

# L'intuition dans la recherche scientifique

## Intuition in Scientific Research

Traduction d'un article original de **Gérald HOLTON**,  
Mallinckrodt Research Professor of Physics and Research,  
Professor of History of Science, Department of Physics,  
Harvard University, Cambridge

### I

Chercheurs et éducateurs scientifiques ont tendance à honorer les vertus des méthodes ayant subi l'épreuve du temps pour les progrès de la science : habileté expérimentale, virtuosité mathématique, planification rationnelle, hypothèses prudentes, induction et déduction rigoureuses, scepticisme quant aux résultats avant réexamen et, enfin, plaidoyer éloquent pour les résultats finaux de quelqu'un.

Tout cela est essentiel. Il y a pourtant un autre ingrédient, un talent additionnel qui, en fait, a été tout à fait important pour certaines des plus grandes percées historiques, mais sur lequel règne généralement un silence embarrassé dans les publications de recherche, et dans la formation de la nouvelle récolte de scientifiques. Pour décrire ce talent, Hans Christian Oersted employa une heureuse formule : « accord anticipateur avec la nature » ; Arthur Schopenhauer y reconnaissait la marque du génie ; Einstein parlait de « Fingerspitzengefühl », de sensation au bout d'un doigt ; et les étudiants et collaborateurs d'Enrico Fermi louaient en privé ce talent comme sa « formidable intuition ».

En vérité, cet élément qui, dans la présentation habituelle, n'est pas mentionné dans notre boîte à outils, bien qu'il soit familier aux historiens des sciences, c'est l'intuition innée de certains scientifiques dont la réponse pourrait prendre la tournure suivante : comment, en premier lieu, planifier le projet de recherche, quel bond imaginatif tenter au tout début de la recherche.

Ma présentation examinera quelques exemples de ce talent spécial, principalement à partir des travaux et des écrits de savants qui y excellèrent, parmi lesquels Henri Poincaré, Albert Einstein, Werner Heisenberg et Enrico Fermi – tout en mentionnant certains problèmes persistants qui méritent d'être discutés, par exemple les théories concernant les sources de l'intuition. Dans la section finale, nous aurons à aborder la transformation de l'idée classique et de l'usage de l'intuition que la mécanique quantique a imposée en physique.

### II

Pour débiter, avouons qu'il y a un paradoxe embarrassant. La science est assurément une des entreprises intellectuelles les plus couronnées de succès. Pourtant, il n'y a pas d'accord quant au secret de sa méthode. Il serait sûrement utile de partager un tel savoir avec d'autres activités, peut-être de moindre réussite, telles que la politique et plus encore la sociologie ; ce fut l'espoir de John Stuart Mill, dans son « Système de Logique », et de bien d'autres jusqu'à maintenant. Mais, alors que durant leurs premières années d'apprentissage, les scientifiques arrivent

à attraper de leurs instructeurs les trucs du métier et même l'important « penchant » pour un type de recherche, (- ainsi que l'exprime le physicien I.I. Rabi : « Il connaît déjà les paroles, il a encore à apprendre la mélodie » -) il n'y en a guère qui apprennent explicitement, par quelque cours ou entraînement, une « méthodologie », une démarche progressive à propos de « comment faire de la recherche ». En effet, il se pourrait bien que l'apprentissage le plus explicite qu'ils reçoivent les conduise à écarter de leurs publications toute présentation des processus de pensée qui les menèrent à leurs résultats et, au lieu de cela, selon le conseil de Louis Pasteur, à « les faire apparaître comme inévitables ». Bien sûr, des philosophes, de Francis Bacon à nos jours, ont écrit avec éloquence sur la méthode scientifique ainsi qu'ils la perçoivent ; mais il n'y a guère de scientifiques pour les lire. Pour la plupart des savants, leur « méthode » peut-être résumée par un passage bien connu du livre « Reflections of a physicist » (1955) de P.W. Bridgman (un des derniers physiciens-philosophes, qui reçut en 1946 le Prix Nobel pour avoir, pratiquement à lui seul, créé la physique expérimentale des hautes pressions). J'ai la chance d'avoir appris mon métier de physicien en étant son étudiant et j'ai connu, de première main, son vif intérêt pour la philosophie de la science. Mais à la fin, il écrivit : « la méthode scientifique, pour autant qu'il s'agisse d'une méthode, n'est rien de plus que : faire tout son possible avec son intellect, tous les coups sont permis ».

On peut en apprendre un peu plus en observant les savants au travail et en lisant leurs textes destinés à un public plus large, ou d'un caractère plus général. Ce qui ressort d'un tel examen est que, selon la plupart des auteurs, pour être aussi sûr que possible, le raisonnement scientifique doit en premier lieu être *inductif* ; ce qui signifie simplement, dans sa forme la plus primitive : être fondé sur l'expérience et la mise à l'épreuve, couche par couche, et pas à pas, d'hypothèses logiquement reliées, testables, jusqu'à ce qu'on atteigne le domaine d'une théorie – ou d'une loi – souveraine.

On peut l'admettre, dans ce procès supposé qui part des données sensorielles pour aboutir aux vastes généralisations, s'introduisent souvent des erreurs humaines ; ce procès n'est pas aussi faillible qu'on a l'habitude de le penser. Mais une raison pour la large, quoique tacite, acceptation de l'induction fut héritée du positivisme ou de l'empirisme logique qui régnaient, par exemple, en physique sous l'influence d'Ernst Mach qui, dénonçant les traces métaphysiques dans nos concepts et processus de pensée, prônait, comme fondation alternative d'une bonne science, des descriptions basées sur les sensations.

