

Séance du 14 octobre 2019

## L'esprit de découverte, illustré par quelques Christophe Colomb de la Physique moderne

Jean-Pierre NOUGIER

IES, Univ Montpellier, CNRS, Montpellier, France  
Académie des Sciences et Lettres de Montpellier

---

### MOTS-CLÉS

Découverte, physique, recherche, Poincaré, Einstein, Millikan, Bohr, Röntgen, Becquerel, Penzias, Wilson, Rutherford, Michelson, Morley, publications, brevets.

### RÉSUMÉ

Quelques exemples sont donnés de ce que peut être l'esprit de découverte en sciences et plus particulièrement en physique, On verra qu'il est possible de découvrir :  
– en trouvant ce qu'on cherche, en faisant preuve d'intuition, de réflexion, de discernement, de ténacité, mais aussi de risque et d'audace (recherche contractuelle applicative ou fondamentale, Poincaré, Einstein), alliant à la fois confiance en soi et doute (Millikan, questionnement entre Einstein et Bohr),  
– en trouvant ce qu'on ne cherche pas (Röntgen, Becquerel, Penzias et Wilson), aptitude appelée "sérendipité",  
– en ne trouvant pas ce qu'on cherche (Rutherford, Michelson et Morley).

On met en évidence le développement considérable de la recherche, ainsi que l'évolution de sa structuration : du caractère individuel au mode collectif, avec des moyens passant du stade artisanal aux grands programmes de recherche internationaux. L'esprit de découverte reste le moteur de l'innovation. Il nécessite de porter un regard neuf, un regard différent de celui que portent les autres.

---

## 1. Introduction

L'Académie des Sciences et Lettres de Montpellier privilégie cette année la thématique du "voyage", qui notamment est le sujet du colloque du 22 novembre 2019. Je propose donc dans cet article un "Voyage au pays de la connaissance", à travers quelques réflexions sur "l'esprit de découverte".

L'esprit de découverte nécessite de la curiosité, de la réflexion, une certaine intuition, puis de la ténacité et de l'audace, et parfois un peu d'ingénuité voire d'inconscience. Cela vaut en particulier pour les grandes explorations, les grandes découvertes des navigateurs des temps passés ou des astronautes des temps futurs. Mais je ne m'attarderai pas sur ce type d'aventures. J'ai choisi d'évoquer plutôt l'esprit de découverte en Physique, en illustrant mon propos par quelques exemples précis, choisis de façon plus ou moins arbitraire parmi de nombreux autres possibles. Mais ce qui sera dit ici vaut aussi pour toute autre discipline scientifique.

Chacun a en mémoire la phrase assassine : « Des chercheurs qui cherchent, on en trouve ; mais des chercheurs qui trouvent, on en cherche », citation faussement attribuée à de Gaulle [1]. Découvrir implique donc de chercher et de trouver. Mais les

chemins qui conduisent à la découverte sont tortueux et semés d'embûches, comme vont le montrer les quelques exemples qui suivent.

## 2. Découvrir en trouvant ce qu'on cherche

### *La lucidité*

Dans l'immense majorité des cas, un chercheur a un objectif de recherche précis, et il trouve ce qu'il cherche. Plus ou moins vite. Après ou avant ses concurrents. C'est typiquement le cas des recherches sur contrat. À titre d'exemple, dans mon laboratoire, l'IES (Institut d'Électronique et des Systèmes, à Montpellier), le budget opérationnel de recherche, c'est-à-dire les subventions publiques, récurrentes, Université et CNRS, hors salaires des chercheurs et enseignants chercheurs permanents, est de l'ordre de 250 à 300 k€ par an ; le montant de la quarantaine de contrats signés chaque année par les chercheurs s'élève à 2,5 à 3 M€ (millions d'euros). Autant dire que le laboratoire vit à 85 ou 90 % de contrats, publics et privés. Si de tels contrats peuvent être obtenus chaque année, c'est bien parce que chaque année les objectifs des contrats signés antérieurement sont atteints, à quelques exceptions près, et ces objectifs peuvent être évalués et chiffrés par les chercheurs en termes de temps de travail, de charges en personnels temporaires (les doctorants essentiellement), de coûts d'investissements et de fonctionnement. Mais mon laboratoire est loin d'être le seul dans ce cas, il en est ainsi pour la plupart des grands laboratoires en France et dans le monde, entre autres dans les domaines des nouvelles technologies, ou de la chimie par exemple.

