

Lumière et relativité.

Jean Eisenstaedt,

SYRTE, Observatoire de Paris, CNRS, UPMC ; 61 avenue de l'Observatoire, 75014 Paris, France.

L'optique du 19^e siècle est complexe et prépare mal à la relativité. Elle y est même en quelque sorte opposée car les théories de l'éther ne sont pas compatibles avec le principe de relativité. Il n'est donc pas surprenant que des difficultés pédagogiques – et c'est un euphémisme – se soient révélées, non seulement chez les étudiants mais aussi chez les physiciens eux-mêmes. Cette mutation est loin d'être accomplie aujourd'hui. La révolution einsteinienne a plus d'un siècle, mais elle n'est pas encore vraiment entrée dans les esprits ni dans beaucoup de manuels.

J'insisterai avant tout sur ces questions sans pouvoir en développer ici les théories ni les observations et expériences, complexes et souvent obscures. Ce n'est pas ici le lieu de reprendre en détail le cheminement sinueux, incertain de l'histoire et des théories de la lumière. Mais de proposer une sorte de schéma entre histoire et concepts.

Les questions essentielles.

Après que Römer ait montré en 1676 que la vitesse de lumière était finie, la question n'intéresse guère avant les travaux d'Arago au tout début du 19^e siècle. Arago qui pose en fait toutes les bonnes questions, sans en trouver bien sûr l'issue.

Le point essentiel c'est que la constance de la vitesse de propagation de la lumière est toujours « vérifiée » mais toujours problématique car incompatible :

- avec le « théorème » de l'addition galiléenne des vitesses de la source et de l'observateur terrestre.
- avec l'aberration qui exige à la fois la constance de la vitesse de la lumière et la prise en compte de la vitesse de la Terre.
- avec l'effet Doppler-Fizeau pour la lumière (incomprise par Doppler) qui impose que l'on tienne compte de la vitesse de la source aussi bien que de celle de la Terre.

Aucune des deux grandes théories, la théorie newtonienne de l'émission au 18^e siècle, les théories ondulatoires de Fresnel, Maxwell ou Lorentz au 19^e siècle ne donneront satisfaction.

Il faudra attendre 1905 et la cinématique relativiste, la théorie de la relativité restreinte d'Einstein pour que tous ces problèmes trouvent une solution cohérente.

La relativité restreinte a assez vite été acceptée par les physiciens théoriciens. Mais, parce qu'elle met en cause l'espace et le temps pour les fondre en un

espace-temps, son interprétation a posé de délicats problèmes conceptuels. Le paradoxe des jumeaux en est le paradigme. On ne s'étonnera pas que ces problèmes se soient exprimés d'une manière encore plus forte en relativité générale dont l'interprétation ne s'éclaircira que peu à peu, en particulier grâce aux travaux de Minkowski. La « générale » permettra la clarification des concepts de la « restreinte ». C'est pourquoi nous nous attacherons à en poser les bases qui simplifient les concepts fondamentaux des relativités et notre manière de voir pourvu que l'on veuille bien faire son deuil des concepts newtoniens, ce qui n'est pas le plus simple...

La lumière de Galilée à Einstein.

Revenons-en à Galilée-Descartes-Newton. Au principe d'inertie et à l'addition des vitesses. Le principe d'inertie est basé sur le concept d'état. Le mouvement rectiligne uniforme est un état qui ne diffère pas de l'état de repos. Tous ces états sont équivalents pour les lois de la physique.

Le principe d'inertie, principe de relativité, le théorème de composition des vitesses - qui se démontre à partir des concepts newtoniens et donc euclidiens - sont à la base des théories galiléo-newtonienne, aussi bien quant à la cinématique qu'à la dynamique des corps en mouvement jusqu'au début du 20^e siècle.

Deux théories s'affrontent au 18^e siècle quant à la lumière : la théorie ondulatoire de la lumière et la théorie (corpusculaire) de l'émission qui, dans le droit fil newtonien, dominera jusqu'au début du 19^e siècle.

La théorie de l'émission consiste essentiellement en l'application à la lumière de la cinématique ainsi que de la dynamique newtonienne des corps matériels. La lumière est vue comme un corpuscule

lumineux qui est sujet aux mêmes lois qu'un corpuscule matériel ; sa propagation en ligne droite ne pose pas problème. À longue portée elle est sujette à la cinématique des corps matériels, et, pour de nombreux auteurs, à la gravitation. À courte portée elle s'appuie sur la théorie corpusculaire de Newton en tant qu'elle rend compte, - grâce à la loi des sinus - de la réfraction par exemple sur un prisme : l'angle de réfraction est inversement proportionnel à la vitesse de la lumière incidente. La théorie de l'émission implique aussi que la vitesse de la lumière est plus grande dans un milieu plus dense, dans l'eau que dans l'air, un point qui signera, au milieu du 19^e siècle, sa défaite face à la théorie ondulatoire.

