

## 2005 : L'année mondiale de la physique

G. Paturel, Observatoire de Lyon

### Introduction

Après le dossier Vénus, qui nous a occupés pratiquement toute l'année 2004, voici un autre dossier, celui de l'année mondiale de la physique. Pourquoi une telle célébration ? Albert Einstein a publié son article mémorable introduisant la nouvelle mécanique, la mécanique relativiste, en 1905, le 30 juin pour être précis. L'anniversaire de sa mort, le 18 avril 1955, est une autre commémoration que l'on peut attacher à cette année 2005.

### Les débuts difficiles

Einstein a profondément bouleversé la physique, dans de très nombreux domaines, et pourtant, les débuts de sa carrière furent particulièrement difficiles. A la fin de ses études en 1900, il ne put obtenir un poste auprès des physiciens qu'il avait sollicités (W. Ostwald et H. Kamerlingh-Onnes). Sa passion pour la physique - plus tard il se décrira lui-même comme un monomane de la physique - ne se démentit pas, malgré quelques moments de découragement. En 1901, il écrivit un premier article sur la capillarité, article qui fut publié dans la revue *Annalen der Physik*.

Avec son ami K. Habicht et un jeune Roumain, M. Solovine, qu'il rencontra lors de cours de physiques qu'il donnait pour survivre, il avait constitué en 1902 un petit cercle de discussions scientifiques, l'Académie Olympia, qui eut probablement une grande influence, en lui permettant de discuter des idées neuves. Cette période fut difficile sur le plan matériel, mais heureusement, il put, grâce au soutien du père de son ami Marcel Grossmann, obtenir un emploi, en juin 1902, au Bureau suisse des brevets, dans la ville de Berne. Nous aurons l'occasion de reparler de M. Grossman, qui joua encore un rôle important dans la carrière d'Einstein. Un autre ami d'Einstein vint travailler à

l'Office des brevets de Berne. C'était M. Besso. Celui-ci participa aux discussions au cours desquelles Einstein trouva la formulation finale de son article de 1905 sur la Relativité restreinte. 1905, c'est aussi l'année où Einstein vit sa thèse acceptée après deux refus.

### 1905, l'année décisive

Ce fut un moment de plus grande liberté d'esprit. En 1904, il avait déjà publié cinq articles scientifiques, acceptés par les *Annalen der Physik*, des articles portant essentiellement sur la thermodynamique. Puis vint l'année exceptionnelle de 1905. Einstein, cette année-là, publia quatre nouveaux articles, vite remarqués par les physiciens, dont Max Planck : le premier article lui valut le prix Nobel de Physique pour l'interprétation de l'effet photoélectrique, le second portait sur le mouvement Brownien, le troisième constituait les fondements de la Relativité restreinte (appelée *Special Relativity*, par les Anglo-saxons), cette nouvelle mécanique qui englobait celle de Newton, et le dernier article était celui qui portait en lui la relation emblématique de l'œuvre d'Einstein :

$$E = mc^2.$$

On aurait tort de penser que seuls les deux derniers articles étaient réellement importants. En effet, le premier article laissait entrevoir un lien entre la conception ondulatoire et la conception corpusculaire du photon, le second prouvait la réalité des atomes, à une époque où cette réalité était encore contestée.

On ne peut que s'émerveiller d'une telle productivité, seulement cinq ans après la fin de ses études. Cette productivité ne se démentira pas pendant toute sa carrière. Nous reviendrons sur les étapes marquantes de la vie d'Einstein pour explorer

sa deuxième grande théorie, la théorie de la relativité Générale.

