

## Temps et relativité générale - Débat

Intervenants : Hervé Zwirn, Bernard d'Espagnat, Jean Kovalevsky, Gérard Petit, Dominique Laplane, Anne Dambricourt,

### Hervé Zwirn

Je souhaiterais apporter une précision sur un aspect que l'on n'a fait qu'effleurer mais qui me semble extrêmement important lorsque l'on parle de la relativité restreinte ou de la relativité générale. Il s'agit d'aborder ces théories sous l'angle de leur signification physique. La mécanique newtonienne repose sur le principe de relativité galiléenne, qui stipule que les lois de la mécanique ont la même forme dans tous les référentiels galiléens, c'est-à-dire les référentiels qui sont en mouvement rectiligne uniforme. Ceci signifie simplement que pour connaître la forme des lois de la mécanique quand on passe d'un référentiel galiléen à un autre, on applique des règles, qu'on a appelées "transformation de Galilée", et l'on trouve des lois de forme identique dans le nouveau référentiel. Or, il se trouve que, contrairement aux lois de la mécanique newtonienne, les lois de l'électromagnétisme de Maxwell ne sont pas invariantes lors d'une transformation de Galilée. Le principe de relativité restreinte stipule alors que les lois de l'électromagnétisme doivent, elles aussi, être invariantes lors d'un changement de référentiel galiléen. Il devient donc nécessaire de remplacer la transformation de Galilée par une nouvelle règle de transformation qu'on appelle "la transformation de Lorentz". La relativité restreinte est la théorie qui étend l'invariance des lois de la nature, lors d'un changement de référentiel galiléen, à l'électromagnétisme. C'est un point important dans la mesure où cela a une signification physique profonde : cela signifie que, lorsqu'on est dans un référentiel galiléen, il est impossible de mettre en évidence un mouvement absolu, que l'on fasse des expériences de mécanique — et cela était déjà vrai en mécanique newtonienne avec le principe de relativité galiléenne — ou des expériences d'optique (comme la mesure de la vitesse de la lumière) — ce qui là, était faux en mécanique newtonienne. La relativité générale peut alors être vue comme une généralisation supplémentaire selon laquelle cette invariance de toutes les lois de la nature doit être préservée même quand on se place dans des référentiels dans lesquels règne un champ gravitationnel. C'est ce point de vue qui a guidé Einstein dans sa construction des théories de la relativité restreinte et générale et non le résultat négatif de l'expérience de Michelson et Morley (qui a montré que la vitesse de la lumière était une constante).

### Bernard d'Espagnat

Je crois d'ailleurs qu'Einstein a dit lui-même que ce n'était pas l'expérience de Michelson et Morley qui l'avait motivé.

## Jean Kovalevsky

Je pense tout de même que, bien que ce ne soit pas précisément l'expérience de Michelson et Morley qui l'ait motivé, les transformations de Lorentz étaient bien connues à cette époque. Or, les formules de Lorentz (qui se rapportent effectivement à des phénomènes électromagnétiques puisque la vitesse de la lumière y joue un rôle fondamental) et la métrique (le  $ds^2$ ) de la relativité restreinte sont équivalents et on passe de l'une à l'autre par un calcul algébrique simple.

## Gérard Petit

Il est bien clair que cela a été une approche d'unification pour l'électrodynamique qui a guidé Einstein.

