

Le concept “d'événements indépendants” dans les trois articles d'Einstein de 1905

YVES PIERSEAX

2, rue du Tournoi, 1190 Bruxelles, Belgique

RÉSUMÉ. La question de la détermination d'un lien logique entre les trois articles célèbres d'Einstein de 1905 a fait l'objet de l'attention de nombreux auteurs. Nous proposons une nouvelle approche basée sur le concept “d'événement” et plus particulièrement “d'événements indépendants” (“unabhängige Ereignisse”).

ABSTRACT. The problem of finding a logical link between Einstein's three famous papers of 1905 has been considered by many authors. We propose a new possible path of approach based on the concept of “event” and more specifically of “independent events” (“unabhängige Ereignisse”).

La recherche d'une unité cachée derrière les trois articles d'A. Einstein de 1905, à savoir l'article sur les quanta de lumière (mars) [1-A], le mouvement brownien (mai) [1-B] et la relativité restreinte (juin-septembre) [1-C] intéresse davantage les historiens des sciences que les physiciens. Ainsi, G. Holton écrit dans un paragraphe (“L'oeuvre d'Einstein et sa continuité”) d'un article entièrement consacré “Aux origines de la théorie de la relativité restreinte”:

“Une lecture des premiers mémoires d'Einstein sur la relativité, et de ses lettres s'y rattachant, qui les envisage dans le contexte d'ensemble de ses autres articles scientifiques, de ceux, particulièrement, portant sur la théorie quantique de la lumière et sur le mouvement brownien, dont la rédaction et la publication survinrent de même en 1905, une telle lecture met en relief, de manière frappante, deux faits essentiels.” (nous soulignons). [2, p 132]

Le premier article [A] est “mieux connu” sous le nom “d'effet photoélectrique” pour lequel Einstein reçoit le prix Nobel en 1921. Mais

il est aussi “mal connu” sous cette appellation car l’effet photoélectrique apparaît dans l’article de mars 1905 comme une application, parmi trois applications envisagées, de l’hypothèse heuristique des quanta de lumière. Cette dernière est déduite essentiellement à partir d’une similitude entre relations thermodynamiques concernant le corps noir et la théorie cinétique moléculaire. Le second article [B], le mouvement brownien, introduit le concept de fluctuations de pression.

Holton enchaîne immédiatement avec le premier fait essentiel:

*“Alors même que les 3 mémoires de 1905 à faire date - et qui furent soumis aux Annalen der Physik à cadence de moins de huit semaines entre chaque article - semblent relever de domaines totalement distincts, un examen plus attentif fait apparaître qu’ils prenaient, de fait, un même problème d’ordre général comme point de départ: en l’occurrence, **les fluctuations de la pression de radiation.**”* (nous soulignons)[idem].

Cette affirmation de Holton de l’omniprésence des fluctuations de la pression de radiation pour les trois mémoires (y compris donc celui sur la relativité) est assez surprenante. Il convient à cet égard de préciser que les fluctuations de pression de rayonnement ne se trouvent *directement* ni dans l’article de 1905 sur les quanta de lumière [A] ni dans l’article sur la relativité [C].

La piste indiquée par Holton mérite cependant d’être suivie si l’on prend en compte le développement ultérieur (1905-1909) de la recherche einsteinienne. Ainsi les fluctuations de pression de rayonnement constituent la principale préoccupation d’Einstein en 1909 dans ses deux articles [3] consacrés à la “structure et la constitution de la lumière”.

Holton précise à cet égard le “deuxième fait fondamental”:

*“Dès 1905, à ce qu’Einstein devait indiquer par la suite, dans une lettre adressée à von Laue, il s’était rendu compte que la théorie de Maxwell amenait à des prédictions erronées, lorsqu’on considère le déplacement d’un miroir suspendu par un équipage mobile et fort sensible ‘dans une enceinte rayonnante de Planck’. Ce qui se relie à l’élucidation du mouvement brownien, en même temps que la structure quantifiée du rayonnement d’une part; et, d’autre part, **à la remise en cause, de portée beaucoup plus générale, qu’Einstein allait effectuer en ce qui concerne les fondements électromagnétiques de la physique**¹ eux-mêmes.”*(nous soulignons)[idem].

¹ Holton utilise la formulation d’Einstein dans son Autoportrait (1949)

Ce “deuxième fait fondamental” mis en évidence par Holton concerne directement les relations entre l'article de mars (quanta de lumière) et celui de mai (mouvement brownien). Cette relation [A-B] demeure invisible si on limite le premier à la description de l'effet photoélectrique en oubliant les procédures de déduction qui s'inscrivent, en 1905 comme en 1909, dans le cadre de la thermodynamique einsteinienne. L'existence d'un lien [A-B] entre le mouvement brownien et la structure de la lumière au travers du concept de fluctuations de pression, ne laissera certes pas les physiciens indifférents mais ne contribuera pas non plus à diminuer leur scepticisme quant à la possibilité d'utiliser la même filière pour mettre en relief l'existence d'une triple relation [A-B, A-C et B-C] entre les trois mémoires fondamentaux de 1905.

