

LE CONCEPT DE TEMPS

DANS LA THÉORIE D'EINSTEIN

PREMIÈRE PARTIE:

Les antécédents historiques de la construction relativiste.

La théorie de la relativité possède, on le sait, une grande force, qui réside dans sa structure purement mathématique, à la fois simple et solide, constituant un tout qui, par son enchaînement logique, s'impose fortement, et même *nécessairement* au mathématicien, dès le moment où il en accepte le point de départ.

Cette structure a cependant le grand désavantage de désorienter et de repousser les efforts de tous ceux qui, sans avoir de vastes connaissances en mathématiques et une longue habitude du maniement des formules, essaient de la pénétrer pour arriver à la *pensée* concrète cachée sous l'appareil de ces dernières.

C'est pourquoi, malgré l'intérêt énorme qu'elle a suscité dans tous les milieux ayant ou non une culture scientifique, cette théorie n'a pas encore obtenu le minimum de consentement auquel elle serait en droit de prétendre après bientôt vingt ans d'existence.

Et c'est ainsi que, à côté des enthousiasmes de ceux qui, par une disposition naturelle à l'abstraction et par une longue habitude du raisonnement au moyen de formules, n'éprouvent aucune difficulté à accepter comme une « réalité » une construction qui, de la réalité, ne représente qu'un aspect tout à

fait particulier et schématique, l'aspect géométrique, nous trouvons encore la froideur, l'indifférence ou la défiance de la grande masse des physiciens expérimentateurs, c'est-à-dire des gens qui devraient être le plus directement intéressés à juger de l'excellence de cette construction qui se vante de pouvoir retracer, en quelques traits rectilignes, cette vaste, complexe et multiforme somme d'objets et d'aspects qui constituent leur champ de travail et qu'ils appellent « réalité ».

Ces deux orientations opposées ont l'une et l'autre leur raison d'être: la première naît de l'ampleur, de la simplicité et de l'élégance de la synthèse géométrique (de cette géométrie des « hyperespaces » qui est, au fond, *pure* analyse mathématique) dans laquelle la nouvelle théorie a réussi à grouper les faits les plus saillants et les plus généraux de la physique; la seconde vient de l'*infécondité* véritablement grave que le schéma d'Einstein a montrée sur le terrain euristique, infécondité qui ne peut impliquer qu'une condamnation aux yeux de ceux qui *connaissent* et admirent la *grandiose* fertilité des grandes nouveautés théoriques enregistrées par l'histoire de la physique au cours des deux derniers siècles, nouveautés qui cependant, sous le rapport conceptuel, ont été beaucoup plus modestes que celle dont nous parlons ici.

Il est superflu de dire que la science ne peut, sans renoncer à sa dignité et même à sa finalité, tolérer la coexistence d'orientations si différentes. Aussi doit-on considérer que tout savant qui, ayant sérieusement réfléchi au nouveau courant de pensée, aura trouvé qu'il ne pouvait s'y abandonner passivement, a véritablement le devoir d'exposer en public ses hésitations, ses réserves, sans jactance, mais sans préoccupations ni timidité. C'est avec ce sentiment d'un devoir à accomplir que je me permets de présenter quelques doutes et quelques vues que m'ont suggérés les *prémises* fondamentales de l'appareil mathématique, c'est-à-dire les postulats essentiels de la théorie et le « nouveau concept scientifique du temps » qu'Einstein a forgé et qui est la *véritable clef de voûte* de tout l'édifice théorique.

Qui connaît les origines de la théorie sait qu'elle est issue tout entière d'une simple question d'analyse mathématique, d'apparence modeste et plus que pacifique, qui nous conduit

le plus simplement du monde aux concepts où s'affirme la plus grande révolution qu'ait peut-être enregistrée l'histoire de la pensée scientifique.

Naturellement, la question analytique a un substratum physico-philosophique, auquel il est nécessaire de se reporter pour être à même de juger de la qualité et de la force des arguments sur lesquels le théoricien a établi les bases de l'édifice. C'est pourquoi je pense que le lecteur voudra bien me suivre dans le rapide exposé, de caractère historique, du lent travail qui, dans le domaine de la physique proprement dite, a préparé le terrain pour l'audacieuse construction relativiste.