## Un savant fascinant

Einstein était une personne qui, sur bien des points, était exceptionnelle. L'homme avait un caractère affirmé, ce qui lui valut l'opposition de quelques-uns de ses professeurs. Mais il avait aussi une humanité profonde : son mépris pour la force des armes (il est injuste qu'il soit parfois perçu comme l'inventeur de la bombe atomique, lui le pacifiste convaincu) le poussa très jeune à abandonner sa nationalité, celle d'un pays jugé trop militariste à ses yeux. Plus tard, il utilisa sa notoriété pour aider ses compatriotes poursuivis par le nazisme. C'est ainsi qu'il écrivit ce petit livre exceptionnel dont nous avons déjà parlé : "*L'évolution des idées en physique*", en collaboration avec L. Infeld, pour aider financièrement ce dernier. Mais ce qui me paraît plus important encore, et particulièrement pour un scientifique, c'est son honnêteté foncière. Il ne savait pas mentir. Une anecdote est révélatrice. Il fut rapporteur ("*referee*" en anglais) pour un article d'un jeune physicien (je crois me souvenir qu'il s'agissait de Kaluza). Il refusa tout d'abord l'article. Mais deux ans plus tard, Einstein se ravisa et écrivit à l'éditeur pour dire qu'il s'était trompé et que l'article était acceptable.

Une autre facette de ce théoricien hors du commun était, on l'ignore souvent, un sens aigu du concret. Dans certains articles théoriques, Einstein n'hésite pas à donner des schémas techniques ; il eut l'occasion de prendre un brevet sur un principe de réfrigérateur, ses expériences de pensée (les trains, les ascenseurs) montrent aussi ce lien direct au concret.

## Emotion personnelle

Einstein a fasciné plusieurs générations d'étudiants et l'importance de ses travaux se révèle encore aujourd'hui, avec les lasers, les lentilles gravitationnelles, les condensats dits de "Bose-Einstein", et bien d'autres choses de la physique moderne.

Permettez-moi d'évoquer brièvement une expérience personnelle qui peut éclairer sur les raisons, parfois curieuses, qui motivent un jeune pour la physique. Mon premier contact avec les nouvelles lois relativistes me fut donné par un camarade de classe, qui, pendant un cours de mathématiques, m'affirma qu'une montre dont le ressort était remonté (à l'époque, les montres électroniques n'existaient pas) était plus lourde

qu'une montre dont le ressort était détendu. Le professeur nous surprit en train de parler et nous réprimanda. Il ignorait que cette révélation choquante, venait de sceller pour toujours mon intérêt pour la relativité et son inventeur.

Depuis lors, ma fascination ne s'est pas démentie, ni pour l'œuvre, ni pour l'homme. Je ressens une émotion certaine à l'idée d'avoir été contemporain d'Einstein pendant une dizaine d'années. Je ne l'ai pas rencontré, bien sûr, mais j'ai rencontré quelqu'un qui l'avait rencontré, et qui tous les matins prenaient le même bus que lui, à Princeton. C'était B. Mandelbrot, l'inventeur des fractals. Il me raconta qu'Einstein, très âgé déjà, avait un siège réservé dans le bus.

## Le programme de ce dossier

Tout au long de ce dossier, nous évoquerons les travaux d'Einstein, en suivant le fil chronologique. Mais l'année mondiale de la physique, c'est aussi la célébration de toute la physique et nous parlerons des travaux remarquables d'autres physiciens, H. Poincaré, L. de Broglie et bien d'autres.

Dans ce Cahier, nous commencerons par parler de l'expérience décisive de Michelson et Morley pour évoquer ensuite H. Poincaré, qui fut par certains aspects, un précurseur. Nous donnerons aussi la démonstration, telle qu'elle fut publiée par Einstein lui-même, de la transformation dite de Lorentz. La relativité a la réputation d'être une théorie, très mathématique, et donc très difficile. Nous débattons de la nécessité d'exprimer les théories physiques sous forme purement mathématique, à travers un texte de C. Larcher.

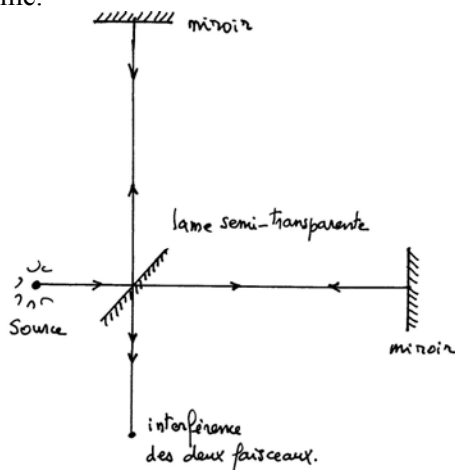
## A lire, absolument !

