

LES IDÉES D'EINSTEIN ET LA THÉORIE DE LA RELATIVITÉ

1. Introduction. 2. Conceptions fondamentales. 3. Critères de choix d'une théorie scientifique. 4. Genèse de la théorie de la relativité restreinte. 5. L'Univers quadridimensionnel. 6. La géométrie, la physique et la théorie de la relativité générale.

1. Les travaux d'Einstein sont d'un fini remarquable : les formes d'exposé de la théorie élaborées sur de longues années diffèrent très peu de l'exposé initial. Il faut y ajouter une clarté extraordinaire et une grande précision de langage qui s'harmonise avec l'esprit rationaliste caractéristique de l'œuvre du savant. Chacun des travaux d'Einstein est étroitement lié à l'ensemble et rend claire la structure générale de la théorie. La caractéristique essentielle de la théorie de la relativité, l'un des principes de base de son élaboration, c'est que les relations théoriques données ont été trouvées à partir des postulats très généraux de la conception scientifique du monde. D'où l'unité interne de l'héritage scientifique laissé par Einstein. Cette unité apparaît avec une netteté particulière lors d'une revue rétrospective. Dans son autobiographie de 1949 Einstein note que seule une revue rétrospective lui permet de saisir le développement systématique de ses idées¹⁾. Les relations logiques nettes faisant de ses travaux scientifiques un tout monolithique apparaissent tout particulièrement dans les nombreux résumés rétrospectifs d'Einstein.

Si aujourd'hui nous sentons encore plus l'unité de son œuvre, ceci est dû à une nouvelle évaluation du désir d'arriver à une théorie unitaire du champ qui imprégnait toute la vie spirituelle du savant dans les trente dernières années de sa vie.

La théorie de la relativité est la première conception physique universelle, qui dès le début, par la voix de son créateur, proclame son caractère non définitif. Elle a porté

* ¹⁾ A. Einstein. Autobiographisches. Voir le recueil « Albert Einstein Philosopher-Scientist ». Ed. by P. Schilp. Tudor Publishing Company. N.Y., 1951.

atteinte aux principes fondamentaux de la physique lesquels ne pouvaient être ébranlés sans renoncer à tout absolu dogmatique, en particulier à la notion de fini absolu de la théorie de la relativité elle-même.

Dans son autobiographie de 1949, Einstein fait une remarque critique sur la forme sous laquelle il a formulé la théorie de la relativité. La théorie de la relativité introduit certains postulats concernant le comportement des échelles et des horloges. « Ceci, en un certain sens, n'est pas logique ; la théorie des échelles et des horloges devrait découler des solutions des équations de base (compte tenu du fait que ces objets ont une structure atomique et qu'ils sont en mouvement) et non être étudiée indépendamment. Mais la méthode habituelle a ses raisons, car dès le début il est évident que les postulats adoptés sont insuffisants pour fonder la théorie des échelles et des horloges¹⁾. »

Durant trente ans Einstein a cherché une théorie permettant de déduire les lois de la théorie de la relativité à partir de concepts encore plus fondamentaux. Ces recherches ont été vaines. A l'heure actuelle, dans la théorie des particules élémentaires et des champs quantifiés on note certaines tendances encore mal affirmées, mais qui permettent toutefois d'apprécier d'une manière plus profonde et plus précise les recherches d'Einstein visant à la création d'une théorie unitaire du champ, donc le développement et la généralisation de la théorie de la relativité. Les années qui suivirent sa mort ont vu l'accumulation rapide de nouvelles connaissances sur le microcosme et l'Univers et l'apparition de nouveaux problèmes attendant une solution théorique. Aujourd'hui, nous sommes en mesure de voir des aspects nouveaux de la théorie de la relativité restreinte liés au développement de la théorie quantique relativiste, de nouveaux aspects de la théorie de la relativité générale apparus dans certains problèmes d'astrophysique et de cosmologie, résolus ou non, ainsi que les aspects nouveaux des esquisses de la théorie unitaire du champ. Ainsi, à l'heure actuelle, s'ouvre à nos yeux l'idée essentielle qui imprègne tous les travaux d'Einstein sur la théorie de la relativité.

2. Nernst affirme que la relativité d'Einstein est plus une théorie philosophique que physique.

* ¹⁾ A. Einstein. Autobiographisches. Ed. citée.

Cette remarque est dans l'esprit de la période « préatomique », c'est-à-dire du temps où la physique atomique n'avait pas encore donné à la théorie de la relativité d'Einstein les preuves expérimentales modernes, incompatibles par leur nombre et leur importance avec les effets macroscopiques connus au début du siècle. A cette époque, l'explication des résultats de l'expérience de Michelson et d'autres expériences analogues découlant de la théorie d'Einstein produisit une grande impression vu sa généralité et son naturel. A l'heure actuelle, nous connaissons un grand nombre d'expériences qui ne sauraient être expliquées sans la relativité.

La remarque de Nernst souligne néanmoins le rôle important des critères de la connaissance dans la théorie de la relativité d'Einstein. La physique du XX^e siècle est plus étroitement liée aux problèmes de la connaissance que la physique de la période précédente. Ce trait caractéristique de la science moderne apparut avec plus de netteté au milieu du siècle. En 1944, Einstein écrit : « Les difficultés que rencontre le physicien aujourd'hui l'obligent bien plus que le physicien des générations précédentes à prendre connaissance des problèmes philosophiques¹⁾. »

Au début du siècle, ce contact pour les physiciens était déjà devenu plus important qu'auparavant. Si Schiller en s'adressant aux naturalistes et aux philosophes pouvait dire : « ...Ce n'est que par des voies différentes que vous trouverez la vérité ! », pour la science et la philosophie du XX^e siècle il semble que ce soit le contraire.

La théorie de la relativité marque une nouvelle période dans les relations entre les problèmes purement physiques et les problèmes de la connaissance. Elle explique les résultats négatifs des recherches sur le vent d'éther non pas par une hypothèse avancée spécialement, mais sur la base d'une révision radicale des notions de l'espace et du temps. La théorie de la relativité ne pouvait être le résultat de l'application purement spontanée des principes de la théorie de la connaissance. Elle se fondait sur l'élaboration consciente de ces principes. Une telle élaboration avançait parfois les représentations physiques, parfois retardait sur elles. Ainsi les digressions philosophiques d'Einstein liées à la théorie de la relativité sont parfois rétrospectives, par-

* ¹⁾ A. Einstein. Ideas and Opinions. N.Y., 1954, p. 19.

fois, au contraire, devançant certains travaux sur la relativité. Les idées philosophiques des dernières années de sa vie sont particulièrement importantes pour dresser le bilan de la conception du monde d'Einstein. Elles permettent de comprendre d'une manière plus profonde et plus précise la structure interne de la théorie de la relativité, telle que la voyait rétrospectivement Einstein. Soulignons que le mot « rétrospectivement » ne doit pas être compris trop à la lettre, car souvent Einstein considérait la théorie de la relativité à la lumière d'une certaine idée nouvelle plus générale, qui était loin d'être une théorie physique univoque ; ainsi, l'évaluation « rétrospective » était en même temps une évaluation « perspective ».

La conception du monde d'Einstein qui s'est cristallisée dès le début de son activité créatrice permet d'entrevoir non seulement la structure logique de la théorie de la relativité, mais également ses sources spirituelles, le chemin réel qui a conduit Einstein à la théorie de la relativité. Il faut noter que les digressions ultérieures sont également très importantes. Ce n'est que par un regard sur le passé qu'Einstein a pu distinguer ce qui, dans ses idées premières, « travaillait » en faveur de la théorie de la relativité de ce qui portait un caractère purement personnel, de ce qui ne s'est pas trouvé confirmé et avait été rejeté.

Ce qui vient d'être dit montre que les digressions philosophiques d'Einstein apparaissent sur la base d'un crédo en perpétuel développement, mais qui s'est déjà affirmé dans les années de jeunesse. La caractéristique de ce crédo nous permettra de voir les idées philosophiques à la base de la théorie de la relativité.

La conception du monde d'Einstein est pour l'essentiel proche des idées fondamentales du rationalisme du XVII^e siècle, étroitement liées aux principes physiques de la conception classique du monde de cette époque. Il s'agit des idées rationalistes de base qui ne se sont affirmées qu'au siècle suivant. En ce sens Spinoza a eu plus d'influence sur Einstein que les coryphées ultérieurs du rationalisme. Au XVII^e siècle la raison ne prétendait pas encore donner une image complète de la nature, ces prétentions devaient recevoir leur couronnement dans l'image laplacienne de l'être, donnant la position et les vitesses de toutes les particules de l'Univers. D'un autre côté, au XVII^e siècle, la raison ne se considérait pas comme étant appelée à cons-

truire *a priori* les lois régissant l'Univers. Ce qui est caractéristique du XVII^e siècle et particulièrement de Spinoza, c'est une conception de l'Univers dans laquelle la raison se rapproche peu à peu des lois réelles, sans prétendre à chaque approximation à une solution définitive de toutes les énigmes de l'existence.

Une telle conception n'exclut pas un certain schéma de l'être, une certaine idée sur le caractère des lois fondamentales du monde que la raison conçoit peu à peu. La raison se rapproche des lois réelles de l'existence et fait entrevoir une harmonie réelle de l'Univers, cherchant à découvrir derrière les effets extérieurs des déplacements et des interactions de parties discrètes de la substance. Ces parties discrètes, ces corps matériels ne diffèrent que par leur forme, leur grandeur et leur mouvement, des définitions quantitatives permettant de comprendre la nature des choses.

Le rationalisme du XVII^e siècle se caractérise par un certain idéal de la connaissance scientifique du monde, où ne figurent que des particules de matière homogène en mouvement et en interaction. Cette image ne coïncide pas complètement avec le contenu positif des connaissances scientifiques (une telle coïncidence est proclamée au XVII^e siècle), elle reste un idéal. La mécanique classique du XVII^e siècle tend à se rapprocher de cet idéal, on peut l'appeler l'*idéal classique* de la science.

Galilée a écrit qu'« extensivement » (par l'ampleur des données) la connaissance humaine ne peut être comparée avec la vérité absolue infinie et inépuisable, mais qu'« intensivement » (par l'authenticité) « la raison humaine prend connaissance de certaines vérités d'une manière aussi parfaite et avec une certitude aussi absolue que la nature même ¹⁾ ». Cette connaissance certaine est mathématique : les mathématiques découvrent l'enchaînement des causes et des effets « et il n'existe pas de certitude de degré supérieur ».

De sorte que l'image complète des relations causales, accessibles aux mathématiques et qui se réduisent aux mouvements et aux interactions des corps, reste l'idéal de la science. Cet idéal reflète l'essence intrinsèque des choses, et

* ¹⁾ G. Galilée. Dialogue sur deux grands systèmes du monde, le système de Ptolémée et celui de Copernic. Ed. Naz. VII. Firenze. Barbera, 1934, p. 129.

l'approche de cet idéal exclut toute représentation subjective et découvre dans une mesure de plus en plus grande l'harmonie objective de l'Univers.

