

12H05...

11H55 !



N. David Mermin

Traduction de Victor Policarpo

Préface de Richard Taillet

Il était temps

Comprendre enfin la relativité

N. David Mermin

Il était temps

Comprendre enfin la relativité

Pourquoi, si longtemps après sa découverte en 1905, aurait-on encore besoin d'un nouveau livre sur la relativité d'Einstein ?

Parce que malgré la littérature abondante dans ce domaine, peu d'ouvrages se limitent au formalisme mathématique strictement nécessaire pour faire comprendre aux lecteurs le sens physique de cette théorie. D'après David Mermin, la relativité devrait être une partie importante de l'éducation de chacun car après tout, c'est en grande partie une question de temps, un sujet que tout le monde connaît bien ! Le livre révèle que certaines de nos notions les plus intuitives sur le temps sont fausses et que la nature réelle du temps découverte par Einstein peut être rigoureusement expliquée sans mathématiques avancées.

Cet ouvrage est le fruit de plus de trente ans d'expérience d'enseignement auprès d'étudiants non scientifiques. L'approche proposée est imaginative, précise et complète. Clair, vivant et informel, la compréhension de ce livre ne nécessite pas de connaissances mathématiques particulières et le livre séduira les lecteurs intellectuellement curieux de toutes sortes, y compris les physiciens professionnels, qui seront intrigués par son approche très originale.

N. David Mermin est un physicien théorique, membre de l'Académie nationale des sciences, qui a remporté le premier prix Julius Edgar Lilienfeld de la société américaine de physique pour « sa remarquable clarté et son esprit de conférencier auprès de non-spécialistes sur des sujets difficiles ».



9 782759 821617

edp sciences

16 €

ISBN : 978-2-7598-2161-7

www.edpsciences.org

Il était temps

Il était temps

Comprendre enfin la relativité

N. DAVID MERMIN

Traduction de Victor Policarpo

Préface de Richard Taillet



17, avenue du Hoggar – P.A. de Courtabœuf
BP 112, 91944 Les Ulis Cedex A

Translation from the English language edition of: "It's about time, Understanding Einstein's Relativity", N. David Mermin, © 2005, Princeton University Press.

Licensed by Princeton University Press, Princeton New Jersey, U.S.A. in conjunction with their duly appointed agent, L'Autre agence. All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage and retrieval system, without permission in writing from the Publishers.

Composition et mise en pages : Patrick Leleux PAO
Couverture : conception graphique de B. Defretin, Lisieux
Illustration de couverture : peb & fox

Imprimé en France
ISBN (papier) : 978-2-7598-2161-7
ISBN (ebook) : 978-2-7598-2206-5

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinés à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences, 2018

NOTE DU TRADUCTEUR

*Merci à Stéphane Puech pour sa précieuse aide.
Merci à toi de m'avoir plongé dans la relativité restreinte
exactement au moment où il le fallait !*

Le titre original « It's about time » est basé sur un double sens. En anglais, il peut se lire de deux façons différentes : « Il était temps » ou « C'est une question de temps ».

PRÉFACE

Si l'importance d'une discipline scientifique peut se mesurer par les références dans la culture populaire, les théories de la relativité (la relativité restreinte et la relativité générale) occupent une place très privilégiée dans l'imaginaire collectif. Voyages dans le temps, trous noirs, espace-temps, antimatière, « $E = mc^2$ », toutes ces expressions résonnent aujourd'hui de façon familière, même aux oreilles de publics peu sensibilisés à la physique, au moins autant grâce aux films, séries et livres de science-fiction ou de vulgarisation que par l'enseignement scolaire. Une des raisons en est probablement que ces théories révolutionnent notre façon de concevoir le temps, notion – préoccupation – universelle par excellence.

La relativité restreinte est aujourd'hui enseignée au lycée, dans le but de ne pas laisser des bacheliers scientifiques n'avoir jamais entendu parler de cette théorie pendant leur scolarité. Si l'on tente de formuler cet objectif de façon positive, la question se pose de savoir ce qu'on veut que ces bacheliers aient compris exactement. David Mermin se la posait déjà lorsqu'il tentait d'intégrer la relativité dans les programmes de « High School » aux États-Unis à la fin des années 1960 mais rien ne laisse penser que les leçons qu'il en avait tirées aient été vraiment entendues ni comprises depuis.

En effet, les programmes actuels laissent très peu de place à la présentation de notions fondamentales qui permettraient aux lycéens de comprendre comment la relativité nous demande de revoir notre façon de concevoir l'espace et le temps, au-delà d'un « le temps s'écoule moins vite pour un observateur en mouvement » qui au mieux n'a aucun sens, au pire est un contresens total.