Pour en savoir plus sur Einstein, sa vie, son œuvre, je vous recommande sans réserve le livre écrit par un de ses collaborateurs, Banesh Hoffmann avec la collaboration d'Helen Dukas, la propre secrétaire d'Einstein. Ce livre s'intitule : "Albert Einstein créateur et rebelle", publié aux éditions du Seuil. Ce livre se lit comme un roman.

Pour avoir accès à une sélection des meilleurs articles d'Einstein, il y a la série de livres "Albert Einstein, Œuvres choisies" éditée sous la direction de Françoise Balibar aux éditions du Seuil/CNRS. On y trouve les articles et les lettres les plus célèbres, commentées par des spécialistes. C'est un vrai bonheur de lire les écrits originaux d'Einstein, et d'y découvrir son approche de la physique.

# L'expérience de Michelson et Morley

L'idée que la lumière ait besoin d'un support, l'éther, pour vibrer était très répandue. Pouvait-on mettre en évidence le mouvement de la Terre par rapport à ce support hypothétique ? Tel était l'enjeu de l'expérience. Michelson avait développé un interféromètre très précis. Le principe consistait à faire interférer deux faisceaux lumineux, issus d'une même source, après leur avoir fait parcourir des trajets aller-retour égaux, ou quasiment égaux, dans deux directions perpendiculaires. Les retours sont obtenus par des miroirs placés sur les deux bras du support (voir la figure). Si le chemin optique de la lumière varie sur un des bras, soit parce que celui-ci change de longueur, soit parce que la vitesse de la lumière varie, la figure d'interférence (anneaux ou franges, selon la configuration de l'appareil) se déforme.



Le chemin optique s'exprime comme le produit de la longueur du trajet par l'indice de réfraction (rapport de la vitesse de la lumière dans le vide à la vitesse de la lumière). Nous allons nous placer dans le référentiel de l'éther où la vitesse de la lumière est constante et égale à  $c$ . Nous n'aurons donc pas à considérer l'indice de réfraction, seule la longueur du trajet effectif devra être considérée. Calculons donc les trajets effectifs de la lumière,  $L_1$  et  $L_2$ , pour les deux directions considérées: parallèle à la translation de la Terre sur son orbite et perpendiculaire à cette même direction. Nous noterons  $v$  la vitesse de la Terre sur son orbite et  $L$  la longueur de chacun des bras de l'interféromètre. Nous adopterons un point de vue classique.

Pour la direction orientée dans le sens de déplacement de la Terre, la lumière doit parcourir à l'aller une longueur  $L$ , augmentée du déplacement du miroir de renvoi pendant cette partie du trajet. La

longueur effective est donc  $L + v.t_1$ , où  $t_1$  est le temps  $L/(c-v)$  que la lumière met pour atteindre le miroir. Pour le trajet de retour on a de même une longueur  $L - v.t_2$ , où  $t_2$  est  $L/(c+v)$ , temps que la lumière met pour revenir à son point de départ, après réflexion sur le miroir. La longueur totale du trajet aller-retour est donc:

$$L_1 = 2L + \frac{vL}{c-v} - \frac{vL}{c+v} = \frac{2L}{1-\beta^2}, \text{ où } \beta=v/c.$$

La durée du trajet aller-retour pour le bras perpendiculaire à la direction de translation est plus compliquée à calculer. En effet, l'interféromètre se déplaçant, la longueur du trajet effectif de la lumière, dans le référentiel de l'éther, sera la composition de la longueur  $L_2/2$  et du déplacement  $v.t_2$ , où  $t_2$  est le temps aller (ou retour) de ce trajet, c'est-à-dire  $L_2/2$ . En utilisant le théorème de Pythagore, la longueur effective sera donc :

$$(L_2/2)^2 = L^2 + v^2 \frac{(L_2/2)^2}{c^2}, \text{ d'où l'on tire la}$$

longueur du chemin optique pour le deuxième bras :

