

L'ÉVOLUTION DE L'ESPACE ET DU TEMPS

L'attention des physiciens s'est trouvée récemment ramenée vers les notions fondamentales de l'espace et du temps que de nouveaux faits expérimentaux les obligent à remanier; rien ne peut mieux montrer l'origine empirique de ces notions que leur adaptation progressive, non terminée encore, aux données de plus en plus subtiles de l'expérience humaine.

Je voudrais montrer que la forme, insuffisamment analysée d'ordinaire, sous laquelle ces notions se présentaient jusqu'ici, était déterminée, conditionnée, par une synthèse particulière et provisoire du monde, par la théorie mécaniste. Notre espace et notre temps étaient ceux exigés par la mécanique rationnelle.

A la synthèse nouvelle, de plus en plus puissante, que représente la théorie électromagnétique des phénomènes physiques, correspondent un espace et un temps, un temps surtout, autres que ceux de la mécanique, et en faveur desquels nos moyens actuels d'investigation expérimentale viennent de se prononcer. Il est particulièrement remarquable que le perfectionnement croissant de nos méthodes de mesure, dont la précision a pu être poussée pour certaines au-delà du milliardième, nous oblige à continuer encore aujourd'hui l'adaptation aux faits des catégories les plus fondamentales de notre pensée. Il y a là, pour le philosophe, une occasion excellente de pénétrer la nature intime de ces catégories en les trouvant encore en voie d'évolution, en les voyant vivre et se transformer sous ses yeux.

Il n'y a ni espace, ni temps à priori: à chaque moment, à chaque degré de perfectionnement de nos théories du monde physique, correspond une conception de l'espace et du temps. Le mécanisme impliquait la conception ancienne, l'électromagnétisme en exige une nouvelle dont rien ne nous permet de dire qu'elle sera définitive.

Il est d'ailleurs difficile à notre cerveau de s'habituer à ces formes nouvelles de la pensée: la réflexion y est particulièrement délicate et ne pourra être aidée que par la formation d'un langage adéquat.

C'est la tâche à laquelle, pour faciliter l'évolution de l'espèce humaine, philosophes et physiciens doivent aujourd'hui collaborer.

*
* *

Tous les êtres vivants ont une puissance d'expansion intérieure et spontanée d'autant plus grande qu'ils sont mieux adaptés au milieu dans lequel ils ont pris naissance. Quand, par suite de cette expansion, une rencontre a lieu entre individus ou espèces, il peut y avoir adaptation mutuelle, ou, si l'accord est impossible, conflit avec survivance du plus apte qui, en général, s'assimile la substance de l'autre et lui impose une forme nouvelle que la vie semble avoir jugée meilleure.

Il en est de même pour nos théories physiques: certaines sont particulièrement bien constituées, ont brillamment réussi dans l'interprétation, dans le groupement d'une catégorie de faits expérimentaux, matière à laquelle elles imposent une forme; elles se développent ensuite spontanément suivant cette forme, ce rythme qui leur est propre en prenant pour substance de l'édifice qu'elles construisent les fait déjà connus mais épars, puis ceux qu'elles conduisent à découvrir, et enfin ceux déjà constitués en synthèse sous forme de théories différentes que la nouvelle absorbe après être entrée en conflit avec elles.

De même que le travail de construction des êtres vivants est facilité par les synthèses organiques déjà réalisées dans les autres êtres dont ils s'alimentent, la théorie nouvelle conserve et utilise plus ou moins complètement les groupements de faits déjà constitués par les théories dont elle a triomphé.

Nous assistons en ce moment à un conflit de ce genre entre deux conceptions du monde particulièrement importantes et belles: la mécanique rationnelle de GALILÉE et de NEWTON d'une part et d'autre part la théorie électroma-

gnétique sous la forme adulte que lui ont donnée MAXWELL, HERTZ et LORENTZ.

La mécanique rationnelle fut créée pour l'interprétation des phénomènes du mouvement visible et elle y réussit de manière admirable. Tout l'effort scientifique du dix-huitième siècle et d'une grande partie du dix-neuvième fut consacré à étendre cette puissance d'explication à l'ensemble des phénomènes physiques en appliquant ces mêmes lois aux mouvements invisibles de particules matérielles ou de fluides variés.

Ainsi se développa la doctrine connue sous le nom de mécanisme, par fusion de la mécanique rationnelle et des hypothèses atomistiques. Le succès fut grand dans certains domaines, dans la théorie cinétique des fluides par exemple, moindre dans d'autres comme ceux de l'élasticité et de l'optique.

Il ne faut pas oublier à ce propos qu'on rendit souvent responsable des insuccès du mécanisme la seule conception atomistique, aujourd'hui cependant définitivement établie sur des faits expérimentaux indiscutables, et dont l'association avec la théorie électromagnétique s'est montrée depuis quinze ans d'une si remarquable fécondité. Ce qui semble en réalité être sujet à caution, c'est l'application aux mouvements invisibles des lois de la mécanique établies d'abord pour les mouvements visibles et qui, même pour ceux-ci, ne représentent plus qu'une première approximation, d'ailleurs excellente.

La théorie des phénomènes électromagnétiques, telle que nous la possédons aujourd'hui, est certainement indépendante des lois prescrites au mouvement de la matière par la mécanique rationnelle, bien que celle-ci semble intervenir dans certaines définitions fondamentales: la meilleure preuve de cette indépendance est fournie par les contradictions qui s'élevèrent actuellement entre les deux synthèses.

L'électromagnétisme est aussi remarquablement adapté à son domaine primitif que la mécanique rationnelle a pu l'être au sien; avec ses notions très spéciales d'un milieu qui transmet les actions de proche en proche, de champs électrique et magnétique caractérisant l'état de ce milieu, avec la forme très particulière des relations qu'il énonce entre les variations simultanées de ces champs dans l'espace et dans les temps, l'électromagnétisme constitue une discipline, un mode de pensée tout-à-fait à part, tout-à-fait distinct de la mécanique, et doué d'une force d'expansion étonnante puisqu'il s'est assimilé sans aucun effort l'im-

mense domaine de l'optique et de la chaleur rayonnante devant lequel le mécanisme était resté impuissant, et qu'il y provoque chaque jour des découvertes nouvelles. L'électromagnétisme a conquis la plus grande partie de la physique, envahi la chimie et groupé un nombre immense de faits jusque là sans forme et sans lien.