L'idée de Holton de mettre en évidence l'unité des trois articles de 1905 doit cependant être prise au sérieux et cela d'autant plus qu'on trouve dans l'article d'Einstein sur la relativité de 1905 un paragraphe “insolite” [C, §8] dont l'importance est sous-estimée. Il est consacré à la “pression de rayonnement sur les miroirs parfaits et la transformation de l'énergie des rayons lumineux”. Holton ne précise cependant guère, dans la suite de cet article et dans ses autres travaux, ce qu'il entend par l'unité des trois articles de 1905 (le premier fait essentiel); c'est sans doute la raison pour laquelle la tentative de Holton n'a rencontré que peu d'échos chez les historiens et encore moins chez les physiciens.

Il convient donc de reprendre la tentative de Holton en examinant tout d'abord les raisons pour lesquelles elle n'a pas pu aboutir. La tâche s'annonce ardue si l'on songe que la tradition a placé tout d'abord une cloison étanche entre d'une part les théories dites “classiques” [B et C], relativité et cinétique moléculaire (mouvement brownien) et d'autre part la première hypothèse dite “quantique” [A] sur la structure de la lumière. Mais il existe aussi un abîme entre les deux théories “classiques” [B et C], car qui songerait à établir un lien entre la théorie du mouvement brownien [B] et la relativité restreinte [C]?

La principale raison de l'échec de la tentative de Holton réside dans le fait qu'il a admis la thèse dominante sur le rôle décisif de l'image électromagnétique du monde (“electromagnetic world-picture”) dans la genèse einsteinienne de la théorie de la relativité dans un article intitulé “Einstein, Michelson, and the crucial experiment”, Holton écrit que le but principal d'Einstein est :

“the reformulation of electrodynamics based on Maxwell's equations, together with reform of the notions of space and time which this work necessitates.”[4, p 313]

Holton adopte ainsi la thèse de Langevin sur l'origine maxwellienne du temps relativiste einsteinien. Langevin écrit à cet égard en 1911 dans "Evolution de l'espace et du temps":

"Notre espace et notre temps étaient ceux exigés par la mécanique rationnelle. A la synthèse nouvelle de plus en plus puissante, que représente la théorie électromagnétique des phénomènes physiques, correspondent un espace et un temps, un temps surtout, autres que ceux de la mécanique..." [5, p265]

H. Poincaré [6] a pourtant induit en 1905 son postulat de relativité de la covariance des équations de Maxwell par une transformation qu'il baptise "transformation de Lorentz" et n'a pas jugé nécessaire de remettre en cause les conventions² cinématiques habituelles sur le temps (et l'espace) dans le cadre de sa dynamique de l'électron.

Il convient alors d'examiner plus attentivement le rôle des autres disciplines de la physique dans la genèse einsteinienne de la relativité restreinte. A cet égard, une citation d'Einstein, faite par Holton dans le même article sur l'expérience de Michelson, extraite de ses "Notes autobiographiques (1949)" est vraiment curieuse :

*"Reflections of this type [on the limitations of Maxwell's theory for the description of pressure fluctuations on a light reflector] made it clear to me as long ago as shortly after 1900, i.e., shortly after Planck's trailblazing work, that **neither mechanics nor thermodynamics** could (except in limiting case) claim exact validity. By and by I despaired of the possibility of discovering the true laws by means of constructive efforts based on known facts."* (nous soulignons) [4, p316].

Ainsi le texte d'Einstein selon Holton place la thermodynamique et la mécanique sur un même plan. Einstein a rédigé ses notes autobiographiques en allemand; que dit alors le texte original publié par Schilpp³ en 1949 ?

² Poincaré écrit en 1912 dans un texte intitulé "L'espace et le temps": "Aujourd'hui certains physiciens veulent adopter une convention nouvelle. Ce n'est pas qu'ils y soient contraints; ils jugent cette convention plus commode; voilà tout; et tout ceux qui ne sont pas de cet avis peuvent légitimement conserver l'ancienne pour ne pas troubler leurs vieilles habitudes" ("Dernières Pensées", Paris, Flammarion).

³ La traduction française par F.Lab de cette phrase d'Einstein, dont la suite concerne directement la relativité restreinte, est la suivante: "Peu après 1900, c'est-à-dire après les travaux pionniers de Planck, des réflexions de ce genre

*“Überlegung solcher Art machten es mir schon kurz nach 1900, d.h., kurz nach Plancks bahnbrechender Arbeit klar, daß weder die **Mechanik noch die Elektrodynamik** (ausser in Grenzfällen) exakte Gültigkeit beanspruchen können. Nach und nach verzweifelte ich an der Möglichkeit die wahren Gesetze durch auf bekannte Tatsachen sich stützende konstruktive Bemühungen herauszufinden.”* [8, p53 et 9, p110]

En fait, le parallélisme⁴ dans la remise en question de la mécanique et l'électromagnétisme revient fréquemment sous la plume du jeune Einstein. Ainsi au premier Congrès Solvay à Bruxelles en 1911 il conclut à propos de ses résultats sur les chaleurs spécifiques:

