uméros 19-20 mai-juin-juillet-août 1962

sciences

et l'enseignement des sciences revue française des sciences et des techniques

plusieurs mois sous la présidence du sénateur américain Henry M. Jackson pour étudier cette question. Il recommanda la création d'un conseil scientifique permanent ayant à sa tête un conseiller scientifique, et proposa un programme d'activités sur le thème général « No Barrier to Talent ».

Les barrières aux personnes qui auraient les capacités de contribuer à l'effort scientifique prennent des formes variées et sont parfois assez différentes d'un pays à l'autre. Dans certains pays les premières études sont excellentes et donnent aux enfants le goût du travail, dans d'autres la formation qu'elles offrent est si insuffisante que l'enseignement universitaire en est sérieusement handicapé. Ailleurs, la barrière qui arrête les vocations scientifiques se place au niveau des études universitaires, ou encore à la fin des études lorsque l'étudiant désire pénétrer dans le monde de la recherche.

Le comité temporaire limita ses suggestions à quelques « barrières » où l'action de l'OTAN pouvait être efficace immédiatement :

a. La difficulté pour un apprenti chercheur de s'initier aux développements scientifiques récents qui ne font pas encore partie de l'enseignement universitaire.

b. La difficulté pour certains jeunes d'établir des contacts personnels et étroits avec les scientifiques de pays étrangers.

c. La difficulté d'organiser et de financer certaines recherches où la coopération internationale est indispensable.

En décembre 1957, le conseil scientifique permanent entrait en fonction. Les professeurs Ramsay, Seitz, Nierenberg et actuellement Allis ont été successivement nommés conseiller scientifique. Sans aucun délai, le conseil scientifique s'attaqua aux trois barrières qui étaient soumises à son attention et grâce à une subvention Ford et aux services administratifs de la Fondation universitaire belge put immédiatement se mettre à l'œuvre sans attendre les crédits de l'OTAN et la mise en route de son service.

Un des tout premiers documents du conseil scientifique commence par ces mots :

« Advanced Study Institute Program :

The North Atlantic Council has agreed that there should be a program for the support of scientific study institutes for advanced or special topics. The highly successful summer institutes at Les Houches and Varenna with intensive lectured and seminars extending over a two-week to two-month period are examples of such activities ».

Depuis 1951 aux Houches et depuis 1952 à Varenna, des physiciens se réunissent chaque été pour approfondir les développements récents de la physique ; cet exemple fut suivi au cours des années suivantes par trois ou quatre autres pays. Grâce à l'appui de l'OTAN il y a maintenant plus d'une trentaine d'écoles similaires. Quel rôle jouent ces écoles d'été par rapport aux universités?

L'évolution des sciences est de nos jours trop rapide pour que la plupart des universités puisse en suivre le rythme et assurer un enseignement qui couvre les travaux les plus récents. Il n'est même pas souhaitable que *toutes* les universités cherchent à enseigner *tous* les développements scientifiques et se laissent emporter par le courant des travaux récents au détriment de l'enseignement de base qu'elles doivent assurer. Une école d'été, par contre, permet de réunir, pendant la période des vacances, à la fois, des jeunes chercheurs disséminés dans des universités éloignées les unes des autres, désireux d'approfondir une question en pleine évolution et des spécialistes éminents qui contribuent à son étude. Mieux que les congrès et que les revues scientifiques souvent accessibles aux seuls initiés, les écoles d'été permettent d'acquérir une connaissance approfondie d'un sujet déterminé.

Telles des thébaïdes scientifiques, ces écoles organisent des sessions de une à huit semaines au cours desquelles les participants, dont le nombre atteint rarement la centaine, consacrent tout leur temps à des cours, groupes d'études, discussions, centrés sur un sujet donné Ces écoles recherchent généralement les sites exceptionnels et l'isolement qui permet de fournir un effort intellectuel soutenu. L'OTAN subventionna cinq écoles en 1959, quatorze en 1960, vingt en 1961 et une trentaine en 1962. Les sujets traités vont de la physique théorique aux questions de productivité avec toutefois une prédominance de questions relatives à la physique. Il est évident — mais il faut peut-être le souligner — que, pour assurer leur valeur scientifique, ces écoles doivent pouvoir inviter librement des participants de pays qui ne font pas partie de l'Alliance Nord Atlantique ; ce fut à l'honneur du Conseil scientifique de rendre possible cette coopération entre tous les chercheurs.