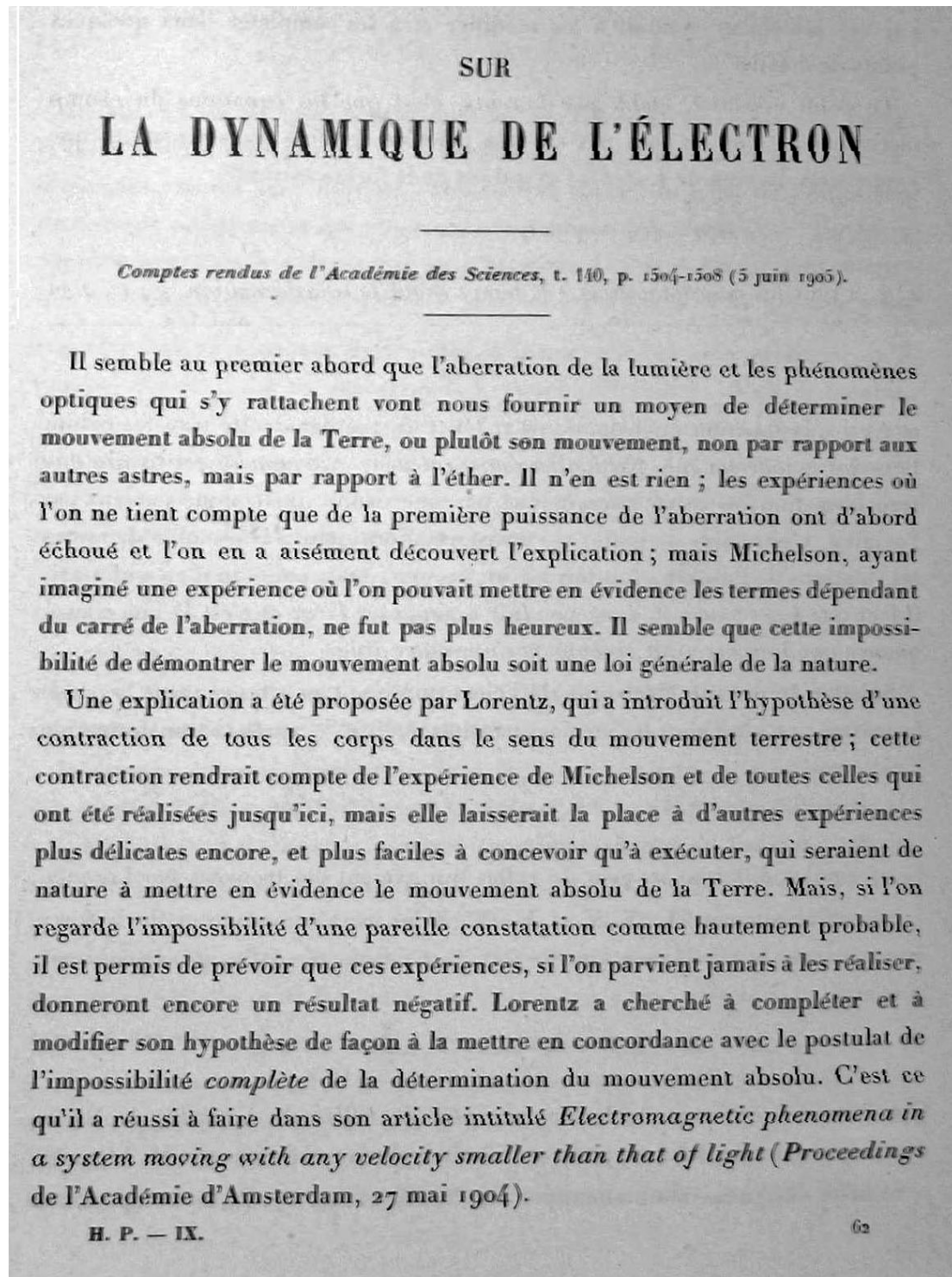
$$L_2 = \frac{2L}{\sqrt{1-\beta^2}}.$$

Notons que nous aurions pu faire le calcul dans le référentiel de la Terre au lieu de celui de l'éther. Le calcul aurait été un peu différent mais le résultat aurait été le même.