### *La prise de risques*

Il ne faudrait pas en conclure que la recherche est sans risque, bien au contraire : la prise de risque est inhérente à l'esprit de découverte, mais les chercheurs professionnels sont capables de l'évaluer à peu près correctement. Je donnerai un autre exemple, toujours à l'IES. Dans les années 1980, le laboratoire a décidé d'engager des recherches, à la fois fondamentales et en technologie de fabrication, sur des composants électroniques fabriqués à l'aide de composés à base d'un matériau appelé antimoine : nous espérions pouvoir à terme réaliser des lasers et photodétecteurs de lumière à des longueurs d'ondes comprises entre 2 et 5  $\mu\text{m}$ . À l'époque, nous savions deux choses : d'une part, que si nous parvenions à réaliser ces composants, des applications importantes pouvaient en découler, dans le domaine de l'émission et de la détection infra-rouge ; d'autre part que nous étions loin d'être certains de réussir, car les difficultés promettaient d'être considérables, à tel point que nous étions l'un des rares laboratoires au monde à s'engager dans cette aventure. Ces recherches ont nécessité des études théoriques, notamment sur les modes de couplage de multi-puits quantiques, elles ont également nécessité la construction d'une salle blanche qui depuis a servi à bien des laboratoires de l'Université de Montpellier ainsi qu'à des entreprises. Elles ont été financées sur crédits propres, sur quelques contrats publics de recherche fondamentale, ainsi que sur les contrats des autres équipes du laboratoire. Après près de vingt années de ce mode de fonctionnement, il se trouve que ces recherches ont débouché, à tel point que, parmi les projets européens "Equipex" d'équipements de laboratoires d'excellence travaillant sur des projets collaboratifs, nous avons été il y a 4 ans le seul laboratoire à obtenir un "Equipex" attribué à une seule équipe, d'un montant de 4,5 millions d'euros (nous étions le seul laboratoire européen à s'être engagé et à réussir dans cette voie !). Actuellement cette équipe est l'une de celles qui obtiennent dans le laboratoire le plus de contrats à caractère applicatif. Mais d'une part il a fallu une vingtaine d'années pour réaliser ces composants, d'autre part il aurait pu se faire que nous ne puissions pas aboutir : la prise

de risque était importante, mais elle était connue et a été assumée. Risque et opiniâtreté sont deux ingrédients de l'esprit de découverte, qualités que seule la passion peut entretenir.