Un des rapports d'activités du conseil scientifique commence par ces mots :

« La coopération scientifique est un moyen évident pour, dans les termes mêmes du traité de l'Atlantique Nord, sauvegarder la liberté, l'héritage commun et la civilisation des pays de la communauté atlantique. La recherche fondamentale et la recherche appliquée relèvent le niveau de vie et simultanément accroissent la sécurité d'un pays. Les progrès scientifiques vers l'un et l'autre buts se renforcent mutuellement. » N'y aurait-il pas lieu de voir également dans la recherche scientifique l'expression d'un des instincts les plus profonds de l'homme. L'instinct qui pousse l'homme à découvrir le monde autour de lui et qui se manifeste déjà chez le jeune enfant que rien, si ce n'est la maladie, n'empêchera d'apprendre à marcher ni d'explorer son univers. Cet instinct peut, peut-être, permettre aux hommes de travailler ensemble même là où d'autres instincts les poussent à lutter les uns contre les autres.

CÉCILE DEWITT

▪ MAITRE DE RECHERCHES AU C.N.R.S.

Où en est la relativité ?

Jean-Marie Souriau

Des discussions passionnées ont marqué la naissance de la Relativité, non seulement parmi les physiciens auxquels cette notion s'adressait directement, mais aussi parmi les philosophes et le public cultivé ■ *Après un demi-siècle, l'effet de ces polémiques reste sensible. Ainsi, il n'est pas encore possible, en 1963, d'enseigner la Relativité comme les autres disciplines scientifiques ; il faut d'abord débarrasser l'esprit des étudiants d'une foule de préjugés qui peuvent se résumer ainsi : la Relativité est une théorie paradoxale et terriblement difficile...*

Jean-Marie Souriau examine ici l'état actuel de la Relativité, principalement sous l'angle de la géométrisation de la physique. Sans entrer dans le détail du développement historique de la théorie, il lui a semblé nécessaire de relever certaines erreurs et certaines confusions qui sont encore largement répandues dans les milieux scientifiques.

L'espace-temps

A l'époque où Einstein a créé la théorie de la Relativité[1], le concept d'espace-temps semblait révolutionnaire et difficile : on peut mesurer le respect qu'il a inspiré au nombre de termes qui ont servi à le désigner : « continuum spatio-temporel » (toujours très en honneur chez les auteurs de science-fiction, bien que désuet chez les scientifiques), « univers », « espace de Minkowski », « variété V_4 », etc...

Cependant, l'espace-temps est une notion banale et beaucoup moins abstraite que la notion d'espace euclidien.

Il ne s'agit pas ici d'un paradoxe ; les réflexions que chacun a pu faire lors du développement de l'astronautique le montrent aisément.

Il est classique, chez les artilleurs notamment, de décrire le mouvement d'un mobile par la *trajectoire*, ensemble des positions successives du mobile, et la *loi du mouvement* indiquant, comme un horaire de chemin de fer infiniment détaillé, le point de la trajectoire où se trouve le mobile à chaque instant.

Pourtant, si l'on considère un mobile qui s'éloigne un peu de la terre, on se rend compte du caractère *relatif* de la trajectoire : une fusée qui monte verticalement a une trajectoire rectiligne pour un observateur terrestre ; mais la terre tourne : la trajectoire est donc *courbe* pour un observateur qui n'est pas entraîné par la terre ; elle sera différente pour des observateurs lunaire, planétaire, ou solaire.

Ainsi, lors du lancement des premières fusées lunaires, on a pu constater la variété des « trajectoires » que leur prêtaient les articles de presse : elliptique pour les uns, en huit pour les autres, ou encore festonnées ; en fait, aucune de ces trajectoires n'était fausse, mais aucune n'était vraie — car la notion de trajectoire dans l'espace est dépourvue de sens. De même sont dépourvues de sens des phrases telles que les suivantes : « la fusée est immobile dans l'espace » ; « l'engin gravite autour du soleil à la vitesse de 25.000 kilomètres à l'heure » ; « les deux fusées sont passées au même point, à 12 heures d'intervalle » ; « le commandant Titov a parcouru une distance totale de 703.143 kilomètres[2] ».