Mais vu que la vitesse de propagation de la lumière obéit au principe de relativité, ce que l'on ne peut refuser dans un contexte newtonien, elle s'ajoute vectoriellement à la vitesse relative étoile-observateur. Par ailleurs, depuis John Michell, (Angleterre 1724-1793) Georg von Soldner (Prusse/Allemagne 1776-1833), et bien d'autres auteurs, on soutient parfois que la lumière doit être sensible à la gravitation. Une hypothèse que retiendra Arago qui s'intéresse de près, dès le début du 19^e siècle, aux équations de la propagation de la lumière. Pour Arago la vitesse de propagation de la lumière (en module) dans le vide ne peut être constante. Il reprend alors, de John Michell, de Robert Blair, l'idée selon laquelle une mesure de réfraction, par exemple sur un prisme, permet de mesurer la vitesse de la lumière. On pourra donc en déduire la vitesse relative à l'observateur de la lumière provenant de sources en mouvement. C'est bien sûr là l'essence de l'effet que Christian Doppler comprendra pour le son, qu'Armand-Hippolyte Fizeau explicitera pour la lumière (ce que n'avait aucunement fait Doppler) l'élaborant d'ailleurs parallèlement dans le contexte de la théorie ondulatoire.

Arago se servira d'un prisme pour mesurer la vitesse - en module - de la lumière et il s'attendra à trouver des inégalités de réfraction, inégalités qui devraient témoigner du mouvement de la Terre, des planètes, des étoiles. Mais l'angle de réfraction demeure constant, ce qu'Arago a bien du mal à comprendre, ne pouvant penser que la théorie de Newton serait là en défaut. Ainsi pose-t-il, au tout début du 19^e siècle, (mais après Robert Blair sur lequel il s'appuie), la question de l'optique des corps en mouvement d'une manière cohérente avec le principe de relativité et l'addition des vitesses. L'article d'Arago, méconnu, longtemps mal

interprété, ne sera pas publié avant le milieu du siècle.

Venons-en à l'aberration, découverte en 1728 par James Bradley. L'image d'une étoile vue par un observateur terrestre semble décrire une ellipse liée au mouvement de la Terre autour du Soleil. C'est là une observation fondamentale en tant qu'elle exhibe la vision copernicienne. D'autre part la théorie de Bradley montre que l'angle d'aberration est en v/c où v est la vitesse relative de l'étoile émettrice par rapport à l'observateur, c , la vitesse de la lumière. Les mesures, relativement précises, de l'angle maximal d'aberration (puisque l'aberration dépend de l'angle que fait, à un moment donné, la trajectoire de la Terre avec la direction de l'étoile) montrent qu'il est constant. Selon Bradley la constante d'aberration est de $20,2''$; ainsi le rapport de la vitesse de la lumière à celle de la Terre sur son orbite est donc de $10\ 210$ à 1 , dont il s'ensuit que la lumière se propage depuis le Soleil en 8 minutes 12 secondes, résultat qui reste cohérent avec les mesures "à la Römer" - liées aux tables des éclipses de Jupiter et améliore la précision de la mesure de la vitesse de la lumière. Ainsi, parce que l'angle d'aberration maximal est constant, on parle de la "constante d'aberration", on ne doute guère que la vitesse de la lumière soit elle aussi constante. Quant à Arago il croit aux variations, pour lui inéluctables, de la vitesse de la lumière qui devraient affecter l'aberration, mais l'effet est encore plus faible que l'effet de réfraction ; les mesures ne sont pas assez précises pour trancher.

Pour ce qui concerne la théorie ondulatoire, développée par Christiaan Huygens, puis par Leonhard Euler, la lumière est une onde. Huygens parvient à montrer, par de complexes développements, comment la lumière peut se propager en ligne droite. L'éther y joue un rôle essentiel. C'est un espace absolu, un espace physique dans lequel les ondes lumineuses sont en quelque sorte gelées. Ainsi est-il évident que la vitesse de la lumière y est constante. Mais alors, comment conjuguer le mouvement de la lumière, ceux du corps émetteur, de l'observateur ?