L'un des admirateurs de Ernst Mach fut, dans ses tout premiers et magnifiques travaux, Albert Einstein. (À la fin d'une de ses lettres à Mach, du 17 août 1909, il écrivit : « je reste Votre

admiratif disciple »). Et, en effet, quand on lit les premiers articles d'Einstein, on peut détecter, par exemple, la base empiriste dans le fait que, dans son texte fondateur de 1905 sur la relativité spéciale, il traite les notions d'espace et de temps de façon opérationnelle/instrumentale, c'est-à-dire en termes de perceptions sensorielles au cours des mesures.

Parmi les nombreux jeunes physiciens qui furent influencés par l'implicite méthode empiriste d'Einstein, il y eut Werner Heisenberg. Son autobiographie nous apprend qu'Heisenberg avait, très tôt, été captivé par l'œuvre d'Einstein. Alors qu'il était encore lycéen, il lut et aima le livre populaire qu'Einstein venait, en 1917, de publier, puis il continua ensuite à étudier de près ses travaux ultérieurs. En 1925, Heisenberg publia son brillant article-brèche intitulé : « Sur la réinterprétation quantique des relations cinématiques et mécaniques ». Dans le résumé du papier, Heisenberg faisait déjà part du principe fondamental qui le guidait : « Ce travail est une tentative pour trouver des fondements pour une mécanique quantique qui se base uniquement sur des relations entre des quantités qui sont en principe mesurables ». Plus tard, il reconnut que cet aperçu crucial était un écho des jours où, étudiant à l'université, il se démenait avec la relativité. Son papier était le résultat d'une démarche de pensée de bout en bout rationaliste, sans indication de spéculations non opérationnelles. Mais une énorme surprise attendait Heisenberg. Escomptant l'approbation de ses travaux par Einstein, il sollicita de sa part une discussion (qu'il relata sous forme imprimée en 1969<sup>1</sup> mais qu'il m'avait auparavant décrite dans une lettre qu'il m'adressa en janvier 1966, à la suite de nos rencontres). Dans sa discussion avec Einstein, Heisenberg tenta d'attirer l'attention sur le fait qu'il ne s'occupait pas des inobservables orbites des électrons au sein des atomes, mais plutôt de la radiation observable. Il déclara à Einstein : « Puisqu'il est raisonnable de n'inclure dans une théorie que les grandeurs qui peuvent être observées, il m'a semblé naturel de n'introduire que celles-là (fréquences et amplitudes), pour ainsi dire en tant que représentantes des orbites électroniques ». Einstein répondit : « Mais vous ne croyez tout de même pas sérieusement que l'on ne peut inclure dans une théorie physique que des grandeurs observables ? ». Heisenberg poursuivit son récit : « Fort surpris, je lui dis : ' Mais je pensais que c'est précisément ce que vous aviez fait pour fonder votre théorie de la relativité ! '. Einstein répliqua : ' J'ai peut-être utilisé cette sorte de philosophie, mais il n'en reste pas moins qu'elle est absurde. ' Puis vint sa célèbre formule : ' C'est seulement la théorie qui décide de ce qui peut être observé ' ».

Tout cela dut apparaître à Heisenberg comme une attaque cinglante contre ce qu'il considérait comme son orientation fondamentale, qui découlait de sa lecture des premiers

travaux d'Einstein. C'est ce qui l'avait guidé depuis le début jusqu'à son plus récent triomphe. Einstein, dont Heisenberg n'avait pas remarqué l'évolution intellectuelle qui l'avait éloigné de l'instrumentalisme positiviste, se mit à lui expliquer de long en large à quel point toute observation est en général complexe, comment elle met en jeu des hypothèses sur les phénomènes, hypothèses basées à leur tour sur des théories. Par exemple, c'est presque inconsciemment qu'on utilise la théorie de Maxwell pour interpréter les comptes rendus d'expériences concernant les rayons lumineux.

Dans la lettre mentionnée plus haut qu'il m'adressa, Heisenberg ajouta une conclusion plutôt frappante : alors qu'une théorie détermine ce qui peut-être observé, le principe d'incertitude lui montre qu'une théorie détermine aussi ce qui ne peut pas être observé. Ironiquement, par cette conversation de 1926, Einstein procura à Heisenberg du « matériel génétique » pour créer, dans l'article de 1927, le principe d'incertitude. (Nous reviendrons ultérieurement sur le rôle d'Heisenberg).