Tous ces non-sens ont la même origine ; c'est qu'on oublie facilement qu'il est impossible de définir un point de l'espace sans le rattacher, soit à un *solide* tel que la terre, soit à un *instant*.

Le concept d'*instant-point* que l'on obtient ainsi est, au contraire, tout à fait objectif : c'est la proximité de deux instants-points qui permet, par exemple, un rendez-vous orbital, ou la destruction d'un « missile » par un « anti-missile ».

1. Ses mémoires fondamentaux ont paru de 1905 à 1916. Réf. 1 et 2.
2. Fédération Aéronautique Internationale, mars 1962.

Pour éviter le genre d'erreurs que nous venons de mentionner, il est indispensable d'adopter un langage sans ambiguïté ; on évitera donc de parler d'espace ; par contre, rien n'empêchera de donner un nom — U par exemple — à l'*ensemble de tous les instants-points ;* c'est cet ensemble U qu'on appelle *espace-temps ;* il est clair que la considération de U ne suppose aucune aptitude mystérieuse à « voir dans la quatrième dimension », sous prétexte que les mathématiciens classent U parmi ce qu'ils appellent les « espaces à 4 dimensions ».

Il ne faudrait pas croire, non plus, que ces considérations soient particulièrement liées à la théorie d'Einstein; il est probable qu'elles n'auraient guère choqué Newton.

Déterminisme et géométrie

Il est évident que toutes les théories physiques actuelles ont des principes communs ; mais les énoncés de ces principes sont tellement variés — et les intentions subjectives de ceux qui les énoncent si diverses — qu'il semble difficile d'en apercevoir clairement l'unité profonde.

A notre avis cependant, et grâce à la méthode rigoureuse de l'axiomatique mathématique, le *principe du déterminisme* et les différents *principes de relativité* se fondent en une seule discipline, qui n'est autre que la *géométrie*, au sens moderne du mot.

Raisonnons par voie inductive, à partir de l'énoncé le plus naïf du déterminisme : « les mêmes causes produisent les mêmes effets ».

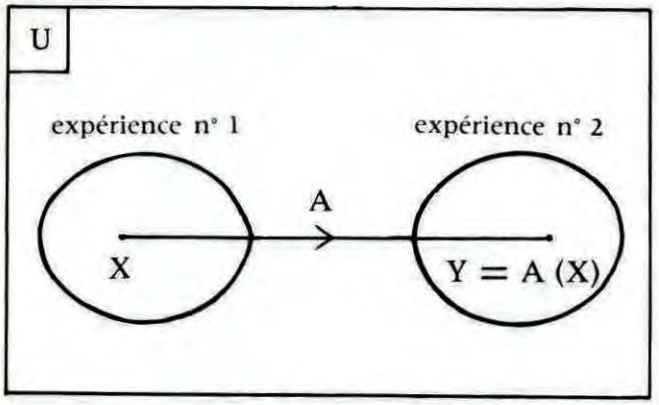
Distinguer les effets des causes n'est pas notre propos ; mais nous nous demanderons à quoi l'on pense lorsqu'on dit *les mêmes* causes, *les mêmes* effets.

Il ne s'agit certainement pas de l'identité complète de deux faits — identité qui irait jusqu'au lieu et à l'instant (il s'agirait alors de deux contemplations d'un même phénomène) ; en réalité, on pense à la *répétition* d'une expérience, en un autre lieu ou à une autre date ; le déterminisme est donc la croyance dans la possibilité de reproduire — plus ou moins bien — un fait expérimental *n'importe où dans l'espace-temps U*.

Toute expérience étant plus ou moins *étendue* dans l'espace et le temps, on voit ce que ceci implique : il existe une correspondance (désignons-la par exemple au moyen de la lettre A) entre la première et la seconde expérience ; à tout instant-point X de l'expérience n° 1, elle fait correspondre un instant-point $Y = A(X)$ de l'expérience n° 2, *de sorte qu'il se passe la même chose en X et en A(X)*

L'espace-temps U possède donc des transformations remarquables (telles que A) qui ont la propriété de *conserver* les lois de la nature ; nous les appellerons des *glissements*[3].