*
* *

Tout le monde sait que, dès les débuts de l'étude des phénomènes lumineux, s'est dressée, en face de la théorie du bombardement soutenue par Newton, la théorie des ondulations, qui admettait que la lumière consistait en la perturbation périodique d'un milieu élastique et très subtil qui remplirait tout l'espace, perturbation qui, sitôt produite dans la source de lumière, se répandrait partout, d'une façon analogue à celle dont les vibrations d'un corps sonore se propagent dans l'air.

A ce milieu hypothétique, conçu comme un fluide capable d'envahir et de pénétrer la structure intime des corps matériels, on a donné le nom d'« éther cosmique ».

Plus tard, lorsque, à la suite des découvertes de Maxwell et de Hertz, la théorie ondulatoire de la lumière subit de profondes transformations, l'hypothèse d'un « éther » conçu comme le véhicule des modifications électromagnétiques particulières auxquelles fut ramenée la lumière, cette hypothèse demeura dans la science; et elle s'est encore maintenue dans la forme plus moderne que la théorie a prise, grâce à Lorentz, après la découverte des électrons.

Donc, pendant plus de deux siècles, à travers les nécessaires adaptations imposées par la moisson de plus en plus grande et véritablement imposante des faits nouveaux dont la science est venue à s'enrichir, l'hypothèse de l'éther a régné incontestée sur la pensée des physiciens.

Arrêtons-nous un moment sur cette conception.

L'espace physique serait un immense océan constitué par ce fluide très subtil, l'éther, dans lequel seraient plongés les corps matériels. Bien plus, ce fluide pénétrerait toute la structure des corps, lesquels se composeraient d'une myriade de particules extrêmement petites, distantes les unes des autres, et noyées dans l'éther.

Cette conception d'un milieu remplissant tout l'espace et pénétrant tous les corps posait aussitôt la question des rapports mécaniques entre matière et éther: vieille question qui a été l'un des plus rudes écueils pour les diverses théories des phénomènes optiques et électriques élaborées jusqu'à ce jour.

Le point essentiel du problème est le suivant:

Lorsqu'un corps matériel se meut, entraîne-t-il ou n'entraîne-t-il pas avec lui l'éther qu'il contient? Ce mouvement de l'éther, s'il existe, se limite-t-il seulement à la portion de cet éther enclose dans la surface terminale du corps, ou bien se propage-t-il et se diffuse-t-il dans les couches environnantes, de telle sorte qu'avec le corps se meuve toute une atmosphère d'éther qui l'enveloppe?

Pour des raisons de brièveté, nous nous abstenons ici de passer en revue les observations qui ont été recueillies et les expériences qui ont été tentées pour donner une réponse à ces questions. Nous nous bornerons à rappeler que Bradley, se fondant sur le phénomène de l'aberration des étoiles, a cru pouvoir affirmer l'immobilité complète de l'éther; que, plus tard, se fondant sur les modalités que le même phénomène présentait lorsqu'il était observé avec une lunette pleine d'eau, Stokes a conclu en faveur d'un entraînement total de l'éther par la Terre en mouvement, et de la dégradation lente de ce mouvement dans les couches éthérées, à mesure que celles-ci sont plus lointaines de la Terre; que Fresnel enfin, tenant compte des observations sur l'aberration et des résultats d'une célèbre expérience faite par Fizeau, avait déjà soutenu l'hypothèse d'un *entraînement partiel* de l'éther par la matière en mouvement, et, pour préciser, l'hypothèse d'un mouvement de l'éther ayant la vitesse

$$v \frac{n^2 - 1}{n^2}$$

où v et n indiquent respectivement la vitesse et l'indice de réfraction du corps matériel en mouvement dans lequel se trouve l'éther entraîné.

