

Pourquoi Einstein inventa-t-il une théorie dont personne n'avait besoin ?

Jean Le Tourneux

Volume 26, numéro 3, hiver 1990

L'invention

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/035827ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/035827ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Les Presses de l'Université de Montréal

ISSN

0014-2085 (imprimé)

1492-1405 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Le Tourneux, J. (1990). Pourquoi Einstein inventa-t-il une théorie dont personne n'avait besoin ? *Études françaises*, 26(3), 91-99.
<https://doi.org/10.7202/035827ar>

Pourquoi Einstein inventa-t-il une théorie dont personne n'avait besoin?

JEAN LE TOURNEUX

Dans un colloque consacré à l'invention dans les arts, les sciences, les affaires et ailleurs, dans un colloque où l'on se demande entre autres choses s'il n'existerait pas un dénominateur commun à toutes ces formes d'invention, le sujet de mon exposé paraîtra sans doute très étroit et singulièrement dépourvu d'ambition. Voici pourquoi j'ai résolu de m'attarder à un cas particulier. Praticien de la physique théorique, je ne suis ni historien ni philosophe des sciences, ce qui ne m'empêche pas, remarquez, de suivre le spectacle de l'évolution des sciences avec un intérêt au moins comparable à celui que m'inspirent les meilleures œuvres de fiction. Et quand je parle d'un spectacle, je ne pense pas seulement à celui qui se déroule autour de moi sur la scène, et dans lequel je ne joue d'ailleurs qu'un rôle extrêmement modeste, je pense encore à celui que nous donne dans la salle un public formé d'historiens, de philosophes, de psychologues, de sociologues dont il est difficile pour un scientifique de ne pas lire les écrits dans le même esprit qu'un artiste lit le compte rendu d'un spectacle auquel il a participé. Or, je dois avouer qu'il m'est complètement impossible, à partir de ce spectacle, de dégager un dénominateur commun aux diverses formes d'invention dans les sciences qui ne soit pas trivial, du moins si je pense aux démarches qui conduisent à des progrès fondamentaux. Les formes mineures d'invention, qui assurent les progrès fondamentaux de la

recherche normale au sens de Kuhn¹, présentent évidemment un défi beaucoup moins grand : mieux circonscrites, elles font intervenir essentiellement l'art de résoudre un problème donné et se prêtent plus facilement à une étude systématique. De ce fait, elles sont moins intéressantes et c'est la raison pour laquelle je n'ai aucune envie de vous en parler. Je préfère vous présenter quelques réflexions sur la *complexité* des mécanismes d'innovation qui permettent de modifier profondément notre vision de l'Univers. Cette complexité présente des cas de figure différents dans chaque épisode et, compte tenu du temps dont je dispose, je ne m'en tiendrai qu'à celui au cours duquel Einstein inventa la relativité générale.

Pourquoi cet épisode ? Parce que sa complexité même, comme nous le verrons, permet d'aborder plusieurs des problèmes soulevés par l'étude de l'invention en physique théorique et de mettre à l'épreuve un certain nombre d'hypothèses avancées dans ce contexte. Il suffit de lire l'ouvrage de Judith Schlanger² pour se faire une excellente idée de ces problèmes et de ces hypothèses. Lesquels retiendront notre attention ?

Tout d'abord, le schéma mis de l'avant par les mathématiciens, Poincaré en particulier, pour le processus de l'invention intellectuelle. L'idée nouvelle se présente de façon soudaine, avec une clarté absolue, à la manière d'une illumination. Ce déclic surgit dans un moment de détente et n'est pas le fruit d'une application délibérée de l'esprit. Quoique Poincaré reconnaisse la nécessité d'encadrer ce moment privilégié de périodes de travail conscient, il n'en reste pas moins que pour lui l'instant crucial est celui de l'illumination. Or, comme le fait judicieusement remarquer Judith Schlanger, « non seulement il n'est pas évident que l'expérience de l'instant abrupt soit l'expérience dominante du savant, mais d'une façon plus large ce n'est peut-être pas la catégorie qui éclaire le mieux les problématiques de la connaissance³ ». De toute évidence, les systèmes de la physique théorique sont beaucoup moins clos que ceux des mathématiques. Le réseau des faits établis expérimentalement et des théories déjà développées impose de fortes contraintes à l'imagination. Dans ces conditions, la plupart du temps l'élaboration d'une théorie nouvelle est une entreprise de longue haleine qu'on saurait difficilement conduire à coups d'illuminations. Comme nous le verrons, Einstein eut deux déclics en développant la relativité générale. Quelle importance faut-il leur attribuer ?