On conçoit, d'autre part, que la transformation *inverse* de A (celle qui fait correspondre le point X au point Y) conserve aussi les lois de la nature ; c'est donc encore



un *glissement* ; nous entrevoyons alors comment le déterminisme pourra *s'énoncer mathématiquement de façon rigoureuse*, au moyen *d'axiomes* concernant les glissements[4], tels par exemple que : « l'inverse d'un glissement est un glissement ».
Il importe de remarquer que ces axiomes ne servent pas seulement à faire de la physique mathématique ; ils sont *communs à toutes les branches de la géométrie moderne*, telles par exemple que la *topologie*, la *géométrie algébrique*, la *géométrie différentielle*, etc.
Nous voyons donc que la physique, grâce au déterminisme, devient une *branche spéciale de la géométrie :* branche où l'on étudie particulièrement la notion de *variance*[5].

Qu'est-ce que la relativité?

Le recours à la géométrisation est donc commun à toutes les théories physiques, bien qu'il soit, suivant les cas, plus ou moins important et plus ou moins conscient. Il ne peut donc pas suffire à caractériser la Relativité d'Einstein.
L'innovation majeure de cette théorie, c'est l'idée que la détermination de l'ensemble des glissements qui conservent la physique est un *problème expérimental* — et que l'on ne peut pas, sur ce point, faire confiance aux seules traditions.
En 1905 (réf. 1), Einstein a mis fin à une longue crise de la physique en montrant que l'on pouvait décrire sans contradiction la propagation de la lumière dans le vide (expérience de Michelson, équations de Maxwell), à condition de remplacer les transformations classiques (« groupe de Galilée ») par les transformations dites de *Lorentz ;* ainsi est née la théorie de la Relativité Restreinte, universellement admise maintenant[6], et qui s'est révélée si féconde par ses applications aux diverses branches de la physique (notion de temps propre, équivalence de la masse et de l'énergie, etc.) et à l'art de l'ingénieur (énergie atomique).

Einstein a franchi une seconde étape en 1916 (réf. 2), en remarquant que les transformations de Lorentz étaient insuffisantes pour décrire la *gravitation ;* il a donc proposé de décrire l'espace-temps avec une autre géométrie, celle qu'on appelle maintenant *géométrie différentielle*, et qui contient bien entendu la géométrie de Lorentz-Minkowski comme cas particulier ; ainsi était née la *Relativité Générale.*

Vérifications de la relativité générale

Dès le début, la Relativité Générale a reçu un grand nombre de vérifications expérimentales remarquables ; elle ne se contente pas de retrouver la mécanique céleste newtonienne, mais prévoit des effets inexpliqués jusqu'alors (avance du périhélie de Mercure) ; elle prévoit aussi un changement de fréquence pour les sources lumineuses placées dans un champ de gravitation, appelé *effet Einstein*, qui a été vérifié notamment sur la plus dense des composantes de l'étoile double Sirius, et une déviation des rayons lumineux qui passent au voisinage du Soleil (observée plusieurs fois, avec netteté, lors des éclipses totales).
Assez vite, les astronomes furent donc convaincus de la validité de la théorie, et utilisèrent notamment l'effet Einstein pour peser les étoiles ; c'est à partir de la Relativité Générale que furent édifiées diverses cosmogonies, dont nous ne parlerons pas ici, et que fut étudiée en particulier l'expansion de l'univers.
Mais les physiciens ne croyaient guère aux mesures des astronomes ; il a fallu attendre les travaux de Mossbauer — travaux qui lui valurent un prix Nobel en 1961 — pour qu'on dispose d'un étalon de fréquence assez précis

3. Les lois de la physique ne cherchent pas à raconter tout ce qui se passe, mais à distinguer le *possible* de l'*impossible* parmi l'*imaginable ;* dire que A est un glissement, c'est dire que l'image par A de tout événement *réel* est un événement *possible.*
4. Le lecteur trouvera l'énoncé du système complet de ces axiomes au chapitre I de la référence 12.
5. La *variance* est l'ensemble des règles qui précisent comment un phénomène qui se passe au point X peut être « transporté » au point A(X) par un glissement A ; la théorie de la variance peut être considérée comme une application de la théorie des *espaces fibrés ;* voir la référence 12, chapitre III.
6. Il reste pourtant, dans le cœur même de la Relativité Restreinte, un mystère que l'expérience n'a pas définitivement éclairci.
On appelle « parité » la transformation qui consiste à donner d'une expérience une image dans un miroir. On peut se demander si les *parités* font partie des transformations de Lorentz, ou, en d'autres termes, si l'image dans un miroir d'une expérience réelle est une expérience possible.
Les physiciens Lee et Yang ont reçu un prix Nobel pour avoir répondu non à cette question ; mais l'interprétation des expériences qu'ils ont proposées reste ambiguë, pour des questions de *variance :* il se pourrait, par exemple, que l'image de la matière dans un miroir soit de l'antimatière, donc aussi du possible. Ce point de vue est défendu notamment par le physicien soviétique Lév Landau, prix Nobel 1962.