“De toute manière, il semble résulter des ces considérations que notre électro-magnétique ne peut, pas plus que notre mécanique, être mise en accord avec les faits”[9, p428]

Dans la suite immédiate de la citation extraite de son Auto-portrait, Einstein indique d'ailleurs explicitement (à propos de la genèse du principe de relativité) que la mise en question parallèle de l'électromagnétisme et de la mécanique (classiques) se fait sous une “présidence” thermodynamique:

“Le modèle qui me guidait était la thermodynamique. Là, le principe général était donné par le théorème suivant : les lois de la nature sont telles qu'il est impossible de créer un mouvement perpétuel (du premier et du second type). Comment alors, était-il possible de trouver un autre principe universel? Après 10 ans de réflexions, ce principe allait naître du paradoxe auquel je m'étais déjà heurté à l'âge de 16 ans: si je suis un rayon de lumière à la vitesse c , j'observerai ce rayon comme un champ électromagnétique au repos, bien que d'un point de vue spatial il est oscillatoire. Cependant, il semble qu'une telle chose ne soit possible ni en termes d'expérience, ni en partant des équations de Maxwell. Dès le début, j'étais convaincu, de façon intuitive, que **pour un tel observateur tout se passerait selon les mêmes lois que pour un observateur par rapport à la Terre.** (nous soulignons) [7 , p51].

m'avaient déjà amené à penser que **ni la mécanique ni l'électrodynamique** (sauf dans des cas limites) ne pouvaient prétendre à une validité absolue. Mais était-il possible de découvrir les lois véritables de la physique en élaborant une construction à partir des faits connus”. [7, p50]

⁴ L'introduction de l'article sur les quanta de lumière (A) est entièrement construite sur une mise en parallèle de la théorie cinétique avec la théorie ondulatoire de Maxwell.

On comprend dès lors difficilement que la thermodynamique ait pu servir de guide dans l'heuristique einsteinienne⁵ tout en étant remise en cause de la même façon que la mécanique. Le "lapsus"⁶ de Holton en ce qui concerne la restitution conforme au texte original⁷ de cette citation est révélateur d'une erreur d'appréciation dans la recherche d'une piste unitaire pour les trois articles de 1905.

Il faut donc, dans la poursuite de la recherche de l'unité des trois articles, élargir le champ des investigations, par delà les fluctuations de pression de radiation mentionnées par Holton: c'est la thermodynamique einsteinienne qu'il convient d'étudier dans ses caractéristiques les plus intimes et en particulier dans ses fondements cinétiques moléculaires. Signalons à cet égard que les travaux du jeune Einstein (1901-1905) concernent les fondements moléculaires de la thermodynamique ainsi que l'application de la théorie cinétique moléculaire aux liquides (thermodynamique des phénomènes capillaires, 1901) et aux solutions diluées (thermodynamique de l'électrolyse, 1902) [10].

Einstein publie ainsi en 1904 un article intitulé "la théorie moléculaire générale de la chaleur" qui constitue une véritable synthèse de ses recherches antérieures sur la théorie cinétique moléculaire et le second principe de la thermodynamique. Cette thermodynamique einsteinienne n'est cependant pas seulement caractérisée par la possibilité de mesurer des fluctuations locales (1904) mais aussi par une définition tout à fait originale du concept de probabilité (1903). Einstein précise à cet égard dans son "Autoportrait":

"Des études entreprises sur le rayonnement, faites à partir de la relation de Boltzmann entre l'entropie et la probabilité (en prenant comme probabilité la fréquence statistique dans le temps) menaient également

⁵ Einstein classe d'ailleurs la thermodynamique et la cinétique ("la mécanique du point") dans deux catégories de disciplines physiques différentes: les théories à principes et les théories constructives. (Einstein A., "Conceptions scientifiques", Champ-Flammarion, Paris 1990)

⁶ Ce "lapsus" ne diminue toutefois en rien l'intérêt de l'article de Holton où il démontre que l'expérience de Michelson-Morley joue un rôle tout au plus mineur dans le processus heuristique einsteinien de la genèse de la relativité. Non seulement Einstein ne l'évoque guère dans son mémoire original (1905, 1-C) mais il a toujours été réticent à reconnaître l'importance cruciale de cette expérience pour la mise au point de la théorie relativiste.

⁷ La traduction française ne correspond pas non plus au texte original ("Science, éthique et philosophie", Seuil, Paris, 1991, p38).

à ces mêmes conclusions.”[les quanta de lumière](nous soulignons)[7, p 50].

M. Klein, spécialiste de la physique statistique einsteinienne, propose l'approche suivante:

“One especially noteworthy feature of this 1903 paper is Einstein's interpretation of the probability of a macroscopic state. Instead of trying to introduce equally probable configurations on an a priori ground Einstein let the natural motion of the system determine the probabilities of its various states. The probability of a state is thus defined as the fraction of any long time interval that the system spend in that state.” (nous soulignons) [11, p 511].