Pourtant, l'idée d'introduire la relativité restreinte dès le lycée semble excellente : le formalisme mathématique est remarquablement simple et les raisonnements obligent à une grande rigueur dans la logique et le langage, dans le vocabulaire et l'articulation des phrases, autant de compétences précieuses pour les jeunes étudiants. La plupart des paradoxes relativistes — car ceux-ci font très rapidement leur apparition lorsqu'on se penche sur les principes de la relativité restreinte — perdent leur substance lorsqu'on les énonce de façon claire et précise, sans tenter de prendre des raccourcis de vocabulaire.

L'acquisition de ces compétences demande de la patience, de la part de l'élève, de la part des enseignants, et de la part des institutions qui veillent à l'équilibre et à la profondeur des programmes scolaires. L'immense mérite de « It's About Time » de David Mermin, c'est de prendre le temps d'aborder les difficultés une par une en dévoilant le caractère profond de certaines d'entre elles. On réalise rapidement que nombre de ces difficultés étaient déjà présentes en physique classique, mais que des raccourcis de langage ou le recours à l'intuition nous les avaient masquées. Le premier chapitre sur le principe de relativité galiléenne et ses conséquences sur les propriétés des chocs est à ce titre absolument remarquable.

Enfin, et c'est un point qui peine à imprégner la culture scientifique populaire, rappelons que la relativité restreinte n'est pas un simple jeu de l'esprit, réservé aux physiciens et à quelques geeks en mal d'intellectuelles sensations fortes. Elle décrit le monde dans lequel nous vivons. Lorsque nos conceptions intuitives sont en conflit avec certaines de ses prédictions, il faut questionner notre

intuition autant que la théorie. Il se trouve que les tests expérimentaux valident toujours la théorie d'Einstein et non notre intuition, lorsqu'elles sont en conflit. L'ouvrage, au-delà de la belle leçon de physique, alimentera chez le lecteur de tout âge de riches réflexions sur la nature du savoir scientifique. Il était temps, pour reprendre le jeu de mots de son titre original, qu'il soit mis à la disposition des lecteurs francophones !

Richard Taillet

SOMMAIRE

<i>Préface</i>	7
<i>Avant-propos</i>	13
<i>Avis aux lecteurs</i>	21
1. Le principe de relativité.....	25
2. Combiner des (petites) vitesses	45
3. La vitesse de la lumière	53
4. Combiner (toutes) les vitesses	69
5. Des événements simultanés et des horloges synchronisées.....	93
6. Une horloge en mouvement ralentit et une règle en mouvement raccourcit.....	111
Règle des horloges synchronisées	126
Règle de contraction des règles ou de ralentissement des horloges en mouvement.....	126
7. Regarder une horloge en mouvement	135
8. L'intervalle entre deux événements	145
9. Des trains de fusées	159
10. La géométrie de l'espace-temps.....	176
11. $E = Mc^2$	233
12. Un peu de relativité générale	263
13. Quel est le « mécanisme » à l'œuvre ?	285

AVANT-PROPOS

« *Le temps absolu, vrai et mathématique, sans relation à rien d'extérieur, coule uniformément.* »

Isaac Newton

« *Mon temps est ton temps.* »

Rudy Vallée

« *Il me vint à l'esprit que le temps était suspect !* »

Albert Einstein

L'année 2005 est le centenaire de la publication de la théorie de la relativité restreinte par Einstein. Quarante années plus tôt, pendant l'année du 60^e anniversaire, je décidai, en tant que jeune professeur assistant de physique à l'université de Cornell (Ithaca, État de New York), que le moment était venu d'introduire la relativité restreinte dans les programmes du lycée. Il est possible de le faire à partir de notions simples d'algèbre et de géométrie plane élémentaire qui, aussi étonnant que cela puisse paraître, sont les seuls outils mathématiques requis pour arriver à une compréhension totale du sujet. C'est ainsi que j'ai commencé à donner des cours de relativité

restreinte à un groupe de professeurs de lycée qui ont eu l'air de bien les apprécier.

La relativité est un sujet d'étude idéal pour le lycée, non seulement parce qu'elle offre une application surprenante des concepts de base des mathématiques faites au lycée, mais aussi parce que tout le monde connaît intimement le sujet. La relativité est une question de temps. Que pourrait-il y avoir de plus familier que le temps ? Ce qui rend le sujet si fascinant, c'est que la relativité est une remise en question radicale de notre conception de la nature du temps, elle a balayé en 1905 tout ce que les gens considéraient comme allant de soi à propos du temps. Par exemple, nous savons maintenant que la première des deux citations qui ouvre la préface est fausse. Comprendre pourquoi Newton et Vallée ont tous deux tort sur la question du temps doit faire partie du bagage intellectuel de tout un chacun. La troisième citation, qui est un admirable résumé de la clé du mystère qui a défié les physiciens du début du xx^e siècle, provient du récit d'une conversation privée¹ avec Einstein vers la fin de sa vie.