Bien qu'elle fût celle qui se rapprochait le plus des faits expérimentaux, cette hypothèse de l'entraînement partiel n'a eu aucun succès, à cause des graves difficultés de calcul que son introduction apportait dans la théorie électromagnétique de la lumière.

C'est pour ce simple motif que Hertz, lorsqu'il a étendu aux corps en mouvement les équations de Maxwell, a préféré adopter le point de vue de Stokes (entraînement total de l'éther), tandis que Lorentz, lorsqu'il a remanié la théorie en mettant les électrons à la base de l'explication universelle des phénomènes physiques, a opté pour l'hypothèse de l'éther immobile et a réussi à faire entrer dans sa synthèse l'expérience de Fizeau (laquelle, comme nous l'avons dit, conduisait directement à l'entraînement partiel), mais au moyen d'un artifice, c'est-à-dire par l'introduction d'une nouvelle notion de temps: la notion du *temps local*.

D'après Lorentz, il règne en chaque point d'un système en mouvement un temps propre, qui non seulement ne coïncide pas avec celui qui est évalué par un observateur immobile, mais qui, bien plus, ne coïncide avec aucun des temps des autres points de ce système mobile.

Pour la première fois se présente ici dans la science une conception nouvelle du temps, extrêmement intéressante, bien que très vague, et qui modifie profondément la conception classique qui, jusqu'alors, avait paru si solide, si naturelle.

Sur un corps en mouvement, la notion du temps serait intimement liée à la rapidité du mouvement et au point particulier du corps. Par conséquent, le temps que nous mesurons ne peut avoir le caractère et la valeur de quelque chose d'absolu, puisque, vivant sur la Terre, nous expérimentons toujours sur un corps en mouvement.

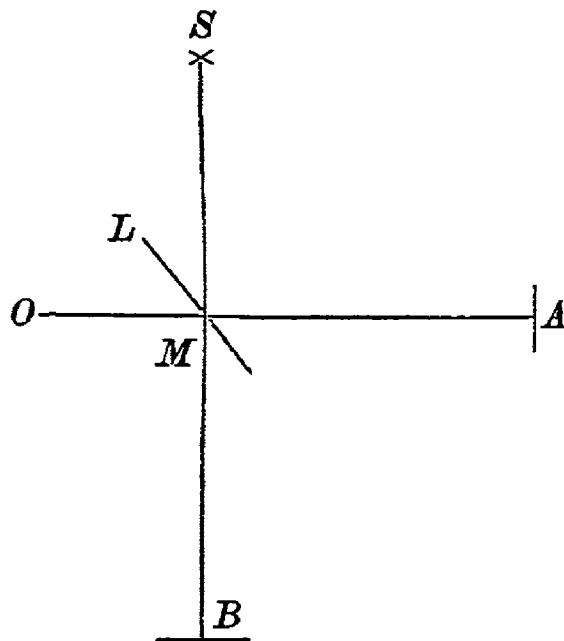
La conception de Lorentz admet l'existence d'un temps absolu, déterminable par un observateur immobile par rapport à l'éther; et, par suite, il serait possible aux observateurs en mouvement (tels que nous) de s'élever de leurs mesures de temps à la connaissance du temps absolu, à travers la connais-

sance de leur mouvement par rapport à l'éther, mouvement qui aurait évidemment une valeur de mouvement absolu.

Cette conception théorique de Lorentz laisse prévoir l'existence de faits et de méthodes capables de nous conduire à la connaissance de notre mouvement par rapport à l'éther, c'est-à-dire à la mesure du courant d'éther, du « vent d'éther » qui devrait traverser tous les corps terrestres.

Des tentatives expérimentales de ce genre ont été entreprises en diverses directions: la plus heureuse, par le haut degré d'approximation que comportent les mesures, a été celle imaginée par Michelson et réalisée par lui et Morley. Il importe de l'esquisser ici brièvement:

Un faisceau de rayons parallèles venant d'une source S rencontre une lame de verre transparent L et, par suite, se divise en deux parties: l'une envoyée après réflexion vers A , l'autre après réfraction vers B .