Dès sa jeunesse, Einstein a perçu cette harmonie objective. Dans son autobiographie de 1949 il parle des idées qui l'ont envahi très tôt : « Il y avait là, à l'extérieur, ce grand monde existant indépendamment de nous, des hommes, et se dressant devant nous comme une énorme et éternelle énigme, partiellement accessible cependant à notre perception et à notre raison. L'étude de ce monde me semblait une libération, et bientôt je me rendis compte que parmi ceux que j'avais appris à apprécier et à estimer, nombreux avaient trouvé leur liberté interne et leur assurance en se donnant entièrement à cette occupation. En l'étreignant par la pensée, dans le cadre de mes possibilités, ce monde objectif s'est présenté à moi d'une manière semi-consciente semi-inconsciente comme un but suprême. Ceux qui pensaient ainsi, que ce soit mes contemporains ou mes ancêtres, sont devenus avec leurs idées mes uniques et fidèles compagnons ¹⁾. »

Dans les années estudiantines, puis plus tard à Berne, dans la période précédant immédiatement la création de la théorie de la relativité, Einstein étudia les idées de Spinoza, et l'attrait d'une connaissance objective prit la forme de conceptions philosophiques déterminées. Puis Einstein s'est rapproché peu à peu de l'idée d'une *représentation invariante* des processus physiques, c'est-à-dire d'une représentation indépendante du choix du système de référence.

La théorie de la relativité a été une étape historique dans le développement de cette représentation invariante. La science fait entrer peu à peu dans l'image physique du monde des relations indépendantes des conditions d'expérience et d'observation. Les conceptions relativistes de l'Antiquité, du Moyen Age, de la Renaissance et des temps modernes marquent des étapes vers une représentation invariante, la première de ces étapes étant l'idée antique de l'espace isotrope. Les Grecs ont renoncé à la Terre plate, ils ont admis l'existence d'antipodes et relativisé la notion de haut et de bas. Ainsi, les directions dans l'espace se sont trouvées être liées aux corps matériels ; le premier

* ¹⁾ A. Einstein. Autobiographisches. Ed. citée.

pas était fait vers l'« idéal classique » futur. Le système héliocentrique de Copernic renonçait ensuite à l'édifice universel, ayant la Terre pour centre, et relativisait l'image du mouvement des corps célestes perçue par un observateur terrestre. Bientôt, avec la conception d'un Univers infini, sans centre, les trajectoires des corps sont reliées à des corps de référence et perdent leur caractère absolu.

Ces étapes de libération de la science de l'anthropocentrisme ont été les étapes de la représentation invariante des processus de la nature. Dans les représentations anciennes des antipodes « tombant » de la Terre, dans les images postérieures de Ptolémée d'un tourbillon destructeur qui aurait balayé de la Terre tous les objets, si celle-ci avait été en mouvement, et autres hypothèses de ce genre, on suppose que le comportement des corps dépend de leur position ou de leur mouvement par rapport à un système de référence privilégié. Vers le début du XX^e siècle, les prétentions d'un certain système de référence à un caractère absolu privilégié reposaient sur la différence de la vitesse de la lumière (la vitesse « réelle » de la lumière est rapportée au système privilégié) et les forces d'inertie apparaissant lors d'un mouvement accéléré par rapport à un tel système.

A ces conceptions s'opposaient celles de l'invariance par rapport aux transformations des coordonnées, de l'homogénéité de l'espace et de la relativité du mouvement, ces dernières découlant des données expérimentales. Le développement de ces conceptions était conditionné par l'idée que le comportement de chaque corps dépend de ses interactions avec les autres corps.

Pour Einstein, la relativité était une étape dans le développement des idées sur l'harmonie objective de l'être. Cette harmonie s'exprime par la liaison causale universelle des processus de la nature. La raison objective du monde est la relation causale de ses processus. Einstein pouvait répéter après Spinoza : « Cause ou raison ».

Dès sa jeunesse, Einstein a eu l'idée d'une représentation de l'Univers objectif, exprimant l'indépendance des voies de la connaissance. Cette idée a conduit, lors de son développement, à la notion d'invariance de grandeurs qui, en physique classique, dépendaient du choix du système de référence, le choix des systèmes de coordonnées déterminant alors les grandeurs considérées auparavant comme invariantes.

Chaque théorie incarnant le principe de la relativité dans des relations purement physiques comparables avec l'expérience et en fin de compte déduites de l'expérience indique quelles sont les grandeurs physiques qui dépendent des transformations des coordonnées et quelles sont celles qui servent d'invariants à ces transformations. Ceci détermine le caractère des transformations et des équations covariantes servant à décrire les relations physiques dans la théorie considérée. La mécanique classique est une théorie physique concrète, proclamant l'invariance des vecteurs et des intervalles de temps ainsi que la variation des vitesses lors des transformations de Galilée. La relativité restreinte affirme l'invariance de l'intervalle quadridimensionnel espace-temps lors des transformations de Lorentz et la variation des échelles spatiales et temporelles. La relativité générale est basée sur l'invariance de l'intervalle quadridimensionnel par rapport à un groupe plus large de transformations.

Cependant, toutes les modifications concrètes du principe de la relativité reposent sur l'hypothèse générale d'une réalité objective, indépendante des modes de perception, d'enregistrement et de mesure.

Pour Einstein cette idée était le fondement de la science dans sa totalité. « La foi en un monde extérieur indépendant du sujet qui le perçoit se trouve à la base de toute science de la nature », écrit Einstein dans son article intitulé « L'influence de Maxwell sur l'évolution de la conception de la réalité physique »¹⁾.

Les corps existant objectivement dans la nature sont liés, dans leur comportement, par une relation causale objective. Einstein exclut l'influence de forces immatérielles sur le cours des processus physiques. Cette idée appliquée conséquemment dans les constructions physiques d'Einstein ne doit jamais être perdue de vue si l'on veut comprendre le sens réel des mots « Dieu » et « religion » qui apparaissent dans ses articles et ses lettres.

Souvent pour Einstein le mot « Dieu » signifie l'harmonie matérielle de l'édifice universel. Rapportons la remarque d'Einstein sur la relation entre la masse et l'énergie faite dans l'une de ses lettres de 1905. « La lumière emporte

* ¹⁾ A. Einstein. Comment je vois le monde. Paris, 1934, p. 194.

une certaine masse. C'est là une idée gaie et séduisante. Mais Dieu ne se moque-t-il pas de ceci et ne me mène-t-il pas par le bout du nez, c'est ce que je ne sais pas¹⁾. » Lorsque son ami de jeunesse Maurice Solovine protestait contre le mot « religiosité », Einstein lui expliquait le sens conventionnel qu'il attribuait à ce mot pour que l'on ne pense pas « qu'affaibli par l'âge, je suis devenu une proie des curés ». Et d'expliquer qu'il s'agissait pour lui de la sensation de l'harmonie interne de l'existence. Une sensation qui s'oppose au positivisme et à la représentation dogmatique du monde²⁾. Dans son article « Comment je vois le monde » Einstein écrivait qu'à l'opposé du croyant « ...le savant est pénétré du sentiment de la causalité de tout ce qui arrive. Pour lui, l'avenir ne comporte pas moins de détermination et d'obligation que le passé, la morale n'a rien de divin, c'est une question purement humaine. Sa religiosité réside dans l'admiration extasiée de l'Harmonie des lois de la nature... Ce sentiment est le leitmotiv de la vie et des efforts du savant, dans la mesure où il peut s'élever au-dessus de l'esclavage de ses désirs égoïstes. »³⁾

L'harmonie du monde a une nature causale. C'est pourquoi elle exclut l'existence de processus initiaux quels qu'ils soient où s'arrêterait la chaîne des causes-effets et qui ne peuvent avoir d'explication causale ultérieure. L'harmonie, d'après Einstein, englobe *tout* l'édifice universel ; découvrant l'harmonie gouvernant l'Univers nous nous rapprochons d'une image univoque, sans hypothèse arbitraire. C'est à cette idée qu'est liée une tendance importante dans l'œuvre d'Einstein et dans l'évolution du principe de la relativité.

Einstein a souvent réfléchi sur la nature des constantes universelles de la physique. On peut rendre ces dernières sans dimensions, il suffit pour cela de remplacer les unités arbitraires de masse, d'espace et de temps par des unités « naturelles ». Peut-on considérer les relations obtenues ainsi entre les masses des différents corps, distances, durées de processus divers, etc., comme des expressions purement

* ¹⁾ C. Seelig. Albert Einstein. Zürich, Europa Verlag, 1960, S. 126.

²⁾ Voir A. Einstein. Lettres à Solovine. Paris, 1956, p. 115.

³⁾ A. Einstein. Comment je vois le monde. Ed. citée, p. 39.

empiriques ou doivent-elles faire l'objet d'une analyse causale ultérieure ?

Dans son autobiographie de 1949 Einstein parle de constantes sans dimensions : « Au sujet de ces dernières je voudrais émettre une hypothèse, que l'on ne peut étayer, à l'heure actuelle, par rien d'autre que la foi en la simplicité et la compréhensibilité de la nature. Cette hypothèse est la suivante : de telles constantes arbitraires n'existent pas. En d'autres termes, la nature est faite de telle sorte que ses lois sont essentiellement déterminées par des exigences purement logiques, telles que dans l'expression de ces lois n'entrent que des constantes pouvant être théoriquement définies (c'est-à-dire des constantes telles que leur valeur numérique ne peut être changée sans détruire la théorie ¹⁾. »

Cette idée traduit l'une des tendances essentielles de la science des temps nouveaux. Kepler déjà voulait trouver les fondements rationnels des relations existant entre les orbites des planètes du système solaire. Mais ceci dépassait les possibilités des XVI^e-XVII^e siècles. Ultérieurement, la science a toujours essayé d'élaborer les relations observées à partir d'un système unique d'interactions des corps qui englobe toute la nature. Dès le début du siècle, dans les années de préparation de la relativité restreinte, Einstein voulait déduire les relations physiques observées à partir de l'harmonie générale de l'existence. Pour Einstein, l'approximation d'une théorie physique mesure la « perfection interne » de la théorie. Nous rencontrerons bientôt ce critère et nous verrons le rôle décisif qu'il a joué dans la genèse de la théorie de la relativité.