Le chemin optique des trajets n'est pas le même dans une direction et dans l'autre. Si donc on observe la figure d'interférence en faisant tourner l'ensemble de l'interféromètre, on devrait la voir se modifier, selon l'orientation des bras vis-à-vis de la direction de translation de la Terre. Or il n'en fut rien. L'éther était-il entraîné avec la Terre ; l'interféromètre subissait-il une déformation juste capable de compenser l'effet attendu ? Autant de questions qui plongèrent les physiciens dans la perplexité. On voit que si le chemin optique dans la direction de translation de la Terre se contractait d'un facteur :  $\sqrt{1-\beta^2}$ , les chemins optiques demeureraient identiques. C'est ce qu'ont proposé plusieurs physiciens, dont les auteurs de l'expérience ainsi que Fitzgerald et Lorentz. Cette contraction était certes *ad hoc*, mais c'était la seule qui pût réconcilier cette expérience avec la mécanique de Newton.

# Poincaré, précurseur de la relativité

Poincaré semblait convaincu qu'aucune expérience ne pourrait mettre en évidence le mouvement de translation de la Terre (voir le texte ci-dessous). Il en avait déduit le principe de relativité, comme Einstein, et avait, dès 1905, obtenu l'expression correcte de la transformation qu'il nomma "*transformation de Lorentz*". Il n'eut malheureusement pas l'audace d'abandonner les idées classiques d'espace et de temps.

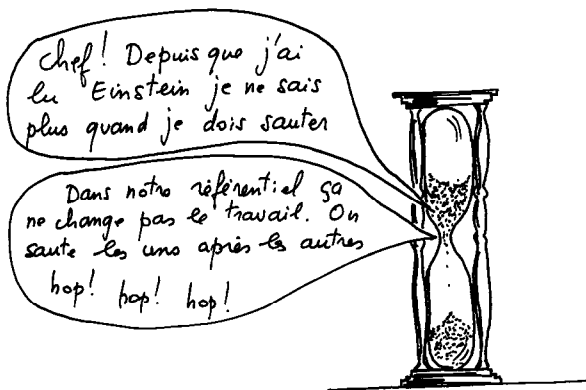


# La transformation de Lorentz

Nous reproduisons ci-dessous la démonstration historique, établissant les fondements de la Relativité restreinte. En fait, la démonstration de 1905 était assez longue et difficile à suivre. Einstein a trouvé une démonstration plus simple en 1907. C'est celle que nous reproduirons, avec quelques compléments pour expliquer les calculs.

Dans l'article de 1905, Einstein définit tout d'abord les deux postulats de sa nouvelle théorie : 1) Le principe de relativité qui affirme qu'aucune expérience mécanique ou électrodynamique ne peut permettre de déceler un mouvement de translation uniforme. Comme nous l'avons vu, c'était une conviction pour Poincaré également. 2) La vitesse de la lumière dans le vide est constante indépendamment de la vitesse de la source émettrice. Einstein montrera que ces deux postulats ne sont pas incompatibles.

Einstein discute ensuite la notion de simultanéité et de relativité des longueurs. Il conclut qu'il n'est pas possible d'attribuer un sens absolu à la simultanéité ou à la longueur. Seules ont un sens précis les mesures faites dans un référentiel donné avec des horloges et des règles en repos par rapport à ce référentiel.



Einstein considère alors deux systèmes de coordonnées : l'un  $S\{x,y,z,t\}$ , l'autre  $S'\{x',y',z',t'\}$ . Ces deux référentiels sont supposés en translation uniforme l'un par rapport à l'autre, avec une vitesse uniforme  $v$ , de telle sorte que l'axe  $x$  de  $S$  coïncide avec l'axe  $x'$  de  $S'$ . Les grandeurs  $x, y, z, t$  fixent un événement relativement au système  $S$ . Ce même événement est fixé par les grandeurs  $x', y', z', t'$ , relativement au système  $S'$ . Il faut trouver les équations qui lient ces grandeurs entre elles. Les

équations cherchées doivent être linéaires du fait de l'homogénéité du temps et de l'espace. L'origine du temps dans les deux systèmes est choisie au moment où les origines des coordonnées coïncident. Lisons Einstein :