## Bernard d'Espagnat

La phrase de Minkowski citée par Eric Bois nous dit en somme que ce qui compte, ce n'est pas la position en soi, ni le temps en soi mais que c'est le mélange des deux, c'est-à-dire l'événement. Désormais, la réalité en soi, la réalité indépendante, ce ne sont pas les objets, à tel ou tel instant, mais ce sont les événements : c'est-à-dire l'association entre un point de l'espace et un instant du temps. Cette idée a donc constitué une étape par rapport à la vision antérieure dans laquelle la réalité était essentiellement associée à la notion d'espace. Je pense qu'avec la mécanique quantique, que nous aborderons plus tard, une nouvelle étape sera probablement à franchir en ce sens qu'avec la relativité, qu'elle soit restreinte ou générale, l'on peut encore considérer que les événements sont des événements de la réalité en soi. Alors que lorsque l'on aborde la mécanique quantique, cela devient très difficile de considérer même que les événements sont des éléments de la réalité en soi. Ceci me conduit à une autre réflexion à propos de cette notion de sens physique qu'Eric Bois a évoqué. Qu'est-ce, au juste, que le sens physique ? C'est discutable. Mais je crois que ce que les professeurs et les physiciens en général entendent par sens physique, c'est quelque chose qui se rapporte beaucoup à l'expérience, c'est-à-dire à ce que nous faisons. Cela se rapporte à la réalité, bien entendu — on s'exprime en terme de choses qui existent réellement — mais, lorsque l'on veut vraiment préciser les choses, l'on finit par dire : « si on fait ça, on observe ça », et c'est ça le sens physique finalement. C'est comme cela que l'on départage ce qui a un sens physique de ce qui est problématique ou philosophique ou conjectural, etc... De ce point de vue-là, le premier raisonnement d'Einstein — celui qu'il a publié dans son premier papier — est instructif, car il raisonne sur les signaux que l'on peut envoyer. Il est très « opérationnaliste ». Ensuite, Einstein est devenu réaliste, cela est bien connu. Il est allé de l'instrumentalisme vers une position plus réaliste, qui est la position de l'Einstein d'âge mûr. A priori les deux points de vue sont légitimes naturellement.

## Dominique Laplane

Les physiciens se considèrent-ils comme satisfaits du système, ou y a-t-il encore des choses qui ne collent pas, comme il y avait des choses qui ne collaient pas dans le système newtonien ? Certains faits restent-ils à expliquer ? A-t-on besoin d'une autre théorie plus complète ?

## Jean Kovalevsky

Je dirais que nous ne sommes pas satisfaits. Je pense que Bernard d'Espagnat peut le dire mieux que moi. Cette relativité générale nous satisfait pleinement lorsque nous sommes dans le cadre de l'astronomie, et de façon générale de la mécanique et de la physique des corps macroscopiques. Mais la relativité et la théorie quantique ne font pas vraiment bon ménage actuellement dans la théorie des particules. La synthèse n'existe pas. De même, une des conséquences de la relativité générale n'a pas été observée directement encore bien qu'on en ait des preuves indirectes : c'est le rayonnement gravitationnel. Un des effets a pu être démontré sur un pulsar double, mais on a pas d'observations sur terre ; peut-être parviendrons-nous à en avoir dans 10 ans ? Or, l'existence même de ces ondes gravitationnelles, nous conduit à un quatrième type d'interaction. Là, la grande unification n'existe pas. Et cela est également quelque chose qui ne nous satisfait pas totalement.

## Gérard Petit

Même si une théorie explique tout ce qui est disponible à l'instant " T ", les chercheurs doivent faire leur possible pour voir si elle s'applique encore un ordre de grandeur plus loin. Il n'y a pas d'arrêt à la marche vers des expériences plus précises, par exemple tester des phénomènes comme les ondes gravitationnelles. La plupart des physiciens sont persuadés qu'elles existent. Si l'on prenait l'optique qu'il n'y a aucune raison qu'elles n'existent pas, ce ne serait pas la peine de faire des expériences pour essayer de les détecter. Mais même si on est sûr qu'elles existent, cela vaut de toute façon la peine de faire ces expériences, car une fois que l'on aura ces techniques pour les détecter, on pourra utiliser l'information qui est dans ces zones gravitationnelles pour mieux connaître l'univers.