Dès la fin des années 1810 Arago, qui doute désormais de la théorie de l'émission, soutiendra le système des ondulations de Fresnel. La théorie de Fresnel s'adresse avant tout à des phénomènes locaux, interférences, diffraction, polarisation, ouvrant ainsi un champ essentiel de la physique de la lumière où ne se pose pas la question des possibles variations de sa vitesse dans le vide. Les principes du système des ondulations seront pour longtemps à la base des différentes versions de la théorie ondulatoire de la lumière et donc de

l'optique des corps en mouvement. Ils permettront de rendre compte des interférences, de la diffraction, de la polarisation et, d'une manière plus ou moins convaincante selon le cas, de l'aberration, de l'expérience d'Arago et de l'effet Doppler-Fizeau.

Du côté de la source, il fallait donc, si l'on voulait comprendre les résultats de Bradley, que la vitesse d'émission de la lumière ne dépendît pas de celle de la source, ce que la théorie ondulatoire permet simplement grâce à l'éther. Quant à l'action de la gravitation sur la lumière, elle est alors impensable d'un point de vue ondulatoire. Mais, du côté de l'observateur, il fallait bien, si l'on voulait expliquer l'ellipse d'aberration, que la vitesse apparente de la lumière dépendît de celle de la Terre.

Fresnel va donc devoir concilier ces exigences. Afin de rendre compte de l'ellipse d'aberration, il suppose que seuls les corps transparents entraînent leur éther mais en ne leur communiquant qu'une fraction, qui dépend de leur indice de réfraction, de leur vitesse. Ainsi la Terre et le prisme, bien qu'étant au repos l'un par rapport à l'autre, ne sont-ils pas dans le même état de mouvement par rapport à l'éther. Ces hypothèses étranges, *ad hoc*, intellectuellement peu satisfaisantes, permettent à Fresnel de rendre compte aussi bien de l'aberration que des résultats, définitivement « négatifs » pour Fresnel, de l'expérience d'Arago.

Malgré les travaux d'Arago, la question de la vitesse de propagation de la lumière ne se pose pas vraiment avant la seconde moitié du 19^e siècle. Il s'agira de comparer la vitesse de la lumière dans l'eau en mouvement, une expérience que réalisera Léon Foucault en 1850 par la méthode du miroir tournant, expérience qui signe la victoire définitive de la théorie des ondulations sur celle de l'émission. La détermination de la vitesse de propagation de la lumière est alors essentielle et de nombreuses expériences sont réalisées en particulier par Alfred Cornu, Eleuthère Mascart, Albert Michelson.

En 1851, Fizeau vérifiait la formule d'entraînement de l'éther de Fresnel avec une précision de 1/100 en mesurant la vitesse de la lumière dans de l'eau en mouvement. Il utilise une méthode d'interférences mise au point par Fresnel et Arago. Les résultats sont compatibles avec la théorie des ondulations de Fresnel qui pouvait désormais prétendre à dominer l'optique.

Pourtant la théorie des ondulations manquait de cohérence et, dans la seconde moitié du 19^e siècle, de nombreux théoriciens contesteront l'étrange hypothèse de Fresnel. Ainsi Mascart critiquera-t-il sèchement le raisonnement qui conduisit Fresnel à sa formule d'entraînement des ondes par le

mouvement des corps. Mascart fut, avant Michelson, un de ceux qui s'appliquèrent avec le plus d'acharnement à mettre en évidence l'effet du mouvement de la Terre sur la lumière.

Fizeau, ne reprend pas à son compte le résultat "négatif" de l'expérience d'Arago. Il croit à l'effet Arago, aussi bien en réfraction qu'en fréquence, rien d'autre que ce que l'on nomme l'effet Doppler pour la lumière. Ainsi, fonde-t-il l'effet Doppler pour la lumière, aussi bien dans le contexte de la théorie de l'émission que dans celui du système des ondulations, en réfraction et en fréquence.

Il faut souligner aussi que la théorie de l'effet (que l'on dit) Doppler par Fizeau implique deux équations différentes, l'une concernant le mouvement de l'observateur, l'autre celui de la source. C'est que la théorie des ondulations sur laquelle s'appuie Fizeau depuis Fresnel n'est pas cohérente avec le principe de relativité, ce qui bien entendu est lié au caractère absolu de l'éther.