*"De la position, maintenant connue, des plans de coordonnées de  $S'$  relativement à  $S$ , nous concluons immédiatement que les équations des couples suivants sont équivalentes :*

$$\begin{aligned}x' = 0 &\Leftrightarrow x - vt = 0, \\y' = 0 &\Leftrightarrow y = 0 \text{ et} \\z' = 0 &\Leftrightarrow z = 0\end{aligned}$$

Trois des équations de transformation cherchées sont donc de la forme :

$$\begin{aligned}x' &= A(x - vt) \\y' &= B.y \\z' &= C.z.\end{aligned}$$

Comme la vitesse de propagation de la lumière dans le vide est égale à  $c$  par rapport aux deux systèmes, les deux équations :

$$x^2 + y^2 + z^2 = c^2 t^2$$

et :

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 = c^2 t'^2$$

doivent être équivalentes. D'où l'on conclut, compte tenu des expressions qui viennent d'être trouvées pour  $x', y', z'$  et après un calcul simple que les équations de transformation cherchées doivent être de la forme :

$$\begin{aligned}t' &= \varphi(v) \cdot \beta \cdot \left(t - \frac{v}{c^2} x\right) \\x' &= \varphi(v) \cdot \beta \cdot (x - vt) \\y' &= \varphi(v) \cdot y \\z' &= \varphi(v) \cdot z\end{aligned}$$

où l'on a posé :

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Nous allons maintenant déterminer la fonction de  $v$  restée jusqu'ici indéterminée. Introduisons un troisième système de référence  $S''$ , équivalent à  $S$  et  $S'$ , se déplaçant par rapport à  $S'$  à la vitesse  $-v$

[...]; alors, en appliquant deux fois les équations auxquelles nous venons d'aboutir, nous obtenons :  
[...]

$$\varphi(v) \cdot \varphi(-v) = 1.$$

Comme en outre la relation entre  $y$  et  $y'$  ne peut pas dépendre du signe de  $v$ , il vient :

$$\varphi(v) = \varphi(-v).$$

On a donc :

$$\varphi(v) = 1$$

et [donc] les équations de transformations[...]"

## Un calcul simple, Monsieur Einstein !

Quand Einstein dit que les équations de transformation peuvent être établies par un calcul "simple", cela était sans doute vrai pour lui, mais pas pour nous. Sans faire précisément le calcul, donnons le moyen de parvenir au résultat:

On commence par noter que  $C=B$ , par raison de symétrie. Par ailleurs, nous choisissons d'écrire la constante  $A$  sous la forme :  $A=B \cdot \beta$ , où  $\beta$  sera une nouvelle constante à déterminer. Nous avons donc les équations de transformation :

$$\begin{aligned}x' &= B \cdot \beta (x - vt) \\y' &= B \cdot y \\z' &= B \cdot z.\end{aligned}$$

Ecrivons maintenant que  $t'$  se transforme linéairement en fonction des autres coordonnées  $x$  et  $t$  et posons :

$$t' = B \cdot \beta (\alpha t + \gamma x),$$

$B \cdot \beta \cdot \alpha$  et  $B \cdot \beta \cdot \gamma$  formant les deux constantes de proportionnalité.

Reportons les expressions de  $x', y', z'$  et  $t'$  dans l'expression  $x'^2 + y'^2 + z'^2 = c^2 t'^2$  et regroupons les termes en  $x^2, y^2, z^2, t^2$  et  $xt$ , puis identifions membre à membre avec l'équation  $x^2 + y^2 + z^2 = c^2 t^2$ . Notons au passage que la constante  $B$  disparaît et reste indéterminée. C'est en fait la valeur  $B = \varphi(v)$  de l'article d'Einstein.

L'expression devant le terme  $xt$  sera identiquement nulle puisqu'il n'y a pas de terme en  $xt$ , dans l'équation :  $x^2 + y^2 + z^2 = c^2 t^2$ . L'expression devant le terme  $t^2$  sera égale à  $c^2$ , etc.

