

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 destinées 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 fautive. 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 décennies 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

jamais apparue auparavant dans aucun livre ni même dans la littérature scientifique avant que je n'en fasse état il y a quelques années dans l'*American Journal of Physics* (1997 et 1998). Les diagrammes d'espace-temps, comme je les présente ici, sont à la présentation conventionnelle des diagrammes d'espace-temps ce que la géométrie plane d'Euclide est à la géométrie analytique de Descartes. La géométrie analytique est l'outil le plus puissant pour les calculs professionnels, mais l'approche d'Euclide est essentielle à une compréhension profonde.

Un aspect inhabituel de mon livre de 1968 consistait en une approche alternative, moins puissante mais aussi moins abstraite que les diagrammes d'espace-temps, basée sur quelques images de deux trains en mouvement relatif montrant comment les deux trains se présenteraient aux passagers de l'un d'entre eux. Une dizaine d'années plus tard, il m'est apparu que cette présentation pouvait être faite de façon beaucoup plus simple et beaucoup plus puissante en montrant chaque train non pas du point de vue de l'autre, mais du point de vue d'une plate-forme par rapport à laquelle ils se déplaceraient en sens inverse à la même vitesse. La présentation selon cette approche optimale constitue l'objet du chapitre 9.

Et pour clore l'inventaire des avancées pédagogiques proposées dans ce présent travail, il me reste à mentionner Alice et Bob. Ces personnages sont devenus, depuis quelques décennies, les protagonistes traditionnels des histoires qu'on se raconte en cryptologie. J'ai fait leur connaissance dans les années 1990 quand je me suis intéressé au développement des nouvelles applications de la physique quantique au traitement de l'information, j'ai alors réalisé qu'ils avaient un rôle nouveau et important à jouer dans la présentation de la relativité restreinte. Ce n'est pas juste parce qu'il est beaucoup plus agréable de parler d'Alice et de Bob que du « référentiel A » ou du « référentiel B ». C'est surtout parce que chacun d'eux est associé à un jeu complet de pronoms de genre différent (au moins dans les langues européennes), ce qui permet au récit d'être familier et informel sans

que l'exigence de précision ne vienne alourdir les phrases. Ils jouent un rôle central dans ce livre (et de manière occasionnelle, leurs amis Charles, Carol, Dick et Ève) et si ce livre n'atteint pas son objectif de vulgarisation de la relativité restreinte, j'espère au moins qu'il ouvrira la voie à des apparitions plus nombreuses des personnages d'Alice et de Bob dans l'arène relativiste.

AVIS AUX LECTEURS

Même si ce livre demande peu de connaissances mathématiques – géométrie plane élémentaire et algèbre de base du lycée –, il ne peut pas être lu comme un roman. J’ai essayé de suivre scrupuleusement la règle communément attribuée à Einstein qui veut que la présentation soit aussi simple que possible, mais pas plus simple que cela. Il vous sera par conséquent souvent nécessaire de faire une pause pour comprendre un point délicat, examiner une figure, analyser la relation avec le texte qui l’accompagne et, plus généralement, de vérifier activement par des allers-retours si vous avez saisi chaque avancée du raisonnement plutôt que de faire une lecture passive et linéaire.

J’ai écrit ce livre à l’intention de lecteurs pouvant avoir différents types de formations. Je l’ai écrit en premier lieu pour des gens qui n’avaient aucune formation particulière en physique ni en mathématiques au-delà de notions élémentaires de géométrie et d’algèbre. La démarche que je propose contient des éléments novateurs, elle est plus terre-à-terre et plus intuitive que les méthodes traditionnelles de niveau comparable qui servent habituellement à former les physiciens. C’est pourquoi j’espère que les étudiants en physique (de premier cycle et au-delà) et même des utilisateurs professionnels de

la relativité pourront trouver ici ou là des choses intéressantes malgré le niveau élémentaire scrupuleusement respecté.