Fizeau s'intéresse aussi aux travaux de Joseph Fraunhofer qui a observé les spectres de plusieurs étoiles et découvert leurs raies. Après 1860, la spectroscopie permettra, grâce aux travaux de Fraunhofer, aux observations de William Huggins, de Pietro Secchi de mesurer l'effet Doppler-Fizeau. Ce n'est qu'après les années 1870 que deviennent vraiment crédibles les premières observations de l'effet. La question de la vitesse de la source qui avait disparu par la porte de l'éther réapparaît par la fenêtre de l'effet Doppler-Fizeau.

En 1864, James Clerk Maxwell, qui vient d'identifier la lumière avec les ondes électromagnétiques, n'a connaissance ni de l'expérience d'Arago ni de l'article de Fizeau. Mais il repense l'effet Doppler-Fizeau pour la lumière (aussi bien en réfraction qu'en fréquence) et propose une expérience destinée à détecter le mouvement de la Terre à travers l'éther. Il montre qu'en théorie de Fresnel l'effet Doppler-Fizeau est caché, n'apparaissant qu'au "second ordre" [en $(v/c)^2$]. C'est précisément ce calcul qui poussera Michelson à faire des expériences précises afin de détecter l'effet du mouvement de la Terre par rapport à l'éther. Le résultat est négatif, la vitesse de la lumière est aussi bien indépendante de la vitesse de la source que de celle de l'observateur terrestre.

De la fin du 19^e siècle au tournant du 20^e, Hendrik Antoon Lorentz proposera de nombreuses variantes de la théorie de Fresnel, s'appliquant à résoudre avec rigueur aussi bien la question de l'aberration que celle de l'expérience d'Arago. Il développe une explication de l'aberration d'une technicité quelque peu écrasante. Afin de rendre compte des questions posées, des expériences et des observations, il devra

s'appuyer sur de multiples conventions, onze hypothèses *ad hoc*, selon l'historien Gerald Holton. C'est dire l'état de complexité du sujet.

Et Holton de conclure son analyse en comparant l'œuvre de Lorentz à celle d'Einstein : « *L'œuvre de Lorentz fait penser à l'entreprise d'un capitaine courageux, d'un homme d'exception tentant le sauvetage d'un vieux rafiot, rafistolé de toute part, en péril sur le récif de l'expérience; tandis que l'œuvre d'Einstein, [...] survient comme le dépit créateur, récusant ce moyen de locomotion même – l'abandonnant pour un véhicule de conception bien différente* ».¹

C'est une toute autre manière de voir, une indispensable révolution qu'apporte Einstein en 1905.

La relativité, théorie des invariants.

Pour mieux comprendre les théories de relativité, il faut en revenir au temps, à la simultanéité. Mais tout d'abord il est nécessaire de repenser, de préciser, le terme « relativité », « la soi-disant théorie de la relativité » dira Einstein. Un terme qu'il n'a pas choisi, auquel il aurait - à juste titre - préféré celui de théorie des invariants. Car avant tout, en "relativité" les lois physiques doivent prendre une même forme dans tous les repères inertiels, galiléens.

En cinématique classique - qui s'applique avant tout aux corpuscules matériels - les transformations de coordonnées galiléennes permettent de passer d'un système inertiel à un autre. Mais dans le cadre de la cinématique relativiste, la relativité restreinte, ce sont les transformations de Lorentz qui jouent ce rôle. Alors, non seulement les lois de la mécanique mais aussi celles de l'optique, de l'électromagnétique prennent la même forme dans tous les systèmes inertiels. Mais la vision que l'on a d'un événement physique, d'un système inertiel à l'autre, est relative.

C'est là en fait un problème de projection, proche des techniques du dessin industriel ou de l'architecture. Pour savoir précisément quelles sont les cotes de l'objet que l'on veut fabriquer, du bâtiment que l'on souhaite construire, on en projette la structure, la forme, sur un plan, et sur chacun des côtés. Si l'on change de représentation, en souhaitant dessiner le bâtiment de trois-quarts, ou en vue perspective, on conçoit qu'il faille un instrument mathématique qui permette cette transformation, ce changement de

¹ (Holton 1981, p. 136).

point de vue. Notons en passant qu'en mécanique, en relativité, ce sera le rôle du calcul tensoriel de passer d'un système de coordonnées à un autre. Mais il ne s'agit que d'un instrument permettant la représentation du bâtiment qui, lui, reste invariant, identique à lui-même. On voit plus clairement dans cet exemple banal à quel point le caractère "relatif" de la relativité restreinte ou générale est problématique. Il s'agit simplement d'un relativisme de la description : l'essence de la théorie, c'est l'invariance.