La définition einsteinienne de la probabilité thermodynamique (1903) est directement liée à la déduction de l'hypothèse heuristique des quanta de lumière [A] tandis que la théorie einsteinienne des fluctuations (1904) conduit directement à la mise en évidence de la promenade aléatoire (“random walk”) de la particule brownienne [B].

1 [A] Les événements indépendants et l'hypothèse heuristique des quanta de lumière

Dans les deux paragraphes fondamentaux de son article de mars 1905, Einstein énonce (§5) et ensuite inverse (§6) le principe de Boltzmann dans le but de procéder à la déduction de l'hypothèse des quanta lumineux. Il définit tout d'abord ce qu'il appelle dans le §5 la probabilité statistique qui lui permet “d'éliminer une difficulté logique qui fait encore obstacle à la mise en oeuvre du principe de Boltzmann”. Il envisage alors la transition entre deux états de la façon suivante [1-A, p46]:

“Si parler de probabilité d'un état d'un système a un sens et si, en outre, toute augmentation d'entropie peut-être conçue comme une transition vers un état de plus grande probabilité, l'entropie S_1 d'un système est une fonction de la probabilité W_1 de l'état instantané du système. Si donc on a affaire à 2 systèmes S_1 et S_2 sans interaction, on peut poser:

$$S_1 = \phi_1(W_1)$$

$$S_2 = \phi_2(W_2)$$

Si l'on considère ces deux systèmes comme un seul et même système d'entropie S et de probabilité W , on a

$$S = S_1 + S_2$$

et

$$W = W_1 \cdot W_2$$

Cette dernière relation exprime le fait que les états⁸ des 2 systèmes sont des **événements indépendants** les uns des autres (voneinander unabhängige Ereignisse). De ces équations, il découle que:

$$\phi_1(W_1 W_2) = \phi_1(W_1) + \phi_2(W_2)$$

(fin de citation)(nous soulignons).

Einstein déduit alors la célèbre relation qu'il baptise "principe de Boltzmann" (S désigne l'entropie, R la constante des gaz parfaits, N le nombre d'Avogadro et W la probabilité temporelle):

$$S - S_0 = \frac{R}{N} \ln W$$

Il parvient ensuite, à partir d'un raisonnement fondé sur la théorie cinétique moléculaire (système de n points mobiles) à une formulation concrète de sa probabilité statistique en fonction du volume [A, p47]:

"Quelle est la probabilité pour que en un instant choisi au hasard les n points mobiles indépendants contenus dans le volume V_0 se trouvent (par hasard) tous dans le volume V? Pour cette probabilité qui est une probabilité statistique, on obtient évidemment la valeur:

$$W = \left[\frac{V}{V_0}\right]^n$$

(fin de citation)"

Dans le paragraphe suivant il obtient une expression semblable pour le rayonnement [1-A, p48]:

"Si un rayonnement monochromatique de fréquence ν et d'énergie E est enfermé (grâce à des parois réfléchissantes) dans un volume V_0 , la probabilité pour qu'à un instant quelconque, toute l'énergie du rayonnement se trouve dans une portion V du volume V_0 est:

$$W = \left[\frac{V}{V_0}\right]^{\frac{N \cdot E}{\beta \nu}}$$

⁸ Remarquons ce rapprochement, chez le jeune Einstein entre le concept d'état et celui d'événement.

*D'où nous tirons cette autre conclusion: Un rayonnement monochromatique de faible densité (dans les limites du domaine de validité de la loi de Wien) se comporte, par rapport à la théorie de la chaleur, comme s'il était constitué de **quanta d'énergie indépendants les uns des autres** (unabhängigen Energiequanten), de grandeurs $h\nu$.”*

Einstein a donc comparé la probabilité statistique obtenue au paragraphe 5, dans le cadre de la théorie moléculaire générale de la chaleur, avec celle qu'il a obtenue au paragraphe 6 dans le cadre du rayonnement noir, pour arriver à son hypothèse heuristique sur les quanta de lumière⁹. Ce qui nous intéresse ici, c'est que la probabilité statistique à partir de laquelle il déduit les quanta d'énergie indépendants fait appel au concept d'événements indépendants.

2 [B] Les événements indépendants et la promenade aléatoire (random walk)

C'est dans le paragraphe le plus important (paragraphe 4) de l'article de mai 1905, où Einstein formule pour la première fois un théorème “fluctuation-dissipation”, qu'apparaissent également les conditions nécessaires pour aboutir à ce résultat inédit à propos du processus de diffusion [1-B, p61]:

*“Il est clair qu'il faut supposer que chaque particule individuelle accomplit son mouvement indépendamment de celui des autres particules; il faut aussi considérer que les mouvements d'une seule et même particule correspondant à des intervalles de temps différents sont des **processus indépendants** (unabhängige Ereignisse)”* (nous soulignons).

Pour la deuxième fois dans ses travaux, Einstein introduit dans le prolongement de l'indépendance des processus la notion capitale d'événements¹⁰ indépendants:

⁹ Le terme quanta de lumière apparaît en 1906 dans l'article “Théorie de la production et de l'absorption de la lumière”. Il ne s'agit pas à ce stade de photons au sens actuel du terme puisque l'énergie seule est quantifiée.