De nos deux théories adverses, la première possède les titres de noblesse d'un passé déjà ancien, l'autorité d'avoir vu vérifier ses lois par les astres les plus lointains comme par les molécules les plus ténues des gaz; la seconde, plus jeune et plus vivante, s'adapte infiniment mieux à la physique entière et possède une force intérieure de croissance que l'autre semble avoir perdue.

MAXWELL avait cru possible de concilier les deux théories et de montrer que les phénomènes électromagnétiques sont susceptibles d'interprétations mécaniques; mais sa démonstration, faite d'ailleurs sur le cas particulier des phénomènes présentés par les courants fermés, prouve seulement que les deux synthèses ont des caractères communs, la propriété commune de laisser stationnaires certaines intégrales, mais elles peuvent rester inconciliables par d'autres caractères.

*
* *

Ces caractères divergents ont été mis récemment en évidence par des faits expérimentaux nouveaux, par le résultat négatif de toutes les expériences, dont certaines d'une extraordinaire délicatesse, qui ont été tentées pour essayer de mettre en évidence le mouvement de translation uniforme d'ensemble d'un système matériel par des expériences intérieures à ce système, pour saisir le mouvement de translation absolu.

On savait déjà, et la Mécanique rationnelle rend parfaitement compte de ce fait, que des expériences de mécanique, sur les mouvements visibles, effectuées à l'intérieur d'un système matériel, ne permettent pas de mettre en évidence un mouvement de translation uniforme d'ensemble du système mais permettent au contraire d'atteindre le mouvement de rotation par le pendule de FOUCAULT ou le gyroscope. Autrement dit, au point de vue mécanique, la translation uniforme d'ensemble n'a pas de sens absolu, la rotation au contraire en a un.

Mais, à l'intérieur d'un système matériel, d'autres expériences peuvent être tentées qui mettent en jeu des phénomènes électromagnétiques ou optiques. La théorie

électromagnétique fait intervenir dans ses explications un milieu, l'éther, qui transmet les actions électriques et magnétiques et dans lequel se propagent, avec une vitesse déterminée, les perturbations électromagnétiques, la lumière en particulier.

On pouvait espérer que, si un système matériel se meut d'une translation uniforme par rapport à ce milieu, des expériences électromagnétiques ou optiques intérieures au système puissent permettre de saisir cette translation, de la mettre en évidence.

Comme la Terre, dans son mouvement annuel, possède une vitesse de translation qui varie constamment de quantités allant jusqu'à soixante kilomètres par seconde pour la vitesse relative correspondant à deux positions du globe diamétralement opposées sur l'orbite, on pouvait espérer qu'au moins à certains moments de l'année des observateurs liés à la Terre ainsi que leurs appareils se mouvaient par rapport à l'éther avec une vitesse de cet ordre et pourraient réussir à mettre leur mouvement en évidence.

On pouvait l'espérer, car en combinant les équations fondamentales de l'électromagnétisme, supposées exactes pour des observateurs fixes dans l'éther, avec les notions ordinaires de l'espace et du temps telles que la mécanique rationnelle les exige, on trouvait que ces équations devaient changer de forme pour des observateurs en mouvement dans l'éther, et que les différences, pour des vitesses de l'ordre de celle de la Terre sur son orbite, devaient être visibles dans certaines expériences d'une extraordinaire délicatesse.

Or le résultat s'est trouvé constamment négatif et, indépendamment de toute interprétation, nous pouvons énoncer comme un fait expérimental le contenu du principe suivant, dit de relativité :

Si divers groupes d'observateurs sont en translation uniforme les uns par rapport aux autres (tels des observateurs liés à la Terre pour diverses positions de celle-ci sur son orbite) tous les phénomènes mécaniques et physiques suivront les mêmes lois pour tous ces groupes d'observateurs. Aucun d'eux, par des expériences intérieures au système matériel qui lui est lié, ne pourra mettre en évidence la translation uniforme d'ensemble de ce système.

Au point de vue électromagnétique on peut encore dire que les équations fondamentales, sous leur forme ordinaire, sont vérifiées pour tous ces groupes d'observateurs à la fois, que tout se passe pour chacun d'eux comme s'il était immobile par rapport à l'éther.

*
**

C'est donc un fait expérimental que les équations entre grandeurs physiques par lesquelles nous traduisons les lois du monde extérieur, doivent se présenter exactement sous la même forme pour divers groupes d'observateurs, pour divers systèmes de référence en translation uniforme les uns par rapport aux autres.

Ceci exige, dans le langage des mathématiques, que ces équations admettent un groupe de transformations correspondant au passage d'un système de référence à un autre en mouvement par rapport à lui. Les équations de la physique doivent se conserver pour toutes les transformations de ce groupe. Dans une telle transformation, quand on passe d'un système de référence à un autre, les mesures des diverses grandeurs, en particulier de celles qui correspondent à l'espace et au temps, sont modifiées d'une manière qui correspond à la structure même de ces notions.

Or les équations de la mécanique rationnelle admettent effectivement un groupe de transformations correspondant au changement du système de référence, et la partie de ce groupe qui concerne les mesures d'espace et de temps est d'accord avec la forme ordinaire de ces notions.

Ce sera le grand mérite de H. A. LORENTZ d'avoir montré que les équations fondamentales de l'électromagnétisme admettent aussi un groupe de transformations qui leur permet de reprendre la même forme quand on passe d'un système de référence à un autre; *ce groupe diffère profondément du précédent pour ce qui concerne les transformations de l'espace et du temps.*

Il faut choisir: si nous voulons conserver une valeur absolue aux équations de la mécanique rationnelle, au mécanisme, ainsi qu'à l'espace et au temps qui leur correspondent, il nous faut considérer comme fausses celles de l'électromagnétisme, renoncer à la synthèse admirable dont j'ai parlé plus haut, revenir en optique par exemple à une théorie de l'émission avec toutes les difficultés qu'elle entraîne et qui l'ont fait rejeter voici plus de cinquante ans. Si nous voulons au contraire conserver l'électromagnétisme, il faut adapter notre esprit aux conceptions nouvelles qu'il exige pour l'espace et le temps et envisager la mécanique rationnelle comme n'ayant plus que la valeur d'une première approximation, largement suffisante d'ailleurs lorsqu'il s'agit de mouvements dont la vitesse ne dépasse pas quelques milliers de kilomètres par seconde. L'électromagnétisme, ou des lois de mécanique admettant le même

groupe de transformation que lui, permettraient seuls d'aller plus loin et prendraient la place prépondérante que le mécanisme assignait à la mécanique rationnelle.