Un invariant c'est une grandeur physique intrinsèque, propre à l'objet, mesurée dans le repère même du mouvement, le repère « propre ». Mais, vu d'un autre repère, par un autre observateur, elle dépend du mouvement relatif des deux repères ; d'où le terme de relativité... qui n'a rien à voir avec le "tout est relatif" des philosophes.

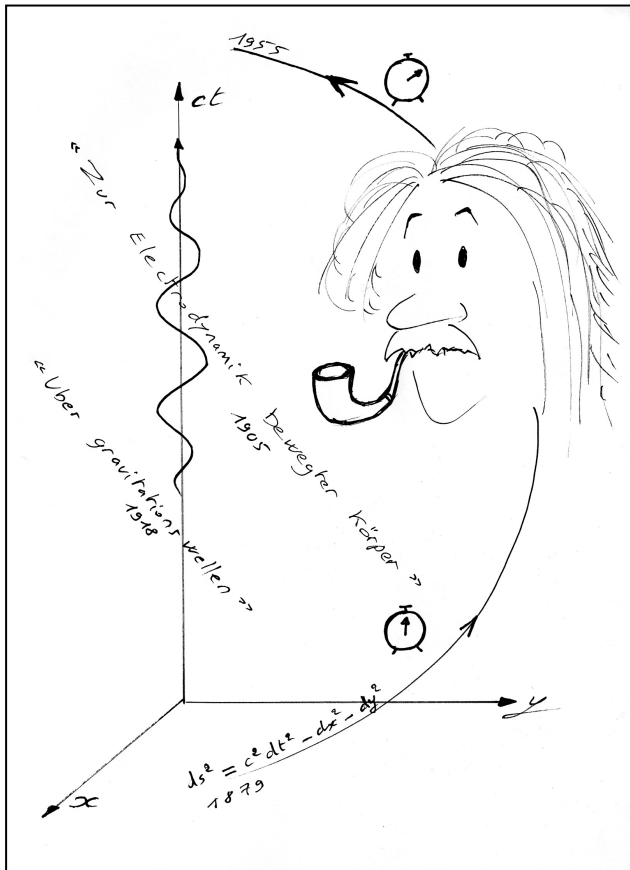
Le temps dans la théorie de la relativité.

Le temps est sans aucun doute le concept premier, central, de la physique, c'est aussi celui de la relativité. Depuis l'antiquité grecque, sa définition, sa mesure, étaient fondées sur l'observation, le dogme de l'uniformité de la rotation des Cieux, puis de la Terre. Dès le 18^e siècle, on s'inquiéta de la régularité de la rotation de la Terre dont Kant prédira le ralentissement dû à la dissipation d'énergie liée au phénomène des marées. Mais on ne parviendra pas à en déceler quelque irrégularité avant la fin des années 1920. Jusqu'alors la Terre était une bonne horloge. À la logique de Newton basée sur un temps absolu, universel, succédera une mesure du temps beaucoup plus physique, que Maxwell pressent déjà en 1873. Il s'agira d'en baser la mesure sur les fréquences atomiques, mais ce n'est encore qu'une idée, très juste, mais qui devra longtemps attendre avant d'être comprise et encore plus avant d'être appliquée.

Dans l'article d'Einstein fondant en 1905 une nouvelle cinématique "relativiste" (à noter que la cinématique galiléenne est aussi relativiste dans la mesure où le terme relativité renvoie avant tout au principe de relativité), le temps est, à travers la question de la simultanéité, en première ligne : « *tous les jugements dans lesquels le temps joue un rôle, écrit-il, sont toujours des jugements sur des événements simultanés* », et ajoute-t-il « *lorsque par exemple, je dis : Tel train arrive ici à 7 heures, cela signifie à peu près : le passage de la petite aiguille de ma montre sur le 7 et l'arrivée du train sont des événements simultanés* »²

² (Einstein 1905, 1993, 32).

Il montrera ensuite qu'il n'y a pas de simultanéité à distance : « nous n'avons pas le droit d'attribuer une signification absolue au concept de simultanéité, et que deux événements qui, du point de vue d'un système de coordonnées, sont simultanés ne peuvent plus être considérés comme des événements simultanés lorsqu'ils sont vus d'un autre système de coordonnées en mouvement par rapport au premier ». ³



Il donne comme exemple une montre, qui « se trouvant à l'équateur doit retarder très légèrement par rapport à une montre de fabrication identique placée à l'un des pôles terrestres ».

Afin de comparer le fonctionnement à distance de ses horloges en mouvement, ce qui n'est évidemment pas simple, le meilleur recours est la lumière dont Einstein suppose la vitesse de propagation dans le vide et dans un système inertiel, constante.