En A et B , à des distances égales de L , sont placés deux miroirs normaux aux rayons, et qui les reflètent suivant les directions AM , BM .

Revenus en M , respectivement après une réfraction et une réflexion sur L , ces rayons se fondent ensemble et se propagent ensemble suivant MO , pour arriver en O à l'œil de l'observateur.

Comme les distances MA et MB sont égales, les temps que les rayons mettraient pour parcourir les chemins $MA M$, $MB M$ — si tout était immobile — seraient égaux.

Or, en faisant l'expérience à la surface de la Terre et en supposant, par exemple, que le bras MA de l'appareil est orienté dans le sens de la translation terrestre, on trouve, par des considérations faciles, que ces temps dans l'hypothèse de Lorentz ne peuvent plus être égaux.

Pour préciser, le temps employé pour l'aller et le retour des rayons qui voyagent suivant MA doit être plus long que celui employé par les rayons qui voyagent suivant MB , de sorte que les deux rayons arrivent en M (et, par suite, à l'œil de l'observateur, placé en O) avec un certain retard, lequel devrait s'invertir en faisant tourner de 90 degrés tout l'appareil sur lui-même.

L'expérience faite avec le plus grand soin a donné, on le sait, un résultat négatif, c'est-à-dire qu'elle a démontré qu'il n'y a aucun retard entre les temps de propagation des rayons lumineux suivant les deux bras.

Ce résultat, bien entendu, mettait en un sérieux embarras toute la théorie de Lorentz, car il apparaissait nettement en contradiction avec l'hypothèse de l'éther immobile placée à la base de l'édifice théorique. Mais plutôt que de renoncer à cet édifice, laborieusement bien que brillamment construit, Lorentz a préféré recourir à une autre hypothèse tout à fait hardie, celle de la contraction des corps dans le sens du mouvement, et cette hypothèse fameuse, simultanément émise aussi par Fitz-Gerald, a été acceptée par presque tous les théoriciens de la physique.

Suivant cette nouvelle et spécieuse conception, les dimensions d'un corps perdraient, elles aussi, leur caractère de parfaite indépendance des conditions cinématiques du corps, ce caractère qui, jusqu'alors, avait été une règle indiscutable de toutes nos spéculations. Une barre se mouvant, par rapport à l'éther, dans le sens de sa longueur, se raccourcirait d'une quantité dépendant de la rapidité du mouvement, pour reprendre sa longueur réelle (celle qu'elle aurait au repos) lorsqu'on la ferait tourner de 90 degrés, c'est-à-dire lorsqu'on la placerait perpendiculairement au mouvement.

Le conflit que nous voyons se révéler ici n'est que le symptôme d'un conflit beaucoup plus vaste et plus profond entre la théorie de Lorentz et la mécanique classique.

O'est ce qui a été très nettement vu par Einstein, lequel a eu le mérite de comprendre que, pour couper court à toutes les tentatives expérimentales (que l'on suggérait ou entreprenait de divers côtés) ayant pour but de chercher un effet capable de révéler le mouvement d'un corps par rapport à l'éther, et un effet dans lequel ne pût entrer en jeu la miraculeuse compensation due à la contraction, pour couper court, dis-je, à ces tentatives et les condamner *a priori*, il fallait pénétrer au fond même du conflit, afin de l'écarter à tout prix et pour toujours.

Et il a bien vu que ce conflit dépendait, en dernière analyse, de ce fait capital que la théorie de Lorentz n'admettait pas ce principe de relativité qui est une loi essentielle de la mécanique classique.

En effet, on le sait, celle-ci ne connaît pas de « corps en repos absolu », et elle n'étudie donc que des mouvements relatifs. Par conséquent elle ne connaît pas de phénomène capable de nous faire découvrir le mouvement d'un corps par rapport à l'espace, et elle ne peut admettre l'existence d'un tel phénomène. En d'autres termes, tous les phénomènes que décrit la mécanique restent, de par leur nature, identiques à eux-mêmes, qu'ils soient supposés se produire dans un monde en repos ou qu'ils aient lieu dans un monde en mouvement, et quelle que soit la vitesse de ce mouvement, pourvu qu'il soit constant.