¹⁰ Le concept d'événement a une double origine probabiliste et cinétique moléculaire. A cet égard Dugas transcrit le raisonnement de Boltzmann dans son travail sur le théorème H de 1872 à propos de la théorie cinétique des collisions moléculaires de la manière suivante: “Les chocs successifs encourus par une même molécule doivent être considérés comme des **événements indépendants** pour qu'on puisse leur appliquer les règles du calcul des probabilités.”

“Introduisons un intervalle de temps τ très petit devant les intervalles de temps observables et quand même suffisamment grand pour que les mouvements exécutés par une même particule durant deux **intervalles de temps successifs** puissent être envisagés comme **des événements indépendants** (*unabhängige Ereignisse*)” [12,p148](nous soulignons).

Einstein déduit alors à la fin du paragraphe 4 la relation fondamentale qui décrit le mouvement de la particule brownienne:

“Le déplacement moyen λ_x qu’effectue une particule dans la direction de l’axe x , soit encore dit de façon plus précise, la racine carrée de la moyenne arithmétique des carrés des déplacements dans la direction de l’axe x est:

$$\lambda_x = \sqrt{\langle x \rangle^2} = \sqrt{2Dt}$$

[1-B, p 63]” (nous soulignons).

L’interprétation einsteinienne de la promenade aléatoire (“random walk”) de la particule brownienne est donc conditionnée par l’indépendance des événements.

3 [C]Les événements indépendants et la cinématique relativiste

Alors que Poincaré n’utilise jamais le concept d’événement dans sa théorie de la relativité (1905), il est bien connu que le concept d’événement intervient de façon décisive, dès le paragraphe 1 dans la nouvelle définition einsteinienne du “temps au repos du système au repos”:

“Il convient en effet de noter que tous nos jugements dans lequel le temps joue un rôle sont toujours **des événements simultanés**. Quand je dis, par exemple, ‘le train arrive ici à 7 h’, cela veut dire que le passage de la petite aiguille de ma montre par l’endroit marqué 7 et l’arrivée du train sont **des événements simultanés**. Il semblerait que l’on pourrait écarter les difficultés concernant la définition du temps si l’on substituait à ce dernier terme l’expression ‘position de la montre’.” [1-C, p9-10]. Il est intéressant de remarquer que les deux événements (arrivée du train et position de la petite aiguille) évoqués par Einstein sont des événements indépendants: il n’y a aucun lien de causalité entre le mouvement du train et le mouvement de la petite aiguille. La définition einsteinienne du temps (juin 1905)[1-C, paragraphe 1] fait donc intervenir, contrairement à celle de la relativité de Poincaré, le concept

“d'événements indépendants”. Il constitue d'ailleurs un des éléments les plus originaux de la théorie einsteinienne de la relativité restreinte. Si la définition du temps donnée par Einstein ci-dessus est nécessaire, elle n'est cependant pas suffisante comme il l'indique à la fin du paragraphe 1 du célèbre article de 1905[idem]:

*“Le temps d'un événement est l'indication simultanée à ce dernier d'une horloge à l'endroit où cet événement se produit et qui est **synchrone** avec une certaine horloge au repos; elle doit être de plus **synchrone** avec la même horloge pour toutes les déterminations du temps.”* (nous soulignons).

Il faut donc compléter la définition de la simultanéité (“même temps”) comme coïncidence (même endroit, même temps) de deux événements indépendants par la synchronisation des horloges “au repos dans le référentiel au repos”. La procédure einsteinienne de synchronisation (simultanéité à distance)¹¹, des horloges dans la théorie de la relativité restreinte repose entièrement sur les processus d'émission, de réflexion et de réception de signaux lumineux considérés comme des événements ponctuels. Ce concept d'événement ponctuel (“Punkt ereignis”) est défini par Einstein en 1907¹² comme un processus physique qui se produit dans un élément d'espace (“Raumelement”) et dont la durée est infiniment courte (“Zeitelement”).

En outre, dans la procédure einsteinienne de synchronisation, l'émission en un point A d'un signal lumineux, sa réflexion en B et son retour en A sont des événements ponctuels dépendants: les événements qui se produisent dans la nature peuvent être dépendants ou indépendants.

Einstein met ainsi en question le dogme scolastique selon lequel “tout est relié à tout” ou “tout est dans tout et réciproquement” puisque, précisément, il existe dans la nature des événements qui n'ont entre eux aucune relation de causalité. Cette conception originale de la causalité est inscrite par Einstein au coeur même de la nouvelle cinématique¹³.

¹¹ La synchronisation ainsi conçue, quand on y ajoute la convention de l'égalité aller-retour de la vitesse de la lumière sur un trajet donné, est réflexive et transitive. Einstein énonce ces propriétés sans les démontrer (Grünbaum, 1955)

¹² Deuxième article de synthèse sur la relativité [A], (“Oeuvres choisies”, p 87)

¹³ Poincaré pose le problème au niveau de la dynamique (juin 1905); il construit de ce fait non pas une nouvelle cinématique mais une “Mécanique nouvelle” sans changer nos “conventions habituelles” sur le temps.