pour mettre en évidence l'effet Einstein entre deux étages d'un même laboratoire ; on a une idée de la précision de ces mesures en remarquant qu'elles mettent en évidence la variation du champ de gravitation terrestre sur quelques mètres, alors qu'on n'avait pu, jusqu'alors, obtenir un effet mesurable qu'en recourant au champ gravitationnel *total* des étoiles *les plus denses*.
Du coup, la Relativité Générale est revenue au premier plan de l'actualité ; les physiciens commencent à y croire, et l'on peut espérer que de grands progrès seront effectués dans les années qui viennent.
Les vérifications que l'on recherche actuellement sont pour la plupart fondées sur l'analogie certaine qui existe entre les équations d'Einstein (gravitation) et celles de Maxwell (lumière et champ électromagnétique) ; on cherche à répéter pour le champ de gravitation les expériences qui ont réussi avec le champ électromagnétique, et que l'on peut classer en trois types :
1. *Vérifications optiques :* on voudrait mettre en évidence les *ondes gravitationnelles* prévues par les équations d'Einstein, et vérifier notamment qu'elles se propagent à la vitesse de la lumière (réf. 5, § 23).
2. *Vérification de structure :* il s'agirait d'observer les *dix potentiels gravifiques* d'Einstein, ou les grandeurs de champ qui s'en déduisent.
3. *Vérifications quantiques :* de même que la quantification des équations de Maxwell a conduit à la théorie d'une particule appelée *photon*, on pense que la quantification des équations d'Einstein doit conduire à une nouvelle particule, que l'on a appelée *graviton*, et que l'on aimerait bien observer.
Ce programme se heurte à de très grosses difficultés, tant théoriques qu'expérimentales, mais qui ne suffisent pas à décourager les physiciens.

Faut-il géométriser la physique?

Comme nous l'avons dit plus haut, la Relativité Générale est basée sur la *géométrie différentielle ;* malheureusement, en 1916 ,avant les travaux d'Elie Cartan, cette géométrie était encore dans les limbes, et Einstein lui-même ne s'est guère donné la peine de préciser sa pensée à ce sujet. C'est ainsi, par exemple, qu'il énonce son principe général de Relativité : « les lois de la nature doivent être exprimées de telle manière qu'elles vaillent pour tous les systèmes de référence, c'est-à-dire qu'elles soient covariantes dans toute substitution de coordonnées ». Cet énoncé risque évidemment d'amener le lecteur à confondre les *glissements*, transformations géométriques de l'espace-temps qui conservent les lois de la physique, avec les *substitutions de coordonnées*, simples artifices de calcul soumis à l'arbitraire de l'utilisateur.
Ainsi a pris naissance un vaste mouvement d'incompréhension de la Relativité, comptant parfois dans ses rangs des savants éminents. V. Fock, par exemple, a pu écrire : « Nous nous proposons de rectifier l'interprétation erronée et très répandue selon laquelle la théorie d'Einstein de la gravitation est une sorte de relativité générale » (réf. 3, introduction).
Et pourtant, la Relativité Générale est bien plus qu'une théorie de la gravitation, de même que la Relativité Restreinte est bien plus qu'une théorie de la propagation de la lumière ; c'est une *géométrisation de la physique*, qu'on doit accepter ou refuser en bloc (en la perfectionnant au besoin) ; mais la position « moyenne » qui consiste à accepter certains de ses résultats en refusant les autres n'est guère soutenable du point de vue logique.
Malheureusement, toute la physique actuelle, et notamment la Théorie Quantique des Champs, est écrite dans la géométrie de la Relativité Restreinte ; pour l'instant, *on ne sait même pas l'exprimer* dans le langage de la Relativité Générale, et il n'existe pas de règle permettant de le faire ; il est donc nécessaire de se livrer à une révision complète de tous les raisonnements et de toutes les expériences.
On comprend que les physiciens aient repoussé le plus possible une telle échéance : pourquoi se livrer à un tel travail, alors que la Relativité Générale est encore douteuse, et que les interactions gravitationnelles sont tellement petites[7] comparées aux interactions électromagnétiques et nucléaires que nous étudions ?
Mais les vérifications expérimentales récentes, et le fait que la Relativité Générale ne concerne pas seulement la gravitation, vont probablement rendre bientôt indispensable cette *critique géométrique* de toute la physique