Ainsi, l'harmonie de l'existence est dans la liaison causale universelle, englobant toute la nature. Cette relation se révèle peu à peu au chercheur. L'idée d'une approche de la vérité objective imprégnait la conception du monde de Galilée et de Spinoza, elle caractérise le rationalisme du XVII^e siècle, et ce n'est que plus tard que la raison a commencé à prétendre à une connaissance absolue et totale de la vérité dans l'instance dernière. Pour Einstein, tout comme pour les coryphées de la pensée rationaliste du XVII^e siècle, la connaissance du monde n'est pas une équivalence triviale entre des constructions *a priori* de la raison

* ¹⁾ A. Einstein. Autobiographisches. Ed. citée.

et les connaissances scientifiques. Une pensée dogmatique impose à la nature ces constructions ou bien déclare solutions définitives des énigmes de l'existence les connaissances empiriques du moment présent. Einstein, au contraire, voit dans la connaissance un problème complexe : le monde est inépuisable, l'information que nous en avons est limitée, insuffisante, approchée, non définitive ; cependant, le monde est connaissable : les hypothèses sur le monde se succèdent rapprochant l'homme de la vérité objective. C'est là le sens de la phrase bien connue d'Einstein : « Le plus incompréhensible dans le monde, c'est qu'il est compréhensible. »

Il est temps de passer à la démonstration concrète du rôle joué dans la théorie de la relativité par les principes philosophiques exposés. Mais au préalable, il est bon de s'arrêter sur l'influence exercée par la philosophie des temps modernes sur les conceptions d'Einstein.

Dans sa jeunesse, Einstein a étudié consciencieusement Hume et, par la suite, il a, à maintes reprises, parlé de l'influence qu'a eue Hume sur ses idées sur la connaissance. Einstein a appris chez Hume à se méfier des perceptions sensibles concrètes de l'expérimentateur, des « évidences » empiriques se présentant devant le chercheur qui étudie la nature. Une telle « évidence », affirme Einstein, ne détermine pas, d'une manière univoque, la liaison causale réelle des processus de la nature. Mais Hume en tire une conclusion avec laquelle Einstein ne peut être d'accord. Hume affirmait que la connaissance ne pénètre pas l'essence de la liaison causale objective, que la connaissance doit se limiter au monde des effets. Au contraire, Einstein affirme l'insuffisance de l'enregistrement phénoménologique des perceptions, de la nécessité et de la possibilité de cognition objective de la cause des perceptions.

Einstein se prononce d'une manière plus déterminée sur Kant. La critique de Kant dans son ensemble et l'idée du caractère *a priori* de l'espace et du temps jouent chez Einstein un rôle particulièrement important, c'est une hypothèse fondamentale de ses théories physiques.

L'opinion définitive d'Einstein sur la philosophie de Mach est très catégorique si Einstein n'est pas d'accord avec Mach. Néanmoins cette opinion a évolué avec le temps car tout au début Einstein sympathisait avec la théorie de la connaissance de Mach.

Dans son autobiographie de 1949 Einstein parle de la critique de la conception newtonienne de l'espace absolu dans la « Mécanique » de Mach et il ajoute : « Dans ma jeunesse j'ai été également très impressionné par la théorie de Mach, alors que cette dernière me paraît aujourd'hui inconsistante dans ses points fondamentaux. »

Ce changement d'opinion a joué un rôle important dans la biographie d'Einstein. Pour ce qui est des idées philosophiques avec lesquelles Einstein abordait les idées physiques nouvelles, il faut se référer à son opinion définitive et particulièrement nette de 1920. Après un discours prononcé à la réunion de la Société française de philosophie à Paris, Einstein déclarait à Meyerson qu'il considérait Mach comme un « déplorable philosophe »¹⁾.

Dans la bouche d'Einstein ces paroles paraissaient d'une vivacité inattendue. En fait, il les a répétées de nombreuses fois sous une forme moins vive, mais dans un sens encore plus catégorique. L'essentiel, c'est que le point de vue antipositiviste d'Einstein est lié à toutes ses idées physiques fondamentales.

Einstein a, à maintes reprises, écrit que les notions physiques doivent pouvoir être vérifiées expérimentalement. La théorie de la relativité a, en effet, chassé de la physique des notions qui ne pouvaient en principe être vérifiées expérimentalement ; il s'agit de la simultanéité d'événements, dont les coordonnées sont définies dans des systèmes de coordonnées se déplaçant les uns par rapport aux autres, du mouvement par rapport à l'éther et de l'existence même de l'éther comme système de référence universel. Mais comme nous venons de le noter, la correspondance de principe des notions décrivant la réalité physique et de l'expérience n'avait chez Einstein rien de commun avec l'identification de l'expérience et de la réalité. Les idées d'Einstein sur la connaissance et la théorie de la relativité elle-même en témoignent. Ainsi les déclarations sans cesse répétées d'Einstein sur « le libre arbitre de la connaissance » n'avaient rien à voir avec l'idée de caractère *a priori* et conventionnel de la nature. Ses déclarations relatives à la relation avec l'expérience et celles concernant « le libre arbitre de la connaissance » sont incompréhensibles

* ¹⁾ E. Meyerson. La déduction relativiste. Paris, 1925, p. 62.

indépendamment les unes des autres, ce sont là deux aspects d'une même conception.

Lorsqu'Einstein dit que l'homme peut librement faire des hypothèses, le mot « libre » signifie seulement que les hypothèses sont libres de limitations phénoménologiques. Il n'y a là aucune concession aux tendances conventionnelles et *a priori*. Il en fut ainsi par exemple pour la découverte de la planète Neptune, dont l'existence n'était pas une conséquence phénoménologique des observations. Einstein utilise ces faits historiques pour réfuter toutes les formes de subjectivisme. Si la connaissance arrive à des conclusions ne figurant pas dans les observations et que ces conclusions sont ensuite confirmées par l'expérience, ceci veut dire que la connaissance pénètre au-delà de ces effets et leur trouve une cause objective.

Pour comprendre comment les idées antipositivistes d'Einstein « travaillaient » lors de la naissance de la théorie de la relativité, il est bon de s'arrêter sur les critères, étroitement liés à ces idées, du choix d'une théorie physique, qu'Einstein a formulés à la fin de sa vie, mais qui l'ont guidé durant toute la création de la Relativité.

3. Si les conceptions scientifiques reflétant une vérité objective doivent correspondre aux observations, ceci veut dire que le premier critère dans le choix d'une conception scientifique doit être son accord avec l'expérience.

« Mais autant cette exigence est évidente par elle-même, autant il faut de précautions pour l'appliquer. En effet, souvent, sinon toujours, on peut conserver la même base théorique générale, à condition seulement de l'adapter aux faits à l'aide d'hypothèses artificielles supplémentaires. En tout cas, ce premier critère revient à la vérification des bases théoriques à partir des données expérimentales¹⁾. » Si une conception scientifique donnée sort du cadre phénoménologique, ceci veut dire que le critère dans son choix doit être naturel et répondre à une quantité minimale d'hypothèses *ad hoc*.

« Le second critère peut être brièvement caractérisé comme critère de « perfection interne » de la théorie, tandis que le premier concerne sa « justification externe ». A la « perfection interne » de la théorie je rapporte également ce

* ¹⁾ A. Einstein. Autobiographisches. Ed. citée.

qui suit : une théorie nous paraît avoir plus de valeur lorsqu'elle n'est pas logiquement choisie d'une manière arbitraire parmi des théories à peu près semblables, construites d'une manière analogue. »

La thèse générale d'Einstein dans la théorie de la connaissance rend inséparables les critères de « justification externe » et de « perfection interne ». A l'origine on trouve la représentation d'un monde unitaire, d'une liaison causale universelle formant la raison objective du monde, l'harmonie de celui-ci. Notre conception scientifique, conciliant son contenu avec les expériences, évitant au maximum les postulats arbitraires, se rapproche de cette harmonie.

Les critères de « justification externe » et de « perfection interne » ont été appliqués à l'image classique du monde, justement dans ce sens, en fait unifié. La structure logique de la théorie de la relativité, le passage inévitable de la théorie restreinte à la théorie générale, la relation d'une nouvelle idée et de l'idéal classique de la science, tout ceci découle de l'unité de la « justification externe » et de la « perfection interne ». La violation de la « justification externe » est apparue à Einstein dans les résultats de l'expérience de Michelson et des expériences analogues. On pouvait combler cette lacune en émettant des hypothèses supplémentaires. Mais cela aurait été en contradiction avec la « perfection interne » de la théorie. Einstein s'est attaqué en premier aux fondements d'une conception scientifique du monde. La relation avec les postulats s'est trouvée ainsi évidente.

Einstein a puisé dans la philosophie rationaliste et la physique classique une représentation du monde, pour laquelle le comportement de chaque corps est déterminé par son interaction avec les autres corps. Une telle conception doit, de plus en plus, dominer dans la science, c'est là, comme a dit Einstein, le *programme de Newton*. Le comportement des corps est déterminé par leur interaction avec les autres corps ; selon la position du corps et sa vitesse, son action sur les autres corps change, et selon la position et les vitesses des autres corps, leur action sur le corps considéré varie d'un point à l'autre et à chaque instant. Ces variations sont décrites par les équations différentielles. Après Maxwell, la physique applique avec un succès extraordinaire les équations différentielles à la description

du champ électromagnétique. C'est pour cette raison qu'Einstein appelle *programme de Maxwell* l'idée générale d'une dépendance totale du comportement des corps des lois décrites par les équations différentielles.

C'est là pour Einstein l'idéal de la connaissance scientifique, qui se trouve à la base de la physique classique. Einstein était convaincu qu'une science élaborant les notions les plus naturelles, excluant au maximum l'arbitraire subjectif et pouvant en principe être vérifiées expérimentalement, se rapproche de l'idéal classique. Mais la science classique diffère de l'idéal classique : elle comprend des notions qui le contredisent, et l'élimination de ces notions permet d'atteindre une grande « perfection interne » et une « justification externe ».

La mécanique classique en tant que base de la physique a perdu sa « justification externe » lors du développement de l'électrodynamique. Lorsque régnaient les conceptions classiques, pour rentrer dans le cadre de l'image mécanique de l'Univers l'éther (que Planck a appelé « l'enfant de la science classique, conçu dans l'affliction ») devait être doté de propriétés contraires à l'expérience.

Les tentatives de faire de l'éther un corps mécanique se sont révélées vaines. Néanmoins, bien que les modèles mécaniques de l'éther aient été discrédités, on attribue à ce dernier une certaine vitesse par rapport aux corps qui s'y trouvent plongés.

Si l'éther a une certaine vitesse par rapport aux corps, ceux-ci ont à leur tour une certaine vitesse par rapport à l'éther et l'éther entre dans l'image du monde comme un corps de référence. Cependant, ici, l'image classique du monde est en contradiction flagrante avec les faits. Par le critère de « justification externe » on a renoncé à la notion de vitesse des corps rapportée à l'éther et à l'existence de l'éther lui-même.