Les événements ponctuels (indépendants ou dépendants) sont donc les éléments de construction de base de la cinématique relativiste einsteinienne (rebaptisés par Minkowski “points d’Univers”).

Le diagramme spatio-temporel de Minkowski permet de représenter un cadre cinématique général pour les événements au moyen de la terminologie standard, quelque peu métaphysique, de “futur absolu, passé absolu et éloignement absolu” par rapport à un événement bien déterminé (choisi comme origine). On représente alors le mouvement d’une particule comme une suite d’événements constituant une même ligne d’univers continue. Dans son livre sur la théorie de la relativité restreinte, Synge utilise à cet égard la terminologie suivante:

“The history of a particle is a continuous sequence of events”[13,p6]

Remarquons à cet égard que la particule brownienne est le premier exemple historique qui suggère la traduction du mouvement d’une particule non plus en termes galiléens classiques de positions successives en fonction du temps $x(t)$ mais en termes relativistes de suite d’événements (x, t) . Einstein indique ainsi dans sa description de la particule brownienne:

“Les mouvements exécutés par une même particule durant les deux intervalles de temps successifs puissent être envisagés comme des événements indépendants.” [idem](nous soulignons).

On voit alors comment s’articule le concept d’événements indépendants avec les concepts d’Einstein -Minkowski d’intervalles d’événements de type spatial ou temporel. Des événements dépendants sont nécessairement séparés par un intervalle de type temporel tandis que des événements indépendants peuvent être séparés aussi bien par un intervalle de type temporel (en première analyse la particule brownienne) que par un intervalle de type spatial. Il est dès lors possible de traduire en termes d’événements le langage habituel lequel est formulé partiellement en termes d’événements et partiellement en termes de corps. En effet deux événements qui sont en dehors des cônes de lumière respectifs correspondent nécessairement à des corps différents tandis que des événements situés à l’intérieur du cône de lumière peuvent correspondre ou ne pas correspondre au même corps. Ainsi deux événements E_1 et E_2 situés de part et d’autre du cône de lumière de l’événement origine O sont nécessairement indépendants; mais deux événements situés à l’intérieur du cône de lumière peuvent représenter aussi bien des événements dépendants que des événements indépendants. C’est d’ailleurs précisément à partir de deux événements indépendants au

même endroit qu'Einstein opère sa nouvelle définition du temps (c'est-à-dire, la simultanéité) en adoptant une autre convention que celle de Poincaré.

La réforme einsteinienne de la cinématique galiléenne est donc profonde car elle introduit les événements indépendants à l'intérieur même du cône de lumière afin de pouvoir redéfinir le temps. Chaque événement possède son cône de lumière qui découpe le plan (x,t) de la nouvelle cinématique en différentes zones qui n'existent naturellement pas dans le cadre de la cinématique galiléenne.

En particulier la zone “éloignement absolu” n'a aucun sens dans la cinématique galiléenne (le passé et le futur sont relatifs). On peut à cet égard traduire cette notion, quelque peu métaphysique “d'éloignement absolu” de la terminologie traditionnelle par le concept “d'événements nécessairement indépendants”.

Dans la cinématique galiléenne tous les événements sont susceptibles d'être dépendants puisqu'elle n'impose à la mécanique newtonienne dont elle constitue le fondement¹⁴, aucune limite intrinsèque pour la vitesse de transmission des interactions (action instantanée à distance). On peut certes réinterpréter la cinématique galiléenne en termes d'événements mais le concept einsteinien “d'événements nécessairement indépendants” n'y trouve pas sa place.

La cinématique nouvelle des événements repose donc sur un double articulation: “indépendance-dépendance” et “spatial-temporel”. Ce langage purement événementiel a d'ailleurs été suggéré par E. Schrödinger qui s'est beaucoup intéressé au concept d'événement notamment en 1935 dans “Science et humanisme”:

“Les observations doivent être considérées comme des événements discrets, disjoints les uns des autres. Entre elles, il y a des lacunes que nous ne pouvons combler. C'est pourquoi j'ai dit qu'il vaut mieux ne pas regarder une particule comme une entité permanente, mais plutôt comme un événement instantané. Parfois ces événements donnent l'illusion des objets permanents, mais cela n'arrive que dans des circonstances particulières et pendant une période de temps très courte (τ) dans chaque cas particulier.” [14.p45] (nous soulignons et désignons la période de temps très courte par τ).

¹⁴ tenir compte d'une vitesse finie au niveau de la dynamique s'apparente plutôt à l'approche de Poincaré de la théorie de la relativité restreinte.