*
* *

Pour mieux mettre en évidence l'opposition entre les deux synthèses, il est plus simple de fondre, comme l'a proposé MINKOWSKI, les deux notions d'espace et de temps dans la notion plus générale d'univers.

L'univers est l'ensemble de tous les événements: un événement consiste en ceci qu'il se passe ou qu'il existe quelque chose en un certain lieu à un certain instant. Étant donné un système de référence, c'est-à-dire un système d'axes lié à un certain groupe d'observateurs, un événement quelconque est déterminé au point de vue de sa position dans l'espace et dans le temps, par quatre coordonnées rapportées à ce système de référence, trois pour l'espace et une pour le temps.

Étant donnés deux événements rapportés à un certain système de référence, ils différeront en général à la fois dans l'espace et dans le temps, se produiront en des points différents à des instants différents. A un couple d'événements correspondra ainsi une distance dans l'espace (celle des points où les deux événements se passent) et un intervalle dans le temps.

On peut ainsi définir le temps par l'ensemble des événements qui se succèdent en un même point, par exemple dans une même portion de matière liée au système de référence, et définir l'espace par l'ensemble des événements simultanés. Cette définition de l'espace correspond en effet à ceci que la forme d'un corps en mouvement est définie par l'ensemble des positions simultanées des diverses portions de matière qui le composent, de ses divers points matériels, par l'ensemble des événements qui constituent les présences simultanées de ces divers points matériels. Si l'on convient avec MINKOWSKI d'appeler *ligne d'univers* une portion de matière qui peut être en mouvement par rapport au système de référence, l'ensemble des événements qui se succèdent dans cette portion de matière, la forme d'un corps à un instant donné est déterminé par l'ensemble des positions simultanées sur leurs lignes d'univers des divers points matériels qui composent ce corps.

La notion de simultanéité d'événements qui se passent en des points différents se présente ainsi comme fondamen-

tale dans la définition même de l'espace lorsqu'il s'agit de corps en mouvement, et c'est le cas général.

Dans la conception ordinaire du temps on attribue à cette simultanéité un sens absolu, on la suppose indépendante du système de référence; il est nécessaire que nous analysions de plus près le contenu de cette hypothèse généralement tacite.

Pourquoi n'admettons-nous pas d'ordinaire que deux événements, simultanés pour un certain groupe d'observateurs, puissent ne pas l'être pour un autre groupe en mouvement par rapport au premier, ou, ce qui revient au même, pourquoi n'admettons-nous pas qu'un changement du système de référence permette de renverser l'ordre de succession dans le temps de deux événements ?

Cela tient évidemment à ce que nous admettons implicitement que, si deux événements se succèdent dans un certain ordre pour un système donné de référence, celui qui s'est produit le premier a pu intervenir comme cause et modifier les conditions dans lesquelles s'est produit le second, quelle que soit la distance qui les sépare dans l'espace.

Dans ces conditions il est absurde de supposer que pour d'autres observateurs, pour un autre système de référence, le second événement, l'effet, puisse être antérieur à sa cause.

Le caractère absolu admis d'ordinaire pour la notion de simultanéité tient donc à l'hypothèse implicite d'une causalité pouvant se propager avec une vitesse infinie, à l'hypothèse qu'un événement peut intervenir instantanément comme cause à toute distance.

Or cette hypothèse est conforme à la conception mécaniste et est exigée par elle puisqu'un solide parfait de la mécanique rationnelle, ou un cordon de sonnette inextensible par exemple, interposé entre les deux points où les événements se produisent, permettrait de signaler instantanément la production du premier événement au point où le second va se produire, et permettrait par conséquent de tenir compte du premier, de le faire intervenir comme cause dans les conditions qui déterminent le second. Il y a donc adaptation mutuelle de la mécanique rationnelle et des conceptions ordinaires de l'espace et du temps dans lesquelles la simultanéité de deux événements distants dans l'espace possède un sens absolu.

Nous ne sommes donc point surpris de constater que dans le groupe de transformation qui conserve les équations de la mécanique *l'intervalle du temps de deux événements se conserve, est mesuré de la même manière par*

tous le groupes d'observateurs quels que soient leurs mouvements relatifs.

Il en est autrement pour la distance dans l'espace : c'est un fait bien simple et contenu dans les notions habituelles que la distance dans l'espace de deux événements n'a pas en général de sens absolu et dépend du système de référence employé.

Un exemple concret fera comprendre comment la distance dans l'espace des deux mêmes événements peut être différente pour différents groupes d'observateurs en mouvement les uns par rapport aux autres. Imaginons que par un trou percé dans le plancher d'un wagon en mouvement par rapport au sol, on laisse tomber successivement deux objets : le deux événements que constituent les sorties des deux objets par le trou du wagon se passent en un même point pour des observateurs liés au wagon et au contraire en des points différents pour des observateurs liés au sol. La distance dans l'espace de ces deux événements est nulle pour les premiers observateurs, et égale au contraire pour les autres au produit de la vitesse du wagon par l'intervalle de temps qui sépare les chutes des deux objets.

C'est seulement dans le cas où les deux événements sont simultanés que leur distance dans l'espace a un sens absolu, ne varie pas avec le système de référence. Il en résulte immédiatement que les dimensions d'un objet, la longueur d'une règle par exemple, ont aussi un sens absolu, sont les mêmes pour des observateurs en repos ou en mouvement par rapport à cet objet : nous avons remarqué en effet que pour des observateurs quelconques, la longueur d'une règle est la distance entre deux positions simultanées des extrémités de la règle, c'est-à-dire la distance dans l'espace de deux événements simultanés, de deux présences simultanées des deux extrémités de la règle. Nous venons de voir que la simultanéité, comme la distance dans l'espace de deux événements simultanés, ont un sens absolu dans les conceptions habituelles du temps et de l'espace.