L'allusion que je viens de faire aux contraintes imposées par les théories déjà existantes m'amène tout naturellement au deuxième problème que je souhaite aborder : comment une théorie révolutionnaire s'insère-t-elle dans le cours de l'histoire des sciences ? Nous verrons que

1. Thomas S. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*, Chicago, The University of Chicago Press, 1962.

2. Judith Schlanger, *L'Invention intellectuelle*, Paris, Fayard, 1983.

3. *Ibid.*, p. 58.

le cas de la relativité générale est particulièrement instructif à cet égard.

Finalement, le problème le plus important sans doute. Comment s'articulent faits expérimentaux et théories physiques? Dans quelle mesure les théories sont-elles déterminées par les faits? En gros, le scénario classique est le suivant. Un observateur ou un expérimentateur effectue un certain nombre de mesures. L'ensemble de celles-ci peut s'exprimer de façon très compacte grâce au langage mathématique. Chemin faisant, il arrive qu'on observe la récurrence de certaines régularités: on vient alors de découvrir la formulation mathématique d'une loi empirique. C'est ce qui arriva à Kepler quand il analysa les observations de Tycho Brahé: il montra que dans un repère lié au soleil toutes les planètes se déplacent sur des ellipses. Jusqu'ici il n'y a pas de théorie. La théorie commence au moment où Newton formule les hypothèses de la mécanique classique et reproduit les trajectoires elliptiques de Kepler à partir de sa théorie de la gravitation. Une théorie respectable ne doit pas se contenter de reproduire les faits déjà connus: elle doit encore se compromettre et faire des prédictions que de nouvelles expériences viendront infirmer ou confirmer. Quand les choses tournent mal, la théorie doit être modifiée ou, si elle a trop de plomb dans l'aile, supplantée par une rivale. Ce dialogue idyllique entre expérimentateurs et théoriciens se poursuit jusqu'au jour où un drame éclate: l'expérience révèle un fait ou un ensemble de faits qu'aucune théorie à l'horizon ne saurait expliquer. Cet état de crise, décrit par Thomas S. Kuhn⁴, est à l'origine des révolutions scientifiques: l'énergie du désespoir inspire aux théoriciens l'audace de parier, c'est-à-dire d'introduire des méthodes et des concepts radicalement nouveaux.

Voilà donc le scénario classique. Dans l'ensemble il n'est pas si vilain, mais on peut se demander s'il arrive à l'occasion que les choses se passent autrement. En particulier, une révolution théorique peut-elle se dérouler sans que des observations expérimentales aient d'abord déclenché une crise? J'en suis fermement persuadé et j'espère vous en convaincre dans quelques instants en vous montrant que la relativité générale n'a pas été développée pour lever un état de crise. Si c'est bien le cas, il s'agit là d'un élément important dans l'analyse des facteurs et mécanismes responsables de l'innovation en physique théorique.