La révision de l'antinomie classique "indépendance-dépendance" opérée par la cinématique nouvelle apparaît très clairement si on considère le plan (x, t) dans son entièreté. Elle s'efface si l'on se limite aux intervalles temporels d'événements qui ont fait l'objet des études de Minkowski. Ce dernier a montré que l'on peut construire en attribuant aux particules une ligne d'univers ("Weltlinie") et un temps propre¹⁵ ("Eigenzeit") une dynamique classique qui n'est pas moins déterministe que la dynamique classique.

Le langage purement événementiel, suggéré par Schrödinger, consiste donc tout d'abord en une simple traduction. La ligne d'univers qui possède en chaque point une tangente représente la trajectoire d'une corps déterminé comme une suite d'événements qui dépendent les uns des autres et en première instance des conditions initiales (x, v) de la particule.

On peut ainsi établir une correspondance entre le déterminisme de la description classique et celui de la description relativiste d'une trajectoire de particule, comme suite continue d'événements dépendants.

Au delà de cette traduction l'observation de Schrödinger n'interdit pas de considérer aussi un autre aspect qui a été négligé à savoir: "les événements spatiaux ou nécessairement indépendants".

La description du mouvement de la particule brownienne dans le langage purement événementiel suggéré par la RR einsteinienne apporte à cet égard un élément nouveau qui demeurerait invisible dans l'ancienne formulation. Einstein indique ainsi dans une phrase déjà citée de son article sur le mouvement de la particule brownienne:

*"afin que ... les mouvements exécutés par une **même particule** durant les deux intervalles de temps successifs puissent être envisagés comme des **événements indépendants**"*[idem] (nous soulignons).

Il existe alors deux possibilités de représenter une telle situation dans la logique de la cinématique einsteinienne:

(1) représentation "type temporel": les événements indépendants E_1 et E_2 (positions de la particule brownienne) sont situés à l'intérieur du cône de lumière; ces événements correspondent à deux positions (instantanées) successives de la même particule brownienne situés sur une ligne d'univers (continue) représentant une trajectoire spatiale (continue). (représentation de Minkowski)

¹⁵ qui prolonge la définition einsteinienne du temps.

(2) représentation “type spatial” : les événements indépendants E_1 et E_2 (positions de la particule brownienne) sont situés en dehors des cônes de lumière respectifs; ces événements correspondent à deux positions successives de la même particule mais ne peuvent pas appartenir à une ligne d'univers (interprétation inférée de la citation de Schrödinger).

Il convient à présent d'interpréter physiquement ces deux représentations (minkowskienne et schrödingerienne). Rappelons d'abord la situation expérimentale telle qu'elle est décrite par J.Perrin qui écrit en 1913 à propos du type de trajectoire de la particule brownienne:

“Nous resterons encore dans la réalité expérimentale, si mettant l'oeil au microscope, nous observons le mouvement brownien qui agite toute petite particule en suspension dans un fluide. Pour fixer une tangente à la trajectoire, nous devrions trouver une limite au moins approximative à la direction de la droite qui joint les positions de cette particule en deux instants successifs très rapprochés (τ). Or tant que l'on peut faire l'expérience cette direction varie follement lorsqu'on fait décroître la durée qui sépare ces deux instants. En sorte que ce qui est suggéré par cette étude à l'observateur sans préjugé, c'est encore la fonction sans dérivée et pas du tout la courbe avec tangente”. [15,p27] (nous soulignons).

La trajectoire spatiale (3 dimensions) de la particule brownienne, telle qu'elle devrait être décrite à partir de l'expérience, correspond à une courbe sans tangente et la vitesse instantanée n'est pas mesurable selon Perrin. En choisissant un intervalle de temps τ différent pour la mesure on obtient une autre courbe très différente. A la limite infinitésimale, où τ tend vers zéro, il peut exister (ontologiquement) une trajectoire classique où la vitesse instantanée (la tangente) est déterminée en chaque point. La ligne d'univers de cette particule ne franchirait pas la frontière interdite pour des temps infinitésimaux beaucoup plus petits que les intervalles de temps considérés par Einstein. Cette trajectoire reconstituée continue est cependant selon Perrin en dehors de la “réalité expérimentale”.

Ainsi l'interprétation temporelle (1) dans la cinématique relativiste revient à supposer l'existence pour la particule brownienne d'une trajectoire ontologique ou encore “cachée”. L'interprétation de type spatial (2) suggère de considérer que cette particule brownienne, dont deux positions successives correspondent à des événements nécessairement indépendants, comme la même particule mais ayant “complètement

oublié ses conditions initiales” (promenade aléatoire comme processus markovien).

A quoi correspond le passage de la frontière interdite¹⁶, du cône de lumière dans la représentation spatio-temporelle einsteinienne du mouvement brownien d’une particule?

Il ne peut être question d’une trajectoire ontologique correspondant à une dynamique causale. Au delà du simple fait expérimental, l’interprétation spatiale (2) dans la cinématique relativiste supprime cette trajectoire cachée pour la particule brownienne qui relie E_1 et E_2 .

