

Le concept d'événement, le concept d'état et la loi de Boltzmann dans la Relativité Restreinte d'Einstein

YVES PIERSEUX

(ULB), CP 230,
Boulevard du Triomphe, B-1050, Bruxelles, Belgique.

RÉSUMÉ. Nous avons mis en évidence que l'on pouvait séparer les deux logiques relativistes de Poincaré et d'Einstein, chaque relativité restreinte (RR) reposant sur son propre système d'axiomes [18]. Une singularité de la déduction relativiste einsteinienne se situe au niveau de l'utilisation abondante du concept d'événement. Nous avons établi à cet égard que le concept d'événement occupe une position stratégique dans les trois articles fondamentaux d'Einstein de 1905 [16]. Nous montrons que l'indépendance des événements est directement liée à l'inversion par le jeune Einstein de la loi de Boltzmann. Nous montrons aussi que le rapprochement explicitement opéré par Einstein entre les concepts d'événement et d'état dans l'article sur les quanta de lumière de mars se trouve aussi implicitement dans l'article sur la RR de juin.

ABSTRACT. We showed that the two relativistic logics of Poincaré (with ether) and Einstein (without ether) are separable: each special relativity has got his own set of axioms. The singularity of Einstein's relativistic deduction is situated in his plentiful use of the concept of event that occupies a strategic role in the three fundamental 1905 papers (quanta of light, Brownian moving and special relativity). We show now that Einstein's 1905 proclamation of independence of events is directly connected with Einstein's inversion of Boltzmann's law. We show also that explicit Einstein's connection between the concept of event and the concept of state in the March paper on the quanta of light can be found, in the same way, in the June paper on special relativity.

- 1° *L'invariance des lois du milieu électromagnétique de Poincaré et l'invariance des lois de changement d'état d'Einstein (1905)*
- 2° *La transformation de Lorentz de Poincaré et la transformation des coordonnées d'un événement d'Einstein*
- 3° *La proclamation einsteinienne de l'indépendance des événements*
- 4° *Le rapprochement événement-état dans l'article sur les quanta indépendants de lumière*
- 5° *Le rapprochement état-événement dans la RR sans éther et l'invariance relativiste de la loi de Boltzmann*

1 L'invariance des lois du milieu électromagnétique de Poincaré et l'invariance des lois de changement d'état d'Einstein (1905)

Considérons tout d'abord les énoncés du principe de relativité dans chacune des deux théories, quasi simultanées et largement indépendantes, de Henri Poincaré et d'Albert Einstein:

Henri Poincaré

“Dynamique de l'électron”
(5 juin - 23 juillet 1905)

principe de relativité

“Il semble que cette impossibilité de démontrer le mouvement absolu soit une loi générale de la nature; nous sommes naturellement porté à admettre cette loi, que nous appellerons le Postulat de Relativité et à l'admettre sans restriction.” [8, introduction]

Albert Einstein

“Electrodynamique des corps en mouvement” (27 juin 1905)

principe de relativité

“1° Etant donnés deux systèmes de coordonnées en translation uniforme l'un par rapport à l'autre, les *lois auxquelles sont soumis les changements d'états (Zustandänderungen)* des systèmes physiques restent les mêmes, quel que soit le système de coordonnées auquel les changements d'états sont rapportés.” [mes italiques, 2-C, §2]

2° (invariance de la vitesse de la lumière)

L'énoncé de Poincaré n'est pas plus "faible" (impossibilité de mettre en évidence un mouvement absolu) que celui d'Einstein (mêmes lois dans les deux systèmes) car Poincaré précise dans son résumé de juin 1905:

"Les équations d'un milieu électromagnétique ne sont pas altérées par certaines transformations que nous appellerons transformation de Lorentz; deux systèmes, l'un immobile, l'autre en translation deviennent l'image exacte l'un de l'autre." [HP-3].

La différence entre les deux points de vue relativiste est très subtile (il existe une véritable "structure fine" de la RR, deux théories complètes et cohérentes très proches et néanmoins distinctes). La formulation originale par le jeune Einstein du principe de relativité en termes d'invariance des "lois qui gouvernent les changements d'état" n'est à cet égard pas sans intérêt puisqu'elle contraste avec l'invariance des "équations du milieu électromagnétique" de Poincaré. Nous avons montré qu'il y avait une cinématique *implicite* chez Poincaré basée essentiellement sur le principe de relativité et sur le principe de contraction réelle des tiges déformables [18].