## Anne Dambricourt

J'ai une question en rapport avec ce que j'essaye de comprendre quotidiennement : c'est-à-dire la notion de durée dans le domaine de la biologie. Le problème sur lequel je tombe, c'est toujours le rapport entre durée, causalité et acausalité. Et quel peut-être l'équivalent physique entre deux instants qui se suivent, une simultanéité qui devient une seconde simultanéité, on dira qu'il y a une causalité si l'instant «  $t_2$  » est historiquement lié à «  $t_1$  ». Ma question est de savoir quel est l'équivalent physique entre deux instants qui se suivent et qui n'ont pas de rapports de causalité et deux instants qui se suivent, «  $t_2$  » étant une forme « évoluée » de «  $t_1$  » ? Quel est, en terme physique et dans cette

connaissance du temps, l'équivalent de la causalité et quelle peut être la source d'une acausalité ? Qu'est-ce que l'acausalité en science du temps ?

### Eric Bois

La causalité usuelle stipule une relation d'antécédent à conséquent selon, a titre principal, un principe d'antériorité temporelle. Le statut du temps de ce principe est celui du temps newtonien. Par définition, l'a-causalité, au sens d'une rupture du principe de causalité usuelle, ne respecte pas l'antériorité temporelle de l'antécédent sur le conséquent, c'est-à-dire de la cause sur l'effet.

### Gérard Petit

Il est possible de construire un temps-coordonnée dans lequel le principe de causalité est respecté. C'est-à-dire que si deux événements ont une relation de causalité, la coordonnée de temps du deuxième est supérieur à la coordonnée de temps du premier. L'on peut construire à peu près n'importe quel temps-coordonnée mais il est possible d'en construire qui respectent ce principe de causalité, et qui sont naturellement donnés par les métriques que l'on a vu tout à l'heure.

### Lucien Israël

J'ouvre des revues de vulgarisation comme *Science et Avenir* ou *La Recherche* et je lis que des astrophysiciens pensent que dans certains coins de l'univers observable, le temps s'écoule dans l'autre sens, qu'est-ce que cela veut dire ? Cela a-t-il un rapport avec le fait que les équations sont symétriques, quel que soit le sens du temps ?

### Jacques Vauthier

On ne sait même pas si les astrophysiciens savent ce qu'ils veulent dire ! Deux remarques. La première concerne la différence entre le point de vue philosophique et le point de vue du physicien. Le temps du philosophe, c'est le temps de l'être humain. C'est un temps ontologique, qui est constitutif de notre être. On le vit d'une certaine manière qui n'est pas celle de notre voisin. Cette notion est relative. Il y a eu une remarque très intéressante dans ce que vous disiez dans votre exposé sur cette notion intrinsèque du temps, qui est maintenant mise en évidence du côté de la physique.

La deuxième remarque, puisque je suis mathématicien, c'est de rappeler qu'Einstein, lorsqu'on lui a dit que la relativité fonctionnait, et qu'on lui a demandé « et si cela n'avait pas marché, qu'est-ce que vous en auriez pensé ? », a répondu : « *I would have been sorry for the Old One* ». De fait, c'était extraordinaire de voir que cette construction qui était une construction mathématique était ce que l'on appelle le temps. Il y a là une modélisation mathématique qui est spectaculaire et dont on peut se demander comment cela se fait qu'elle est aussi pertinente. On voit que la science modélise une réalité

mais n'épuise pas la réalité. Il y a donc immédiatement les limites du modèle. Cela rejoint la question que posait M. Laplane : « Y a-t-il un au-delà de cette théorie ? ». Y aura-t-il une grande unification un jour ? Dans la représentation du temps, je suis toujours mal à l'aise par rapport à ce terme de « temps ». Qu'est ce que cela veut dire ? Qu'est-ce que cela représente précisément ? Comment cela résonne-t-il chez chacun d'entre nous ? Nous avons eu un exposé sur le chaos, et nous avons vu que la résonance de ce mot n'est pas du tout ce que l'on pense. Rappelons que lorsqu'Einstein est venu à Paris et s'est retrouvé dans un grand amphithéâtre de la Sorbonne avec Bergson, cela a été un dialogue de sourds entre eux, sur cette notion de temps.