L’interdit minkowskien n’est donc pas transgressé mais le fait, si fait il y a, est réinterprété par (2). Cette réinterprétation directement suggérée par la présence d’événements nécessairement¹⁷ indépendants revient à **mettre en question l’identité de la particule: que signifie “même particule”?**

Notre réserve (“si fait il y a”) est clairement motivée par l’évidence expérimentale que les observations réalisées par Perrin d’une particule brownienne donnent toujours lieu à des événements de type temporel. Notre démarche inférée des observations de Schrödinger est donc essentiellement spéculative.

Les événements indépendants n’en interpellent pas moins les fondements de la théorie physique moderne: il suffit de traduire le mouvement de la particule brownienne dans le cadre de la cinématique des événements pour retrouver des propriétés spécifiquement quantiques (problème de l’identité des particules, absence de trajectoire cachée, présence de discontinuités fondamentales). La source d’inspiration relativiste de L. de Broglie pour la fondation de la mécanique ondulatoire repose essentiellement sur la synthèse [A-C].

La synthèse [A-B-C], basée sur la **“proclamation einsteinienne de l’indépendance des événements”** et aidée du concept d’événement

¹⁶ L’intention n’est pas de transgresser un interdit minkowskien mais de montrer que la richesse de la cinématique einsteinienne des événements est telle qu’elle ne s’épuise pas entièrement, comme il est traditionnellement admis dans la représentation de l’Univers que Minkowski a construite à partir des événements temporels.

¹⁷ Dans l’interprétation de type temporel où les événements ne sont pas nécessairement indépendants, on peut concevoir que pour des temps infinitésimaux les événements traduisant les positions successives de la particule brownienne deviennent des événements dépendants (l’existence d’une trajectoire cachée déterminée par les conditions initiales- x , v - révèle que la particule possède une “mémoire de son histoire” et une identité classique).

suggéré par Schrödinger, permet de prolonger cette ligne d'inspiration, au delà de la frontière généralement admise depuis 1926.

Remerciements.

Je tiens tout particulièrement à remercier Mr. Jean Reignier pour le vif intérêt et pour le soutien actif qu'il accorde depuis de nombreuses années à mes recherches sur l'origine et les fondements de la relativité restreinte (Einstein et Poincaré).

Je remercie aussi vivement, Mr Pierre Marage, Mlle Isabelle Stengers et Mr Jean Wallenborn avec lesquels les discussions sur différents aspects de la théorie de la relativité et de la thermodynamique statistique ont été très fructueuses.

Références

- [1] Einstein A.
 [A] “Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt, Ann. d. Phys., p 132-148 (traduction CNRS, Oeuvres choisies, “Quanta”, vol 1,, Seuil, 1989, p 39)
 [B] “Über die von der molekularinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierte Teilchen”, Ann. d. Phys., 17, p549-560 (traduction CNRS, Oeuvres choisies, “Quanta”, vol 1, Seuil, 1989, p55)
 [C] “Zur Elektrodynamik bewegter Körper”, Ann. d. Phys., 17, p 892-921 (traduction par Solovine, Gauthiers-Villar, 1955, p 5).
 Les références [A, B, C] renvoient au texte français.
- [2] Holton G. “L'imagination scientifique”, Gallimard, Paris, 1981.
- [3] Einstein A. “Zum gegenwärtigen Stande des Strahlungsproblems”, Ph. Z., 10, p185-193 (traduction “Annales de la fondation de Broglie”, vol 4, p 151) et “Entwicklung unserer Anschauungen über das Wesen und die Konstitution der Strahlung”, Ph. Z., p 817- 825. (traduction CNRS, Oeuvres choisies, vol 1, Quanta, Seuil, 1989, p 86)
- [4] Holton G. “Thematics Origins of scientific thought”, Harvard University Press, 1973
- [5] Langevin P. “La physique depuis 20 ans”, G. Doin, Paris, 1923.
- [6] Poincaré H. “Sur la dynamique de l'électron”, Compte rendu de l'Ac. des Sci. de Paris, juin 1905.
- [7] Einstein, “Autoportrait”, Interéditions, traduction, F. Lab, Paris, 1980.
- [8] Schilpp P. A. “A. Einstein: Philosopher-Scientist”, North Western University and southern Illinois University, 1949, 1951, 1970.
- [9] “Congrès sur la théorie du rayonnement et les quanta”, Actes sous la direction de P. Langevin et de M.de Broglie, Gauthiers-Villar, Paris, 1912.
- [10] Pais A. “Subtle is the Lord. The science and the life of A. Einstein”, Oxford University Press, 1982.

- [11] Klein M. "Thermodynamics in Einstein's thought", Science, vol 157, 1967.
- [12] Dugas R. "La théorie physique au sens de Boltzmann", Edition du Griffon, Neuchatel-Suisse, 1959.
- [13] Synge J.L. "Relativity. The special theory", North Holland Public Company, 1956.
- [14] Schrödinger E. "Physique et représentation du monde", Seuil, Paris, 1992.
- [15] Perrin J. "Les atomes", Flammarion, 1991.
- [16] Lochak G. "Louis de Broglie, un prince de la Science", Flammarion, Paris, 1992 ,p82.

(Manuscrit reçu le 12 novembre 1996)