### ***L'audace***

Ainsi la prise de risque, c'est-à-dire l'audace, est une composante importante de l'esprit de découverte. C'est évident pour ce qui concerne les grandes découvertes des navigateurs de la fin du XV<sup>ème</sup> siècle, les astronautes prêts à s'embarquer pour un voyage sur la Lune voire sur Mars, mais c'est aussi vrai en sciences, comme nous l'avons vu dans la section précédente. Un autre exemple d'audace est la théorie de la relativité. En 1905 Einstein pose les fondements de la relativité restreinte. Mais Henri Poincaré (1854-1912) possédait tous les éléments qui auraient pu faire de lui le découvreur de la relativité restreinte. Considéré comme l'un des derniers grands savants universels, il possédait tous les outils mathématiques et les connaissances physiques nécessaires. Ainsi Poincaré écrivait en 1902, soit trois ans avant la publication d'Einstein sur la relativité restreinte, dans son ouvrage *La science et l'hypothèse* : « Ainsi l'espace absolu, le temps absolu, la géométrie même ne sont pas des conditions qui s'imposent à la mécanique ; toutes ces choses ne préexistent pas plus à la mécanique que la langue française ne préexiste logiquement aux vérités que l'on exprime en français. » [2]. En 1905, Poincaré pose les équations des transformations de Lorentz, qui décrivent les relations entre les coordonnées d'espace et de temps entre deux repères galiléens (c'est-à-dire en translation uniforme l'un par rapport à l'autre) ; il montre que ces transformations laissent invariante la vitesse de la lumière, puis pose que les perturbations du champ de gravitation se propagent à la vitesse de la lumière, ce qu'il nomma les « ondes gravifiques » (aujourd'hui « ondes gravitationnelles »), soit dix ans avant la théorie de la relativité générale d'Einstein. Mais pour expliquer l'origine physique des transformations de Lorentz, Poincaré n'ose pas admettre que le temps dépend du repère considéré : il considère que le temps est absolu, conformément à ce qui est alors universellement admis, de sorte qu'il a recours à des contractions réelles de l'espace. Einstein, lui, postule que la vitesse de la lumière est constante, et pose que le temps aussi bien que l'espace sont relatifs, c'est-à-dire ne sont pas les mêmes dans deux repères en translation uniforme l'un par rapport à l'autre ; il retrouve ainsi les mêmes transformations de Lorentz, faisant des variations de longueur et de temps des effets de la perspective dans un espace-temps à quatre dimensions, et non des contractions réelles comme le pensait Poincaré. Avec un peu plus d'audace, Poincaré aurait pu être le père de la relativité restreinte à la place d'Einstein.

Thomas Edison (1847-1931), génie de la découverte s'il en est, avec 1093 inventions à son actif (soit en moyenne une invention tous les quinze jours pendant 42 ans !), déclarait : « Le génie, c'est 1 % d'inspiration et 99 % de transpiration ». Très peu de gens possèdent ce 1 % d'inspiration ; très peu aussi les 99 % de transpiration ; ce qui explique pourquoi si peu de gens possèdent à la fois le 1% d'inspiration et les 99 % de transpiration !

### ***L'assurance et le doute***

L'esprit de découverte comporte aussi deux états d'esprit contradictoires qui doivent animer le chercheur : la certitude du bien fondé de ses méthodes et de ses résultats, le doute permanent sur son travail ; c'est d'ailleurs ce doute, cette remise en cause et cet esprit critique, sur soi-même et sur les autres, associés à une grande honnêteté intellectuelle, qui sont les garants de la qualité des résultats obtenus.

Cet état d'esprit peut être illustré par Robert Andrews Millikan (1868-1953). Ce physicien américain entreprit en 1908 de mesurer la charge de l'électron. Pour cela il

observait au microscope de minuscules gouttes d'eau chargées d'électricité, en équilibre entre leur poids et le champ électrique exercé par un condensateur. En répétant ses observations sur des milliers de gouttes, il montra que les charges électriques étaient toutes multiples d'une valeur élémentaire, la charge de l'électron (soit 1,602 Cb (Cb est le symbole de l'unité de charge électrique, le Coulomb), que Millikan avait à l'époque estimée à 1,592 Cb, l'erreur étant probablement due à l'utilisation par Millikan d'une valeur incorrecte de la viscosité de l'air). Le physicien Félix Ehrenhaft contesta ses résultats, ce qui conduisit Millikan à effectuer une autre série de mesures qui confirmèrent ses résultats en 1913. Mais Millikan lui-même contesta l'interprétation d'Einstein, qui avait montré le caractère corpusculaire de la lumière en 1905, en associant les travaux de Max Planck sur le rayonnement du corps noir (1899), et ceux de Philipp Lenard et Heinrich Herz (1886) sur l'effet photoélectrique. Millikan, persuadé que la lumière était un phénomène ondulatoire, entreprit des recherches expérimentales poussées pour démontrer que l'interprétation corpusculaire d'Einstein était erronée, et finit par conclure, après dix ans de travaux, en 1914, qu'Einstein avait raison [3], ce qui lui permit, en plus, de déterminer la valeur de la constante de Planck en utilisant l'effet photoélectrique. Millikan reçut en 1923 le prix Nobel de physique « Pour ces travaux de recherche sur la charge électrique élémentaire et sur l'effet photoélectrique ».