Spécialement pour ce deuxième groupe de lecteurs potentiels, par endroits, vers la fin de certains chapitres, je vais plus loin dans le sujet que ce qui serait strictement nécessaire pour mon premier groupe de lecteurs. Ces prolongements sont conçus de façon à ne pas dépasser le niveau mathématique général de ce livre. Au fur et à mesure que vous avancez dans un chapitre, si à un moment donné vous trouvez que cela devient trop difficile, je vous conseille de passer au chapitre suivant. Il y a de grandes chances que tout ce que vous avez sauté, même si en soi cela avait un intérêt, ne jouera pas un grand rôle dans le développement qui suit. Si jamais ce n'est pas le cas – si vous tombez sur des références récurrentes aux sections que vous avez sautées – alors et seulement dans ce cas, il vous faudra revenir en arrière et batailler pour passer à travers la difficulté qui vous sera utile pour comprendre la suite. Je ne recommande pas une lecture en picorant le contenu de manière aléatoire, comme on pourrait le faire avec un mode d'emploi, cependant il n'est pas nécessaire de le lire en respectant forcément l'ordre des chapitres.

En guise d'exemples de sujets « facultatifs » qui pourraient décourager certains lecteurs, je mentionnerais les applications de la loi relativiste de composition des vitesses aux collisions à la fin du chapitre 4, la démonstration de la loi des événements simultanés en utilisant des signaux moins rapides que la lumière à la fin du chapitre 5, la méthode de synchronisation des horloges par transport direct des horloges à la fin du chapitre 6, la discussion à la fin du chapitre 10 sur les relations entre les coefficients d'échelle des différents référentiels, les conséquences de tout cela sur l'intervalle invariant et les diverses applications des lois de conservation relativistes à la fin du chapitre 11. J'ai séparé ces sections du reste de leur chapitre par un paragraphe écrit en petits caractères qui résume leur contenu. Même si elles peuvent être sautées sans perdre le fil de la progression du livre, je ne vous encourage pas à les ignorer parce qu'elles contiennent des

aspects de la relativité très intéressants et traités de la manière la plus simple que je connaisse. Mais ces sections peuvent parfaitement être sautées sans que cela nuise à la compréhension de la nature du temps révélée par la théorie.

1

Le principe de relativité

La théorie de la relativité restreinte a été publiée par Einstein en 1905 dans son article « Sur l'électrodynamique des corps en mouvement¹ ». L'adjectif « restreinte » permet de la distinguer de la relativité générale, théorie achevée dix ans plus tard par Einstein, qui englobe la gravitation. Dans ce livre, mis à part le chapitre 12 où il est question de relativité générale, nous nous préoccuperons uniquement de relativité restreinte. Dans la suite, je n'utiliserai pas le mot « restreinte » puisque c'est d'elle dont il sera forcément question.

Einstein a basé sa théorie de la relativité sur deux postulats. Le premier est aujourd'hui appelé le principe de relativité. Le second sera traité plus en détail dans le chapitre 3. Einstein a formulé son principe de relativité de la façon suivante : « Dans le domaine de la mécanique comme dans celui de l'électromagnétisme, il n'existe aucun phénomène dont les propriétés accréditent le concept de repos

1. A. Einstein, "Zur Elektrodynamik bewegter Körper", *Annalen der Physik* 17 (1905) : 891-921.

absolu. » Il aurait tout aussi bien pu le formuler d'une manière plus brève et plus générale : « Il n'existe aucun phénomène dont les propriétés accréditent le concept de repos absolu. »

Einstein prend la peine de préciser électromagnétisme et mécanique, car le principe de relativité était communément admis, depuis longtemps déjà, dans le domaine de la mécanique. Il a d'abord été énoncé par Galilée trois siècles plus tôt et il constitue un des fondements de la mécanique classique de Newton. Mais en 1905, il régnait une grande confusion sur la question de la validité de ce principe dans le domaine de l'électromagnétisme. Le titre un peu particulier de l'article d'Einstein s'explique par sa volonté d'insister sur la validité générale de ce principe à la fois dans le domaine de la mécanique et dans celui de l'électromagnétisme. Einstein n'a pas explicitement indiqué que le principe de relativité s'applique à tous les phénomènes, car en 1905 on croyait encore que la mécanique (avec la gravité, souvent considérée à l'époque comme une partie de la mécanique) et l'électromagnétisme englobaient à eux seuls tous les phénomènes de la nature. Aujourd'hui, nous savons qu'il y a d'autres types de phénomènes (précisés au chapitre 13) et nous sommes convaincus que le principe de relativité s'applique à tous les phénomènes sans exception.

Dans ce chapitre, nous expliquerons le principe de relativité avec plus de détails que dans la formulation très concise d'Einstein et ensuite nous verrons comment ce principe peut être utilisé pour prévoir l'issue de quelques situations simples, mais pas forcément évidentes.