On obtient ainsi trois équations :

$$c^2 = (c^2 \cdot \alpha^2 - v^2) \beta^2, \text{ par identification avec le terme en } t^2,$$

$$1 = \beta^2 (1 - c^2 \cdot \gamma^2), \text{ par identification avec le terme en } x^2,$$

$$0 = v + \alpha \cdot \gamma \cdot c^2, \text{ par identification avec le terme inexistant en } x \cdot t$$

On peut tirer  $\frac{1}{\beta^2} = \alpha^2 - \frac{v^2}{c^2}$  et  $\frac{1}{\beta^2} = 1 - c^2 \gamma^2 = 1 - \frac{v^2}{c^2 \alpha^2}$

En égalant les deux expressions de  $1/\beta^2$ , on tire une équation du second degré en  $X = \alpha^2$ . On trouve quatre solutions :  $\alpha = \pm \frac{v}{c}$  et  $\alpha = \pm 1$ . Les solutions en  $v/c$  sont dégénérées (elles conduisent à une transformation identiquement nulle en  $t'$  et  $x'$ ). Des deux autres solutions, seule la solution  $\alpha = 1$  est acceptable, pour que  $t$  et  $t'$  varient dans le même sens. A partir de là tout est vraiment simple. On trouve les expressions des différentes constantes et donc les équations de transformation.

# L'expression de la physique

C. Larcher

A la suite d'un de mes messages sur les propos de Jean-Marc Lévy-Leblond (la relativité avec 12 guillemets), un collègue se demande en substance s'il est possible de parler des sciences modernes (relativité et physique quantique) en utilisant simplement des mots. Je vous soumetts une réflexion, non scientifique, mais dont le fondement me paraît assez fondamental.

La question de base pourrait être posée de la manière suivante : «Comment peut fonctionner la pensée humaine quand elle élabore une théorie scientifique ? » Se poser la question : « Comment pense-t-on ? » est un sujet typiquement philosophique mais c'est une question qui en science peut présenter de l'importance. Beaucoup de philosophes estiment que l'on ne peut penser que parce que l'on utilise des mots. Mais l'on pourrait aussi dire que l'on pense avec des images mentales. On trouve même des exemples dans l'histoire des sciences. Par exemple en physique, Maxwell pour établir les équations de l'électromagnétisme et Kékulé en chimie pour établir la formule du benzène. Sans parler, de façon encore plus saisissante, de l'astronomie. Enfin, avec la physique du XX<sup>e</sup> siècle (relativité et physique quantique) nombre de scientifiques estiment que la pensée scientifique s'exprime presque ontologiquement en termes mathématiques.

Pour Galilée et bon nombre de physiciens, la Nature serait «écrite en langage mathématique» Autrement dit, est-ce que, aujourd'hui, l'unique méthode dont nous disposons pour décrire «la réalité» est d'écrire des équations ? Il semblerait actuellement que oui. Un collègue écrit sur la liste

«physchim» : « Une question n'est une question scientifique que si l'on est capable de mettre un processus «non verbal» pour y répondre. Si tout se passe seulement au niveau du langage, la question n'est pas scientifique».

La question que l'on peut logiquement se poser est la suivante : comment des notions mathématiques qui dépendent de l'esprit humain pourraient expliquer un réel qui, lui, n'en dépend pas ? On peut certes être étonné par ce que le physicien Eugène Wigner qualifiait de «déraisonnable efficacité des mathématiques», mais tout autant par les travaux de K. Gödel et A. Turing qui ont démontré «le caractère à jamais incertain des fondements mathématiques» in « La Recherche » N° 270 (l'Univers est-il intelligible ?) Je propose ce débat difficile, et pas nouveau, à la réflexion collective.



GP

■

## Le point de vue de Einstein et Infeld

*"Les idées fondamentales jouent un rôle essentiel dans la formation d'une théorie physique. Les ouvrages de physique sont remplis de formules mathématiques compliquées. Mais c'est la pensée, ce sont les idées qui sont à l'origine de toute théorie physique. Les idées doivent plus tard revêtir la forme mathématique d'une théorie quantitative, pour rendre possible la comparaison avec l'expérience."* Citation tirée de : 'L'évolution des idées en physique', A. Einstein et L. Infeld, Petite Bibliothèque Payot, 1963 (Titre original : The Evolution of Physics, 1938).

GP.