Et ici, une fois de plus, le schéma cognitif d'Einstein se trouve confirmé. L'expérience seule ne donne pas d'une manière univoque une nouvelle théorie : les résultats de l'expérience de Michelson auraient pu être expliqués d'une manière artificielle par des hypothèses conçues à cet effet. Cependant de telles hypothèses, par exemple l'hypothèse de contraction de Lorentz, étaient en contradiction avec le critère de « perfection interne ».

Pour la théorie de la relativité générale le chemin suivi

a été quelque peu différent. Ici dès l'abord le critère fondamental a été la « perfection interne ». En ce sens l'idéal classique avançait sensiblement la physique classique. La première différence est dans le choix arbitraire des systèmes d'inertie comme seuls systèmes où les lois de Newton sont vraies.

Nous touchons ici au principe de Mach qui a joué un rôle important dans le développement de la théorie de la relativité générale. Quand il introduisait la notion d'espace absolu, Newton se référait aux forces centrifuges et aux forces d'inertie en général qui apparaissent dans les systèmes matériels accélérés. L'apparition de ces forces était attribuée à l'intervention effective de l'espace en tant que tel dans le cours des processus mécaniques. Une telle intervention viole la proportionnalité des forces et des accélérations et sort du cadre d'une conception du monde qui explique tout par l'interaction des corps.

Mach a dans sa « Mécanique » critiqué la notion d'espace absolu de Newton en partant de l'interaction des corps comme cause unique de tout ce qui se passe dans la nature. Einstein a appelé cette conception principe de Mach. Conformément à ce principe, les forces d'inertie ne diffèrent pas des autres forces, en ce sens qu'elles sont le résultat des interactions des corps. Donc, les forces d'inertie ne témoignent pas du mouvement dans un espace absolu, mais résultent des actions des autres corps sur le corps considéré. Nous verrons quelles considérations ont obligé Einstein, en fin de compte, à douter du principe de Mach et à le rejeter, ce qui l'éloignait toujours plus des principes classiques sans réhabiliter l'espace absolu de Newton.

4. L'éther, en tant que système mécanique, est un milieu immobile où se propagent des tensions élastiques, ceci lui vaut tout naturellement de devenir corps de référence universel ; il remplace ainsi l'espace absolu vide de Newton, sans toutefois toucher à la mécanique de Newton et entre autres à la règle classique de composition des vitesses. Le refus de reconnaître à cette règle et à la mécanique de Newton dans son ensemble un caractère universel et exact est dû à l'écroulement de la conception mécanique de l'éther. Dès qu'on a enlevé à l'éther son rôle de corps de référence universel, la théorie du champ se trouve émancipée de la mécanique de Newton. L'éther disparaît alors de toute con-

ception scientifique du monde, car sa dernière raison d'être était de relier la théorie du champ électromagnétique à la mécanique de Newton.

Dès le début de notre siècle, par suite du développement de la théorie de Maxwell, les conceptions mécaniques de l'éther étaient déjà fortement ébranlées. On voit alors apparaître deux tendances importantes dans la genèse de la théorie de la relativité.

L'attention des physiciens et des mathématiciens se porte d'abord sur le problème de la covariance des équations de Maxwell. On commence à relier ce problème aux résultats des expériences de Michelson.

Ensuite, on attribue au mouvement des corps dans l'éther des propriétés paradoxales du point de vue classique, en contradiction avec la représentation classique du mouvement des corps rapporté aux autres corps. Cependant, avant Einstein, la covariance des équations de Maxwell n'est pas liée aux propriétés fondamentales du mouvement, et le fait que la vitesse de la lumière soit invariante lors du passage d'un système d'inertie à l'autre passe pour purement phénoménologique. Le comportement des corps se déplaçant dans l'éther s'explique par l'interaction des corps et de l'éther. Le schéma dynamique hypothétique proposé pour cette interaction ne ressemble pas au schéma purement cinétique du mouvement mutuel des corps lequel ne coïncide pas avec la règle classique de composition des vitesses. Nous avons en vue les conceptions de Lorentz et de Poincaré énoncées presque simultanément avec la théorie d'Einstein.

Dans la dernière décennie du XIX^e siècle, Lorentz a, à maintes reprises, émis l'hypothèse de la contraction longitudinale des dimensions des corps en mouvement. Le plus complet et le plus rigoureux des exposés de cette hypothèse a été donné par Lorentz, en 1904, dans son article intitulé « Effets électromagnétiques dans un système se déplaçant à une vitesse arbitraire inférieure à celle de la lumière »¹⁾. Lorentz a expliqué les résultats de l'expérience de Michelson par la contraction de la longueur du bras longitudinal de l'interféromètre. Les résultats des autres expériences montrant la constance de la vitesse de la lumière dans des référentiels en mouvement ont reçu une

* ¹⁾ H. A. Lorentz. | Proc. Acad. Sc. Amsterdam, 1904, 6, 809.

explication analogue. L'invariance de la vitesse de la lumière dans des systèmes d'inertie en translation se trouve être le résultat phénoménologique de deux effets du mouvement de l'interféromètre dans l'éther se compensant mutuellement : il s'agit du ralentissement de la lumière par rapport à l'interféromètre et de la contraction de la longueur du bras longitudinal. L'éther comme corps de référence absolu reste, mais le mouvement rapporté à ce corps de référence ne peut être décelé. Un tel relativisme purement phénoménologique ouvre la voie à l'élaboration mathématique de notions exprimant la relativité du mouvement. Dans l'article adressé en juillet 1905 à *Rendiconti del Circolo Mat. di Palermo* et intitulé « Sur la dynamique de l'électron »¹⁾ Poincaré donne une conception élaborée des invariants des transformations de coordonnées quadridimensionnelles. Cette conception anticipe en quelque sorte sur l'appareil mathématique de l'ouvrage d'Einstein « Sur l'électrodynamique des corps en mouvement » envoyé aux *Annalen der Physik* trois semaines avant que Poincaré ait envoyé son travail à *Rendiconti*, mais également en une certaine mesure sur les travaux mêmes de Minkowski. Cependant, pour ce qui est des représentations physiques, Poincaré n'a pas de beaucoup devancé Lorentz. Il a conservé l'éther comme corps de référence absolu, considérant la contraction longitudinale des échelles comme un effet dynamique, comme le résultat de l'interaction de l'électron en mouvement avec l'éther, provoquant la contraction des dimensions longitudinales réelles de l'électron au repos.

Dans la théorie de la relativité d'Einstein la constance de la vitesse de la lumière, lorsqu'on passe d'un système d'inertie à un autre, est une propriété de la matière. La covariance des équations de l'électrodynamique, par rapport aux transformations de Lorentz, exprime l'absence réelle d'un référentiel privilégié et d'un corps de référence absolu, c'est-à-dire de l'éther. Ce dernier ne se soustrait pas à l'observateur : il n'existe pas. Einstein écrit : « L'introduction de l'éther porteur de la lumière est alors superflue, car, dans la théorie proposée, on n'introduit pas d'« espace absolument au repos », aux propriétés particulières, ni de

* ¹⁾ H. Poincaré. *Rendiconti del Circolo Mat. di Palermo*, 1906, XXI, p. 129.

vecteur vitesse d'un point de l'espace vide dans lequel se déroulent les processus électromagnétiques¹⁾. »

« Le temps local » de Lorentz prend alors un autre sens. Tous les « temps locaux » sont équivalents tout comme la longueur d'un segment dans un système donné est équivalente à la longueur de ce segment dans un autre système d'inertie. Le caractère mutuel de la contraction des échelles de Lorentz et de l'accélération du temps signifie que la relativité du mouvement (pour le moment, il ne s'agit que du mouvement rectiligne et uniforme) a un caractère objectif, est une propriété de la matière.

Einstein se refuse à considérer la contraction de Lorentz comme un effet dynamique et la porte au-delà des limites de l'électrodynamique, dans le domaine plus étendu des relations cinématiques. Le mouvement relatif des corps, et lui seul, peut expliquer la différence des échelles spatiales et des intervalles de temps, mesurés dans des référentiels et liés aux corps en mouvement.

Ce point de vue fait passer le principe de la relativité de l'électrodynamique à la mécanique. C'est là un autre aspect de l'extension du principe classique de la relativité de Galilée-Newton aux effets optiques. Le principe classique devient universel, mais n'est plus lié aux transformations de Galilée ; c'est maintenant aux transformations par rapport auxquelles les équations de l'électrodynamique sont covariantes de devenir universelles. Einstein déduit leur covariance non pas d'actions dynamiques spécifiques de l'éther sur les corps qui s'y meuvent, mais de relations générales espace-temps.

C'est là le rôle joué par l'électrodynamique lors de l'élaboration de la théorie de la relativité. Le conflit initial entre l'expérience et la physique classique a mûri dans l'électrodynamique. Plus encore, toute l'histoire de l'électrodynamique classique peut être considérée comme le mûrissement logique d'un tel conflit. Néanmoins, la théorie de la relativité d'Einstein ne repose pas sur l'électrodynamique.

En 1955, Einstein écrivait à Seelig : « Si l'on jette un coup d'œil rétrospectif sur le développement de la théorie de la relativité, aucun doute qu'en 1905 elle était mûre. Lorentz savait déjà qu'aux équations de Maxwell correspondent les

* ¹⁾ A. Einstein. *Ann. Physik*, 1905, 17, 891.

transformations qui par la suite portèrent son nom, et Poincaré a approfondi cette idée. Je connaissais le travail fondamental de Lorentz paru en 1895, mais je ne connaissais pas le travail ultérieur et les études de Poincaré liées à ce travail. En ce sens mon travail était indépendant. Mais voici ce qui était nouveau. Les transformations de Lorentz n'étaient pas déduites de l'électrodynamique, mais de considérations générales...¹⁾ »

L'électrodynamique devait trouver sa place dans un schéma causal unifié de l'édifice universel. Comme elle n'y trouvait pas sa place, Einstein est arrivé à un nouveau schéma. Ceci non par une modification particulière, mais par une modification générale du schéma classique. Le principe directeur général (c'est-à-dire garantissant la « perfection interne » de la théorie) de cette modification était la condition de « justification externe », de possibilité de vérification expérimentale de la théorie.

Einstein dans une lettre à Solovine expliquait : « Ce qui caractérise en outre la Théorie de la relativité est plutôt un point de vue épistémologique. Il n'y a pas en physique de notion dont l'emploi soit *a priori* nécessaire ou justifié. Une notion acquiert son droit à l'existence uniquement par son enchaînement clair et univoque des événements, respectivement des expériences physiques. C'est ainsi que dans la Théorie de la relativité, les notions de simultanéité absolue, de vitesse absolue, d'accélération absolue, etc., sont rejetées parce que leur liaison univoque avec les expériences se montre impossible... De toute notion physique doit être donnée une définition telle qu'on puisse, en vertu de cette définition, décider en principe si elle se trouve ou ne se trouve pas juste dans le cas concret²⁾. »

Einstein voyait une analogie profonde entre la structure logique de la théorie de la relativité et celle de la thermodynamique. Dans les deux cas la théorie fait *systematiquement* des déductions de notions traditionnelles dénuées de sens physique.