Étant donnés deux événements successifs quelconques, deux événements séparés dans le temps, on pourra toujours trouver un système de référence par rapport auquel ces deux événements coïncident dans l'espace, des observateurs pour lesquels ces deux événements se passent en un même point. Il suffira en effet de donner à ces observateurs, par rapport au système de référence primitif, un mouvement tel qu'ayant assisté au premier événement, ils assistent ensuite au second, les deux événements se passant ainsi pour eux en un même point voisin d'eux ; il suffira de

donner à ces observateurs une vitesse égale au quotient de la distance dans l'espace par l'intervalle dans le temps des deux événements rapportés au système de référence primitif, et cela sera toujours possible si l'intervalle dans le temps n'est pas nul, si les deux événements ne sont pas simultanés.

Ce qu'on peut ainsi réaliser pour l'espace, la coïncidence de deux événements dans l'espace par un choix convenable du système de référence, nous avons vu qu'on ne peut pas le réaliser pour le temps, puisque l'intervalle dans le temps de deux événements a un sens absolu, est mesuré de la même manière dans tous les systèmes de référence.

Il y a là une dissymétrie entre l'espace et le temps habituellement donnés que les conceptions nouvelles font disparaître: l'intervalle dans le temps, comme la distance dans l'espace y deviennent variables avec le système de référence, avec le mouvement des observateurs.

Dans les conceptions nouvelles, un seul cas subsiste et doit subsister où le changement du système de référence est sans effet: c'est celui où les deux événements coïncident à la fois dans l'espace et dans le temps: cette double coïncidence doit avoir en effet un sens absolu puisqu'elle correspond à la rencontre des deux événements et que de cette rencontre peut jaillir un phénomène, un événement nouveau, ce qui a nécessairement un sens absolu. Reprenant l'exemple précédent, si les deux objets qui sortent du wagon par un même trou en sortent simultanément, si leur sorties coïncident à la fois dans l'espace et dans le temps, il en pourra résulter un choc, une rupture des objets, et ce phénomène de choc a un sens absolu, de sorte que dans aucune conception du monde, électromagnétique ou mécanique, la coïncidence à la fois dans l'espace et dans le temps, si elle existe pour un groupe d'observateurs, ne pourra être niée par un autre groupe, quel que soit son mouvement par rapport au premier. Pour ceux qui voient passer le wagon comme pour ceux qui s'y trouvent, les deux objets se seront brisés mutuellement parce qu'ils sont passés en même temps au même point.

Exception faite de ce cas très particulier, il est facile de voir que la conception électromagnétique exige un remaniement profond de la notion d'univers. Les équations de l'électromagnétisme impliquent, sous leur forme habituelle, qu'une perturbation électromagnétique, une onde lumineuse par exemple, se propage dans le vide avec une même vitesse dans toutes les directions, égale à trois cent mille kilomètres par seconde environ.

Les faits expérimentaux nouvellement établis ayant montré que si ces équations sont exactes pour un groupe d'observateurs, elles doivent l'être aussi pour tous autres quels que soient leurs mouvements par rapport au premier, il en résulte ce fait paradoxal qu'une perturbation lumineuse donnée doit se propager avec la même vitesse pour différents groupes d'observateurs en mouvement les uns par rapport aux autres. Un premier groupe d'observateurs voit une onde lumineuse se propager dans une certaine direction avec la vitesse de trois cent mille kilomètres par seconde et voit un autre groupe d'observateurs courir après cette onde avec une vitesse qui peut être quelconque; et cependant, pour ce second groupe, l'onde lumineuse se mouvra par rapport à lui avec la même vitesse de trois cent mille kilomètres par seconde.

M. EINSTEIN a montré le premier, comment cette conséquence nécessaire de la théorie électromagnétique suffit pour déterminer les caractères de l'espace et du temps exigés par la conception nouvelle de l'univers. On conçoit, d'après ce qui précède, que la vitesse de la lumière doive jouer un rôle essentiel dans les énoncés nouveaux: elle est la seule vitesse qui se conserve quand on passe d'un système de référence à un autre et joue dans l'univers électromagnétique le rôle que joue la vitesse infinie dans l'univers mécanique. Ceci va ressortir clairement des résultats qui suivent.

Pour un couple quelconque d'événements, le changement du système de référence modifie à la fois la distance dans l'espace et l'intervalle dans le temps, mais, au point de vue de l'importance de ces modifications, on est conduit à classer les couples d'événements en deux grandes catégories pour lesquelles l'espace et le temps jouent des rôles symétriques.

La première catégorie est constituée par les couples d'événements tels que leur distance dans l'espace est supérieure au chemin parcouru par la lumière pendant leur intervalle dans le temps, c'est-à-dire tels que si l'émission de signaux lumineux accompagne la production des deux événements, chacun d'eux aura lieu *avant* le passage du signal venant de l'autre. Une telle relation a un sens absolu, c'est-à-dire qu'elle est vérifiée pour tous les systèmes de référence si elle l'est pour l'un d'entre eux.

Les équations de transformation exigées par la théorie électromagnétique montrent que, dans ce cas, l'ordre de succession des deux événements dans le temps n'a pas de sens absolu. Si, pour un premier système de référence, les deux événements se succèdent dans un certain ordre, cet

ordre sera renversé pour des observateurs se mouvant par rapport aux premiers avec une vitesse inférieure à celle de la lumière, c'est-à-dire avec une vitesse réalisable physiquement.

Il est évidemment impossible que deux événements dont l'ordre de succession peut ainsi être renversé soient unis par une relation de cause à effet, puisque si une telle relation existait entre nos deux événements, certains observateurs verraient la cause postérieure à l'effet, ce qui est absurde.