Les équations du milieu électromagnétique étant bien connues, le but du présent article est d'essayer de préciser la nature des lois de changement d'état dans la logique relativiste du jeune Einstein .

2 La transformation de Lorentz de Poincaré et la transformation des coordonnées d'un événement d'Einstein

La transformation des coordonnées de l'espace et du temps (c'est Poincaré qui la baptise "transformation de Lorentz") est formellement la même chez les deux auteurs:

Transformation de Lorentz

"Le point essentiel, établi par Lorentz, c'est que les équations du *champ électromagnétique* ne sont pas altérées par une certaine transformation (que j'appellerai de Lorentz) et qui est de la forme suivante : $x' = k l (x - \epsilon t)$, $y' = l y$, $z' = l z$, $t' = k l (t - \epsilon x)$

x, y, z sont les coordonnées et t le temps avant la transformation et x', y', z' et t' après la transformation." [8, §1]

Transformation des coordonnées d'un événement

“A toutes les valeurs x, y, z, t , déterminant d'une façon complète le lieu et le temps d'un *événement* dans le système au repos, correspondent les valeurs ξ, η, ζ, τ qui déterminent cet *événement* par rapport à k . Le problème qui se pose maintenant est de trouver le système d'équations qui relie ces grandeurs entre elles. (...) Nous obtenons:

$$\xi = \varphi(v) \gamma (x - vt), \eta = \varphi(v) y, \zeta = \varphi(v) z, \tau = \varphi(v) \gamma (t - vx/c^2) \quad [2-C, \S 3]$$

Einstein et Poincaré mettent en évidence tous les deux la structure de groupe de ces transformations de Lorentz (TL) ; ce qui constitue un élément essentiel d'une théorie de la relativité. On pourrait dès lors penser que seules les notations sont différentes (ϵ, k et l , le facteur d'échelle chez Poincaré et β, γ et φ , le facteur d'échelle chez Einstein¹).

Pourtant, alors que la TL est induite par Poincaré de la covariance des équations de Maxwell(-Lorentz), la transformation des coordonnées d'un événement est déduite par Einstein dans la première partie cinématique de son article où il n'est pas question de l'électromagnétisme. De plus, alors qu'il est bien connu que la cinématique relativiste d'Einstein *nie* l'existence de l'éther, la dynamique relativiste de Poincaré *affirme* au contraire l'existence de l'éther, lequel exerce une pression qui contracte réellement les corps en translation uniforme [17].

Malgré l'apparente similitude formelle des deux transformations, Poincaré utilise la TL dans le sens cinématique implicite où elle compense la contraction «réelle par principe» dans le système en mouvement par rapport à l'éther alors qu'Einstein l'utilise dans le sens où elle fait apparaître réciproquement contractées des longueurs a priori identiques [17].

La contraction des tiges de Poincaré est aussi «réciproque» chez Poincaré que chez Einstein car seule une vitesse relative est mesurable par rapport à

¹ En vérité Einstein écrit β pour γ . Ce sont les notations de Planck (9°) qui seront retenues (voir aussi conclusion pour la constante –notée k par Planck - de Boltzmann).

l'éther ; ce dernier peut toujours, pour tout couple de systèmes inertiels, conventionnellement être choisi au repos dans l'un des deux systèmes. Mais alors l'autre système est en mouvement par rapport à l'éther relativiste, ce qui entraîne une convention de synchronisation fondée sur la dualité temps vrai-temps local.

Même si on explicite la cinématique sous-jacente à la dynamique relativiste de Poincaré, on ne retrouve pas la conception typiquement einsteinienne de l'espace-temps. Le jeune Einstein prépare en effet ses deux systèmes dans un état de synchronisation identique, ce qui suppose l'élimination de la dualité temps vrai-temps local par la définition du temps comme coïncidence de deux événements [18].

Il est indispensable de pousser la logique relativiste de Poincaré jusqu'à ses limites les plus extrêmes pour élucider le sens du rapprochement einsteinien entre les concepts d'état (énoncé du principe de relativité) et d'événement (déduction de la TL).