### III

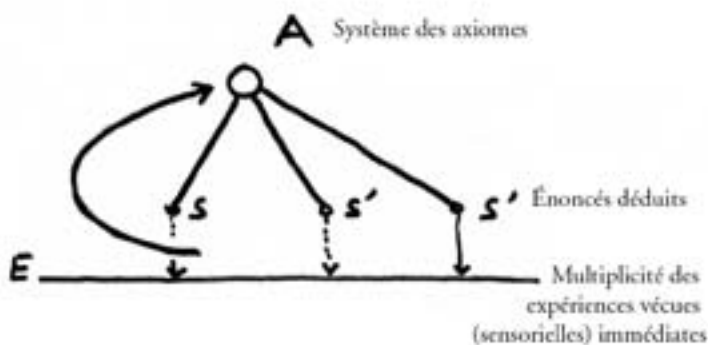
Qu'est-ce qui avait modifié l'esprit d'Einstein, rendant « absurde » sa façon initiale de penser à propos de la physique ? Parmi ses nombreux écrits à ce sujet, j'en sélectionne deux. Dans ses *Notes Autobiographiques*, publiées en 1949, il remarqua que, bien que le livre de Ernst Mach sur l'Histoire de la Mécanique ait « exercé sur moi une profonde influence alors que j'étais étudiant » la position épistémologique de Mach « m'apparaît maintenant comme intenable, car il ne place pas sous l'éclairage correct la nature essentiellement constructive et spéculative de la pensée, et plus spécialement de la pensée scientifique ». L'état de la physique peu après 1900 lui montre que ni la mécanique, ni la thermodynamique ne pouvaient « prétendre à l'exactitude ». En conséquence, il en arriva à une décision fondamentale qui guida de plus en plus son travail : « Je me mis bientôt à désespérer de la possibilité de trouver de vraies lois par des efforts constructifs à partir de faits connus (c'est-à-dire : par induction). Et plus j'essayais désespérément, plus j'en arrivais à la conviction que seule la découverte d'un principe formel universel pouvait nous conduire à des résultats assurés. L'exemple que je voyais devant moi était la thermodynamique ». Cela le conduisit à la découverte du principe de relativité que, rétrospectivement, il considérait maintenant avoir été « dès le tout début... intuitivement clair ».

Ce thème est répété ailleurs dans les *Notes Autobiographiques* ; par exemple : « Concepts et propositions n'acquiescent

de « sens » ou de « contenu » que grâce aux rapports qu'ils entretiennent avec les expériences sensibles. La relation à ces dernières n'est pas elle-même de nature logique, mais de nature purement intuitive. C'est le degré de certitude avec lequel cette relation peut-être établie, et rien d'autre, qui différencie les vaines élucubrations de la « vérité » scientifique... Bien que les systèmes conceptuels soient, d'un point de vue logique, totalement arbitraires, ils n'en sont pas moins soumis à un objectif : permettre d'établir une coordination aussi (intuitivement) certaine et complète que possible avec la totalité des expériences sensibles ».

#### IV

Dans l'une de ses lettres les plus intéressantes, Einstein expliqua clairement sa découverte du rôle de l'intuition dans la pensée scientifique. Il répondait à une réclamation d'un de ses plus vieux amis, Maurice Solovine, qui [ ayant trouvé peu clair un passage de « *Out of My later Years* » ] lui demandait en substance : ' Dites-moi une fois de plus, comment vous pensez en science ? ' La réponse d'Einstein (lettre du 7 mai 1952) contient une explication digne d'être retenue des rôles respectifs de l'expérience sensible, de l'intuition et de la logique dans le fonctionnement de l'imagination. Il sera facile de comprendre pourquoi je suis souvent revenu à ce passage de la lettre d'Einstein. Il commence son explication à Solovine par la phrase : « Schématiquement, je vois le problème de cette façon ». Suit alors un diagramme, ce qui n'est pas surprenant quant on sait la préférence d'Einstein pour la pensée visuelle. Dans une esquisse à la fois puissante et simple, Einstein concentre en quelques lignes une grande richesse d'information. Le diagramme décrit un processus essentiellement cyclique, commençant là où il devrait finir :



« 1. Les E (expériences vécues) nous sont données »

Cela se réfère à la ligne horizontale en bas de la figure, marquée E et étiquetée : « Multiplicité des expériences vécues (sensorielles) immédiates ».

Cette ligne E est plutôt décevante. Elle représente en fait un plan dans lequel les divers points, pris ensemble, sont là pour la « totalité du fait empirique ». Il s'agit là d'un véritable labyrinthe d'impressions sensorielles, une diversité chaotique qui, d'une certaine manière, peut-être maîtrisée en y édifiant une structure de pensée qui apporte relation et ordre.

Ensuite, ainsi que le montre le diagramme, s'élevant depuis une zone située juste au dessus de la portion du chaos des observables sur E, se trouve un arc-flèche qui atteint le sommet du schéma. Cela symbolise ce qu'on peut nommer un bond platonicien hardi, une tentative « largement spéculative », un « tâtonnement constructif » ou un saut désespéré de l'imagination quand il semble ne pas exister d'autres voies. La pointe de la flèche atteint une entité bien marquée étiquetée « A, système des axiomes ».

Pour donner une explication, Einstein écrit : « 2. A sont les axiomes d'où nous tirons des conséquences. Psychologiquement, les A reposent sur les E. Il n'y a cependant pas de voie logique des E jusqu'aux A, mais seulement une connexion intuitive (psychologique), toujours ' sujette à révocation ' ».

Quelle courageuse (et dangereuse) conception ! L'échelle de J.S. Mill, au moyen de laquelle la généralisation découlait par induction d'un ensemble d'observations, est retirée. Einstein dit ailleurs (dans son livre *Ideas and Opinions*) que cela ne convient qu'à « la jeunesse de la science ».

Le reste va de soi : à partir du système axiomatique de principes fondamentaux, postulés sur base de conjecture, supposition, « inspiration », « pari » ou « pressentiment », suivant les trois lignes descendantes, les déductions (vers les énoncés déduits S, S', S') dont Einstein suggère qu'elles peuvent être obtenues à partir du système des axiomes au moyen des procédés logiques appris à l'école. Et depuis ces énoncés déduits, en boucle, on peut alors regarder vers le bas la totalité des expériences afin de voir s'ils sont en cohérence avec ce qui peut être observé. (Cela ne marche pas nécessairement du premier coup, au premier tour – le diagramme est une sorte de sténographie pour une série cybernétique, autocorrectrice, de tentatives visant la découverte finale des bons axiomes, lois, principes). [Cette interprétation permet de ne pas considérer la répétition de l'énoncé S' comme une bévue, un lapsus calami : cet énoncé est obtenu au terme de deux déductions successives, la seconde profite des retours du premier examen de cohérence avec les

observables ; apparemment le second examen de cohérence renforce l'adéquation de  $S'$  : la flèche descendant vers  $E$  est en trait plein, ce qui n'était pas le cas la première fois...].