On a coutume d'exprimer cette propriété en disant que les phénomènes mécaniques sont indépendants d'un mouvement de translation uniforme commun à toutes les parties du système. (Dans le langage mathématique, cette propriété du monde mécanique se traduit par le fait que les équations générales des phénomènes mécaniques ne sont pas altérées quand elles sont transformées avec les équations particulières qui expriment une translation uniforme).

Le monde de Lorentz, au contraire, précisément parce qu'il est fondé sur l'hypothèse de l'existence d'un éther immobile, admet implicitement la possibilité de connaître le mouvement

d'un corps par rapport à l'éther et, par suite, il prévoit des phénomènes et des modifications dépendant de ce mouvement, qui dans le domaine du concret physique a valeur de mouvement absolu.

Ce qu'il fallait faire était donc ceci : concilier la théorie avec le principe de relativité.

Cette fin pouvait être atteinte par une double voie : ou bien en modifiant la structure de la théorie, en en enlevant la notion de l'éther immobile et en retouchant ses équations fondamentales de sorte qu'elles pussent, sans inconvénients, coexister avec celles de la translation ; ou bien en modifiant les bases mêmes de la mécanique, précisément de manière que le mouvement de translation, défini d'une façon toute nouvelle, n'altérât pas les équations de la théorie.

Je ne crois pas m'exposer à des critiques fondées, si j'ose penser que la voie la plus naturelle eût été la première, justement parce qu'il devait apparaître *a priori* comme plus probable que la théorie électro-magnétique, tant à cause de sa jeunesse que de son ampleur, pouvait plus facilement renfermer des imperfections et des lacunes.

Cependant, Einstein a préféré entrer complètement dans la voie déjà tracée par Lorentz et conserver intact l'édifice théorique récent, en sacrifiant la vieille et glorieuse mécanique.

Cette voie qu'il a prise dès le commencement, et qu'il a constamment suivie dans tout le développement ultérieur de la théorie, est de caractère strictement mathématique (analytico-formel). Tout se réduit, comme on l'a dit au début, à trouver une nouvelle définition du mouvement rectiligne uniforme (et, par suite, de nouveaux concepts de temps et d'espace, les seuls qui entrent dans la notion de mouvement) telle que les formules qui la représentent aient la propriété de ne pas altérer les équations fondamentales de la théorie électro-magnétique lorsque, aux coordonnées x, y, z et au temps t qui déterminent un événement (dans l'espace et dans le temps) par rapport à un système de repère en repos, viennent à être substitués les coordonnées x', y', z' et le temps t' du même événement par rapport à un système de repère en mouvement uniforme. On trouve ainsi certaines relations entre ces deux quaternes de symboles, la vitesse relative des deux systèmes,

et une certaine constante c (qui a le sens d'une vitesse-limite et qui vient à s'identifier avec la vitesse de la lumière), relations qui contiennent la définition des nouveaux concepts de temps et d'espace et les lois de la nouvelle mécanique. Ce n'est qu'un ensemble de formules agilement et habilement maniées, qui engendrent de nouvelles et élégantes formules. La pensée concrète s'y présente comme une suprastructure, adaptée au schéma que constituent les formules, si bien que le tableau synthétique qu'Einstein nous dessine est certainement beaucoup plus riche en ombres qu'en lumières.

Malgré les difficultés, je vais tâcher d'esquisser tant bien que mal cette pensée, telle qu'on peut l'extraire de l'opuscule de vulgarisation écrit il y a six ans et réimprimé avec tant de succès jusqu'à ces mois derniers.

« Le principe de relativité de la mécanique doit être regardé, y est-il dit, comme l'affirmation — dans un domaine particulier de faits — d'une loi universelle qui nous dénie la possibilité de révéler, au moyen d'un fait physique quelconque, le mouvement absolu ».