Malgré toutes ces bonnes raisons, au cours des quatre dernières décennies, la relativité restreinte n'a jamais été introduite au lycée dans les programmes scolaires². La seule chose qui reste de mon combat chimérique est un livre écrit en 1968, *Space and Time in Special Relativity*, qui est encore publié actuellement. Mon idée était d'écrire ce livre pour des lycéens, cependant, au cours des trois dernières et demie qui ont suivi sa publication, il n'a quasiment jamais fait d'apparition dans les lycées. Pour ma part, je l'ai utilisé dans les cours de relativité restreinte que j'ai donnés épisodiquement à des étudiants de premier cycle de l'université de Cornell durant les trente dernières années.

1. R. S. Shankland, "Conversations with Albert Einstein", *American Journal of Physics* 31 (1963) : 47-57.

2. NDT : En France, la relativité restreinte a fait son entrée dans le programme de sciences physiques de terminale S en 2012 (seule la dilatation du temps est abordée).

Au fil des ans, en intervenant sur le sujet devant les étudiants, je suis devenu de plus en plus insatisfait de mon propre livre. Tout en continuant à le préférer aux autres présentations de niveau mathématique comparable, j'ai fini par le considérer comme le meilleur choix parmi un étalage de choses imparfaites. Pendant les années 1990, j'ai même cessé de le recommander en tant que lecture pour m'appuyer davantage sur des notes de cours que j'étais spécialement en train d'écrire à l'intention de mes étudiants non scientifiques de Cornell. Tout au long de cette décennie, ces notes furent un véritable chantier permanent, continuellement réorganisées et révisées en fonction des nouvelles difficultés rencontrées et en réaction aux incompréhensions émergeant des innombrables conversations que j'ai pu avoir avec des étudiants brillants mais souvent perplexes.

Quarante années se sont écoulées et le professeur assistant visionnaire d'alors est aujourd'hui sur le point de prendre sa retraite et ce nouveau livre sur la relativité s'est construit autour de l'état présent de mes notes de cours. Il ne fait aucun doute que ces notes auraient pu être encore améliorées si j'avais continué à bénéficier de la stimulation des étudiants de Cornell, prodigieusement brillants, spontanés et sceptiques, sans qui elles n'auraient pas évolué jusqu'à leur forme actuelle. Sans l'aiguillon que constitue cette source d'inspiration et de surprises, tout bricolage ultérieur sur ces notes a autant de chances de les améliorer que de les détériorer. Il est donc temps de les transformer en un nouveau livre.

Entre 1968 et 2005, j'ai beaucoup appris sur la manière d'aborder l'enseignement de la relativité restreinte. Une découverte pédagogique m'a particulièrement été utile. Toute personne qui souhaite comprendre le sujet doit être capable de visualiser comment certains événements qui se produisent, par exemple sur le quai d'une gare, seront décrits par le passager d'un train qui traverse cette gare à vitesse constante, et réciproquement comment des événements qui se produisent dans le train seraient décrits par une personne située sur

le quai de la gare. Sans cette faculté de pouvoir passer d'une description à l'autre, on ne peut pas envisager de comprendre la relativité. Alors que dans toutes les introductions à la relativité que je connaisse, c'est valable aussi pour mon livre de 1968, on fait comme si tout le monde possédait cette faculté. On exige immédiatement du lecteur qu'il applique à des phénomènes hautement contre-intuitifs cette capacité peu développée, inhabituelle et souvent inexistante.

Lorsqu'on enseigne la relativité, ces changements de point de vue mènent souvent à deux descriptions qui semblent, au premier abord, se contredire. Face à ces paradoxes apparents, les gens qui ne se sont jamais entraînés à passer d'une description depuis la gare à une description depuis le train – et réciproquement – se disent tout naturellement qu'ils ont fait une erreur de transcription. Et au lieu de chercher à comprendre pourquoi cette contradiction n'est qu'apparente, ils perdent confiance dans la méthode d'analyse qui a abouti à ce résultat.