La recherche d'une formulation très rigoureuse de ce principe soulève des problèmes conceptuels très subtils. Nous les mentionnerons au passage, mais nous éviterons à tout prix de perdre du temps à les décortiquer. Ce serait sans doute très divertissant de mener une telle étude philosophique, mais cette distraction serait superflue et parfaitement inutile à la réussite de notre objectif, qui est de bâtir un système de pensée capable de nous aider à comprendre la relativité.

Ce qui importe avant tout, c'est d'apprendre à *manier* ce principe pour se doter d'un outil pratique destiné à élargir notre compréhension du comportement des objets en mouvement. Au début, l'utilisation du principe de relativité pourra nous sembler un peu étrange, mais il faudra apprendre à l'appliquer sans se noyer dans des difficultés métaphysiques qui peuvent se présenter lorsqu'on cherche à comprendre les choses en profondeur. Pour bien comprendre les conséquences prodigieuses et contre-intuitives des applications directes du principe de relativité dans la théorie d'Einstein, il est essentiel de commencer par apprendre à l'appliquer dans des cas plus simples, moins déroutants.

Le principe de relativité est un exemple de principe d'invariance. Il y a plusieurs autres principes de ce type. Ils commencent tous par la phrase « Toutes choses égales par ailleurs », puis ils se poursuivent par :

1°) Quel que soit l'endroit où vous êtes (principe d'invariance par translation dans l'espace) ;

2°) Quel que soit l'instant que vous considérez (principe d'invariance par translation dans le temps) ;

3°) Quelle que soit l'orientation que vous choisissez dans l'espace (principe d'invariance vis-à-vis de la rotation).

Le principe de relativité obéit également à ce modèle : *Toutes choses égales par ailleurs*,

4°) Quelle que soit la vitesse à laquelle vous vous déplacez à condition qu'elle reste constante et que votre chemin suive une ligne droite (principe de relativité).

« Quel(le) que soit » signifie « les lois qui décrivent les phénomènes naturels sont les mêmes ». Par exemple, la loi qui décrit la force de gravité de Newton entre deux corps matériels est la même s'ils se trouvent dans une certaine galaxie ou dans une autre (invariance par translation dans l'espace). Cette force est la même aujourd'hui que des millions d'années auparavant (invariance par translation dans le temps). La loi n'est pas modifiée si un des corps est à l'est au lieu d'être

au nord de l'autre (invariance vis-à-vis de la rotation dans l'espace). La loi ne doit pas non plus être modifiée si on mesure la force entre deux corps placés dans une gare au lieu d'être placés dans un train en mouvement rectiligne uniforme (principe de relativité).

L'expression « toutes choses égales par ailleurs » soulève de profondes questions. Dans le cas de l'invariance par translation, cela signifie que quand vous déplacez votre expérience vers un nouvel endroit ou vers un nouvel instant, vous devez reproduire tous les autres facteurs qui semblent avoir une influence et, dans le cas de l'invariance vis-à-vis de la rotation, vous devez tourner tout ce qui peut avoir une influence. Dans le cas du principe de relativité, vous devez mettre en mouvement tout ce qui peut avoir une influence. Si jamais tout ce qui a une influence correspond, finalement, à l'univers tout entier, vous pouvez vous demander, à raison, quelle peut bien être l'utilité de ce principe.

Si nous faisons un pas de plus, nous risquons de sombrer rapidement dans des abysses métaphysiques d'où beaucoup ne ressortiront pas. Ne suivons donc pas ce chemin. Intéressons-nous à la manipulation concrète d'un tel principe dans des situations qui, d'habitude, ne posent aucun problème. Dans ces cas-là, il est assez facile d'identifier le petit nombre de facteurs qui doivent rester les mêmes et il n'en faut pas davantage pour que cela fonctionne. Si jamais le principe ne fonctionne pas, alors un facteur qu'on a oublié de considérer et qui a de l'importance finira forcément par apparaître. Cette démarche permet non seulement de régler au coup par coup les problèmes rencontrés, mais aussi d'apprendre des choses nouvelles sur la nature puisqu'elle permet de transposer des conclusions dans des contextes différents. Si, par exemple, l'immobilité de l'air était un facteur important dans une expérience que vous avez menée dans une gare, il faudra alors absolument vous assurer que le wagon roulant sur des rails rectilignes à vitesse constante dans lequel vous reproduisez cette expérience ne soit pas être ouvert aux quatre vents : tous les autres facteurs doivent agir de manière identique.