Or, étant donné que la distance dans l'espace de nos deux événements est supérieure au chemin parcouru par la lumière pendant leur intervalle dans le temps, le premier ne pourrait intervenir comme cause dans la production de l'autre, le second ne pourrait être informé du premier, que si le lien causal pouvait se propager avec une vitesse supérieure à celle de la lumière. Nous devons donc, d'après ce qui précède, éliminer une telle possibilité: la causalité, quelle que soit sa nature, ne doit pas pouvoir se propager avec une vitesse supérieure à celle de la lumière; il ne doit exister ni messenger ni signal pouvant parcourir plus de trois cent mille kilomètres par seconde.

Nous devons donc admettre qu'un événement ne peut agir instantanément comme cause à distance, que sa répercussion ne peut se faire sentir immédiatement que sur place, au point même où il a lieu, puis ultérieurement à des distances croissantes, et croissantes au maximum avec la vitesse de la lumière. Celle-ci joue donc bien, à ce point de vue déjà, dans les conceptions nouvelles, le rôle que joue dans les conceptions anciennes la vitesse infinie qui y représente la vitesse limite avec laquelle peut se propager la causalité.

On voit par là que l'antagonisme actuel entre le mécanisme et l'électro-magnétisme manifeste seulement sous une forme nouvelle l'opposition entre les deux conceptions qui se sont succédées dans le développement des théories électriques: celle de l'action instantanée à distance compatible avec le mécanisme, et celle introduite par FARADAY de la transmission par l'intermédiaire d'un milieu, par action de proche en proche. Cette opposition ancienne se répercute aujourd'hui jusque sur les notions les plus fondamentales.

De ce qui précède découlent diverses conséquences: tout d'abord il est impossible qu'une portion de matière se meuve par rapport à une autre avec une vitesse supérieure à celle de la lumière. Ce résultat paradoxal est contenu dans les formules auxquelles conduit la cinématique nouvelle

pour la composition des vitesses: la composition d'un nombre quelconque de vitesses inférieures à la vitesse de la lumière. De même dans la conception ordinaire la composition d'un nombre quelconque de vitesses finies donne toujours une vitesse finie.

Nous pouvons affirmer ensuite qu'aucune action à distance, la gravitation, par exemple, ne doit se propager plus vite que la lumière et l'on sait que cette condition n'est nullement contredite par les résultats astronomiques actuellement établis.

Enfin il est nécessaire de renoncer au solide parfait de la Mécanique dans lequel on pourrait trouver un moyen de signaler instantanément à distance, d'établir un lien causal se propageant plus vite que la lumière. Rien dans ce que nous savons des solides réels ne s'oppose à ce que toute action, toute onde doive s'y propager moins vite que la lumière; les ondes élastiques, dans les solides les plus rigides, se propagent en réalité avec une vitesse beaucoup inférieure. L'important est que nous devons rejeter la conception même du solide parfait, d'un corps qui pourrait être mis en mouvement simultanément en tous ses points.

On peut résumer le raisonnement qui précède de la manière suivante: s'il existait un signal pouvant se propager avec une vitesse supérieure à celle de la lumière, on pourrait trouver des observateurs pour lesquels ce signal serait arrivé avant d'être parti, pour lesquels le lien causal que ce signal permet d'établir se trouverait inversé: on pourrait télégraphier dans le passé, comme dit M. EINSTEIN et nous considérons que cela serait absurde.

Les deux événements du couple considéré, qui n'ont pas d'ordre défini de succession dans le temps, sont donc nécessairement sans influence mutuelle possible, ce sont véritablement des événements indépendants. Il est évident que, n'ayant aucun lien causal entre eux, ils ne peuvent se succéder dans une même portion de matière, ils ne peuvent appartenir à une même ligne d'univers, à la vie d'un même être. Cette impossibilité est d'ailleurs d'accord avec ce fait que pour être successivement le siège de ces deux événements cette portion de matière devrait se mouvoir avec une vitesse supérieure à celle de la lumière.

Les deux événements ne peuvent donc être amenés à coïncider dans l'espace, par aucun choix du système de référence, mais ils peuvent être amenés à coïncider dans le temps: puisque leur ordre de succession peut être inversé, il existe des systèmes de référence pour lesquels les deux événements sont simultanés.

On peut appeler *couples dans l'espace* les couples d'événements qui viennent d'être considérés, dont l'ordre de succession dans le temps n'a pas de sens absolu, mais qui, de manière absolue, sont distants dans l'espace.

Il est remarquable que, si la distance dans l'espace des deux événements ne peut être annulée, elle passe par un minimum précisément pour les systèmes de référence par rapport auxquels les deux événements sont simultanés.

D'où l'énoncé suivant :

La distance dans l'espace de deux événements qui sont simultanés pour un certain groupe d'observateurs est plus courte pour ceux-ci que pour tous autres observateurs en mouvement quelconque par rapport à eux.

Cet énoncé contient, comme cas particulier ce que l'on a appelé la contraction de LORENTZ, c'est-à-dire le fait qu'une même règle examinée par différents groupes d'observateurs, les uns en repos, les autres en mouvement par rapport à elle, est plus courte pour ceux qui la voient passer que pour ceux qui lui sont liés. Nous avons vu en effet que la longueur d'une règle pour des observateurs qui la voient passer est définie par la distance dans l'espace de deux positions simultanées (pour ces observateurs) des deux extrémités de la règle. Et cette distance d'après ce qui précède, sera plus courte pour ces observateurs que pour tous autres en particulier pour ceux qui sont liés à la règle.

On comprend aussi aisément comment cette contraction de LORENTZ peut être réciproque, c'est-à-dire comment deux règles, égales au repos relatif, se voient mutuellement raccourcies quand elles glissent l'une contre l'autre, des observateurs liés à l'une des deux règles voyant l'autre plus courte que la leur. Cette réciprocity tient à ce que les observateurs liés aux deux règles en mouvement l'une par rapport à l'autre ne définissent pas de la même manière la simultanéité.