C'est bien sûr cet arc, ce bond (que l'on pourrait étiqueter  $J$ ) qui, au cours du processus « privé » de construction théorique, symbolise le précieux moment de plus grande énergie et de plus grande pénétration. Il y a en effet un parallèle étrange entre le processus décrit dans la figure et le modèle qu'Einstein proposa pour expliquer la motivation de la recherche en tant que telle. Ainsi qu'Einstein l'exprime (dans *Ideas and Opinions*), pour échapper au chaos dans le monde de l'expérience, le scientifique, le savant ou l'artiste bâtit une « image simplifiée et claire du monde » en y déplaçant le « centre de gravité de sa vie émotionnelle ».

## V

Henri Poincaré, magnifique mathématicien-physicien, n'aurait pas non plus, lui qui était d'un naturel conservateur, mentionné le mot « intuition » dans les écrits scientifiques qu'il publiait. Mais, tout comme dans le cas d'Einstein, ce terme apparaît dans les articles et livres qu'il destinait au grand public. C'est là qu'il nous permet de voir les idées saisissantes qu'il avait sur la psychologie de l'invention et de la découverte. Aussi familières que certaines puissent être, elles n'en méritent pas moins d'être mentionnées ici, tant elles sont captivantes.

Je me réfère, avant tout, à la conférence qu'Henri Poincaré tint à Paris, en 1908, devant la Société de Psychologie. (Cette conférence sur « L'invention Mathématique » constitue le troisième chapitre de « *Science et Méthode* », récemment réédité par les soins des Archives Henri Poincaré aux éditions KIME<sup>2</sup>). Le subtil mathématicien que fut Jacques Hadamard estimait que cette conférence « avait jeté une lumière éblouissante sur les rapports entre le conscient et l'inconscient, entre le logique et le fortuit, rapports qui sont à la base du problème (de l'invention dans le domaine mathématique) ». En fait, Poincaré conta l'histoire de sa première grande découverte, la théorie des fonctions fuchsienues et des groupes fuchsienus. Il avait attaqué le sujet, deux semaines avant cette découverte, avec une stratégie – typique en mathématiques – : tenter de démontrer que de telles fonctions *ne pouvaient pas* exister. Dans sa conférence, Poincaré raconte : « Un soir, je pris du café noir, contrairement à mon habitude, je ne pus m'endormir : les idées surgissaient en foule ; je les sentais comme se heurter, jusqu'à ce que deux d'entre elles s'accrochassent, pour ainsi dire, pour former une combinaison stable ». Au cours de cette nuit d'insomnie, il trouva qu'il pouvait en fait bâtir une classe de telles

fonctions, sans toutefois savoir encore comment les exprimer sous une forme mathématique adéquate.

Poincaré donne plus de détails : « A ce moment, je quittai Caen, où j'habitais alors, pour prendre part à une course géologique... Les péripéties du voyage me firent oublier mes travaux mathématiques ; arrivés à Coutances, nous montâmes dans un omnibus pour je ne sais quelle promenade ; au moment où je mettais le pied sur le marche-pied, l'idée me vint, sans que rien de mes pensées antérieures parût m'y avoir préparé, que les transformations dont j'avais fait usage pour définir les fonctions fuchsienues étaient identiques à celles de la géométrie non-euclidienne. Je ne fis pas la vérification ; je n'en aurais pas eu le temps, puisque, à peine assis dans l'omnibus, je repris la conversation commencée, mais j'eus tout de suite une entière certitude. De retour à Caen, je vérifiai le résultat à tête reposée pour l'acquies de ma conscience ».

Poincaré analyse de telles intuitions dans ces termes : « Ce qui frappera d'abord, ce sont les apparences d'illuminations subites, signes manifestes d'un long travail inconscient antérieur ; le rôle de ce travail inconscient... Il semble que, dans ces cas, on assiste soi-même à son propre travail inconscient, qui est devenu partiellement perceptible à la conscience surexcitée... ».

Hadamard a rassemblé un certain nombre de témoignages similaires selon lesquels, à partir d'une incubation continue, souterraine au niveau subconscient, apparaît, d'une façon discontinue, dans une rupture d'une stupéfiante intensité, la solution consciente. Il mentionne Carl Friedrich Gauss, qui parle d'une telle rupture comme « éclat soudain d'un éclair » et des observations semblables par Hermann Helmholtz, Wilhelm Ostwald et Paul Langevin..., sans oublier Mozart qui, dit-on, parla un jour ainsi de la source de ses pensées musicales : « D'où viennent-elles et comment ? Je n'en sais fichtre rien – et je n'en ai rien à tirer ! » [Sacré Mozart, va !].