Un principe variationnel

La géométrisation de la physique non quantique fut effectuée, dans sa plus grande partie, par Einstein lui-même. Il procéda par voie inductive, passant d'abord de la physique classique à la Relativité Restreinte, puis de la Relativité Restreinte à la Relativité Générale.
En même temps qu'Einstein, et indépendamment, le mathématicien D. Hilbert était parvenu à écrire les équations de la gravitation (réf. 4) ; mais Hilbert procédait par voie *déductive*, en partant d'un principe *variationnel*[8].
En 1957, reprenant le point de vue de Hilbert, nous avons proposé un énoncé axiomatique de la Relativité Générale (la « Relativité Variationnelle »), énoncé qui se compose d'une caractérisation de la géométrie relativiste et d'un principe variationnel (réf. 7, 8, 12).

7. Ainsi, pour un couple d'électrons, le rapport de la répulsion électrostatique à l'attraction gravitationnelle est voisin de 4.10^{42}.
8. On appelle ainsi les principes qui proposent de déterminer les lois en annulant la *variation* d'une certaine intégrale, appelée *action ;* les premiers principes variationnels furent proposés par Fermat, (1662) et par Maupertuis, (1744) ; on verra ci-dessous que le principe de Maupertuis se rattache *directement* aux principes variationnels de la Relativité Générale.

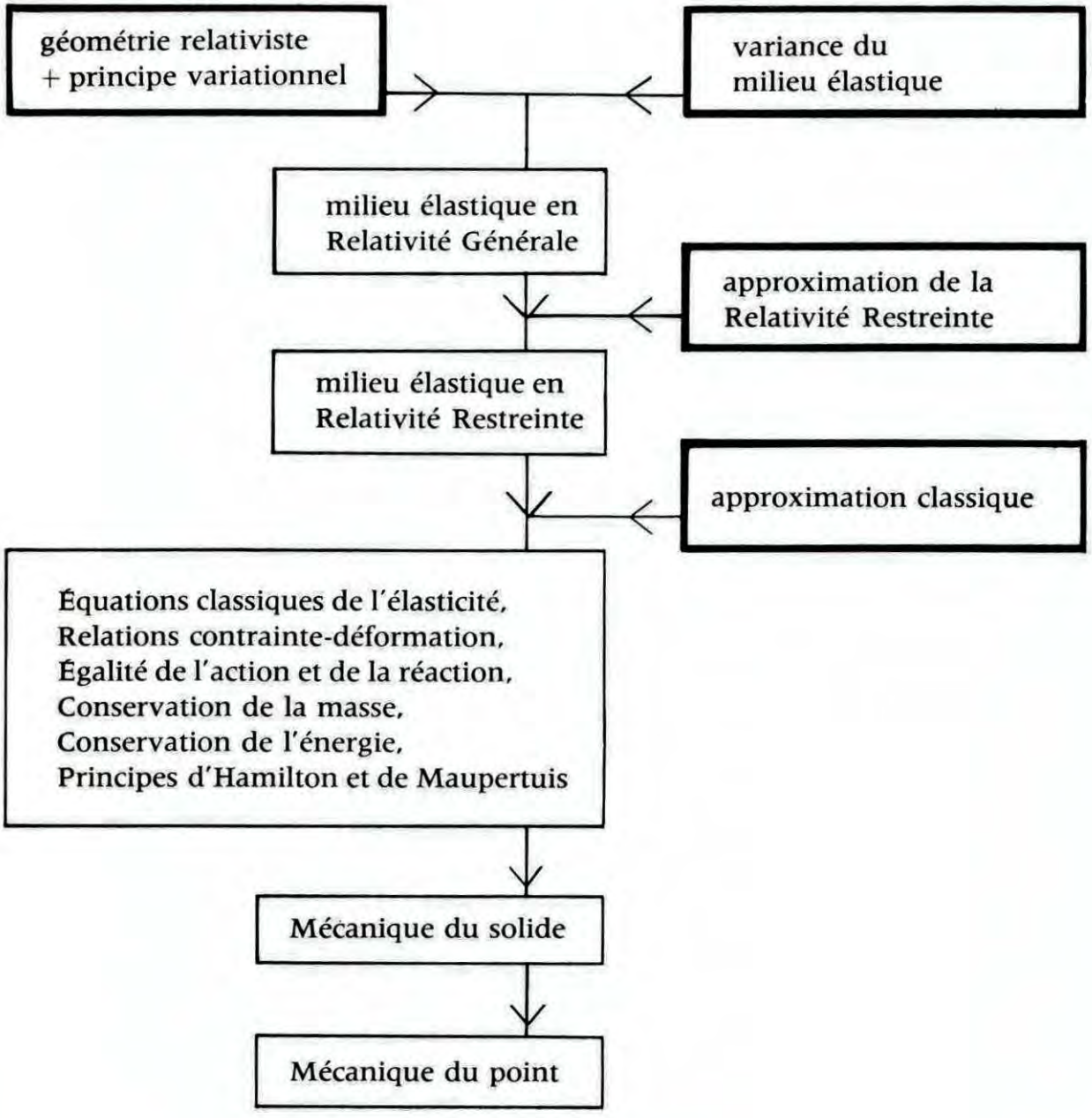
Cette axiomatique permet de *déduire* un grand nombre de propriétés qui avaient été *induites* par Einstein ; notamment l'existence du *tenseur impulsion-énergie* associé à chaque phénomène physique, et l'équation de conservation qu'il vérifie.