En fait, il est particulièrement intéressant de voir jusqu'à quel point la relativité générale a pu se développer indépendamment de considérations dictées par la situation expérimentale, car Einstein a décrit à plusieurs reprises les relations qui existent, selon lui, entre physique théorique et faits expérimentaux⁵. La pensée pure, dit-il, ne

4. Thomas S. Kuhn, *op. cit.*

5. Voir, par exemple, «On the Method of Theoretical Physics», dans *Essays in Science*, New York, Philosophical Library, traduit de *Mein Weltbild*, Amsterdam, Querido Verlag, 1933. Voir aussi, «On the Generalized Theory of Gravitation», *Scientific American*, vol. 182, n° 4, 1950, pp. 13-17.

permet pas d'accéder à la connaissance du monde réel. Toute connaissance de la réalité part forcément de l'expérience et doit forcément y aboutir. Quel est le rôle de la raison dans tout cela? Elle doit déduire grâce à la logique les conclusions contenues implicitement dans les postulats de la théorie et voir à ce que ces conclusions soient bien conformes à la réalité sensible. Mais ces postulats et les concepts qui sont à la base de la théorie, d'où viennent-ils? Aucun raisonnement logique, dit Einstein, ne permet de les tirer de l'expérience sensible. Ils sont de caractère purement fictif. On a avantage à les prendre aussi près de la réalité physique que possible, comme le fit Newton en introduisant le concept de force; il est alors plus facile de vérifier expérimentalement si l'on fait fausse route ou non. Mais plus la structure logique des théories se simplifie, plus le nombre de concepts logiquement indépendants diminue et plus s'élargit le fossé qui les sépare du monde sensible. Si les axiomes de la physique théorique ne peuvent pas être déduits logiquement de l'expérience, s'ils ne sont que pure invention de l'esprit, peut-on espérer accéder à la vérité, peut-on espérer connaître l'Univers? Oui, dit Einstein, l'histoire de la science nous apprend que la nature est la réalisation des idées mathématiques les plus simples que l'on puisse concevoir. La simplicité d'une théorie, ses propriétés de symétrie, sa cohérence interne, voilà les principes qui guident Einstein dans l'élaboration de toutes ses théories.

Voyons maintenant comment ces principes l'amènèrent à créer la relativité générale. Quelle témérité que d'espérer pouvoir évoquer en quelques minutes l'histoire extrêmement complexe de cette théorie! Le défi est d'autant plus grand que ce colloque est interdisciplinaire et que plusieurs d'entre vous connaissent relativement peu, je suppose, l'histoire de la physique. Pour cette raison, évitant de sauter à pieds joints dans la relativité générale, j'évoquerai très brièvement, d'abord, les étapes qui conduisirent à cette théorie⁶. Du même coup j'épouserai l'une des préoccupations de ce colloque, qui est l'articulation des idées nouvelles aux idées anciennes.

Tout d'abord, une remarque triviale mais essentielle pour tout ce qui va suivre: tout mouvement est relatif, c'est-à-dire que tout mouvement est décrit par rapport à un système de référence que j'appellerai un repère et que vous pouvez imaginer comme un système d'axes orthogonaux servant à déterminer la position du mobile en fonction du temps. De toute évidence le mouvement observé dépend du repère par rapport auquel on le décrit. Si j'installe dans ma voiture un petit repère personnel et que je me mets en route, je suis au repos par rapport à lui, mais en mouvement par rapport à un autre repère fixé au sol.

6. Pour plus de détails, voir l'admirable biographie scientifique d'Einstein par A. Pais, *Subtle in the Lord*, Oxford University Press, 1982. On lira aussi avec intérêt la transcription de la conférence prononcée par Einstein à Kyoto en 1922, «How I Created the Theory of Relativity», dont la traduction fut publiée dans *Physics Today*, 1^{er} août 1982, pp. 45-47.