Poincaré lui-même exprime ainsi sa perplexité quant à la source de ses idées. Il confesse, toujours dans sa conférence de 1908 : « Je suis absolument incapable de faire une addition sans faute. Je serais également un fort mauvais joueur d'échecs ». Mais il déclare aussi : « [Si] j'ai le sentiment, l'intuition pour ainsi dire de cet ordre, de façon à apercevoir d'un coup d'œil l'ensemble du raisonnement, [je ne dois plus craindre d'oublier l'un des éléments...] ». Il célèbre « cette intuition de l'ordre mathématique, qui nous fait deviner des harmonies et des relations cachées ». Certainement, après l'intuition vient le labeur : « Inventer, c'est discerner, c'est choisir ». Mais, pour cela, il faut accorder une priorité à « notre sensibilité émotionnelle » en privilégiant « phénomènes inconscients », « beauté », « harmo-

nie » et « élégance ». A la fin, Poincaré revient, dans cet exposé populaire de sa théorie de la découverte et de l'innovation à leur source principale, qu'il appelle « sensibilité esthétique ». Les artistes qui l'ont lu ont dû se sentir en forte résonance sympathique avec cette présentation.

Poincaré avait déjà discuté antérieurement la nature de la découverte, particulièrement dans son recueil de 1902 « *La Science et l'Hypothèse* ». Il fit une remarque qui, à l'époque, secoua le milieu : il notait que les concepts et les hypothèses ne nous étaient pas donnés uniquement par la nature elle-même, mais que, dans une large mesure, il s'agissait de conventions choisies par un chercheur particulier selon des raisons de commodité, et orientées par des « prédilections » personnelles. Il poursuivit : « Nous concluons donc que les principes de la géométrie ne sont que des conventions ; mais ces conventions ne sont pas arbitraires ». Et, dans le cas particulier de la physique, toute présupposition commode aurait encore, le cas échéant, à passer ce test : servir à expliquer des phénomènes observables.

Une part significative de « *La Science et l'Hypothèse* » était la seconde partie, constituée de trois chapitres consacrés aux géométries non-euclidiennes et à celles de dimensions supérieures. Dans ces pages, on ne trouve ni équations, ni figures, mais des prouesses d'analogie pour tenter d'expliquer les choses. Un seul exemple, célèbre : pour parvenir à rendre plausible l'espace d'une géométrie à plus de trois dimensions, Poincaré introduisit une distinction entre l'espace géométrique et l'espace conceptuel ou « représentatif ». Ce dernier a trois manifestations : l'espace visuel, l'espace tactile et l'espace moteur. Cet espace moteur est celui dans lequel nous effectuons nos mouvements, ce qui le conduisit à écrire, en italiques : « *L'espace moteur aurait autant de dimensions que nous avons de muscles* ». Et cela nous remet ceci en mémoire : Nos muscles, notre corps tout entier, abritent à foison des intuitions non-rationnelles – qui vont de la manière d'enfiler un imperméable jusqu'aux exploits quasi-surhumains des athlètes, des musiciens et des danseurs de ballet.

## VI

Je vais maintenant me tourner vers un grand physicien qui, tous ceux qui l'ont connu en conviendraient, était tout ce qu'il y a de plus rationnel et de moins intéressé par les problèmes philosophiques : Enrico Fermi. Il fit, au début de l'année 1934, sa sensationnelle découverte scientifique lorsqu'il décida que lui et son équipe de recherche à Rome devraient employer des faisceaux de neutrons afin d'induire de la radioactivité dans les

éléments de la table périodique. A ce groupe romain est dû un travail vraiment excellent, publié en un grand nombre d'articles dans un journal italien, si bien que le physicien I. I. Rabi aurait, dit-on, donné ce conseil : « Bon ! Eh bien, maintenant, il faut nous mettre tous à apprendre l'Italien ».

Mais, vers la mi-octobre 1934, la situation dans leur laboratoire commença à se détériorer. Une étrange inconsistance surgit dans les résultats de l'irradiation des cibles avec les faisceaux neutroniques. Les relevés instrumentaux qu'ils obtenaient se trouvaient dépendre des tables sur lesquelles les équipements étaient placés – une table était en bois, l'autre, pas très éloignée, était une plaque de pierre. Quand l'expérience de radioactivation d'une cible d'argent était effectuée sur la première table, on obtenait une radioactivité notablement plus élevée que lorsque la même expérience avait lieu sur l'autre table, le support de marbre. Pour baptiser cela, le groupe trouva une expression fameuse : « le miracle des deux tables ».

Afin de découvrir le fin fond de l'histoire, Fermi entreprit, à partir du 18 octobre 1934, un ensemble systématique d'observations et le journal de bord du laboratoire a été conservé. Le groupe raisonna : peut-être le boîtier de plomb affectait-il les neutrons qui atteignaient la cible dans ces deux cas, et il observa que l'interposition d'un bloc de plomb modifiait quelque peu l'activation. Fermi décida alors d'insérer dans le faisceau de neutrons un filtre de plomb, un coin d'épaisseur variable. L'étonnant compte rendu des événements de la matinée de ce jour crucial (22 octobre 1934) que fit plus tard Fermi à son collègue S. Chandrasekhar fut publié par les soins de ce dernier, et, ce qui figure dans le dernier paragraphe de cette publication, essentiel, fut répété mot à mot par d'autres proches de Fermi, tels que Edoardo Amaldi et Emilio Segré, dans leurs écrits historiques. Qu'il me soit permis de citer ce paragraphe parce que nous aurons à en faire une analyse.