3 La proclamation einsteinienne de l'indépendance des événements

Poincaré n'utilise jamais le concept d'événement. Il y donc là un indice de "structure fine" si l'on prend au sérieux cette réflexion de J. Perrin: "La définition d'un événement est plus complexe d'un degré que celle d'un point matériel." [15]

Le concept d'événement occupe une position stratégique dans les trois travaux de 1905 du jeune spécialiste de la thermodynamique statistique Albert Einstein. L'année de 1905 est celle de la proclamation einsteinienne de l'indépendance des événements [18].

QUANTA DE LUMIERE (mars) [2-A]

C'est dans le paragraphe 5° de l'article sur les quanta de lumière [2-A] où Einstein apporte sa touche la plus personnelle, puisqu'il s'agit de la théorie moléculaire de la chaleur (autrement dit de son approche statistique de la thermodynamique), qu'on trouve pour la première fois la notion *d'événements indépendants* :

Dans le calcul de l'entropie par les méthodes de la théorie moléculaire, on emploie couramment le mot "probabilité" (Wahrscheinlichkeit) dans un sens qui ne recouvre pas la définition de ce mot telle qu'elle est donnée en calcul

des probabilités. En particulier, on définit souvent de façon hypothétique des “*occurrences d’égale probabilité*” (Fälle gleicher Wahrscheinlichkeit), dans des cas où les modèles théoriques sont suffisamment précis pour qu’à la place de cette définition hypothétique on ait une déduction.

Je montrerai ailleurs que, dans les considérations relatives aux processus thermiques on peut très bien se satisfaire de ce qu’il est convenu d’appeler les “probabilités statistiques”. J’espère ainsi éliminer une difficulté logique qui fait encore obstacle à la mise en oeuvre du *principe de Boltzmann*.

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:

$$S_1 = \varphi_1(W_1) \quad S_2 = \varphi_2(W_2)$$

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

$$S = S_1 + S_2 = \varphi(W) \quad \text{et} \quad W = W_1 W_2$$

Cette dernière relation exprime le fait que les **états des 2 systèmes** sont des **événements indépendants** les uns des autres (voneinander unabhängig Ereignis)”. (...) Si S_0 désigne l’entropie d’un système pour un certain état initial et si W est la probabilité relative d’un état d’entropie S on a donc de façon générale : (nous mettons toujours en italique et en gras, 2-A, § 5)

$$S - S_0 = k \ln W$$

Nous insistons sur trois points essentiels :

1) Le concept d’événements indépendants est directement lié à la probabilité statistique d’Einstein qui n’est pas la probabilité classique de la mécanique statistique fondée sur des “occurrences d’égale probabilité”.

2) Einstein caractérise l’état des systèmes par l’entropie ou par la probabilité statistique. Seuls les systèmes thermodynamiques ou macroscopiques sont à première vue concernés. Le rapprochement inédit entre la notion d’état et d’événement effectué par Einstein est cependant profond et nous montrerons

que l'inversion du principe de Boltzmann par Einstein a un sens microscopique (événements ponctuels ou événements élémentaires).

3) La définition einsteinienne de la probabilité statistique des événements (des états) indépendants joue un rôle décisif dans la formulation de l'hypothèse heuristique des quanta indépendants de lumière ("quanta d'énergie indépendants les uns des autres"):

"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 (unabhängigen Energiequanten), indépendants** les uns des autres, de grandeurs $R \beta v / N$." (nous soulignons, $\beta = h/k$).

Telle est la conclusion à laquelle le jeune Einstein parvient après avoir réussi à «éliminer une difficulté logique qui fait encore obstacle à la mise en oeuvre du principe de Boltzmann» (cf. citation). Il s'agit d'un renversement radical de perspective: les quanta de lumière et les événements du jeune Einstein ne sont bien entendu pas indépendants au sens classique d'une indépendance statistique².