« S'il existait un éther lumineux corporel rigide remplissant tout l'espace, tous les mouvements des objets corporels pourraient être rapportés à lui, on pourrait dans ce sens physique parler de « mouvement absolu » et fonder sur cette

* ¹⁾ C. Seelig. Albert Einstein. Ed. citée. S. 116.

²⁾ A. Einstein. Lettres à Maurice Solovine. Ed. citée, p. 21.

notion la mécanique. Mais après que les efforts de découvrir par des expériences physiques l'état de mouvement privilégié par l'éther lumineux hypothétique eurent échoués, il était indiqué de retourner le problème. C'est ce qu'a fait la Théorie de la relativité d'une façon systématique. Elle supposait qu'il n'y a pas dans la nature d'états de mouvement physiques privilégiés et se demandait quelles sont les conséquences qui peuvent être tirées de cette supposition concernant les lois de la nature. La méthode de la Théorie de la relativité est analogue à celle de la Thermodynamique ; car cette dernière science n'est autre chose que la réponse systématique à la question : Comment les lois de la nature doivent-elles être constituées pour qu'il soit impossible de construire un *perpetuum mobile* ?¹⁾ »

5. En 1908, dans les travaux de Hermann Minkowski la théorie de la relativité était exposée sous la forme de relations géométriques pseudo-euclidiennes du monde quadridimensionnel spatio-temporel. Sous cette forme la théorie de la relativité restreinte reçut un élan supplémentaire qui facilitait la fondation systématique de la mécanique et de l'électrodynamique relativistes et le passage ultérieur à une théorie plus générale étendue au mouvement accéléré. Minkowski a introduit la notion de « point d'Univers », de « ligne d'Univers » et a montré que les relations de la théorie de la relativité peuvent être représentées sous la forme de relations géométriques, analogues aux relations d'Euclide si en plus des coordonnées x_1, x_2, x_3 (c'est-à-dire x, y, z .) on introduit une quatrième coordonnée $x_4 = ict$. On obtient alors une géométrie pseudo-euclidienne quadridimensionnelle, dont la dimension diffère de celle de la géométrie euclidienne ordinaire, la quatrième coordonnée étant de plus imaginaire.

Malgré l'importance de ces notions, la représentation quadridimensionnelle ne changeait pas le sens physique de la théorie de la relativité. Le sens physique de la géométrie quadridimensionnelle, la relation entre l'espace et le temps, figurait déjà dans le premier article d'Einstein sur la théorie de la relativité.

Ce n'est pas là une constatation triviale : le monde réel existe dans l'espace et le temps. Ce fait était connu depuis

* ¹⁾ A. Einstein. Lettres à Maurice Solovine. Ed. citée, p. 19.

longtemps. La théorie de la relativité contenait également une autre assertion. Par suite de la constance de la vitesse de la lumière dans différents référentiels se déplaçant les uns par rapport aux autres, les aspects purement spatial et purement temporel de l'Univers n'ont pas d'équivalent physique réel. Plus loin nous prendrons connaissance, plus en détail, des idées d'Einstein sur les liens entre les mathématiques et la physique. Mais ce que nous savons sur le point de vue épistémologique d'Einstein suffit pour faire apparaître l'idée essentielle du monde quadridimensionnel dès ses premiers travaux sur la théorie de la relativité. Si l'éther comme corps de référence universel n'existe pas, cela veut dire que la notion de simultanéité absolue ne peut être confrontée aux résultats de l'expérience. Disparaissant de l'image de l'Univers, l'éther et le mouvement qui lui était rapporté ont emporté avec la notion de simultanéité absolue la notion de flux de temps englobant tout l'espace, ainsi que la notion d'espace absolu.

Dans son autobiographie de 1949 Einstein écrit : « Une erreur très courante est de croire que la théorie de la relativité restreinte a ouvert ou a introduit de nouveau les « quatre dimensions » d'un continuum. Il n'en est rien. Le continuum spatio-temporel se trouve également à la base de la mécanique classique, seulement ici les « sections » correspondant à une valeur constante du temps sont une réalité absolue (c'est-à-dire ne dépendant pas du choix du système de référence). Ainsi le continuum à quatre dimensions se sépare d'une manière naturelle en un continuum tridimensionnel et un continuum unidimensionnel (le temps), et les « quatre dimensions » ne sont donc pas indispensables. Par contre, dans la théorie de la relativité restreinte il existe une dépendance formelle entre la manière dont doivent entrer dans les lois de la nature les coordonnées spatiales d'une part, et la coordonnée temporelle, de l'autre ¹⁾. » L'idée d'un monde quadridimensionnel indissociable au sens absolu se trouvait déjà dans les postulats physiques de la théorie de la relativité. Après les travaux de Minkowski, cette idée reçut un élan heuristique supplémentaire, car il n'était plus nécessaire de vérifier la covariance lorentzienne des équations de la physique qui expriment les lois physiques en effectuant les opérations données par les trans-

* ¹⁾ A. Einstein. Autobiographisches. Ed. citée.

formations de Lorentz. La covariance des lois physiques par rapport à ces transformations est donnée par la forme mathématique de la loi.

L'analyse de la relation réelle entre l'appareil mathématique de Minkowski et les fondements de la théorie de la relativité d'Einstein permet de préciser le sens du symbolisme de Minkowski et le sens de la théorie de la relativité. Le développement des idées mathématiques de Minkowski permet d'une manière très claire d'apercevoir la relation existant avec les premiers travaux d'Einstein sur la théorie de la relativité.

Einstein écrit : « Le fait que la dissociation objective du continuum quadridimensionnel en un continuum spatial tridimensionnel et un continuum temporel unidimensionnel n'existe pas conduit à ce que les lois de la nature ne reçoivent leur forme logique acceptable que lorsqu'elles s'expriment en tant que lois du continuum spatio-temporel quadridimensionnel. C'est là l'essentiel du succès méthodologique important que la théorie de la relativité doit à Minkowski... ¹⁾ »

Cette caractéristique se trouve confirmée par le développement de la théorie des invariants et des groupes de transformations qui a suivi la création de la géométrie de Minkowski. Cela a permis à Emmy Noether de faire une incursion très profonde dans les lois de la conservation. Le théorème de Noether concernant la relation entre l'invariance du lagrangien par rapport à un certain groupe de transformations continues et les lois de la conservation permet, sous une forme très claire, d'apercevoir la relation existant entre les lois de la conservation de l'impulsion et de l'énergie et l'homogénéité de l'espace et du temps.

La conservation de l'impulsion est liée à l'homogénéité de l'espace et la conservation de l'énergie à l'homogénéité du temps. Mais la théorie de la relativité a mis fin à la fiction d'un temps unifié, englobant tout l'espace. Elle a également mis fin à l'idée d'une représentation purement spatiale des événements simultanés dans tout l'Univers comme représentation de la réalité objective. De sorte que dans l'image de l'Univers donnée par Einstein ce n'est pas l'espace et le temps, pris séparément, qui sont homo-

* ¹⁾ A. Einstein. The meaning of relativity. Princeton Univ. Press. Princeton-N.Y. 1921.

gènes, mais le continuum spatio-temporel. L'impulsion d'une particule est donnée par trois composantes spatiales, c'est-à-dire par un vecteur à trois dimensions. L'énergie peut être considérée comme la quatrième composante, c'est-à-dire la projection sur l'axe temporel, d'un certain quadri-vecteur énergie-impulsion. Sa variation d'un point d'Univers à un autre est donnée par le tenseur d'énergie-impulsion quadridimensionnel. Les lois de la conservation de l'impulsion et de l'énergie se trouvent réunies en une loi de conservation unique.

En ce sens la théorie de la relativité est une nouvelle étape dans l'étude de l'homogénéité de l'espace et du temps, notion fondamentale des sciences depuis le XVII^e siècle. La conception de Galilée sur l'inertie et la relativité du mouvement d'inertie marquant le début de la science classique exprimait l'idée de l'homogénéité de l'espace. Le principe de la conservation de l'énergie, qui est devenu au XIX^e siècle l'idée centrale de la science, correspondait au concept de l'homogénéité du temps. La théorie de la relativité développe d'une manière systématique toutes les conséquences qui découlent du postulat de l'homogénéité de l'espace-temps.

Entre autres il s'agit de la relation entre la masse et l'énergie. En 1905, après avoir envoyé son article « Sur l'électrodynamique des corps en mouvement » aux *Annalen der Physik*, Einstein écrit à son ami Habicht : « Le principe de la relativité pour les équations de Maxwell exige que la masse soit proportionnelle à l'énergie contenue dans le corps ¹⁾. »

La proportionnalité de la masse et de l'énergie était dotée de « justification externe », elle se trouvait confirmée par l'ensemble de toutes les expériences à la base de l'électrodynamique classique, et cette conception découlant inévitablement des principes généraux était caractérisée par la « perfection interne ». Einstein était déjà arrivé à cette conclusion dans un petit article intitulé « L'inertie d'un corps dépend-elle de l'énergie qu'il contient ? », envoyé en septembre 1905 aux *Annalen der Physik*.

L'ensemble des notions et des conclusions visant à considérer la masse et l'énergie comme proportionnelles est l'objet de la dynamique relativiste. Cet ensemble est d'une im-

* ¹⁾ C. Seelig. Albert Einstein. Ed. citée. S. 126.

portance primordiale pour l'application de la théorie de la relativité, tout particulièrement lors de la solution des problèmes de la physique atomique, de la physique nucléaire, de la physique des particules élémentaires, ainsi que (et peut-être justement pour cette raison) pour le développement de la théorie de la relativité elle-même.

Dans son autobiographie de 1949 Einstein a voulu formuler « les vérités dernières que la physique a reçues de la théorie de la relativité restreinte ». Les notions d'impulsion, d'énergie et de masse équivalente se trouvent être les plus importantes dans cette définition récapitulative. Par suite de la conservation de l'énergie la théorie de la relativité est une théorie *des champs* par excellence. L'unification des lois de conservation de l'énergie et de l'impulsion, ainsi que l'équivalence de la masse et de l'énergie peuvent être, avec la négation de la simultanéité absolue, considérées comme la pierre angulaire de la théorie.

Le sens du formalisme quadridimensionnel, sa relation avec les vues initiales et les premiers travaux d'Einstein, ainsi que le rôle de la notion d'énergie dans la théorie de la relativité apparaissent dans le nouvel exposé de l'électrodynamique donné dans les travaux d'Einstein.