« Je vais [dit Fermi] vous conter comment j'en vins à faire la découverte que je suppose être la plus importante que j'aie faite. Nous travaillions très dur sur la radioactivité induite par les neutrons et les résultats que nous obtenions n'avaient pas de sens. Un jour, alors que j'allais au laboratoire, l'idée me vint que je devrais examiner l'effet du placement d'un morceau de plomb devant les neutrons incidents. Et, contrairement à mon habitude, je me donnai du mal pour que la pièce de plomb soit usinée avec précision. J'étais manifestement insatisfait de quelque chose : j'essayai toute « bonne excuse » pour remettre à plus tard la mise en place du morceau de plomb. Quand finalement, à contrecœur, j'allai la placer, je me dis : Non ! Ce

n'est pas du plomb que je veux, c'est de la paraffine. C'était comme cela : sans avertissement, sans raisonnement conscient, préalable. Je pris immédiatement le premier morceau de paraffine que je pus saisir et l'installai là où aurait été le morceau de plomb ».

Le résultat fut aussitôt évident : une forte augmentation de la radioactivité induite sur la cible, et cela même si l'expérience avait lieu sur la plaque de marbre. Comme le rappelle Segré dans son autobiographie, ce jour-là vers midi « tout le monde fut convoqué pour observer l'effet miraculeux du filtrage par la paraffine. Et c'est dans une extrême perplexité que nous rentrâmes chez nous pour le déjeuner et notre sieste habituelle... Quand nous revînmes vers trois heures de l'après-midi, Fermi avait trouvé une explication à l'étrange comportement des neutrons filtrés. Il fit l'hypothèse que les neutrons pouvaient être ralentis par des collisions élastiques [avec les noyaux d'hydrogène dans la paraffine], et devenir ainsi plus efficaces – une idée contraire à notre attente ». C'était, en effet, une rupture avec l'histoire précédente dans ce domaine.

Comme Edoardo Amaldi le nota, ce fut seulement plus tard que fut établie la loi «  $1/v$  », c'est-à-dire la loi selon laquelle la section efficace de capture des neutrons est inversement proportionnelle à leur vitesse (si elle est faible). Mais, désormais le miracle des deux tables était démasqué. Car Fermi réalisait maintenant que, lors des premières et troublantes expériences d'irradiation d'un échantillon d'argent, une partie du faisceau neutronique était d'abord passé dans la table de bois, où les noyaux d'hydrogène avaient fortement ralenti les neutrons (qui sont presque de la même masse), puis que certains de ces neutrons lents avaient été dispersés sur la cible d'argent en y produisant l'effet inattendu. Par contre, les noyaux lourds dans le marbre de l'autre table ne pouvaient guère produire un tel effet. On répéta rapidement l'expérience en utilisant de l'eau au lieu de la paraffine, et l'hypothèse initiale de Fermi fut ainsi confirmée.

Immédiatement, toute la profession sut que le groupe romain avait franchi une nouvelle frontière. Ce fut un moment culminant pour l'équipe de Fermi et il s'avéra que c'en était un aussi pour le monde sur son chemin vers un futur incertain (car la découverte de Fermi fut, plus tard, essentielle pour la construction des réacteurs nucléaires – déclenchant en effet ainsi l'âge nucléaire).

Pour ce qui est de Fermi, la préparation et l'usage des neutrons lents, entre autres pour la fabrication de nouveaux éléments radioactifs, fut reconnue dans la formulation de la citation de son Prix Nobel : « pour sa révélation de nouveaux élé-

ments radioactifs produits par irradiation neutronique et pour la découverte reliée de réactions nucléaires provoquées par les neutrons lents ».

Mais, dans cette histoire, il y a une énigme lancinante. Fermi avait, comme je l'ai dit, la réputation d'être le plus rationnel des savants ; pourtant ce n'est ni par accident, ni par hasard, mais bien par un acte de détermination soudaine, qu'il place cette pièce cruciale de paraffine devant la source de neutrons, « sans crier gare, sans raisonnement conscient préalable ». Pourquoi fit-il cela, lui, le moins impulsif des physiciens ? Une partie de la réponse est de nouveau, à mon avis, qu'il existe chez certains esprits brillants une sorte d'intelligence intuitive qui peut les guider secrètement, pour le meilleur et pour le pire, lors des phases primales de leur recherche.

Michel Polanyi, qui est à la fois un scientifique et un philosophe, a (par exemple dans son livre *Personal knowledge*) écrit abondamment sur ce qu'il a appelé la « connaissance tacite » des savants, une connaissance qui est le produit d'une longue immersion, ou « habitation », dans leur sujet de recherche. Cette vision des choses était aussi claire pour Einstein : dans un essai de 1918, *Les motifs de la recherche*, il écrivit : « Aucune voie logique ne mène à ces lois élémentaires ; seule y mène l'intuition soutenue par une sorte de sympathie avec l'expérience, (*Einführung in die Erforschung*) ». Polanyi a résumé cela en une simple phrase : « Nous savons plus que nous ne pouvons exprimer ». Peter Brian Medawar, faisant écho à Poincaré, notait : « L'intuition prend beaucoup de formes différentes en science et en mathématiques, cependant ces formes ont en commun certaines propriétés : la soudaineté de leur origine, la plénitude de la conception qui y est incorporée, et l'absence de préméditation consciente ». Le savant néerlandais Peter Debye a eu lui aussi un avis pénétrant sur le processus de découverte scientifique : « Notre science est essentiellement un art qui ne pourrait vivre sans l'éclair de génie qui, de temps à autre, se produit dans l'esprit de quelque homme réceptif qui, sensible à la moindre indication, connaît la vérité avant même d'avoir la preuve ».