À ce propos, l'approche pédagogique habituelle de la relativité est épouvantable. On introduit un concept technique essentiel et non familier (passer de la description d'un « référentiel » à un autre), en l'appliquant immédiatement à des cas inhabituels et hautement contre-intuitifs. La chose la plus importante que j'ai apprise en enseignant la relativité à de nombreuses générations d'étudiants de premier cycle à Cornell, dont aucun ne suivait d'études purement scientifiques, c'est qu'il faut commencer par inculquer cette technique de changement de référentiel en l'appliquant à des cas tout à fait familiers et très intuitifs. Les méthodes pour développer ces capacités ne manquent pas et elles permettent de s'entraîner sur des situations qui peuvent être complexes, mais dont les résultats ne semblent jamais paradoxaux. C'est l'objet du chapitre 1 de ce livre où nous examinerons quelques situations simples de collisions entre objets. Bien que ces phénomènes non relativistes ne fassent jamais partie des préliminaires des présentations conventionnelles de la relativité, je suis maintenant convaincu qu'il est essentiel de les

aborder lorsqu'on présente le sujet à des personnes n'ayant aucune formation scientifique, si nous voulons qu'ils comprennent ce qui va suivre. Commencer une introduction à la relativité par une étude de quelques collisions simples présente un deuxième avantage, car on peut ensuite mettre à profit ces situations pour expliquer la formule $E = mc^2$.

Ce que j'ai également appris depuis 1968, c'est qu'il est primordial d'insister le plus tôt possible sur le fait que, bien que les objets allant à la vitesse de la lumière aient la réputation de se comporter de manière très étrange, le comportement d'objets allant à des vitesses comparables à celle de la lumière est tout aussi bizarre. La spécificité du mouvement à la vitesse de la lumière n'est qu'un cas particulier d'une propriété plus générale, valable pour tout mouvement, mais dont l'importance ne se manifeste qu'à des vitesses extrêmes. Cette propriété plus générale peut s'exprimer sous la forme d'une règle simple mais quantitative, qu'il est possible et même utile de formuler assez rapidement. C'est ce que je fais dans le chapitre 4 en utilisant une expérience de pensée étonnamment simple qui apparaît comme un devoir à la maison dans mon livre de 1968. Quand j'ai réalisé que personne n'avait jamais vraiment remarqué cette démonstration, j'ai publié ce devoir à la maison et sa solution dans l'*American Journal of Physics* (1983). Dès lors, il m'est apparu clairement que le sujet de ce devoir à la maison pouvait jouer un rôle pédagogique important dans le développement de la relativité. Chacun peut prendre conscience que le rôle primordial que semble jouer la lumière dans les nombreuses expériences de pensée utilisées dans l'investigation de la nature du temps n'est pas indispensable. À la place, il est tout à fait possible d'utiliser le déplacement rectiligne uniforme de n'importe quel autre objet pour transmettre des signaux d'un endroit à l'autre de l'espace.

Un aspect plus conventionnel de la présentation qui va suivre est la place qui est réservée à une question dont l'importance a été comprise dès le départ par Einstein, mais qui a eu tendance à être

minimisée dans les exposés ultérieurs de la relativité restreinte, y compris dans mon livre de 1968. Il s'agit du caractère totalement conventionnel de l'affirmation que deux événements qui se produisent en deux lieux différents sont simultanés. Le fait qu'on ne puisse attribuer aucune signification absolue à la simultanéité de deux événements éloignés est la plus importante leçon que nous enseigne la relativité et cette notion doit inévitablement apparaître dans n'importe quelle introduction sur le sujet. Mais en 1968, je l'ai introduite comme une conséquence secondaire d'autres propriétés au lieu d'insister sur le rôle fondamental qu'elle joue pour expliquer presque tous les autres aspects de la théorie. Dans le livre présent, la question du caractère conventionnel de la simultanéité est introduite dès les premiers chapitres avec une formulation quantitative, concise et facile à retenir qui lui permet de jouer un rôle central dans la clarification de tout ce qui suit.

Une autre innovation dans le livre est mon traitement des diagrammes d'espace-temps inventés par Minkowski dans la foulée de la publication de la théorie. Ils jouent un rôle important en reliant ensemble tous les aspects de façon visuelle et intuitive sans faire appel à des équations compliquées. Dans mon livre de 1968, ces diagrammes apparaissent dans un cadre plutôt conventionnel dans lequel les axes des coordonnées d'espace-temps jouent un rôle fondamental dans la description des événements, et (ce qui est moins conventionnel) j'utilise des relations trigonométriques pour en extraire des informations importantes. Une vingtaine d'années après cela, j'ai réalisé que ces axes ne sont qu'une distraction inutile et potentiellement déroutante et que toute cette trigonométrie qui alourdit parfois ma présentation passée peut être remplacée avantageusement par de la géométrie plane très simple où il suffit généralement de comparer différents assemblages de triangles analogues. À ma connaissance, cette approche des diagrammes d'espace-temps qui permet très facilement de les établir directement à partir des deux principes d'Einstein n'était

C'est ce procédé qui consiste à prendre conscience de l'imperfection des idées anciennes, de rechercher scrupuleusement les vieilles erreurs pour les remplacer par des hypothèses plus solides, qui rend la recherche scientifique si captivante. Le monde serait un endroit bien plus agréable à vivre si le plaisir de mettre en avant ses propres idées fausses était plus répandu dans d'autres secteurs de l'activité humaine.