Il montre ensuite que l'on peut concevoir une relation entre le lieu et le temps des événements, telle que tout rayon lumineux possède la même vitesse de propagation c par rapport à deux systèmes inertiels en mouvement l'un par rapport à l'autre. Il démontre que cette relation n'est autre que le système d'équations des transformations de Lorentz.

³ (Einstein 1905, 1993, 35).

Ainsi, renversant les termes du problème, Einstein pose que la vitesse de la lumière est une constante universelle. Conservant le principe de relativité, il est conduit à une autre cinématique que celle de Galilée, de Newton, à la relativité "restreinte" qui impose une autre loi d'addition des vitesses, qui n'est autre que celle de Lorentz. Car la nouvelle cinématique, implicite dans la théorie de Maxwell, - les équations de Maxwell sont invariantes par ces transformations de Lorentz - justifie, en donnant en particulier un sens plus clair au temps, les lois d'addition des vitesses de Lorentz. Cette cinématique, la relativité restreinte, suffit à résoudre les questions posées depuis près d'un siècle par l'aberration et l'effet Doppler-Fizeau ; ce qu'il fait dans son article de 1905. Un travail splendide qui révolutionne la physique. Il en déduira aussitôt l'équivalence « masse-énergie » : $E = mc^2$. Car "si un corps cède l'énergie E sous forme de rayonnement, sa masse diminue de E/c^2 ."

La simultanéité absolue, le temps absolu de Newton sont caducs. Mais Einstein a aussi dû rejeter, et c'est essentiel, deux hypothèses, empruntées à la mécanique classique, « que rien ne justifie », d'une part, que « l'intervalle de temps qui sépare deux événements est indépendant de l'état de mouvement du corps de référence » d'autre part que « la distance spatiale de deux points d'un corps rigide est indépendante de l'état de mouvement du corps de référence » ⁴ En fait, il pose comme essentiel le temps propre entre deux événements d'une même trajectoire. Plus tard il devra aussi rejeter le concept de rigidité.

En 1905, la théorie de Newton de la gravitation est restée à l'écart de cette révolution. Mais pour Einstein, il n'est pas possible, il n'est pas acceptable, que l'électromagnétisme - où la lumière joue un rôle central - soit basé sur la cinématique relativiste tandis que la gravitation l'est sur celle de Newton - dans laquelle la lumière ne joue aucun rôle. La nature ne peut être basée, structurée par deux théories antagonistes. Pour Einstein cela est tout simplement insupportable, le monde de la physique ne peut être divisé sur un point aussi fondamental. Ce qui le conduira, dix ans plus tard, à la relativité générale.

En 1907, alors qu'il met en place les fondements de ce qui sera la relativité générale, il est amené à s'interroger sur l'influence du champ de gravitation sur "les horloges". C'est à ce propos, et semble-t-il pour la première fois, qu'il posera les raies des atomes comme horloges : « il existe des "horloges" qui sont présentes en des lieux de potentiels gravitationnels différents et dont l'allure peut être contrôlée très

⁴ (Einstein 1917, 1976, 33).

précisément : ce sont les sources des raies spectrales », et ajoute-t-il « la lumière qui vient de la surface solaire, lumière émise par une source de ce type, possède une longueur d'onde supérieure d'environ deux millièmes à celle de la lumière émise sur la Terre par des substances identiques »⁵

Concepts et interprétations.

Après ce bref rappel, classique, de l'histoire de l'optique et des théories de relativité, il est indispensable de repenser concepts et interprétations classiques.

Dans la première moitié du 20^e siècle la relativité générale a posé beaucoup de problèmes et après les années soixante, son interprétation sera précisée, bouleversée. L'avènement de « la générale » a permis de simplifier, de mieux comprendre ces questions, ces concepts sur plusieurs points fondamentaux qui se rapportent aux concepts, au temps, aux horloges, aux distances... ce qui n'est pas sans implications quant à l'interprétation de « la restreinte ».

On connaît, - d'une certaine manière, trop bien - le paradoxe des jumeaux de Langevin, lié à la contraction des longueurs, à la dilatation du temps. Je n'entrerai pas dans les détails de ce paradoxe qui a fait couler beaucoup d'encre, et a encombré trop longtemps l'interprétation de la théorie : on s'y perd comme la littérature scientifique aussi bien que de vulgarisation l'ont amplement montré. Ce paradoxe ne nous éclaire pas, tout au contraire. Ces jumeaux ne nous ont guère aidé sinon pour voir qu'il y a là un problème dans la définition du temps, de la distance, de l'espace-temps bien sûr. Tout simplement parce qu'il s'agit d'un paradoxe et donc de l'opinion commune qu'il faut oublier ; une question qu'il faut voir autrement.