Indépendamment des difficultés conceptuelles qui rendent trop ardue et trop obscure la notion de mouvement absolu, nous pouvons, sur le terrain des faits concrets, accepter sans plus de façons cette proposition d'Einstein; car on peut, avec le degré de certitude que la science comporte, affirmer que l'expérience, interrogée de bien des manières, a toujours répondu clairement en faveur du principe de relativité *généralisé*.

Cependant l'extension du principe de relativité à tous les phénomènes physiques se heurterait, suivant Einstein, à *une grave difficulté* dans le domaine de la *propagation de la lumière*.

Pour suivre fidèlement la pensée de notre réformateur, il est bon de rapporter ici, presque textuellement, une page de l'opuscule en question:

« Un long train court sur une voie rectiligne, avec la vitesse constante v . Dans ce train, un voyageur marche, dans le même sens que le train, avec la vitesse w . Un observateur O situé sur la voie ferrée verra le voyageur se mouvoir avec la vitesse $v + w$, car, tandis que le wagon a avancé de la distance v , le voyageur s'est déplacé en avant de la distance w et a donc parcouru la distance $v + w$ par rapport à la voie ».

Après ce rappel d'un théorème bien connu de la mécanique classique, celui de la composition des vitesses, Einstein suppose que le long du train voyage maintenant un rayon lumineux, dont l'extrémité avance avec la vitesse c par rapport à la voie, et il se demande quelle vitesse ce rayon doit avoir par rapport à un observateur O' emporté par le train.

« Il est clair, écrit-il textuellement, qu'ici trouve son application la considération précédente, dans laquelle le voyageur mobile par rapport au wagon tient la place du rayon lumineux. Comme, au lieu de la vitesse w par rapport au train, figure ici la vitesse c de la lumière par rapport à la voie, celle de la lumière par rapport au wagon sera :

$$w = c - v;$$

donc, *la vitesse de propagation de la lumière par rapport au wagon est inférieure à c .*

« Mais ce résultat est en contradiction avec le principe de relativité. La loi de propagation de la lumière dans le vide, suivant ce principe, devrait — comme toutes les autres lois générales de la nature — avoir la même expression, que l'on prenne soit le wagon, soit la voie comme système de repère ».

Ici, évidemment, nous sommes en présence d'une affirmation dont le contenu est beaucoup plus vaste que celui que l'on peut accorder au principe de relativité généralisé.

Celui-ci n'exige pas du tout que la vitesse de propagation de la lumière ait la même valeur pour les deux observateurs: il veut seulement que l'observateur O placé sur la voie, lequel expérimente sur la lumière provenant d'une source *immobile par rapport à la voie*, et l'observateur O' qui se trouve dans le train et expérimente sur la lumière provenant d'une source *en repos par rapport au train* (et, par suite, en mouvement avec la vitesse v de tout le train par rapport à la voie), trouvent des valeurs égales. Ce point est extrêmement important et il faut qu'il soit bien compris par quiconque désire pénétrer l'esprit de la nouvelle théorie.

Il est si vrai que *cette nouvelle affirmation* d'Einstein *dépasse, et de beaucoup, les strictes limites du principe de relativité*, que la science est déjà depuis quelque temps en possession de faits permettant à l'observateur du train de connaître la vitesse

avec laquelle il se meut par rapport à la source en repos sur la voie, et vice versa. Il suffit de rappeler le phénomène de déplacement des raies du spectre connu sous le nom d'effet Döppler, phénomène qui, on le sait, nous a permis de déterminer la vitesse avec laquelle beaucoup d'étoiles courent à notre rencontre ou fuient dans la direction de notre rayon visuel.

Il faut donc examiner avec le plus grand soin possible cette nouvelle affirmation que fait Einstein de la *constance de la vitesse de propagation de la lumière* par rapport à n'importe quel observateur mobile, affirmation qui constitue le postulat fondamental de la nouvelle théorie. C'est ce que nous ferons prochainement dans la seconde partie de cette étude.

Palermo, Università, Istituto di Fisica.

MICHELE LA ROSA

(Traduit par H. Buriot-Darsiles, Moulins).