Maintenant, deux ou trois choses qu'il faut savoir au sujet de Newton. Il a développé deux théories qui nous intéressent : la mécanique classique, dont le fameux $F = ma$ de votre enfance permet de calculer le déplacement d'un corps sous l'action d'une force, et une théorie de la gravitation selon laquelle deux masses s'attirent avec une force proportionnelle au produit des masses et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare. À partir de cette force et de $F = ma$, Newton peut calculer les trajectoires des planètes autour du soleil. Il y a un aspect intrigant dans sa mécanique : les équations n'en sont valides que pour une classe de repères, les repères dits inertiels, dans lesquels un corps soumis à l'action d'aucune force garde une vitesse constante. Une question préoccupait beaucoup Newton : pourquoi certains repères sont-ils inertiels, alors que d'autres ne le sont pas? Pour répondre à cette question il postula l'existence d'un espace absolu. Vous pouvez imaginer cet espace comme une espèce de théâtre vide muni d'un repère dans lequel Dieu aurait planté l'Univers. Les repères inertiels sont ceux qui sont animés d'une vitesse constante par rapport à l'espace absolu. Ce sont des repères privilégiés, mais l'un d'entre eux est hyperprivilégié : c'est celui qui est au repos par rapport à l'espace absolu. Newton a longtemps essayé d'imaginer une expérience permettant d'identifier ce repère hyperprivilégié, mais sans succès. Pourrait-il au moins détecter un mouvement accéléré par rapport à l'espace absolu? Là, il crut avoir plus de succès. Si vous communiquez un mouvement de rotation à un seau d'eau sa surface s'incurve. Pourquoi? À cause de la force centrifuge. D'où vient cette force? Du fait, dit Newton, que votre eau a un mouvement accéléré par rapport à l'espace absolu.

L'espace absolu de Newton prend un nouveau visage au XIX^e siècle. Les progrès de l'optique amènent les physiciens à considérer la lumière comme un phénomène vibratoire. Mais il faut un sujet au verbe vibrer : ce sera l'éther, substance omniprésente dans l'Univers. Pourquoi l'espace absolu ne serait-il pas le repère par rapport auquel l'éther est au repos? La chasse à l'éther s'organise. Mais cette fois les progrès de la physique expérimentale permettent de monter une expérience d'optique, celle de Michelson-Morley, qui tranchera de façon indiscutable : l'éther n'existe pas, crise majeure.

C'est en réponse à cette crise qu'Einstein développe la première de ses deux théories de la relativité, la théorie restreinte. Il entérine définitivement l'espace absolu et postule que tous les repères inertiels sont absolument équivalents. Toutes les lois de la physique doivent prendre la même forme dans chacun d'entre eux. C'est une condition de symétrie qu'Einstein impose à toutes les lois de la physique. Les conséquences de la relativité restreinte, vous en avez tous entendu parler : elles comprennent, entre autres, la loi $E = mc^2$ et le caractère non absolu de la simultanéité de deux événements en deux points distincts de l'espace. Cette théorie révolutionnaire est très vite acceptée par la communauté scientifique.

En 1907, Einstein rédige un article de revue sur la relativité restreinte et rencontre un problème : la théorie newtonienne de la gravitation est incompatible avec la relativité restreinte. En effet, la force de Newton entre deux masses ne dépend que de la distance entre ces deux masses et non du temps. Si l'une des deux masses subit un déplacement, l'autre ressent instantanément une force différente. Il y a donc transfert d'information à une vitesse infinie, ce qui n'est pas conforme à la relativité restreinte, selon laquelle aucun signal ne peut se propager plus vite que la lumière. Einstein doit donc modifier la théorie de la gravitation de Newton. Il s'agit d'un problème de compatibilité entre deux théories. Il ne s'agit surtout pas d'une crise provoquée par un quelconque désaccord avec des observations expérimentales. La théorie gravitationnelle de Newton n'a connu que des succès, sauf pour un détail : l'axe de l'ellipse de la planète Mercure ne garde pas une orientation constante dans l'espace, mais tourne de 43 secondes d'arc par siècle. C'est ce qu'on appelle la précession du périhélie de Mercure. On avance diverses hypothèses pour expliquer ce désaccord, mais aucune ne fait l'unanimité. Personne pourtant ne met en doute la validité de la théorie de Newton. Même Thomas S. Kuhn reconnaît qu'il n'y avait aucun état de crise. En principe, Einstein aurait pu modifier la théorie de la gravitation dans le cadre de la relativité restreinte. Pourquoi ne l'a-t-il pas fait ? Parce qu'il est déjà mécontent de cette théorie. En effet, elle ne s'applique qu'à une classe privilégiée de repères, les repères inertiels, qui sont animés les uns par rapport aux autres de vitesses constantes. Elle ne s'applique pas aux repères non inertiels qui sont accélérés par rapport aux repères inertiels. Einstein ne peut supporter l'absence de symétrie entre ces deux classes de repères. Si la vitesse par rapport à l'espace absolu n'est pas observable, pourquoi l'accélération le serait-elle ? Ne serait-il pas plus simple, conceptuellement, de mettre tous les repères sur un pied d'égalité et de postuler que toutes les lois de la physique gardent la même forme dans tous les référentiels ? Comment y parvenir ?