Nous vivons, nous pensons un monde pré-euclidien, celui de notre chambre, de nos laboratoires ; la physique moderne, contemporaine, la cosmologie, n'ont pas de raison de ressembler à ce monde-là. C'est un autre monde dans lequel nous amène la relativité, dont nous n'avons pas une expérience personnelle. Comprendre ce monde en référence à notre monde, à nos outils ordinaires, là est le problème. D'autres outils sont indispensables ; il faut oublier ce que l'on sait trop bien, penser autrement le monde de la relativité. Et d'abord se poser de simples questions, si simples qu'elles peuvent étonner.

Que suppose-t-on quant à la distance, la longueur de la règle ? Sa rigidité ? Précisément, la rigidité est un des problèmes du monde d'Euclide, de Newton.

Rigide pour une règle, cela signifie que si je tape à un bout de la règle le signal est aussitôt répercuté à l'autre bout de cette règle : la vitesse du signal est infinie. Ce qui est impossible en relativité restreinte où la vitesse d'un signal est limitée. Aucun signal, aucune particule ne peut aller au-delà d'une vitesse limite que figure celle de la lumière. Nous avons vu qu'en 1905, Einstein n'est pas vraiment clair de ce point de vue, car il emploie encore et ailleurs (Einstein 1905, 1993, 41) le concept de rigidité. La rigidité faisait alors encore partie de la panoplie relativiste.

En fait, ce point est lié à la question de la signification physique des coordonnées, qui sera clairement interrogée dans le cadre de la relativité générale. Einstein sera plus tard très net sur ce point, par exemple dans sa lettre à Paul Painlevé :

« Il faut sans cesse garder à l'esprit que les coordonnées ne possèdent pas de signification physique, ce qui veut dire qu'elles ne représentent pas le résultat d'une mesure, seules les conclusions, accessibles par l'élimination des coordonnées, peuvent prétendre à une signification objective »⁶

Cette question se résout grâce au principe de covariance qui dit, très logiquement, qu'il n'y a pas de raison pour que tel système de coordonnées soit a priori préféré. On comprend qu'alors il n'est pas possible de donner un sens physique à tel système de coordonnées plutôt qu'à tel autre. Ainsi, en relativité générale, les coordonnées (x, y, z, t) , n'ont aucun sens physique et cela est vrai de tout système de coordonnées. Les coordonnées ne sont rien d'autre que des adresses qui vous disent où est telle planète à tel moment, t . Telle année j'habitais à telle adresse.

Mais est-ce si bizarre ? N'est-on pas dans un espace-temps ? Où temps et espace ne sont pas dissociables, n'ont plus séparément de sens. Temps et espace ne sont plus indépendants, ils sont définis d'un seul bloc. Seule la grandeur ds , l'intervalle élémentaire entre deux événements - de genre temps - a un sens ; elle définit le temps propre, s . C'est bien ce que fait remarquer Einstein à la fin de sa lettre à Painlevé : *« l'interprétation métrique de la grandeur ds [c'est] le noyau profond de la théorie elle-même ».*

Bien évidemment ces conclusions s'appliquent aussi en relativité restreinte qui s'exprime dans un espace-temps. L'espace-temps de Minkowski qui a d'ailleurs beaucoup fait pour mieux en comprendre les implications, en particulier le rôle du temps propre qui seul a un sens physique. Chaque particule, chaque planète, chaque étoile, chaque observateur, chaque individu a son (propre) temps propre : sa montre-

⁵ (Einstein 1905, 1993, p. 119).

⁶ Einstein à Painlevé, le 7 décembre 1922, cité dans (Eisenstaedt 1982, 174-175).

bracelet. Le temps propre "s" défini d'une manière invariante, a la même forme quelque soit le système de coordonnées dans lequel on travaille :

$$ds^2 = dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2.$$

Les « distances » - qui ne sont désormais que des temps de trajet - se mesurent donc en temps propre sur des trajectoires géodésiques ; photon qui va de l'objet observé à l'observateur, ou encore d'une « adresse » à l'autre, d'un même observateur ou d'une même particule : son temps propre entre deux événements, doit être intégré le long de sa

$$\text{trajectoire : } \int_A^B ds.$$

En fait le temps coordonné, aussi bien que les distances coordonnées seront encore très employés tout au long de la première moitié du 20^e siècle, car les relativistes auront bien du mal à faire leur deuil des concepts newtoniens. Cette difficulté à comprendre la relativité générale induit alors une interprétation néo-newtonienne problématique dont la théorie ne sortira que difficilement, essentiellement grâce aux questions posées par les trous noirs.