Einstein utilise les notions du calcul tensoriel dans le continuum pseudo-euclidien quadridimensionnel. Il considère un tenseur quadridimensionnel antisymétrique à six composantes indépendantes, ce qui lui permet de donner aux équations de Maxwell la forme d'équations tensorielles covariantes par rapport aux transformations de Lorentz. Mais le sens physique des équations de Maxwell ne s'en trouve pas changé : la théorie de la relativité appliquée à l'électrodynamique rend à cette dernière ce qu'elle lui a pris. Mais l'électrodynamique acquiert une « perfection interne » plus nette vu le nombre plus restreint d'hypothèses indépendantes initiales.

Dans les équations classiques de l'électrodynamique écrites sous forme quadridimensionnelle, on peut voir que l'existence distincte des champs électrique et magnétique est relative. Dans un système d'inertie le champ peut n'être que purement électrique, et dans un autre, se déplaçant par rapport au premier, il possède en plus une composante magnétique. Le champ magnétique dans un système acquiert également une composante électrique dans un autre système et agit sur une charge électrique au repos dans ce système.

Einstein montre ensuite sous une forme très évidente la nature logique de la notation quadridimensionnelle et la relation existant avec les critères de « justification externe » et de « perfection interne ».

Après avoir montré que l'énergie de l'unité de volume du champ électromagnétique a les propriétés d'un tenseur quadridimensionnel, Einstein poursuit : « Ce fait a été démontré directement seulement pour le champ électromagnétique, mais l'on peut affirmer qu'il est universel ¹⁾. »

Le tenseur d'énergie décrit sa distribution spatiale. Remarquons en passant qu'Einstein voit les limites de cette théorie, il serait plus exact de dire qu'il voit qu'en dehors de ses limites s'étend un domaine exigeant une généralisation ultérieure. Pour le champ électromagnétique, on connaît les valeurs de son intensité lorsque la distribution des charges et des courants est donnée. Cette distribution par elle-même et en premier lieu l'existence des charges élémentaires n'est pas expliquée par la théorie existante. « C'est là, — écrit Einstein —, une lacune dans nos connaissances, que l'on a essayée de combler en considérant les particules chargées comme des singularités. A mon avis, cela signifie que l'on renonce à trouver la structure réelle de la matière. Il me semble qu'il est mieux d'avouer notre impuissance plutôt que de se contenter d'une solution apparente ²⁾. »

La distribution de l'énergie du champ électromagnétique est donnée par le tenseur quadridimensionnel $T_{\mu\nu}$, dont on connaît l'expression complète pour l'espace extérieur aux particules chargées. Ce tenseur satisfait à la relation :

$$\frac{\partial T_{\mu\nu}}{\partial x_\nu} = 0.$$

Cette relation découle de la théorie du champ électromagnétique. « Il est douteux que l'on puisse se passer de l'hypothèse que, dans tous les autres cas également, la distribution spatiale de l'énergie est donnée par un tenseur symétrique », écrit Einstein.

Cette généralisation de la relation :

$$\frac{\partial T_{\mu\nu}}{\partial x_\nu} = 0$$

* ¹⁾ A. Einstein. *Motiv des Forschens* dans le recueil « Zu Max Plancks-60. Geburtstag : Ausprachen in der Deutsche physikalische Gesellschaft », Karlsruhe, 1918.

²⁾ *Ibid.*

pour une distribution arbitraire de l'énergie découle de la notation quadridimensionnelle de l'électrodynamique classique. La notation quadridimensionnelle diminue le nombre des hypothèses indépendantes à la base de l'électrodynamique. En d'autres termes, la forme relativiste explicite de l'électrodynamique classique fait apparaître sa relation avec les principes plus généraux. Les équations de Maxwell et tout ce qui en découle d'une manière univoque présentent une « justification externe ». Mais pour Einstein ce n'est pas suffisant. Il veut que la théorie qui a acquis cette justification s'approche de la « perfection interne », contienne un minimum d'hypothèses *ad hoc*, c'est-à-dire faites spécialement pour expliquer l'observation. La notation quadridimensionnelle répond à ce critère, elle relie la notion de tenseur d'énergie du champ électromagnétique à des relations spatio-temporelles générales, qui ne sont pas seulement vraies pour le champ électromagnétique. C'est pourquoi la notation quadridimensionnelle donne aux relations, qui sont nées et ont reçu la « justification externe » au sein de l'électrodynamique, un sens plus général.

6. La géométrie quadridimensionnelle pseudo-euclidienne ne serait pas devenue l'un des traits d'union entre la théorie de la relativité restreinte et la théorie de la relativité générale si Einstein n'avait pas utilisé, dans ses recherches d'une généralisation ultérieure, l'idée d'une relation entre la géométrie et la physique.

Cette idée ainsi que de nombreuses autres idées épistémologiques d'Einstein ont été énoncées sous une forme plus ou moins finie après l'apparition de la conception physique. Cependant, sous une forme non explicite, mais très importante pour la naissance de la conception physique, cette idée existait déjà auparavant.

L'évolution des idées d'Einstein sur la relation entre la géométrie (et les mathématiques en général) et la physique calquait, en une certaine mesure, l'évolution historique de ces idées. C'est pourquoi les notes autobiographiques d'Einstein s'entremêlent ici avec les récapitulations historiques. Lycéen Einstein étudiait déjà les éléments de géométrie, il était subjugué par la possibilité fautive d'une connaissance purement logique de l'Univers.

« Il semble que par la méditation pure on puisse acquérir des renseignements exacts sur les objets observés, mais ce

miracle repose sur une erreur. Celui à qui ce miracle apparaissait pour la première fois voit l'extraordinaire dans le fait même que l'homme soit capable d'atteindre ce degré de fiabilité et de pureté dans la pensée abstraite, dont ont fait montre pour la première fois les Grecs en géométrie¹⁾. » Les Grecs non seulement atteignaient cette fiabilité et cette précision étonnante dans la compréhension géométrique du monde, mais ils ne séparaient pas la connaissance géométrique, c'est-à-dire logique, de la connaissance empirique. En ce sens la jeunesse du savant rappelle l'enfance de la science. Dans cette même autobiographie de 1949 Einstein écrit : « Les objets auxquels la géométrie a à faire ne me semblaient pas être d'une autre nature que ceux qui sont « visibles » et « palpables », c'est-à-dire les objets perçus par les organes des sens. Une telle compréhension primitive est basée évidemment sur le fait que l'on tient compte inconsciemment de la relation qui existe entre les notions géométriques et les objets observés (longueur et tige solide, etc.)²⁾. »

L'évolution individuelle d'Einstein est semblable à l'évolution de la science. Einstein a caractérisé avec une grande netteté le point de vue antique sur la géométrie dans son article intitulé « La géométrie non euclidienne et la physique »³⁾. Il y décrit la géométrie antique comme une science semi-empirique. « Le point était un corps, abstraction faite de ses dimensions. Une droite était donnée par les points, que l'on peut optiquement superposer dans la direction du regard ou par un fil tendu. Nous avons donc à faire à des notions qui, comme toutes les notions en général, ne sont pas déterminées par l'expérience, mais se trouvent néanmoins en relation directe avec les objets de nos émotions. Les hypothèses relatives aux points, aux droites, à l'égalité des segments et des angles étaient, en cet état de la connaissance, simultanément des hypothèses touchant à certaines émotions liées aux objets de la nature. »

Cette conception naïve initiale se trouve peu à peu remplacée par une autre, tenant compte de la différence entre les notions géométriques et leurs modèles physiques. D'une part, l'axiomatisation de la géométrie nourrissait cette

* 1) A. Einstein. Autobiographisches. Ed. citée.

2) *Ibid.*

3) « Mein Weltbild ». S. 107.

nouvelle conception et conduisait même à une représentation erronée du caractère *a priori* de la géométrie. « Le désir de tirer toute la géométrie de la sphère confuse de l'empirique conduisit imperceptiblement à une conclusion erronée que l'on peut comparer à la transformation des héros honorés en dieux », écrit Einstein.

« Conformément à la conception des physiciens relative à la nature des corps solides et de la lumière, il n'est plus dans la nature d'objets qui par leurs propriétés correspondent exactement aux notions de base de la géométrie euclidienne. Le corps solide ne peut être considéré comme absolument invariable, et un rayon de lumière ne reproduit pas exactement une ligne droite, ni en général une image unidimensionnelle. Conformément aux conceptions de la science moderne, la géométrie prise isolément ne correspond en toute rigueur à aucune expérience ; elle doit être appliquée à leur explication en rapport avec la mécanique, l'optique, etc. De plus, la géométrie doit précéder la physique, car les lois de cette dernière ne peuvent être exprimées sans l'aide de la géométrie. La géométrie donc doit être considérée comme une science précédant du point de vue logique toute expérience et toute science expérimentale. »

Cette transformation de l'idée première, conformément à laquelle la géométrie est une science semi-empirique, a conduit, d'une part, à la version *a priori* de Kant et, d'autre part, ultérieurement, à la version conventionnaliste de Poincaré. Einstein leur oppose une autre conception qu'il lie au nom de Helmholtz : en fin de compte, les notions de géométrie correspondent aux corps réels d'une manière qui est loin d'être directement empirique, et « ainsi toutes les propositions de la géométrie acquièrent le caractère d'affirmations relatives aux corps réels ».

« De ce point de vue la question de l'applicabilité de la géométrie euclidienne prend un sens clair. La géométrie euclidienne, tout comme la géométrie en général, conserve le caractère d'une science mathématique, car ses théorèmes, déduits d'axiomes, sont le résultat d'un problème purement logique ; mais en même temps elle devient également une science physique, car ses axiomes contiennent des affirmations concernant les objets de la nature, et qui ne peuvent être démontrées que par l'expérience. »

Einstein écrit que sans ce point de vue « il est pratiquement impossible d'aborder la théorie de la relativité ».

C'est là une remarque très importante qui éclaire d'une façon inattendue les origines de la théorie d'Einstein. On peut montrer facilement que la géométrie physique, au sens moderne du mot, est apparue avec la théorie de la relativité générale. La différence *physique* entre la géométrie euclidienne et non-euclidienne s'est fait sentir dès 1916. Il est également facile de montrer que l'idée d'un critère physique définissant une géométrie réelle du monde existait chez Einstein avant 1916 et le guidait dans ses recherches sur la théorie de la relativité générale. Mais Einstein parle de la théorie de la relativité en général, c'est-à-dire également de la théorie de la relativité restreinte.

Ici il faut se rappeler que la théorie de la relativité restreinte a été la réponse négative à la question de savoir si la géométrie tridimensionnelle avait un équivalent physique réel. Cette question perd son sens pour la version conventionnaliste de l'origine de la géométrie. Elle n'est pas non plus fondée pour l'interprétation empirique phénoménologique de la géométrie. Pour ce qui est de la version *a priori*, elle exclut également les doutes sur la réalité de la géométrie euclidienne tridimensionnelle. Si les relations géométriques caractérisant l'espace, et notamment le nombre de ses dimensions, sont une forme *a priori* de la connaissance, l'image physique du monde est obligatoirement l'équivalent de ces relations.