Le premier déclic, la première illumination d'Einstein survint un jour alors qu'il était assis dans son bureau de l'Office des Brevets à Berne.

Tout à coup, écrira-t-il plus tard, il me vint l'idée la plus heureuse de ma vie. Le champ gravitationnel n'a qu'une existence relative... Pour un observateur qui tombe en chute libre, il n'y a pas de champ gravitationnel, au moins dans son voisinage immédiat⁷.

En effet, si vous êtes dans un ascenseur en chute libre, vous ne sentez plus votre poids et vous ne pouvez pas laisser tomber d'objets sur le plancher : ils sont en chute libre eux aussi. Pourquoi ? Parce que tous les objets, comme on le sait depuis Galilée, tombent avec la même accélération dans un champ gravitationnel. Il s'agit là du seul fait expé-

7. Manuscrit de la Pierpont Morgan Library, cité par Pais, p. 178.

rimental, à ma connaissance, qu'ait utilisé Einstein dans l'élaboration de sa relativité générale. Un fait connu depuis quelques siècles! Pourquoi cette idée fut-elle si importante? Parce qu'elle permit à Einstein de jeter un pont entre les concepts de référentiel accéléré et de force gravitationnelle. C'est à partir de là qu'il imagina la possibilité de formuler une théorie de la gravitation en même temps qu'une généralisation de la théorie de la relativité aux repères non inertiels.

Puisque nous sommes ici pour discuter de l'invention intellectuelle, arrêtons-nous quelques instants à cette première illumination d'Einstein. Notons au passage qu'elle illustre bien l'idée chère à Koestler du rapprochement de deux zones différentes de sens. Notons également que si Koestler nous donne ainsi une description plus fine du déclic créateur, il n'explique strictement en rien le mécanisme responsable de ce déclic.

Einstein fut-il le seul physicien à établir ce rapprochement? On ne peut évidemment pas répondre à cette question avec certitude, mais ce n'est pas du tout impossible. Il n'était pas le seul physicien à tenter de réconcilier gravitation et relativité restreinte, mais il fut sûrement le seul à vouloir généraliser la relativité aux systèmes non inertiels par suite d'un parti pris de symétrie et de simplicité conceptuelle.

Si le déclic de 1907 le mit sur la voie de la relativité générale, il n'achèvera cette théorie qu'en 1915. Même s'il laissa ce problème de côté pendant trois ans et demi, il lui fallut cinq ans de travail exténuant pour atteindre son but. En 1912, il eut un autre coup d'intuition: il se rendit compte de la nécessité d'utiliser une géométrie non euclidienne dans les repères non inertiels. Quoiqu'il ait présenté cette intuition comme subite, des études récentes suggèrent qu'elle fut préparée par ses études sur les repères tournants. Einstein connaissait très peu les géométries euclidiennes. Avec l'aide de son ami le mathématicien Marcel Grossmann, il fit l'apprentissage des techniques mathématiques qui lui sont nécessaires. Ils commettent ensemble un certain nombre d'erreurs. Pourtant, le 18 novembre 1915, Einstein annonce à l'Académie prussienne des sciences qu'il peut expliquer, grâce à sa théorie, la précession du périhélie de Mercure. Une semaine plus tard, il communique à la même académie la forme définitive des équations de la relativité générale. C'est de loin le système théorique le plus complexe qui soit sorti du cerveau humain jusqu'alors. Conceptuellement, c'est une révolution complète. En présence de matière, l'espace-temps acquiert une courbure et n'obéit plus à une géométrie pseudo-euclidienne. La force de Newton est complètement éliminée. Les trajectoires des particules sont données par les géodésiques de l'espace-temps courbe. Mais ce qui nous semble aujourd'hui le plus important de tout, peut-être, c'est le fait que la relativité générale ouvre la porte à une interprétation géométrique des phénomènes gravitationnels.