Ainsi pourrait-on comprendre que lorsque la main de Fermi atteignit ce « drôle de bout de paraffine » au lieu du coin de plomb, il fut guidé par une supposition qui, à cet instant, était en dessous du niveau de la conscience, mais résultait de sa connaissance intime de la physique du neutron, une connaissance élaborée durant deux ans d'étude intensive, de discussions et d'expérimentations avec la neutronique. Comme l'a montré le Professeur De Gregorio, Fermi pourrait bien avoir lu auparavant des publications de 1932-1933 dans lesquelles étaient discutés les neutrons lents et les effets des substances hydro-

génées sur les neutrons ; Fermi avait par ailleurs participé à la conférence Solvay de 1933 où ces questions furent abordées.

Mais il est significatif que personne, en dehors de Fermi et de son groupe, ne se soit engagé dans le programme intensif de production de radioactivité artificielle, d'abord, pendant plusieurs mois, au moyen de neutrons rapides, et ensuite, à partir de cette matinée d'octobre 1934 (quand Fermi fut capable d'exploiter les ressources qu'il avait jusqu'alors glissées sous le niveau conscient), avec des neutrons lents. En fait, le récit rapporté par Chandrasekhar était une partie d'un texte plus long qui révèle que la discussion avec Fermi avait commencé précisément avec une considération sur le rôle des idées « subconscientes » dans le travail scientifique créatif.

Nous disposons d'autres témoignages sur des situations où Fermi fut capable de tirer, de ressources cachées, des réponses aux questions auxquelles il se trouvait confronté. Ainsi, Herbert Anderson a relaté qu'à un moment crucial, quand, en 1939, à l'Université Columbia, démarraient les difficiles travaux sur la possibilité d'une réaction en chaîne, « Fermi demanda qu'on le laissât seul pendant vingt minutes » puis qu'il sortit avec une estimation grossière de l'effet d'absorption résonante pour l'uranium. Anderson ajoute que cette estimation, que l'on put prouver être correcte, « était en grande partie intuitive. Fermi, pour ces choses-là, ne se trompait jamais... » ; et on peut imaginer quel effet bénéfique un tel talent avait sur le groupe de Fermi. On crédite par ailleurs Fermi d'avoir aidé les ingénieurs du réacteur pour obtenir d'autres estimations grossières de données non encore mesurées, telle que la section efficace de collision nucléaire.

En tout cas, dans le discours officiel que prononça le Professeur Hans Pleijel, de l'Académie Suédoise, lors de la remise du Prix Nobel à Fermi en décembre 1938, ce mot crucial fut aussi mentionné. Devant l'audience rassemblée, Pleijel déclara ce qui suit : « À côté des découvertes significatives de Fermi et, dans une certaine mesure, sur le même rang, on peut placer son talent d'expérimentateur, sa brillante inventivité et son intuition... qui jette un éclairage nouveau sur la structure des noyaux atomiques et ouvre de nouveaux horizons pour le développement futur de la recherche atomique ».

## VII

Finalement, nous revenons à Werner Heisenberg qui, après l'entretien avec Einstein et les oreilles lui sonnent encore de la phrase « Seule la théorie décide de ce qu'on peut observer », se mit à publier des articles qui ébranlèrent le monde, dont ceux

sur le principe d'Incertainité. Nous retournons vers lui parce que ces articles ont tourné le concept d'intuition en physique dans une direction tout à fait nouvelle. Il était l'homme qu'il fallait pour le faire, et ce dès le début. À vingt ans, il s'était lancé dans un projet de théorie quantique qui n'utiliserait que les demi-entiers. À l'inquiétude de son ami Wolfgang Pauli, Heisenberg répliqua avec sa confiance habituelle « Der Erfolg heiligt die Mittel » (« le succès sanctifie les moyens » ou, plus faiblement : « La fin justifie les moyens »). En fait ç'aurait pu être sa devise sa vie durant. Quand il persuada le jeune Heisenberg de le rejoindre à son Institut de Copenhague, Niels Bohr lui avoua qu'à l'origine il n'avait pas élaboré ses modèles atomiques en mariant des idées quantiques à la mécanique classique. Cela lui était venu intuitivement, en tant qu'images représentant des événements dans un atome. Ce qui s'appliquait particulièrement à sa conception des trajectoires définies des électrons autour du noyau, qui étaient des extrapolations à partir d'événements observés dans la vie quotidienne. De même pourrait-on visualiser intuitivement les quanta de lumière en termes de bulles ou paquets d'énergie. Cependant, la lumière possède aussi des propriétés d'ondes. Comment pourrait-on imaginer ensemble les deux aspects ? Par le passé, la possibilité de visualisation intuitive avait toujours été d'un grand secours. Mais, au début des années 1920, cette possibilité devenait très problématique.

Un événement-clé pour la solution du casse-tête fut la publication de cet article de 1925 qui, comme Heisenberg l'expliqua à Einstein l'année suivante, avait été mis en route selon la vieille tradition d'une physique basée sur les expériences sensibles. Heisenberg en avait banni complètement le concept d'orbite électronique, inobservable quoique « visualisable », ainsi que d'autres « images » de ce genre, et mis à la place un schéma mathématique, adapté pour refléter les *données* (par exemple les fréquences et les intensités observables). Il déclara qu'à l'« *Anschauung* » habituelle, dérivée de conceptions, en principe (et à nos yeux) continues, de l'espace-temps ordinaire, devait être substituée, lorsqu'on pensait à propos du domaine atomique, une nouvelle « *Anschaulichkeit* », nécessitée par la physique quantique. La réalité devait se rapprocher d'une description mathématique. Comme Heisenberg le déclara plus tard, dans son livre *Physique et Philosophie* (1958), « le physicien doit se replier sur le schéma mathématique », c'est là que règne la nouvelle « *Anschauung* ».