— Il suffit de définir la *variance* de la gravitation pour *démontrer* les équations postulées par Einstein, équations qui ont fait l'objet des vérifications astronomiques indiquées plus haut. Mais la théorie laisse prévoir l'existence de termes supplémentaires, qui pourraient jouer un rôle dans les champs de gravitation très intenses.

— De même, une simple définition de variance permet d'obtenir, dans le cas le plus général, les équations du *milieu élastique*.

Il s'agit là d'une représentation très schématique de la matière, mais qui est intéressante au point de vue épistémologique : le tableau suivant nous montre en effet que cette schématisation nous permet de déduire *tous les principes de la mécanique classique :*

Mais les axiomes de la Relativité Variationnelle sont



beaucoup moins nombreux que les axiomes qui s'introduisent successivement dans l'élaboration traditionnelle de la mécanique classique, de la théorie de l'élasticité et de la gravitation ; on peut donc affirmer, sans chercher le paradoxe, que la Relativité Générale est une théorie *plus simple* que la Mécanique Classique, plus simple également que la Relativité Restreinte — pour qui connaît, bien entendu, la géométrie différentielle.
Ceci permet donc d'espérer que la géométrisation de la physique quantique apportera, elle aussi, des simplifications et des perspectives nouvelles.

Y a-t-il une cinquième dimension?