MOUVEMENT BROWNIEN (mai) [2-B]

C'est dans le paragraphe 5° de l'article sur le mouvement brownien [2-B] où Einstein apporte sa touche la plus personnelle, puisqu'il s'agit de la promenade aléatoire d'une seule et même particule (autrement dit de sa déduction de la relation fluctuation-diffusion), qu'on trouve pour la seconde fois la notion *d'événements indépendants* :

"Il faut aussi considérer que les mouvements *d'une seule et même particule* correspondant à des intervalles de temps différents sont des

² Les deux désaccords entre Planck et Einstein [18] au sujet de la nature corpusculaire du rayonnement lui-même et de la définition de la probabilité ne constituent en vérité qu'un seul désaccord. Les notions d'indépendance statistique et d'équiprobabilité sont liées. Sur cette base classique, adoptée par Planck et par Gibbs, (cf. 4), on n'a bien sûr pas de quanta indépendants de lumière.

processus indépendants (unabhängige Vorgänge) les uns des autres, du moins pour des intervalles de temps pas trop courts. Introduisons un intervalle de temps t 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**.”[2-B, §4]

C’est le premier exemple historique de description du mouvement “d’une seule et même particule” non pas en termes classiques de changement de position en fonction du temps “ $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ ” mais de succession d’événements “ x , y , z , t ”. L’application par Einstein du calcul probabiliste pour la promenade aléatoire résulte immédiatement de l’indépendance qu’il confère *a priori* aux deux états successifs de mouvement de la particule brownienne. Remarquons en outre le rapprochement intéressant entre le concept de processus et d’événement effectué par Einstein³.

Dans son deuxième article de synthèse sur la RR sans éther, Einstein précise le lien entre les concepts de processus et d’événement⁴:

“Pour donner une valeur à l’emplacement d’un processus (Vorganges) qui se produit dans un élément d’espace (Raumelement) et dont la durée (Dauer) est infiniment courte (**événement ponctuel**, “**Punkt ereignis**”), nous avons besoin d’un système de coordonnées cartésiennes de trois tiges rigides (...).”[3, §3]

Les événements ponctuels, qui constituent la limite microscopique des processus macroscopiques dans les deux premiers articles de 1905 sont aussi

³ Cette coïncidence n’est nullement fortuite comme nous l’avons montré dans un article paru dans les “Annales de la Fondation de Broglie”[16].

⁴ Le concept d’événement a une double origine probabiliste et cinétique moléculaire. A cet égard, Dugas [11] 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 façon 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 de probabilité”. [11, p148].

les éléments de construction de base de la cinématique relativiste einsteinienne.

RR SANS ETHER ((juin, cinématique des événements) [2-C])

C'est dans le paragraphe 1° de l'article sur la relativité [2-C] où Einstein apporte sa touche la plus personnelle, puisqu'il s'agit de la définition du temps (autrement dit de la simultanéité), qu'on trouve pour la troisième fois la notion *d'événements indépendants* :

“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 7h”, 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.”[2-C, §1]

La conception einsteinienne de la simultanéité définit ainsi le temps en rapport avec deux événements qui se passent au même endroit et non plus nécessairement en rapport avec le déplacement d'un seul corps d'un endroit à l'autre (image classique d'une horloge avec des aiguilles); il est suffisant de concevoir l'horloge idéale du jeune thermodynamicien atomiste [18] comme une série d'événements successifs au même point, sans référence à un éventuel déplacement dans l'espace.

Le concept de temps défini à partir de la *coïncidence de deux événements indépendants* (il n'y a pas de lien de causalité entre le mouvement du train et celui de la petite aiguille) est incompatible avec le concept de temps *local* de Poincaré qui par essence est défini par la quatrième TL - $t' = k(t - \epsilon x)$ - en fonction du lieu (x) où se trouve l'observateur.

Dans un article de 1910 sur la RR, Einstein insiste sur le concept d'événement *élémentaire* :

“Nous entendrons par *événement élémentaire, un événement supposé concentré en un point et de durée infiniment petite*. Nous appellerons coordonnée de temps d'un événement élémentaire l'indication, au moment où se produit l'événement, d'une horloge située infiniment près du point où l'événement a lieu. Un événement élémentaire est donc défini par quatre coordonnées: la coordonnée de temps et les trois coordonnées définissant la

position dans l'espace du point où l'événement est supposé concentré." [4, p25]

Un événement *élémentaire* est un processus qui se produit dans un volume infinitésimal pendant une durée infinitésimale.