Nous allons trouver pour les couples d'événements de la seconde catégorie des propriétés exactement corrélatives des précédentes par permutation de l'espace et du temps. Ces couples, que j'appellerai *couples dans le temps*, sont définis par la condition suivante, qui a un sens absolu : la distance dans l'espace des deux événements est inférieure au chemin parcouru par la lumière pendant leur intervalle dans le temps ; autrement dit, le second événement se produit *après* le passage du signal lumineux dont l'émission coïncide dans l'espace et dans le temps avec le premier. Ceci introduit, au point de vue du temps, une dissymétrie entre les deux événements, le premier est antérieur au pas-

sage du signal lumineux dont l'émission coïncide dans l'espace et dans le temps avec le second événement, tandis que le second est postérieur au passage du signal lumineux dont l'émission accompagne le premier. Un lien de causalité peut exister, au moins par l'intermédiaire de la lumière, entre le deux événements, le second a pu être informé du premier, et ceci exige que l'ordre de succession ait un sens absolu, ne puisse être inversé par aucun changement du système de référence. On voit immédiatement qu'une telle inversion exigerait une vitesse supérieure à celle de la lumière pour le second système de référence par rapport au premier.

Deux événements entre lesquels existe ainsi une possibilité réelle d'influence, s'ils ne peuvent être amenés à coïncider dans le temps, peuvent toujours être amenés à coïncider dans l'espace par un choix convenable du système de référence. En particulier si les deux événements appartiennent à une même ligne d'univers, se succèdent, avec un ordre absolu, dans le vie d'une portion de matière, ils coïncident dans l'espace pour des observateurs liés à cette portion de matière.

Corrélativement à ce qui se passait tout à l'heure si l'intervalle dans le temps des deux événements ne peut être annulé, il passe par un minimum, précisément pour le système de référence par rapport auquel les deux événements coïncident dans l'espace.

D'où l'énoncé,

L'intervalle de temps entre deux événements qui coïncident dans l'espace, qui se succèdent en un même point pour un certain système de référence, est moindre pour celui-ci que pour tout autre en translation uniforme quelconque par rapport au premier.

*
**

Dans tout ce qui précède, les systèmes de référence employés sont supposés animés de mouvements de translation uniformes : pour de tels systèmes seulement les observateurs qui leur sont liés ne peuvent expérimentalement déceler leur mouvement d'ensemble, pour de tels systèmes seulement les équations de la physique doivent conserver leur forme quand on passe de l'un à l'autre. Pour de tels systèmes tout se passe comme s'ils étaient immobiles par rapport à l'éther : une translation uniforme dans l'éther n'a pas de sens expérimental.

Mais il ne faut pas conclure pour cela, comme on l'a fait parfois prématurément, que la notion d'éther doit être abandonnée, que l'éther est inexistant, inaccessible à l'expérience. Seule une vitesse uniforme par rapport à lui ne peut être décelée, mais tout changement de vitesse, toute accélération a un sens absolu. En particulier c'est un point fondamental dans la théorie électromagnétique que tout changement de vitesse, toute accélération d'un centre électrisé s'accompagne de l'émission d'une onde qui se propage dans le milieu avec la vitesse de la lumière, et l'existence de cette onde a un sens absolu; inversement toute onde électromagnétique, lumineuse par exemple, a son origine dans le changement de vitesse d'un centre électrisé. Nous avons donc pris sur l'éther par l'intermédiaire des accélérations, l'accélération a un sens absolu comme déterminant la production d'ondes partant de la matière qui a subi le changement de vitesse, et l'éther manifeste sa réalité comme véhicule, comme support de l'énergie transportée par ces ondes.

La théorie prévoit la possibilité de mettre en évidence, par des expériences électromagnétiques ou optiques, toute accélération du mouvement d'ensemble d'un système matériel, au moyen d'expériences intérieures à ce système, quand ce ne serait qu'en constatant l'émission d'ondes par des corps électrisés liés au système, immobiles par rapport à lui. Nous savons d'ailleurs que si l'accélération du mouvement d'ensemble est communiquée au système par des actions extérieures qui s'exercent seulement, contrairement à ce qui se passe pour la gravitation, sur certaines parties du système, nous disposons de bien d'autres moyens pour la mettre en évidence, par exemple des déformations intérieures au système par l'intermédiaire desquelles l'accélération se transmettra des portions du système soumises aux actions extérieures, aux autres portions qui ne les subissent pas.

Dans un champ de gravitation uniforme, où chaque portion du système subirait directement l'action extérieure qui lui communiquerait l'accélération d'ensemble, comme dans le boulet de Jules Verne, de semblables réactions ne se produiraient pas, mais il resterait, comme je l'ai dit plus haut, la possibilité d'expériences électromagnétiques ou optiques pour déceler le changement de vitesse du mouvement d'ensemble: les lois de l'électromagnétisme ne seraient pas les mêmes par rapport à des axes liés à ce système matériel que par rapport à des axes en mouvement uniforme de translation d'ensemble.



Nous allons voir se manifester sous une autre forme ce caractère absolu de l'accélération.

Considérons une portion de matière en mouvement quelconque et la succession des événements qui constituent la vie de cette portion de matière, sa ligne d'univers.

Pour deux de ces événements suffisamment voisins, des observateurs en mouvement uniforme qui assistent successivement à ces deux événements peuvent être considérés comme liés à la portion de matière, le changement de vitesse de celle-ci étant insensible dans l'intervalle des deux événements. Pour ces observateurs, l'intervalle de temps entre les deux événements, qui constituera un élément de ce que nous appellerons le *temps propre* de la portion de matière, sera plus court que pour tout autre groupe d'observateurs liés à un système de référence en mouvement uniforme quelconque.

Si nous prenons maintenant deux événements quelconques de la vie de notre portion de matière, leur intervalle de temps mesuré par des observateurs en mouvement non uniforme qui auront constamment suivi la portion de matière, sera, par intégration du résultat précédent, plus court que pour le système de référence en mouvement uniforme.

En particulier ce système de référence pourra être tel que les deux événements considérés s'y passent en un même point, que par rapport à lui la portion de matière ait parcouru un cycle fermé, soit revenue à son point de départ grâce à son mouvement non uniforme. *Et nous pouvons affirmer que pour des observateurs liés à cette portion de matière, le temps qui se sera écoulé entre le départ et le retour, le temps propre de la portion de matière, sera plus court que pour des observateurs qui seraient restés liés au système de référence en mouvement uniforme.* Autrement dit la portion de matière aura moins vieilli entre son départ et son retour que si elle n'avait pas subi d'accélération, que si elle était restée immobile par rapport à un système de référence en translation uniforme.