Il est possible de décrire le champ électromagnétique en Relativité Générale ; bien que supérieure à la description de la Relativité Restreinte, cette théorie présente plusieurs aspects peu satisfaisants : il est nécessaire d'introduire à priori de nouveaux principes, comme l'*invariance de jauge;* les interactions électromagnétiques sont décrites de façon empirique, et non géométriques comme dans le cas de la gravitation. C'est pourquoi cette description a été nommée « théorie *provisoire* de l'électromagnétisme »[9].
Très tôt, divers savants ont recherché une meilleure explication. Nous nous contenterons de mentionner les essais d'Hermann Weyl, 1919, d'Einstein et Schrödinger, 1946-1950, et nous nous arrêterons à une théorie remontant à Kaluza, 1921, qui propose d'interpréter l'*invariance de jauge* au moyen d'une *cinquième dimension de l'espace-temps.*
Il y a de quoi faire sursauter n'importe qui : comment peut-il se faire que cette cinquième dimension *ne se voie pas* ?
Dans la théorie de Jordan-Thiry (réf. 3, 5), on postule un principe de stationnarité, qui aboutit bien à cacher la cinquième dimension, mais qui a certains aspects peu satisfaisants.
En 1958 (réf. 6), W. Pauli a suggéré de reprendre un principe de *périodicité*, proposé en 1926 par O. Klein.
En 1958 également (réf. 9, 10, 11), nous avons proposé de remplacer ces principes par une simple *condition topologique :* dans cette théorie, la cinquième dimension ne se voit pas parce qu'elle forme une *courbe fermée extrêmement petite ;* on peut considérer que l'univers est analogue à un *tube*, mais un tube dont les génératrices possèdent déjà quatre dimensions, celles qui sont apparentes pour un observateur grossier de l'espace-temps, de même qu'un tube capillaire suffisamment long et fin peut être pris pour une courbe, si l'on néglige l'une de ses deux dimensions[10].

9. André Lichnerowicz, réf. 5. Introduction au livre II.
10. Bien entendu, la théorie s'énonce en un langage mathématique tout à fait précis (réf. 12, chapitre VII) ; il serait dangereux de trop se fier à l'image du tube, uniquement destinée à soutenir l'imagination.

Cette théorie tubulaire permet de retrouver les résultats de la théorie de Jordan-Thiry : unification des équations d'Einstein avec celles de Maxwell, de l'énergie-impulsion avec l'électricité, et ceux de la théorie de Klein-Pauli : passage à la mécanique ondulatoire: mais elle apporte aussi des résultats nouveaux, et conformes à l'expérience ; ainsi, les interactions entre le champ électromagnétique et les particules chargées, décrites empiriquement jusqu'ici, deviennent une *conséquence nécessaire* de la structure géométrique de l'espace, aussi bien d'ailleurs pour les particules du type *fermion* que pour les particules du type *boson ;* la théorie montre que toutes les charges électriques sont les multiples entiers d'une charge élémentaire, fait bien connu mais pas encore expliqué ; elle donne une interprétation géométrique à la conjugaison de charge, transformation qui fait correspondre à chaque particule son *antiparticule.*
La théorie permet aussi de calculer le rayon du tube-univers ; la valeur numérique obtenue 3,78 10^{-32} cm) est *extrêmement petite*, même devant les dimensions des particules élémentaires, qui sont de l'ordre de 10^{-13} cm ; c'est bien ce que l'on avait supposé à priori.
Bien entendu, cette théorie n'explique pas tout ; elle est loin d'être achevée, et comporte encore bien des difficultés. Mais si l'avenir montre qu'elle doit être prise en considération, il deviendra nécessaire de formuler toute la physique en géométrie pentadimensionnelle.
Elle montre en tout cas, dès maintenant, qu'il n'est pas déraisonnable de concevoir une structure plus subtile à l'espace-temps où nous vivons.

JEAN-MARIE SOURIAU
▪ PROFESSEUR A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE MARSEILLE

Références

1. A. Einstein. Ann. Phys. Lpz. 17, 1905, 891.
2. A. Einstein. Ann. Phys. Lpz. 49, 1916, 769.
3. V. Fock. The theory of space-time and gravitation, trad. angl. N. Kemmer. Pergamon Press, 1959.
4. D. Hilbert. Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, 1915, 395.
5. A. Lichnerowicz. Théories Relativistes de la gravitation et de l'électromagnétisme. Masson, 1955.
6. W. Pauli. Theory of Relativity, note 23. Pergamon Press 1958.
7. J.M. Souriau. C.R. Acad. Sciences 244, 1957, 2779.
8. J.M. Souriau. Alger Mathématiques 5,2, 1958, 103.
9. J.M. Souriau. C.R. Acad. Sciences 247, 1958, 1559.
10. J.M. Souriau. C.R. Acad. Sciences 248, 1959, 1478.
11. J.M. Souriau. Coll. Intern. C.N.R.S., Gravitation Royaumont 1959.
12. J.M. Souriau. Géométrie et Relativité. Paris, Hermann, 1963, sous presse.
13. Y. Thiry. Étude mathématique des équations d'une théorie unitaire à quinze variables de champ. *Thèse*, Gauthier-Villars, 1951.