4 Le rapprochement événement-état dans l'article sur les quanta indépendants de lumière

Nous avons ainsi établi un lien essentiel entre la probabilité d'un état thermodynamique d'Einstein et le concept d'événements indépendants d'Einstein. Mais nous n'avons pas encore montré qu'un tel lien implique une définition microscopique de l'état qui n'est pas du tout celle de la mécanique classique. Einstein considère, dans le même paragraphe 5 de l'article sur les quanta de lumière, un système de *points mobiles indépendants* pour lequel il ne formule aucune hypothèse notamment sur la loi de mouvement; les seules grandeurs d'états considérées sont le volume V et aussi l'entropie S :

“Soit dans un volume V_0 un nombre n de points mobiles (des molécules par exemple), sur lesquels nous allons raisonner. Il peut y avoir dans l'espace, outre ceux-ci, d'autres points mobiles, en nombre quelconque et de n'importe quelle espèce. *Quand à la loi régissant le déplacement des points considérés dans l'espace, elle n'est l'objet d'aucune hypothèse* si ce n'est que pour ce mouvement, aucune région de l'espace, non plus qu'aucune direction, n'est privilégiée par rapport aux autres. Le système considéré (...) a une certaine entropie, S_0 . Imaginons une portion de volume V_0 de grandeur V et que tous les n points mobiles soient transportés dans le volume V sans que rien par ailleurs ne soit modifié dans le système. A cet état correspond évidemment une autre valeur S de l'entropie ; nous nous proposons de déterminer cette différence d'entropie grâce au principe de Boltzmann. (...) 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 :

$$W = \left(\frac{V}{V_0} \right)^n$$

D'où l'on déduit par application du principe de Boltzmann, que :

[idem, 2-A]

Les points mobiles indépendants d'Einstein constituent l'intermédiaire entre les événements indépendants et les quanta de lumière indépendants⁵. Einstein applique pour trouver l'évolution temporelle de l'ensemble homogène et isotrope de points non pas la seconde loi de Newton de la mécanique mais la seconde loi de Boltzmann⁶ de la thermodynamique.

Du point de vue de la mécanique la loi de Newton est la loi de changement d'état du mouvement – défini par la position \mathbf{r} or q et la vitesse \mathbf{v} or p – du point matériel. Du point de vue du jeune Einstein, la loi de Boltzmann est la loi des changements d'état (« toute augmentation d'entropie peut-être conçue comme une transition vers un état de plus grande probabilité », voir citation ci-dessus) – défini par V et S – des n points indépendants. Si V et S caractérisent l'état du système de points, chaque point indépendant est à la

⁵ Einstein compare la probabilité statistique obtenue au §5, dans le cadre de la théorie moléculaire de la chaleur, avec celle qu'il a obtenue au §6, dans le cadre du rayonnement noir, pour arriver à son hypothèse heuristique des quanta de lumière dans le paragraphe intitulé “§6 *Interprétation selon le principe de Boltzmann donnant la dépendance en volume de l'entropie de rayonnement monochromatique*. L'inversion selon l'expression de Born [13] du principe de Boltzmann revient à définir la probabilité à partir de l'entropie autrement dit à admettre la définition einsteinienne de la probabilité statistique. Einstein précise par ailleurs dans son Autoportrait [5] : “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 à ces mêmes conclusions.” [5, p 50]. Sa probabilité est donc “une fréquence statistique dans le temps”. Cette précision est indispensable pour traduire un temps de passage du système dans tel ou tel état défini au niveau thermodynamique. Selon Einstein, la fréquence statistique induite de l'entropie n'est donc pas intemporelle comme dans une approche purement mathématique (même “empiriste”)[18].

⁶Remarquons l'expression einsteinienne qui rapporte l'entropie à une *fonction* (de probabilité) de l'état du système : “Nous allons dans ce qui suit interpréter l'équation ci-dessus en nous fondant sur le principe introduit dans la physique par *M. Boltzmann*, principe selon lequel l'entropie d'un système est une fonction de probabilité de son état (*Prinzip nach welchem die Entropie eines systems eine Funktion der Wahrscheinlichkeit seines Zustandes ist*).” [2-A]

limite⁷ caractérisé par x, y, z et t . On retrouve ainsi le point-événement ou événement ponctuel d'Einstein. On peut le voir aussi en prenant en compte le sens profond de l'inversion einsteinienne du principe de Boltzmann (S état macroscopique et W état microscopique).