On peut dire encore qu'il suffit de s'agiter, de subir des accélérations pour vieillir moins vite; nous allons voir dans un instant combien l'on peut espérer gagner de cette manière.

Donnons des exemples concrets: imaginons un laboratoire lié à la Terre, dont le mouvement peut être considéré comme une translation uniforme, et dans ce laboratoire

deux échantillons de radium parfaitement identiques. Ce que nous savons sur l'évolution spontanée des matières radio-actives nous permet d'affirmer que si ces échantillons restent au laboratoire, ils perdront tous deux leur activité de la même manière au cours du temps et garderont constamment des activités égales. Mais envoyons promener l'un de ces échantillons avec une vitesse suffisamment grande et ramenons-le ensuite au laboratoire; ceci exige qu'au moins à certains moments cet échantillon ait subi des accélérations. Nous pouvons affirmer qu'au retour, son temps propre entre le départ et le retour étant moindre que l'intervalle de temps mesuré entre ces mêmes événements par des observateurs liés au laboratoire, il aura moins évolué que l'autre échantillon et par conséquent qu'il se trouvera plus actif que celui-ci; il aura moins vieilli, s'étant agité davantage. Le calcul montre que pour obtenir une différence d'un dix-millième entre les variations d'activité des deux échantillons, il aura fallu maintenir pendant la séparation l'échantillon vagabond à une vitesse d'environ quatre mille kilomètres par seconde.

*
* *

Avant de donner un autre exemple concret, présentons encore notre résultat sous un autre jour. Supposons que deux portions de matière se rencontrent une première fois, se séparent, puis se retrouvent. Nous pouvons affirmer que des observateurs liés à l'une et à l'autre pendant la séparation n'auront pas évalué de la même manière la durée de celle-ci, n'auront pas vieilli autant les uns que les autres. Il résulte de ce qui précède que ceux-là auront le moins vieilli dont le mouvement pendant la séparation aura été le plus éloigné d'être uniforme, qui auront subi le plus d'accéléérations.

Cette remarque fournit le moyen, à celui d'entre nous qui voudrait y consacrer deux années de sa vie, de savoir ce que sera la Terre dans deux cents ans, d'explorer l'aveur de la Terre en faisant dans la vie de celle-ci un saut en avant qui pour elle durera deux siècles et pour lui durera deux ans, mais ceci sans espoir de retour, sans possibilité de venir nous informer du résultat de son voyage puisque toute tentative du même genre ne pourrait que le transporter de plus en plus avant.

Il suffirait pour cela que notre voyageur consente à s'enfermer dans un projectile que la Terre lancerait avec une vitesse suffisamment voisine de celle de la lumière, quoique

inférieure, ce qui est physiquement possible, en s'arrangeant pour qu'une rencontre, avec une étoile par exemple, se produise au bout d'une année de la vie du voyageur et le renvoie vers la Terre avec la même vitesse. Revenu à la Terre ayant vieilli de deux ans, il sortira de son arche et trouvera notre globe vieilli de deux cents ans si sa vitesse est restée dans l'intervalle inférieure d'un vingt-millième seulement à la vitesse de la lumière. Les faits expérimentaux les plus sûrement établis de la physique nous permettent d'affirmer qu'il en serait bien ainsi.

Il est amusant de se rendre compte comment notre explorateur et la Terre se verraient mutuellement vivre s'ils pouvaient, par signaux lumineux ou par télégraphie sans fil, rester en communication constante pendant leur séparation, et de comprendre ainsi comment est possible la dissymétrie entre les deux mesures de la durée de séparation.

Pendant qu'il s'éloigneront l'un de l'autre avec une vitesse voisine de celle de la lumière, chacun d'eux semblera à l'autre fuir devant les signaux électromagnétiques ou lumineux qui lui sont envoyés, de sorte qu'il mettra un temps très long pour recevoir les signaux émis pendant un temps donné. Le calcul montre ainsi que chacun d'eux verra vivre l'autre deux cents fois plus lentement qu'à l'ordinaire. Pendant l'année que durera pour lui ce mouvement d'éloignement, l'explorateur ne recevra de la Terre que des nouvelles des deux premiers jours après son départ; pendant cette année il aura vu la Terre accomplir les gestes des deux jours. D'ailleurs, pour la même raison, en vertu du principe de DOPPLER, les radiations qu'il recevra de la Terre pendant ce temps auront pour lui une longueur d'onde deux cents fois plus grande que pour elle. Ce qui lui semblera radiation lumineuse par laquelle il pourra voir la Terre aura été émis par celle-ci comme rayonnement ultra-violet extrême, voisin peut être des rayons de RÖNTGEN. Et si l'on veut maintenir entre eux une communication par signaux hertziens, par télégraphie sans fil, l'explorateur ayant emporté avec lui des appareils de réception ayant une certaine longueur d'antenne, les appareils de transmission utilisés par la Terre pendant ces deux jour qui suivront le départ devront avoir une longueur d'antenne deux cents fois plus courte que la sienne.

Pendant le retour les conditions seront inversées: chacun d'eux verra vivre l'autre d'une vie singulièrement accélérée, deux cents fois plus rapide qu'à l'ordinaire, et pendant l'année que durera pour lui le retour, l'explorateur verra la Terre accomplir les gestes de deux siècles: on

conçoit ainsi qu'il la trouve au retour vieillie de deux cents ans. Il la verra d'ailleurs pendant cette période par l'intermédiaire d'ondes qui pour lui seront lumineuses mais qui pour elle appartiendront à l'extrême infra-rouge, par ces rayons d'environ cent-microns de longueur d'onde que M. M. RUBENS et WOOD ont récemment découverts dans le spectre d'émission du manchon Auer. Pour qu'il continue à recevoir de la Terre des signaux hertziens, celle-ci devra, après les deux premiers jours et pendant les deux siècles qui suivront, employer une antenne de transmission deux cents fois plus longue que celle du voyageur, quarante mille fois plus longue que celle employée pendant les deux premiers jours.