De ce point de vue un trait de la biographie d'Einstein prend un sens nouveau. Dans sa jeunesse, Einstein abandonnant la foi naïve d'une compréhension purement logique de l'Univers avait perdu tout intérêt pour les mathématiques. Son retour aux mathématiques était lié à des conceptions physiques nouvelles, exigeant des généralisations impossibles sans un appareil mathématique nouveau. Au début du XX^e siècle, lorsqu'Einstein abordait la théorie de la relativité, il s'intéressait peu aux mathématiques. Mais il y avait là un aspect *positif*. Einstein voulait par les mathématiques connaître les propriétés objectives du monde. Ce n'était pas *encore* suffisant pour trouver des conceptions mathématiques exprimant une conception physique nouvelle, mais cela permettait de *ne plus* lier l'idée aux conceptions physiques, étroitement soumises aux conceptions géométriques traditionnelles. Dès le début du XX^e siècle la conception des mathématiques d'Einstein lui ouv-

rait la voie à des idées physiques qui renfermaient des généralisations mathématiques non traditionnelles.

Hilbert voyait cette relation lorsqu'il écrivait : « Dans les rues de notre Hettingen mathématique chaque gamin connaît mieux la géométrie quadridimensionnelle qu'Einstein. Néanmoins, c'est à Einstein que revient ce qui a été fait et non aux mathématiciens¹⁾. »

Hilbert expliquait ceci par le fait qu'Einstein ne portait pas le poids des conceptions mathématiques et philosophiques traditionnelles de l'espace. Einstein était convaincu que les notions géométriques se rapportent, en fin de compte, à des processus réels, précisément *en fin de compte*, de sorte qu'elles peuvent exprimer des propriétés réelles du monde qui contredisent les observations directes et peuvent elles-mêmes être en contradiction avec la géométrie traditionnelle. De sorte que la conception physique nouvelle, excluant de l'image de l'Univers les équivalents réels de la géométrie euclidienne tridimensionnelle, géométrie traditionnelle ordinaire, n'a pas dans la conscience d'Einstein été freinée par la géométrie.

Pour la théorie restreinte c'était suffisant. Pour la théorie de la relativité générale, les exigences étaient bien plus élevées. Ici les conceptions mathématiques nouvelles ne pouvaient passer au second plan, venir après les idées physiques nouvelles. Il fallait que les efforts de la pensée mathématique et de la pensée physique se fassent en même temps et de concert. L'affirmation du contenu physique de la géométrie ne pouvait plus être une estimation historico-scientifique et épistémologique des bases de la géométrie. C'était maintenant le critère indispensable de la construction des notions mathématiques. La possibilité d'une représentation géométrique des lois physiques devenait à son tour une règle heuristique pour leur recherche. Avec l'apparition de la géométrie pseudo-euclidienne quadridimensionnelle on avait trouvé aux lois physiques une forme mathématique qui garantissait leur covariance par rapport aux transformations de Lorentz. Il fallait maintenant trouver des lois physiques covariantes par rapport à un groupe plus étendu de transformations. Les recherches de ces lois devaient s'accompagner d'une généralisation de la géomé-

* ¹⁾ Voir P. H. F r a n k. Einstein, his life and times. N. Y., 1947, p. 206.

trie quadridimensionnelle, de la libération des limitations découlant de son caractère pseudo-euclidien. Une telle généralisation était la condition nécessaire pour passer à la théorie de la relativité générale, c'est-à-dire à l'extension du principe de la relativité au mouvement accéléré.

Le point de départ n'était pas dans le simple désir d'étendre l'invariant trouvé des transformations de Lorentz, peut-être généralisé, à un groupe de transformations plus vaste, ni dans des considérations sur l'insuffisance logique de la mécanique classique et son choix injustifié des systèmes d'inertie. Ces considérations et ces désirs relevaient de méditations purement physiques. La théorie de la relativité restreinte avait grandi à partir des équations de Maxwell pour le champ électromagnétique. Pouvait-on, dans le cadre d'une telle théorie, trouver une place pour le champ de gravitation ?

« Et voilà, écrit Einstein, qu'il m'est venu à l'idée que le fait que la masse inerte égale la masse pesante, ou autrement dit que l'accélération de la chute libre ne dépend pas de la nature du corps qui tombe, pouvait s'exprimer d'une autre manière. Dans le champ de gravitation (pour de petites distances spatiales) tout se passe comme dans l'espace sans gravitation si au lieu du système « d'inertie » on introduit un système accéléré par rapport à ce dernier¹⁾. » Ainsi Einstein est arrivé au principe de l'équivalence et à l'idée que le mouvement accéléré est relatif. Autrement dit, la condition d'invariance par rapport aux transformations de Lorentz était trop faible pour les lois physiques, ces lois devaient également être invariantes par rapport à un groupe plus général comprenant des transformations non linéaires.

Une idée semblable était proposée par Einstein en 1908. L'obstacle essentiel sur la voie conduisant de cette idée à la théorie de la relativité générale, formulée en 1916, se trouvait dans certains concepts traditionnels sur la métrique de l'espace et du temps. Einstein écrit : « Pourquoi a-t-il fallu encore 7 ans pour construire la théorie de la relativité générale ? C'est essentiellement parce qu'il n'est pas si facile de se libérer du concept que les coordonnées ont un sens métrique direct²⁾. »

* ¹⁾ A. Einstein. Autobiographisches. Ed. citée.

²⁾ *Ibid.*

Pour Einstein le sens métrique direct des coordonnées est le concept traditionnel conformément auquel la différence de coordonnées est toujours égale à une certaine longueur indépendante des processus physiques se déroulant dans le domaine donné. Quel est le sort de ce concept lorsqu'on tient compte systématiquement de l'équivalence de l'accélération et de la pesanteur ?

Einstein part des conditions de la théorie de la relativité restreinte et propose de faire un pas vers la généralisation de cette théorie. Introduisons un système rigide à métrique euclidienne tridimensionnelle se déplaçant par rapport à un système galiléen avec une certaine accélération constante dans une certaine direction. Dans ce système non galiléen à accélération constante, le champ constant de gravitation existe déjà. La mesure du temps dans un tel système donne un résultat différent de celui obtenu dans un système immobile. La marche d'une horloge sera différente suivant que le système est accéléré ou immobile. Par conséquent, une transformation non linéaire des coordonnées leur ôte leur sens métrique direct¹⁾.

Il faut ici souligner la relation qui existe entre la considération indiquée et la conception générale d'Einstein relative au lien entre les mathématiques et la physique. Au XIX^e siècle on avait déjà émis l'idée de l'existence d'une relation entre la métrique de l'espace et les processus physiques. Ainsi, Lobatchevski parlait des différentes relations géométriques, euclidiennes et non euclidiennes, correspondant aux différentes forces physiques. Riemann dans sa conférence intitulée « Sur les hypothèses qui servent de base à la géométrie » parlait de la métrique selon les forces agissant dans l'espace. Ces idées n'étaient pas encore la création d'une géométrie physique qui est apparue avec la théorie de la relativité générale. Mais elle se fondait sur l'hypothèse selon laquelle la géométrie décrit des processus physiques réels. Ce concept est devenu une théorie physique nouvelle quand on a trouvé que les *différentes* relations géométriques, en général non euclidiennes, décrivent la réalité physique, que l'écart par rapport aux relations euclidiennes (qui dès la fin du XIX^e siècle était considéré comme dû à la courbure de l'espace) correspond à un champ métrique identique au champ gravitationnel. L'hypothèse de base

* ¹⁾ A. Einstein. Autobiographisches. Ed. citée.

de cette géométrie physique était la notion d'« Univers » quadridimensionnel et le fait que la gravitation incurve d'une manière uniforme toutes les lignes d'Univers, tant les lignes d'Univers des corps ordinaires que celles de la lumière. Une telle *uniformité* de courbure des lignes d'Univers (démontrée pour les corps ordinaires trois siècles avant la théorie de la relativité générale et pour la lumière trois ans après son apparition) permit d'identifier la gravitation et la courbure de l'espace-temps.

Le développement de la physique exigeait instamment une nouvelle conception de la métrique de l'espace. Pour atteindre une telle conception il fallait renoncer consciemment et définitivement au temps *a priori* et à la base conventionnaliste de la géométrie. Les pensées d'Einstein sur la physique et la géométrie n'ont pas simplement favorisé la genèse de la théorie de la relativité générale, elles en ont été une hypothèse indispensable. Ceci ne veut pas dire, d'ailleurs, qu'elles avaient avant 1916 atteint la même clarté que dans les derniers travaux. Ici comme partout dans l'œuvre d'Einstein, les idées épistémologiques ne devenaient claires qu'en corrélation avec les constructions physiques pures.

Ainsi, Einstein s'est libéré de la représentation du sens métrique direct des coordonnées. D'où l'équivalence des systèmes de coordonnées, se transformant les uns en les autres par des transformations continues. Le choix des systèmes d'inertie caractérisant la mécanique classique et la théorie de la relativité restreinte disparaît simultanément.

De l'équivalence de tous les systèmes de référence établis les uns à partir des autres par transformations continues, Einstein déduit que les lois de la nature doivent s'exprimer par des relations covariantes par rapport à un groupe de transformations continues des coordonnées (par rapport au groupe dont le groupe de Lorentz est un sous-groupe). Cette condition, selon Einstein, ne permet pas de trouver les équations fondamentales de la physique. Elle doit être complétée par une autre, à savoir qu'il faut prendre les plus simples des systèmes d'équations covariantes générales et parmi ces dernières chercher les équations du champ décrivant les propriétés physiques de l'espace. Pour les trouver, il convient de connaître la nature mathématique des grandeurs, fonctions des coordonnées, exprimant la structure du champ, autrement dit, les propriétés physiques de l'espace.

Einstein raconte qu'il ne connaissait pas la structure du champ, ni les variables exprimant les propriétés physiques de l'espace dans le cas général. Mais il connaissait déjà les variables décrivant les propriétés de l'espace libre de champ, c'est-à-dire de l'espace dont il est question dans la théorie de la relativité restreinte. Il part de l'invariant des transformations de Lorentz :

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 - dx_4^2, \quad (1)$$

qui est également mesurable et donc, conformément à la définition einsteinienne, une grandeur ayant un contenu physique. On peut donner à l'expression écrite une forme plus générale, vraie pour un système de coordonnées arbitraire :

$$ds^2 = \sum_{i, k=1}^4 g_{ik} dx_i dx_k. \quad (2)$$

La généralisation des lois que contient cette relation doit s'effectuer en deux étapes. On introduit d'abord le champ de gravitation. La métrique de l'espace-temps correspond encore à la formule générale (2), la représentation (1) de la théorie de la relativité restreinte ne peut être conservée que pour un domaine infinitésimal. L'étape suivante de la généralisation fait intervenir le champ unique comprenant, en plus des forces de gravitation, les forces électromagnétiques.