Lorentz insistait au Congrès Solvay de 1911 à Bruxelles [18] sur le fait que la définition einsteinienne de la probabilité n'était pas celle de Gibbs fondée sur un élément $dpdq$ de l'espace des phases. Si l'état des points considérés par Einstein étaient mécaniquement définis (au sens bien connu de Laplace), ils ne pourraient pas se mouvoir indépendamment les uns des autres⁸. Ils ne sont pas définis à partir d'un élément de l'espace des phases Gibbs mais par un élément de volume (Raumelement) et un élément de durée (Zeitelement ou Dauer).

Un événement, au sens fort du jeune Einstein, est un processus ponctuel (temps et espace) complètement déterminé par les valeurs x, y, z, t dans K et par ξ, η, ζ, τ dans k .

5 Le rapprochement état-événement dans la RR sans éther et l'invariance relativiste de la loi de Boltzmann

Après avoir distribué les horloges en tout point dans son paragraphe 1, Einstein passe à la deuxième opération, à savoir la détermination d'un temps commun pour toutes les horloges distribuées dans l'espace : "le temps au repos du système au repos" selon l'expression utilisée par Einstein. Lorsqu'Einstein introduit le deuxième "systèmes de valeurs ξ, η, ζ, τ " qu'il désigne par k , il détermine de façon identique l'ensemble des indications des horloges dans K et dans k :

⁷ Si le volume tend vers zéro, autrement dit devient ponctuel, on trouve, en passant des grandeurs (thermodynamiques) d'état V et S aux grandeurs (mécaniques) d'état x, y, z, t la définition einsteinienne du concept d'événement ponctuel ("Punkt ereignis") ou d'événement élémentaire. On s'aperçoit ainsi que la notion mathématique et intemporelle de fréquence statistique prend un sens physique (spatio-temporel). L'ensemble de points du jeune Einstein peut être aussi bien un ensemble de points de matière que de points de lumière.

⁸ C'est la raison profonde pour laquelle Einstein rejette la définition standard de la probabilité basée sur un modèle mécanique a priori (Gibbs)[9, 18].

“A toutes les valeurs x, y, z, t , (Wertsystem) déterminant d'une façon complète le lieu et le temps d'un événement dans le système au repos, correspondent les valeurs, ξ, η, ζ , (Wertsystem) qui déterminent cet événement par rapport à k . Le problème qui se pose maintenant est de trouver le système d'équations qui relie ces grandeurs entre elles. (...). *A cette fin nous devons exprimer que τ n'est rien d'autre que l'ensemble des indications des horloges au repos dans le système k , qui sont synchronisées d'après la règle du paragraphe 1.*”[2-C, suite de la citation du 2), traduction de Solovine, §1]

Le temps au repos du système au repos est identiquement défini dans K et k chez Einstein (la dilatation étant un effet réciproque qui résulte de l'utilisation de la TL pour comparer des unités de temps à priori identiques). Chez Poincaré la synchronisation du deuxième système K' est définie par le temps local en fonction de la variable *par définition* indépendante le temps vrai de K . Cette dualité est éliminée par Einstein qui insiste en 1907 sur la nécessité d'associer un temps à tout système:

“Nous appellerons “temps associé (gehörig) au système de coordonnées utilisé, ou simplement “temps du système”, *l'ensemble des indications de toutes les horloges réglées* (Inbegriff der Angaben aller gemäß dem vorhergehenden gerichteter Uhren) comme il a été dit et que l'on peut se représenter comme placées en tous les points individuels de l'espace et au repos relativement au système de coordonnées utilisé.”[3]

Autrement dit “l'état interne” des deux systèmes est déterminé de façon identique (la référence à la variable cachée, le temps vrai, est supprimée)

Nous avons montré [17] que dans la logique relativiste einsteinienne l'application de la transformation de Lorentz d'un système à l'autre permet de faire apparaître différents (dilatation du temps, contraction des longueurs) des processus qui sont définis identiques⁹.