Pour comprendre la dissymétrie, il faut remarquer que la Terre mettra deux siècles à recevoir les signaux envoyés par l'explorateur pendant son mouvement d'éloignement qui pour lui dure un an: elle le verra vivre pendant ce temps dans son arche d'une vie deux cents fois ralentie; elle lui verra accomplir les gestes d'un an. Pendant les deux siècles au cours desquels la Terre le verra ainsi s'éloigner, elle devra, pour recevoir les signaux hertziens émis par lui, employer une antenne deux cents fois plus longue que la sienne. A la fin de ces deux siècles parviendra à la Terre la nouvelle de la rencontre du boulet avec l'étoile qui marque le commencement du voyage de retour. L'arrivée du voyageur se produira deux jours après pendant lesquels la Terre le verra vivre deux cents fois plus vite qu'à l'ordinaire, lui verra accomplir les gestes d'une autre année pour le trouver au retour vieilli seulement de deux ans. Pendant ce deux dernières journées, pour recevoir des nouvelles de lui elle devra employer une antenne de réception deux cents fois plus courte que l'antenne du voyageur.

Ainsi la dissymétrie tenant à ce que le voyageur seul a subi, au milieu de son voyage, une accélération qui change le sens de sa vitesse et le ramène au point de départ sur la Terre se traduit par ce fait que le voyageur voit la Terre s'éloigner et se rapprocher de lui pendant des temps égaux chacun pour lui à un an, tandis que la Terre, prévenue de cette accélération seulement par l'arrivée d'ondes lumineuses, voit le voyageur s'éloigner d'elle pendant deux siècles et revenir pendant deux jours, pendant un temps quarante mille fois plus court.

Si l'on cherche maintenant dans quelles conditions un semblable programme pourrait se réaliser, on se heurte, naturellement, à des difficultés matérielles énormes.

La théorie permet de calculer le travail que la Terre devrait dépenser pour lancer le projectile, pour lui commu-

niquer l'énergie cinétique correspondant à son énorme vitesse. En supposant la masse du boulet égale seulement à une tonne on calcule aisément que si l'on veut ne mettre qu'un an à le lancer, en le faisant tourner à l'extrémité d'une fronde par exemple avant de l'abandonner, il faudrait faire fonctionner sans arrêt pendant cette année là quatre cents milliards de chevaux-vapeur et brûler pour les produire au moins mille kilomètres cubes de houille.

Ces difficultés au départ seraient d'ailleurs suivies de difficultés non moins grandes au moment de la réflexion ou de l'arrêt. Il faudrait tout d'abord, pour la réflexion, trouver un système capable d'emmagasiner l'énorme énergie cinétique du projectile, puis de la restituer pour le renvoyer en sens opposé avec la même vitesse. Pour l'arrêt il faudrait dissiper graduellement cette même énergie sans qu'il en résulte à aucun moment d'accélération ni d'élévation de température néfaste au projectile, alors que la quantité de chaleur équivalent à son énergie cinétique suffirait pour le porter à une température de 10^{16} degrés au moins.

Nous avons d'autre part toute raison de penser que si un projectile arrivait vers la Terre avec une telle vitesse, celle-ci ne s'apercevrait même pas de son passage et qu'il s'arrêterait seulement à une certaine profondeur dans le sol sans laisser même aucun trou à l'endroit de la surface où il serait passé. A peine se produirait-il sur sa trajectoire à travers l'atmosphère un léger accroissement de la conductibilité électrique de l'air. Nous savons, en effet, par l'exemple des particules α du radium, que des atomes matériels d'hélium dont la vitesse est à peine de 20.000 kilomètres par seconde peuvent suivre à travers la matière une trajectoire parfaitement rectiligne et traverser d'autres atomes sans laisser d'autre trace de leur passage qu'un accroissement de conductibilité, et notre projectile aurait, par unité de masse une énergie cinétique cent mille fois plus grande que les particules α . Il constituerait une radiation extraordinairement pénétrante. Il faudrait, pour éviter ces difficultés, trouver un moyen de ralentir progressivement son mouvement à mesure qu'il approcherait de la Terre. Il ne semble pas qu'on puisse non plus tenter ici l'emploi du principe de la fusée que mon ami M. PERRIN propose d'utiliser pour les voyages interplanétaires.

*
* *

Je n'ai développé ces spéculations que pour montrer par un exemple frappant à quelles conséquences éloignées des conceptions habituelles conduit la forme nouvelle des

notions d'espace et de temps. Il faut se souvenir que c'est là le développement parfaitement correct de conclusions exigées par des faits expérimentaux indiscutables, dont nos ancêtres n'avaient pas connaissance lorsqu'ils ont constitué, d'après leur expérience que synthétisait le mécanisme, les catégories de l'espace et du temps dont nous avons hérité d'eux. A nous de prolonger leur œuvre en poursuivant avec une minutie plus grande, en rapport avec les moyens dont nous disposons, l'adaptation de la pensée aux faits.

Ce n'est pas seulement dans le domaine de l'espace et du temps que s'impose le remaniement des conceptions les plus fondamentales de la synthèse mécaniste. La masse, par laquelle se mesurait l'inertie, attribut primordial de la matière, était considérée comme un élément essentiellement invariable caractérisant une portion donnée de matière. Cette notion s'évanouit maintenant et se confond avec celle d'énergie: la masse d'une portion de matière varie avec l'énergie de celle-ci, augmente et diminue avec elle. Une portion de matière qui rayonne perd de son inertie en quantité proportionnelle à l'énergie rayonnée. C'est l'énergie qui est inerte; la matière ne résiste au changement de vitesse qu'en proportion de l'énergie qu'elle contient.

La notion d'énergie elle-même perd son sens absolu: sa mesure varie avec le système de référence auquel les phénomènes sont rapportés, et les physiciens cherchent en ce moment quels sont, dans l'expression des lois du monde, les véritables éléments possédant un sens absolu, les éléments qui restent invariants quand on passe d'un système de référence à un autre et qui joueront, dans la conception électromagnétique de l'univers, le rôle que jouaient, dans la synthèse mécaniste, le temps, la masse et l'énergie.