### Jean Kovalevsky

Il y a tout un pan de la relativité générale que nous n'avons pas traité : c'est la relativité-cosmologie. Cette relativité-là, compte tenu des modèles que l'on a en cosmologie, n'est pas encore bien travaillée. Et il reste bien des choses à faire. Lorsque l'espace-temps était beaucoup plus petit, le champ de gravité était extrêmement grand. Je ne suis pas sûr que l'on ait pu répondre à la question des conséquences relativistes sur l'évolution de l'Univers dans ces conditions extrêmes. Peut-être Eric Bois pourra-t-il en dire un peu plus ?

### Éric Bois

Je voulais donner à peu près la même réponse en ce qui concerne la cosmologie relativiste. Mais en introduisant cela par la distinction utile que M. Vauthier faisait tout à l'heure entre le temps mesuré et le temps perçu. On ne peut simplement extraire la nature du temps, et l'identifier comme tel, à partir du temps mesuré de la physique, d'autant qu'il existe plusieurs axiomatiques du temps en physique. Quant au temps perçu, j'apprécie cette expression de « temps ontologique ». En cosmologie théorique, au quotidien, l'on ne manipule pas des horloges. Le temps cosmologique, même issu de la cosmologie relativiste, n'est pas un temps mesuré, même si on peut chercher une cohérence avec une axiomatique particulière. Et cela devient un temps conceptuel : ni un temps perçu, ni un temps mesuré. Ce temps conceptuel doit cependant satisfaire les exigences de la raison via toute l'armature et la consistance du matériau de la physique théorique. Bien que conceptuel, cela n'est donc pas un temps tout à fait souple vis-à-vis duquel l'on pourrait dire tout et son contraire. Cela étant, des postulats raisonnables, mais des postulats tout de même, sont introduits, comme le principe de causalité de Weyl permettant de passer d'une notation locale de la causalité en physique à sa notion globale en cosmologie.

### Bernard d'Espagnat

Si j'ai bien compris, tant que l'on reste dans le schéma général de la relativité générale, il n'y a pas de temps, on ne peut définir le temps cosmique. On ne peut le définir que dans certains modèles, en particulier dans le modèle de Friedman-Lemaître, dans des modèles où l'on suppose une certaine isotropie de l'espace. À ce moment-là, on peut simplifier les équations et définir un temps

cosmique. Mais l'on ne le peut pas, dans le cadre le plus général. Autrement dit, si je comprends bien, si nous pouvons définir un temps cosmique, c'est en vertu d'un phénomène contingent, celui que l'espace est pratiquement isotrope sur les longues distances. C'est assez frappant que l'on soit dans cette situation-là. C'est très différent du schéma de Newton où il y avait aussi un temps absolu mais où le temps absolu était parachuté dès le départ à titre d'hypothèse fondamentale. Alors que là, si la matière était arrangée autrement, l'on ne pourrait définir de temps.