On peut comprendre que l'acceptation de cette nouvelle conception des outils de l'espace-temps ne se soit pas faite sans difficultés. Les révolutions conceptuelles ne sont pas les plus simples à admettre.

Ainsi, les astronomes qui avaient pourtant l'habitude - au moins depuis William Herschel - de donner les distances en années-lumière, une mesure pourtant éclairante, ont eu beaucoup de mal à accepter la relativité générale. Ils ne furent pas les seuls. On peut pourtant se persuader aisément de la nécessité des outils relativistes en se demandant comment mesurer la distance d'ici à Sirius. Faut-il se servir de l'étalon de platine du pavillon de Breteuil ?

Mais tout cela peut aisément se comprendre car on est ici revenu à l'expérience commune. Ne mesure-t-on pas, depuis toujours une distance en temps de parcours - en fonction de son itinéraire, bien sûr mais aussi de son mobile, à pied, à cheval, en voiture, en TGV, en avion, en satellite, ou celui d'une particule, d'un photon... Cette manière de voir, « positive », permet de ne plus voir, de résoudre, de dissoudre le paradoxe des jumeaux de Langevin. Car le chemin pris, est lui aussi spatio-temporel, c'est dans l'espace-temps qu'il faut le visualiser et, bien entendu, nos jumeaux ne prennent pas le même chemin de l'espace-temps. De la même manière, classiquement, on ne met pas le même temps pour aller de Paris à Rome en passant par Bordeaux ou par Lyon. Tous les

chemins mènent à Rome mais ne prennent pas le même temps de conduite, temps qui nous est propre.

Ces outils conceptuels n'ont pas été compris, ni acceptés aisément, la relativité générale les a rendus indispensables tandis que la relativité restreinte pouvait continuer à négocier avec des outils euclidiens, archimédiens, newtoniens ; le temps se dilatait, les longueurs se contractaient, mais il s'agit là encore et toujours de temps-coordonnée, de longueurs-coordonnées euclidiennes, newtoniennes qui n'ont plus de sens physique. C'est dans chaque repère propre que l'on doit faire la physique de la relativité. Le "muon" a un temps propre invariant (posé comme étant le même pour tous les muons), mais si je l'observe dans mon repère, je le mesure dans mon temps propre et ces temps sont différents... il n'y a pas de paradoxe, rien de plus à dire. Sinon qu'il ne sera pas simple (en relativité générale) de faire le lien entre les temps propres de tous les événements, de toutes les trajectoires possibles. C'est un problème qui se pose dans le cadre de la construction spatio-temporelle de l'univers des phénomènes, parallèle à un problème d'arpentage, de triangulation, de topologie.

Il a donc fallu, il faut, faire son deuil non seulement de la simultanéité absolue, du temps absolu de Newton, de la rigidité, mais aussi et ce n'est pas le plus simple, oublier aussi les distances "ordinaires", newtoniennes. La seule mesure, c'est le temps propre. Et c'est le concept fondamental qui permet de mieux penser les relativités.

Références

- Einstein, Albert (1917). Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie. (Gemeinverständlich). Braunschweig: Friedrich Vieweg und Sohn. Traduction française La théorie de la relativité restreinte et généralisée. Maurice Solovine, trad. Paris: Gauthier-Villars, Nouvelle édition, 1976.
- Einstein, Albert (1993). Œuvres choisies Relativité I, Volume 2. Balibar, Françoise, éd. Paris: Seuil.
- Eisenstaedt, Jean (1982). "Histoire et singularités de la solution de Schwarzschild (1915-1923)." *Archive for History of Exact Sciences* 27 : 157-198.
- Eisenstaedt, Jean (2002). Einstein et la relativité générale. Les Chemins de l'Espace-Temps. Paris: Cnrs Éditions.
- Eisenstaedt, Jean (2005). Avant Einstein Relativité, lumière, gravitation. Paris: Seuil.
- Holton, Gerald (1981), L'Imagination scientifique, trad. fr. de J.F. Roberts, Paris, Gallimard.
- Avec mes remerciements à Jean-Philippe Uzan qui a bien voulu relire et discuter ce texte, ainsi qu'à la rédaction de la revue pour ses remarques et corrections.*