⁹ Une analyse du concept einsteinien de rigidité conduit au même résultat, en l'occurrence une imprégnation profonde de la cinématique relativiste des événements par le second principe de la thermodynamique (dans sa formulation probabiliste einsteinienne). [18, article en préparation]

Tout se passe comme si dans la cinématique einsteinienne les états de synchronisation interne des deux systèmes de tiges rigides étaient préparés *indépendamment* l'un de l'autre puisqu'il n'y a pas comme chez Poincaré l'un des deux qui est en mouvement par rapport à l'éther : indépendance des événements au sens d'Einstein et indépendance du temps « vrai » au sens de Poincaré sont clairement antinomiques.

On peut dès suggérer une interprétation originale de l'énoncé originel (1905) du principe de relativité par Einstein en termes de "changement d'état", en s'appuyant sur le concept d'état d'un événement défini comme un processus élémentaire. En effet un événement au sens fort d'Einstein est une « collision » ou une « coïncidence » entre deux événements (au sens faible, c'est un point sur la trajectoire continue au sens de la mécanique). Contrairement à l'état d'un point matériel sur une trajectoire continue caractérisé par (\mathbf{r}, \mathbf{v}) , l'état d'une telle « collision » ou « coïncidence » d'événements est donc caractérisé par (x, y, z, t) dans K ou (ξ, η, ζ, τ) dans k .

Poincaré écrit explicitement dans son article fondamental que « l'état du système dépend seulement de $x + \epsilon t, y, z$ c'est-à-dire de x', y', z' » [8, p525]. Les définitions de l'état par Einstein et Poincaré sont clairement antinomiques.

On peut alors donner un élément d'explication au rapprochement effectué par le jeune Einstein entre événement et état ("les états des deux systèmes sont des événements indépendants", cf. 3) : la loi des changements d'état de l'énoncé originel (1905) du principe de relativité ("Etant donnés deux systèmes de coordonnées en translation uniforme l'un par rapport à l'autre, les lois auxquelles sont soumis les changements d'états (Zustände ändern) des systèmes physiques restent les mêmes..." cf. 1) est la loi de Boltzmann $S = k \ln W$ qui occupe une place fondamentale dans la physique du jeune Einstein [18].

$$\begin{array}{ccc} S = S' & \text{et} & W = W' \\ \text{fonction d'état} & & \text{événement élémentaire} \end{array}$$

Les différences conventionnelles à la base des deux RR (Poincaré et Einstein) s'enracinent profondément dans le sol de la physique la plus pratique. Poincaré adopte les conventions habituelles pratiques du point de vue de la mécanique des milieux continus tandis qu'Einstein (et Planck) adoptent les conventions pratiques du point de vue de la thermodynamique

des systèmes [18]. Si l'invariance relativiste de l'entropie S ne doit guère surprendre¹⁰, celle de la probabilité statistique W peut sembler plus inattendue.

L'indépendance des événements ne doit cependant pas être comprise au sens habituel d'une « indépendance statistique », *auquel cas il n'y aurait pas de quanta de lumière* (cf. 3), mais au sens où il existe une zone acausale dans la RR sans éther [18], autrement dit au sens où il existe des événements *nécessairement* indépendants (intervalle d'événements de type spatial). C'est précisément ce point qui fait problème dans la RR avec éther, comme Poincaré le reconnaissait en 1911 dans « L'espace et le temps » [14].

Soulignons enfin que la constante de Boltzmann k apparaît comme une constante physique fondamentale dans la RR d'Einstein lorsqu'on prend soin de la distinguer soigneusement de celle de Poincaré, autrement dit lorsqu'on prend au sérieux l'existence d'une « structure fine » de la RR.

Remerciements

Je remercie Jean Reignier, Pierre Marage, Georges Lochak, Gilles Cohen-Tannoudji, Joseph Kounieher, Serge Reynaud, Cécile Barbachoux, Marc-Thierry Jaeckel, Jacques Robert, Jean-Michel Courty pour leurs encouragements à persévérer dans la recherche d'une structure fine de la RR.