## **Hervé Zwirn**

Je voulais revenir brièvement sur la question que vous avez posée : " est-ce qu'aujourd'hui on est satisfait ? ". Nous ne sommes toujours pas satisfaits mais il me semble qu'il y a une différence entre la situation du début du siècle et celle d'aujourd'hui. Les causes d'insatisfaction ne sont plus les mêmes. Au début du siècle, le résultat négatif de l'expérience de Michelson et Morley posait un problème, c'était un résultat expérimental qui ne pouvait être compris par la science de l'époque. La mécanique newtonienne prédisait que la vitesse de la lumière n'était pas constante, ce qui était contraire à l'expérience (sauf à imaginer des explications ad hoc artificielles). Aujourd'hui, on ne peut pas dire qu'il existe une expérience du même style qui mettrait en défaut la mécanique quantique ou la relativité générale. Il n'existe pas de résultat expérimental dont on dise "il est contraire aux prédictions des théories en vigueur". En revanche, on a une insatisfaction de nature beaucoup plus théorique dans la mesure où il est nécessaire, parce que c'est la direction dans laquelle progresse la physique, d'unifier les choses. Or nous disposons d'un côté d'une théorie quantique des champs qui décrit trois types d'interactions (forte, faible et électromagnétique) qui sont maintenant partiellement unifiées (même si de gros efforts restent encore à faire), et d'un autre côté de la relativité générale qui décrit une quatrième interaction (l'interaction gravitationnelle). Ceci n'est pas satisfaisant car l'interaction gravitationnelle doit, elle aussi, être quantifiée, ce qui n'est pas le cas dans le cadre de la relativité générale. Il est donc nécessaire de construire une théorie quantique globale qui unifie les quatre interactions. Cette théorie est en cours de construction mais même s'il y a eu des progrès, les physiciens sont loin d'avoir tout compris dans ce domaine. Ils seraient satisfaits s'ils pouvaient dire : " ça y est, on a une théorie unifiée générale, on sait mathématiquement comment elle fonctionne et en plus, on est capable d'en vérifier les conséquences expérimentales". Or, non seulement sur le plan formel on est loin d'avoir fini de construire cette théorie (même si des parties importantes existent déjà) mais de plus, les conséquences expérimentales sont, pour la plupart, totalement hors de portée de nos possibilités de test. Ceci explique peut-être qu'il n'existe pas d'expérience, aujourd'hui, qui contredise les théories en cours puisque les conséquences expérimentales des nouvelles théories se situent à plusieurs ordres de grandeur au-dessus de nos possibilités expérimentales.

Si maintenant on veut réfléchir sur le concept de temps, il convient de se placer dans le cadre de ces théories (appelées "théories des supercordes") même si elles ne sont pas encore achevées. Elles seules font intervenir l'aspect

quantique de l'espace-temps et elles modifient totalement l'idée qu'on peut se faire du concept de temps. Les particules ne sont plus considérées comme ponctuelles mais comme des cordes (entités à une dimension) qui respectent une symétrie appelée "super symétrie". Dans ces théories, le cadre dans lequel on se place possède 10 dimensions. Pour retrouver l'espace-temps à 4 dimensions qui est le nôtre, il se produit ce que l'on appelle une compactification, c'est-à-dire que certaines dimensions sont repliées sur elles-mêmes sur des distances qui sont tellement courtes qu'elles sont inobservables. Le fait que ces dimensions sont inobservables aboutit au fait que nous semblons vivre dans un espace à 4 dimensions (3 d'espace et 1 de temps). Mais il semble que l'aspect quantique rend flou le concept de temps qui devient une sorte de notion approximative qui n'émerge au niveau classique que sous des conditions initiales très particulières. Mais ces considérations sont, pour le moment, hautement spéculatives. Cependant je pense que si l'on veut faire une analyse philosophique de la notion de temps, c'est dans ces modèles qu'il convient de se placer malgré la difficulté que cela représente.

### **Bernard d'Espagnat**

Dans le tour d'horizon que nous venons de faire nous avons dû, bien entendu, laisser de nombreuses questions de côté. En particulier toutes celles concernant l'irréversibilité du temps. Quelles sont les sources de l'irréversibilité que l'on constate ? Curieusement, plusieurs sont concevables et plusieurs, même, paraissent être à l'œuvre simultanément. Nombre de livres traitent de ces questions mais il est rare de trouver dans ceux-ci de vraies tentatives de compréhension de cette étrange confluence. Il y a là tout un domaine que ce n'était pas l'objet de cette réunion d'aborder mais dont, pour mémoire, je tiens à rappeler l'existence.

### **Jean Kovalevsky**

Je souhaiterais faire un commentaire sur ce problème de l'irréversibilité du temps. Il est vrai qu'il y a toute une gamme de propriétés du temps que l'on n'a pas abordée, parmi lesquelles le problème des effets dissipatifs. Or, les effets dissipatifs existent partout, même en mécanique céleste et c'est par ce biais que, peut-être, on pourrait aborder le problème de l'irréversibilité, et cela serait un grand débat. A partir du moment où l'on prend en compte les phénomènes dissipatifs, les équations ne sont plus symétriques et les solutions ne sont pas invariantes par un changement de signe de la variable temps.