Pour des champs faibles, la nouvelle théorie donnait des résultats assez peu différents de ceux de la théorie de Newton. Einstein proposa néanmoins deux tests permettant de la mettre à l'épreuve: la déflexion

des rayons lumineux au voisinage du soleil et le décalage vers le rouge des photons nous venant du soleil. Sa théorie passa les deux examens avec succès. Malgré cela, elle connut jusqu'au début des années soixante un destin assez curieux. Tout le monde en reconnaissait la très grande beauté. Landau et Lifshitz, dans leur célèbre manuel, disent qu'elle est vraisemblablement «la plus belle des théories physiques existantes⁸». Mais presque personne n'avait l'impression qu'elle faisait vraiment partie de la physique. Presque aucune université américaine, par exemple, n'enseignait la relativité générale avant 1965. Pourquoi? Pour deux raisons surtout. Au tout début, on ne savait que faire de cette théorie: on ne connaissait pas de systèmes physiques auxquels l'appliquer. Cet état de choses devait changer, au cours des années soixante, quand les progrès de l'astronomie et de l'astrophysique révélèrent des situations où intervient un champ gravitationnel très intense et où, par conséquent, les théories d'Einstein et de Newton prédisent des résultats très différents. La deuxième raison pour laquelle on s'est peu intéressé à la relativité générale pendant plus de quarante ans tient à sa nouveauté même: les concepts qu'elle met en jeu ne sont familiers à presque personne et elle utilise un langage mathématique, la géométrie différentielle, que peu de physiciens maîtrisent. Avant de faire l'effort d'apprendre ce langage, ils veulent être assurés de la rentabilité de leur investissement! Les progrès de l'astrophysique leur donneront des raisons de le faire, mais une autre motivation plus puissante peut-être s'imposera.

Einstein, comme vous le savez, passa les dernières années de sa vie à essayer de développer une théorie unifiée des champs. Pour des raisons intéressantes, que je n'ai pas le temps d'exposer, ce fut un échec complet. Or, il se trouve que le programme d'unification des forces a connu depuis une vingtaine d'années des succès étonnants grâce aux théories dites de jauge. Je ne vous expliquerai pas ce que sont les théories de jauge, mais qu'il me suffise de vous dire qu'elles se prêtent toutes, comme par hasard, à une interprétation géométrique, à l'instar de la relativité générale. Nous assistons depuis une dizaine d'années à une entreprise de géométrisation massive de la théorie des particules. Poussé par son obsession de la symétrie, Einstein a géométrisé la gravitation. Aurait-il pu deviner qu'il ouvrait de la sorte une voie qui permettrait peut-être un jour de réaliser son vieux rêve d'une théorie unifiée des champs⁹?

Voilà une bien longue histoire et je ne suis pas du tout certain de l'avoir racontée assez clairement.

Quelles leçons s'en dégagent? La première est une constatation probablement assez peu étonnante: même chez un théoricien aussi

8. L. D. Landau et E. M. Lifshitz, *Cours de physique théorique II. Théorie des champs*, Moscou, Éditions Mir, 1970.

9. C. N. Yang «Einstein's Impact on Theoretical Physics», *Physics Today*, juin 1980, pp. 42-49.

transcendant qu'Einstein, les moments d'illumination à la Poincaré peuvent ne représenter qu'une petite fraction de la démarche conduisant à une nouvelle théorie. La deuxième a une portée plus intéressante : on peut avoir une révolution d'importance majeure en physique théorique sans que celle-ci soit la solution d'une crise déclenchée par une découverte expérimentale. L'absence de crise pourra même masquer momentanément la pertinence de cette révolution et il faudra parfois attendre assez longtemps avant de voir s'établir une juste perspective. Cette situation pourrait bien se reproduire...