Un de ses articles fondamentaux (1927) arbore même le titre : « *Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik* » (« Les contenus intuitifs de la cinématique et de la mécanique quantiques »).

Certains lecteurs pourront être pris de perplexité devant des termes tels que « *Anschauung* ». Ce qui voudrait dire qu'ils ont échappé à la lecture de la *Critique de la Raison Pure* (*Kritik der reinen Vernunft*), ce livre extraordinairement complexe et important d'Emmanuel Kant, auquel pratiquement tous les physiciens germanophones (et un certain nombre d'autres), au XIX<sup>ème</sup> siècle et au début du XX<sup>ème</sup>, ont été confrontés (quand ce n'était pas au cours de leurs études, c'était avant : Einstein le lut pour la première fois à l'âge de treize ans, Mach à seize...).

Kant, philosophe et admirateur de la science newtonienne, signa la préface de son livre le 23 avril 1787, et, à partir de ce jour, grandit la conviction que c'était seulement en termes de conceptions intuitivement visualisables, (rapportées à l'expérience et à l'objet) que la vraie science pouvait parvenir à l'esprit de quelqu'un. Le dictionnaire allemand du début du XX<sup>ème</sup> siècle définissait encore « *Anschauung* » comme « vision intuitive ; intuition ». Et Kant lui-même, au tout premier paragraphe – après l'Introduction – de sa *Critique*, dans la section qui commence avec l'analyse de l'espace et du temps, assène sur ce sujet une déclaration analogue au fracas de cymbales du début du « Also sprach Zarathustra » de Richard Strauss : « De quelque manière et par quelque moyen qu'une connaissance puisse se rapporter à des objets, le mode par lequel elle se rapporte immédiatement à eux et que toute pensée prend comme moyen pour les atteindre est l'intuition (*Anschauung*). Mais cette intuition (*Anschauung*) n'a lieu qu'autant que l'objet nous est donné, et, à son tour, l'objet ne peut nous être donné, du moins à nous autres hommes, qu'à la condition que l'esprit soit affecté d'une certaine manière ».

Pour Heisenberg, qui considérait que « la fin justifie les moyens », on pouvait remettre Kant « à jour » et remplacer l'« objet » par les schémas mathématiques. À ses collègues, à commencer par Niels Bohr et Max Born, il fallut un certain temps pour s'y habituer. Erwin Schrödinger avouait courageusement en 1926 « J'ai pris bien sûr connaissance de cette théorie (d'Heisenberg), mais je me suis senti découragé, pour ne pas dire rebuté, par la méthode d'algèbre transcendantale, qui semblait très difficile à utiliser, et par le manque d'*Anschaulichkeit* ».

Il ne semble pas que les américains aient éprouvé ce genre de problème. En février 1929, une tournée de conférences aux États-Unis conduisit Heisenberg à Chicago. À son habitude, il exposa ses nouvelles idées aux physiciens, et fut surpris qu'elles aient été reçues sans opposition. Il confia (comme il le raconte dans *Physics and Beyond*) à un jeune scientifique Américain, « l'étrange impression qu'il avait acquise durant cette tournée : alors que les Européens étaient généralement

opposés et souvent ouvertement hostiles aux aspects abstraits, non figuratifs, de la nouvelle théorie atomique », la plupart des américains l'acceptaient « sans trop de réserves ».

Son ami Américain, qui, clairement, n'était redevable en rien à Kant et son « *Anschaulichkeit* », expliqua « Nous voyons les choses beaucoup plus simplement ». Tant que ça marche, on ne doit pas « commettre l'erreur de traiter les lois de la nature comme des absolus... Je peux voir que ça arrive dans la nature et c'est ça ». Heisenberg fut songeur : « J'eus la nette impression que ma façon de penser lui était plutôt étrangère ». Il aurait pu ajouter : et vice-versa.

Cet épisode prouva que le nouvel usage de l'intuition était devenu facile à accepter par ceux qui n'avaient pas épousé les anciennes conceptions. C'est ce que nous pouvons encore observer quotidiennement dans nos salles de classes, en regardant les visages nouveaux et ouverts de nos étudiants. Les historiens des sciences se démènent pour comprendre plus complètement les mécanismes qui sont derrière tous ces exemples d'« accord anticipateur avec la nature ». J'en ai présenté ici plusieurs qui me semblent souligner, en termes graphiques, le besoin d'explorer davantage cette vaste île de fructueuse ignorance.

Traduction : Robert GERGONDEY

Le traducteur a bénéficié de la collaboration involontaire et précieuse de précédents traducteurs d'Einstein, Hadamard, Heisenberg, Kant... et de Poincaré qui eut le bon goût d'écrire plutôt en français. Les [...] signalent des additions de son cru, et dont il assume donc la responsabilité.

<sup>1</sup> W. Heisenberg, *Der Teil und das Ganze*, éd. Piper (1969) – La Partie et le Tout, Ed. Albin Michel (traduction française 1972).

<sup>2</sup> On peut aussi trouver des extraits du récit de Poincaré, commentés par Jacques Hadamard dans son *Essai sur la Psychologie de l'Invention dans le Domaine Mathématique*, Blanchard (1959).