En 1916, Einstein a renoncé à cette étape de la généralisation.

« La tentative de trouver une représentation du champ total et d'obtenir pour ce dernier des équations me paraissait à cette époque sans issue, et je ne m'y suis pas risqué. J'ai préféré établir pour la représentation de toute la réalité physique un cadre formel préalable. Ceci était indispensable pour pouvoir estimer, ne serait-ce que préalablement, l'idée fondamentale de la théorie de la relativité générale¹⁾. » Une telle étude consistait en l'élaboration d'une loi nouvelle de la gravitation. Cette loi s'exprime par l'équation

$$R_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} R = -\kappa T_{ik},$$

* ¹⁾ A. Einstein. Autobiographisches. Ed. citée.

dont le premier membre contient le tenseur riemanien de courbure et une autre grandeur caractérisant la courbure, et le second membre est le tenseur d'énergie-impulsion. Ce dernier décrit la réalité physique n'entrant pas dans le champ de gravitation défini par l'équation. Dans son autobiographie de 1949, Einstein dit de cette grandeur qu'« elle contient tout ce qui ne peut pas être réuni dans une théorie unitaire du champ ». Dans les propos d'Einstein sur la théorie de la relativité générale se rapportant aux années 1930-1950, on a la même caractéristique du second membre de l'équation de la gravitation : tenseur d'énergie-impulsion ; cette grandeur n'a pas été déchiffrée du point de vue physique. Suivent ces paroles d'Einstein sur les équations de la gravitation :

« Bien sûr je n'ai pas une seule minute douté qu'une telle formulation n'était qu'une issue temporaire permettant de donner au principe de la relativité générale une certaine expression sans contradictions. Cette formulation n'était, en fait, rien de plus que la théorie d'un champ de gravitation, soustrait un peu artificiellement à un champ unique de structure encore inconnue¹⁾. »

Dans les travaux d'Einstein des années 1930-1950, il insiste sur le fait que la théorie de la relativité générale n'est pas achevée en tant que théorie du champ de gravitation. C'est là un compromis temporaire. Einstein cherche une théorie unitaire. Ces recherches vont de pair avec les efforts pour expliquer la nature des particules dont l'existence est déduite des équations du champ unique. La pensée d'Einstein était primitivement orientée vers la généralisation des transformations, vers le passage à un groupe plus étendu de transformations. Mais cette tentative fut vaine. Einstein voulait après Kaluza passer de l'espace-temps quadridimensionnel à un ensemble à un plus grand nombre de dimensions, mais ultérieurement il a renoncé à cette voie pour en fin de compte s'arrêter à une autre solution. Il passe du tenseur symétrique g_{ik} à un tenseur non symétrique composé d'une partie symétrique et d'une partie antisymétrique. Cette transformation est exposée dans ses travaux sur la théorie unitaire du champ. Il faut y ajouter certaines remarques d'Einstein, où il donne une évaluation de résultats obtenus.

* ¹⁾ A. Einstein. Autobiographisches. Ed. citée.

En 1942 Einstein écrivait à son ancien ami Hans Mùhsam : « Je travaille d'une manière encore plus fanatique qu'au-paravant et j'espère résoudre le problème déjà ancien pour moi d'un champ physique unique. Cela me rappelle un navire aérien dans les nuages, et l'on ne sait pas très bien comment redescendre sur la terre... Peut-être verra-t-on des temps meilleurs, ne serait-ce qu'un instant apparaître quelque chose qui ressemble à la terre promise¹⁾... »

Deux ans plus tard Einstein écrit de nouveau à Mùhsam : « Peut-être saurais-je si j'ai le droit de croire en mes équations. Mais ce n'est rien de plus qu'un espoir, car chacune des variantes est liée à de grandes difficultés mathématiques. Il y a longtemps que je ne vous ai pas écrit malgré mes remords de conscience et ma bonne volonté, car les difficultés mathématiques n'ont pas pitié de moi²⁾. »

Einstein n'était pas satisfait non pas tant du fait des difficultés mathématiques sans cesse grandissantes, que parce qu'il avait conscience que la théorie unitaire du champ ne pouvait avoir de vérification expérimentale. En 1951 dans une lettre à Solovine, Einstein écrit :

« La théorie unitaire du champ est maintenant terminée. Mais il est si difficile de l'employer mathématiquement que, malgré toute la peine que je me suis donnée, je ne suis pas en état de la vérifier d'une manière quelconque. Cet état durera encore pendant beaucoup d'années, principalement parce que les physiciens ont peu d'aptitude à comprendre les arguments logiques et philosophiques³⁾. » Mais pour Einstein lui-même la possibilité d'une vérification expérimentale de la théorie était un critère très important pour son choix.

L'absence de base expérimentale à la théorie du champ unique était liée au caractère du développement de la physique dans les années 1930-1950. En 1961, dans l'article intitulé « Remarques sur l'esquisse einsteinienne de la théorie unitaire du champ », Heisenberg écrit :

« Cette tentative merveilleuse dans son essence a d'abord apparemment fait faillite. Au moment où Einstein s'occupait du problème d'une théorie du champ unique, de nouvelles particules élémentaires étaient sans cesse découvertes,

* ¹⁾ Helle Zeit — dunkle Zeit. In Memoriam Albert Einstein. Hrsg. Carl Seelig, Zürich, Europa Verlag, 1956, S. 50-51.

²⁾ *Ibid.*

³⁾ A. Einstein. Lettres à Maurice Solovine. Ed. citée, p. 107.

auxquelles on faisait correspondre de nouveaux champs. Par suite, pour réaliser le programme d'Einstein, il n'y avait pas encore de base expérimentale solide, et la tentative d'Einstein n'a pas donné de résultats satisfaisants. »

A l'heure actuelle, la situation est différente. Personne n'objectera qu'il soit possible en principe d'établir une théorie unitaire des particules élémentaires et qu'une telle théorie soit la théorie unitaire des champs auxquels correspondent des particules de types différents. L'interaction de ces particules et donc des champs, les transformations des particules, les effets ultrarelativistes deviennent des notions de base de l'image scientifique de l'Univers. Mais ce qui nous intéresse ici ce sont les aspects de la théorie de la relativité d'Einstein apparus lors de ces transformations, c'est-à-dire ce qu'il y a de nouveau dans ses travaux. Au premier abord la théorie de la relativité se présentait sous la forme d'une généralisation de la mécanique classique, comme la purification de « l'idéal classique » des notions contradictoires de l'action instantanée à distance (théorie restreinte) et du choix des systèmes d'inertie (théorie générale). Dans la genèse de la théorie de la relativité générale le principe de Mach a joué un rôle important : tous les processus s'expliquent par le mouvement des particules, lequel à son tour s'explique par leur interaction. L'application conséquente du concept de champ a sorti la théorie de la relativité des limites de cette représentation et a obligé Einstein à retirer au principe de Mach son caractère universel. Dans son autobiographie de 1949 Einstein écrit : « Selon Mach, dans une théorie réellement rationnelle, l'inertie provient, tout comme les autres forces de Newton, de l'interaction des masses. Longtemps je trouvais cette opinion exacte. Cependant, ceci suppose, sous forme non explicite, que la théorie de base doit appartenir au même type général que la mécanique de Newton : elle doit reposer sur la notion de masses et d'interaction entre elles. Mais il n'est pas difficile de voir qu'une telle tentative de solution n'est pas compatible avec l'esprit de la théorie des champs¹⁾. »

La théorie de la relativité est sortie des limites du principe de Mach et, plus encore, des limites de « l'idéal classique » par suite, d'une part, du développement logique interne

* ¹⁾ A. Einstein. *Autobiographisches*. Ed. citée.

de la théorie et, d'autre part, du développement de la physique quantique, de la théorie des champs quantifiés et de leurs interactions, c'est-à-dire en suivant une voie qui jusqu'à un certain moment était parallèle à la théorie « classique » de la relativité.

En conclusion, il est bon de souligner encore une fois que la conception du monde d'Einstein ouvre la voie à une théorie unitaire, synthèse des idées relativistes et quantiques. Pour illustrer d'une manière plus concrète ce concept indiscutable sans doute, mais pour le moins très général, il faut passer à des évaluations qui soient moins certaines; dans le domaine des prédictions il existe une relation particulière de complémentarité entre le certain et le concret : plus une prédiction est déterminée, moins son contenu est certain. On peut par exemple supposer qu'à l'échelle microscopique l'espace-temps est discret : une telle hypothèse permettrait d'éliminer les grandes difficultés de la physique moderne. Mais il est difficile de concilier cette hypothèse avec la théorie de la relativité : il est difficile d'imaginer, dans les cellules de l'espace-temps discret, des processus soumis à la causalité relativiste, il est difficile de parler d'événements, liés par des interactions se propageant à des vitesses inférieures à celle de la lumière. Entre-temps, la théorie des processus submicroscopiques doit, lorsqu'on passe aux échelles plus grandes, conduire à la causalité relativiste, aux relations de la théorie de la relativité d'Einstein. Il est bon de se rappeler ici la remarque d'Einstein citée page 228, à savoir que la théorie de la relativité ne peut être considérée comme achevée tant que le comportement des échelles et des horloges, c'est-à-dire la métrique de l'Univers quadridimensionnel, ne se déduit pas des lois les plus générales de l'existence. Les tendances de la pensée physique moderne qui visent à déduire la causalité relativiste de la structure discrète de l'espace-temps et à obtenir ainsi une image de l'Univers dotée de « justification externe » et de « perfection interne » semblent avoir quelque avenir. En tout cas on ne peut pas ne pas être d'accord avec Igor Tamm lorsqu'il dit :

« Personne ne peut évidemment prévoir quel sera le développement ultérieur de la physique, mais il me semble que l'on peut affirmer avec certitude que les idées d'Einstein, son analyse des notions d'espace et de temps et de lien existant entre les relations espace-temps et la matière

se trouvant dans l'espace et le temps peuvent ultérieurement connaître de grands changements, mais sans aucun doute serviront-elles de point de départ à toute une nouvelle époque historique dans le développement de la physique ¹⁾. » Ce sera une époque de renoncement à la physique classique plus radical qu'au début du siècle, une époque qui modifiera peut-être les idées d'Einstein (en les conservant en entier pour certaines échelles et certains domaines), mais qui ne s'écartera pas du chemin emprunté par la pensée théorique après Einstein : elle ne renoncera pas aux critères de « justification externe » et de « perfection interne », elle cherchera dans la nature son harmonie causale objective, elle trouvera pour les notions mathématiques leurs équivalents physiques réels, rien ne l'arrêtera et elle poursuivra ses recherches d'une représentation de plus en plus exacte de la réalité.

* ¹⁾ I. T a m m. Einstein et la physique contemporaine. Uspekhi fizicheskikh naouk, 1956, 59, fascicule 1, p. 10.