¹⁰ Après avoir corrigé et complété de dernier paragraphe de l'article d'Einstein ("électron ponctuel lentement accéléré") pour établir l'équation de la dynamique relativiste des points massifs (1906), Planck attaque en 1907 la dynamique relativiste des systèmes dont le prototype est le corps noir [MP-1 & 2]. Pour montrer le caractère universel de la loi du corps noir, Planck propose une démonstration de l'invariance relativiste de l'entropie: "Nous considérons un corps à l'état de repos (1) dans le système de référence non primé (K), qui se trouve amené dans un deuxième état de repos (2) dans le système de référence primé (K') par un quelconque processus réversible et adiabatique." [MP-2, 2°, §4]. La démonstration de Planck, reprise et approuvée par Einstein [AE-4], revient à interpréter la transformation de Lorentz comme une transformation infiniment lente (cf mise à feu du boost einsteinien, l'état des horloges et des tiges ne subit pas de modification). La démonstration de Planck consiste à mettre en parallèle les deux transformations suivantes: Le système change d'état (1-> 2) au moyen d'une transformation réversible et adiabatique ($S_1 = S_2$). Le système non primé se transforme en système primé (K-> K') au moyen d'une transformation de Lorentz ($S = S'$).

Références

Einstein A.

- [1] 1903. Eine Theorie des Grundlagen der Thermodynamik Ann. d.Ph., 11, p 170-187. (traduction partielle C.N.R.S., vol. 1, "Quanta", Seuil 1989, p18)
- [2-A] 1905. "Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt", Ann. d.Ph.,18, p 132-148. (traduction "C.N.R.S.", Oeuvres Choiesies, vol. 1, "Quanta", Seuil 1989, p39)
- [2-B] 1905. "Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen", Ann. d.Ph., 17, p549-560. (traduction "C.N.R.S.", Oeuvres Choiesies, vol. 1 "Quanta", Seuil 1989, p55)
- [2- C] 1905. "Zur Elektrodynamik bewegter Körper", Ann. d.Ph., 17, p892-921. (traduction par Solovine, Gauthier-Villars 1955, p5). Les références renvoient aux textes français.
- [3] 1907. "Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen". Folgerungen Jahrbuch der Radioaktivität, 4, p 411-462 & 5, p 98-99. (trad. part., C.N.R.S., vol. 2, Seuil 1989, p85)
- [4] 1910 "Principe de relativité et ses conséquences dans la physique moderne" (1ère des trois publications francophones-suisse-d'Einstein). Archives des sciences physiques et naturelles, 29, p 5-28 et 125-244.
- [5] "Autoportrait", InterEditions, traduction F. Lab, Paris, 1980
- [6] The swiss years, writings (1900-1909), vol.2,"The collected papers of Albert Einstein". Editeur J. Stachel, Princeton University Press, 1989

Poincaré H.

- [7] 1900. "La théorie de Lorentz et le principe de réaction". Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles, 2ème série, 5.
- [8] 1905. "Sur la dynamique de l'électron". Comptes rendus de l'Académie des sciences de Palerme; dans Rd. d. Circ. mat. de Palermo, 21, 1906.
- [9] **Klein M.** "Thermodynamics in Einstein's thought Science", vol 157, 1967.

- [10] **Holton G.** "Einstein et la quête de l'image du monde" dans "L'imagination scientifique", Gallimard, Paris, 1981.
- [11] **Dugas R.** "La théorie physique au sens de Boltzmann", Editions du Griffon, Neuchatel-Suisse, 1959].
- [12] **Borel E.** "Probabilité et Certitude", P.U.F. Que sais-je? n° 445, 1950.
- [13] **Born M.** "Einstein's statistical Theories". North Western University Press copyright
- [14] **Poincaré H.** "L'espace et le temps". Conférence à Londres, Scientia, 12, n° XXV, 159, 1912.
- [15] **Perrin J.** "Espace et Temps", Hermann, Paris, 1951.
- [16] **Pierseaux Y.** Le concept d'événements indépendants dans les trois articles d'Einstein de 1905. Annales de la fondation de Broglie, vol 22 n°4, p391.
- [17] **Pierseaux Y.** Thèse de doctorat à l'Université Libre de Bruxelles ("La "structure fine" de la RR", septembre 1998)
- [18] **Pierseaux Y.** La "structure fine" de la RR", L'Harmattan, Paris, 1999.