Les principes d'invariance sont très utiles parce qu'ils nous permettent d'étendre le champ de la connaissance à des situations nouvelles. C'est dans cet esprit que nous nous saisissons du principe de relativité, en restant dans le domaine du concret. Ce principe soutient qu'il n'existe aucune expérience qui nous permette de distinguer l'état de repos de l'état de mouvement rectiligne uniforme. Toute série d'expériences effectuées dans un laboratoire que l'on considère au repos doit donner exactement les mêmes résultats que la série correspondante d'expériences menées dans un laboratoire qui se déplace en mouvement rectiligne uniforme par rapport au premier. Les résultats que nous obtenons dans la nouvelle situation en faisant des expériences dans un laboratoire en mouvement rectiligne uniforme peuvent donc être déduits des résultats que nous avons trouvés dans l'ancienne situation où les expériences étaient menées dans un laboratoire au repos.

Il est important de bien comprendre la signification de ce principe et, en même temps, de se familiariser à son utilisation pratique qui consiste à transposer des connaissances d'une situation à l'autre. Mais en évitant de s'embourber à nouveau dans des questions trop pointues. Qu'entend-on réellement par « au repos » ou par « mouvement rectiligne uniforme » ? Restons dans le concret : un mouvement rectiligne uniforme signifie se déplacer avec une vitesse constante le long d'une direction fixe. On peut le formuler de façon plus concise en disant qu'on se déplace avec un vecteur vitesse constant. Le « vecteur vitesse » englobe à la fois la vitesse et la direction du mouvement. Deux bateaux se déplaçant à 15 pieds/seconde (pi/s), l'un allant vers le nord et l'autre vers l'est, ont la même vitesse, mais un vecteur vitesse différent. Permettez-moi une rapide digression pour faire remarquer que le pied est une unité de distance utilisée dans certains pays anglophones et qui vaut 30,48 cm. Pour le propos de ce livre, il sera très utile de redéfinir le pied et de le raccourcir légèrement par rapport au *foot* anglais pour que sa taille soit un peu plus petite que 30 cm (ou plus précisément 29,9792458 cm – 98,36 % du *foot* anglais). Nous verrons dans le chapitre 3 en quoi cette redéfinition nous sera utile.

Quand on considère des objets en mouvement le long d'une droite, il peut être utile d'orienter cette droite en fixant un sens positif et un sens négatif : ainsi, en fonction de la convention choisie, un même mouvement peut correspondre soit à une vitesse de -10 pi/s vers l'est soit à une vitesse de $+10$ pi/s vers l'ouest. Il faut noter également que dans la définition du mouvement rectiligne uniforme, le maintien d'une direction fixe est aussi important que le maintien d'une vitesse constante : le principe de relativité ne s'applique pas à un objet qui se déplace à vitesse constante sur une trajectoire circulaire.

Il est impossible de confondre les mouvements rectilignes uniformes ou l'état de repos avec les autres mouvements. Pour les passagers, les sensations à bord d'un avion qui vole paisiblement en ligne droite et à vitesse constante ne sont pas du tout les mêmes que lorsque l'avion traverse soudainement une zone de turbulences. Il en va de même si on compare les sensations dans une voiture en mouvement rectiligne uniforme avec celles ressenties dans une voiture en phase d'accélération ou dans un virage très serré ou sur une route avec des nids de poule ou pendant un freinage brutal. Par contre, le ressenti est exactement le même (si on ne regarde pas par la fenêtre) dans un avion qui vole paisiblement dans l'air à 900 km/h et dans un avion à l'arrêt devant l'aérogare.

Quand on applique le principe de relativité, on utilise le terme *référentiel*. Un référentiel est le système sur lequel vous choisissez de vous placer pour décrire les événements. Imaginons qu'une hôtesse de l'air marche vers l'avant de l'avion à 4 km/h dans le référentiel de l'avion. Vous partez de l'arrière de l'avion dans l'intention de la rattraper et pour cela, vous imprimez à votre marche une allure de 6 km/h dans le référentiel de l'avion. Si l'avion vole à 900 km/h alors, dans le référentiel lié au sol, cette situation serait décrite de la manière suivante : l'hôtesse de l'air se déplace vers l'avant à 904 km/h et vous la rattrapez, car votre vitesse est de 906 km/h. Un des aspects remarquables à propos du principe de relativité, c'est la possibilité qu'il nous donne de changer de point de vue et d'apprendre des choses même dans des situations relativement banales.