Autre exemple pour illustrer les certitudes des chercheurs : la célèbre querelle, qui pendant 20 ans opposa Albert Einstein (1879-1955) à Niels Bohr (1885-1962), à partir de la publication en 1935 de l'article dit EPR (initiales des noms de leurs auteurs : Einstein, Podolski et Rosen) [4] et jusqu'à la fin de leurs vies. En mécanique quantique, deux particules sont dites intriquées si elles sont liées l'une à l'autre, de sorte que si l'on modifie l'état d'une particule, on modifie instantanément l'état de l'autre, à la manière des deux disques d'un haltère réunis par une barre : si l'on effectue une rotation d'un disque, l'autre tourne de la même quantité. Il est possible d'intriquer deux photons de sorte que leurs polarisations sont liées, par exemple de telle manière que si la polarisation de l'un est verticale, la polarisation de l'autre est horizontale. Niels Bohr et l'école de Copenhague affirment que l'on ne peut pas connaître l'état de l'ensemble de ces deux particules, sauf si l'on effectue une mesure, et que si la mesure faite sur le photon 1 donne un certain résultat (par exemple : polarisation verticale), alors le photon 2 prend *instantanément* l'état correspondant (ici une polarisation horizontale). Dans leur article, Einstein, Podolski et Rosen imaginent que l'on éloigne l'un de l'autre les deux photons tout en maintenant leur intrication : si l'on effectue la mesure sur l'un, l'autre ne peut pas *instantanément* se mettre dans l'état adéquat, car l'information sur l'état du premier ne peut pas se propager plus vite que la vitesse de la lumière : il faut attendre au minimum le temps que la lumière puisse voyager de l'un à l'autre photon. Les deux savants restèrent sur leurs positions tout au long de leurs vies. Il a fallu attendre les inégalités établies par John Bell en 1964 [5], puis les expériences réalisées Alain Aspect en 1982 [6], pour montrer que Niels Bohr avait raison et Einstein avait tort : un système quantique n'a pas de localisation spatiale.

### 3. Découvrir en trouvant ce qu'on ne cherche pas

Les tubes de Crookes sont les ancêtres des tubes cathodiques de nos oscilloscopes et de nos anciens téléviseurs. Le 8 Novembre 1895, Wilhelm Röntgen (1845-1923) étudie le rayonnement cathodique de tubes de Crookes. Il s'aperçoit par hasard que si le tube est couvert d'un carton noir, des rayons le traversent et viennent faire briller un écran peint avec du platinocyanure de baryum. Il en déduit qu'il existe des rayonnements qui peuvent traverser la matière. Il reproduit alors l'expérience en

intercalant du papier, des livres et même des meubles ! Il décide d'appeler ces rayons « rayons X », en référence au X qui représente l'inconnue en mathématiques. Wilhelm Röntgen comprend également l'importance considérable de ces rayons pour la médecine en prenant un cliché de la main de sa femme : les rayons X étaient découverts, la radiographie était née. Pour ses travaux, Wilhelm Röntgen a reçu le premier prix Nobel en 1901.

À la suite de la découverte de Wilhelm Röntgen, Henri Becquerel effectue en 1896 des recherches sur les liens entre rayons X et fluorescence. Il utilise pour cela du sel phosphorescent d'uranium qu'il entropose dans un placard sur des plaques photographiques enveloppées dans du papier noir. Lorsqu'il ressort ses plaques, il est surpris de constater qu'elles ne sont plus vierges. Il distingue même l'image négative d'une croix de cuivre qui se trouvait entre l'uranium et l'une des plaques photographiques. Il en conclut qu'une substance, apparemment inerte, se montre capable d'émettre des rayons qui traversent le papier mais sont arrêtés par le métal. Henri Becquerel découvre ainsi la radioactivité naturelle, c'est-à-dire l'émission spontanée de radiation par un matériau.

En 1965, deux Physiciens de la Bell Téléphone, Arno Penzias et Robert Wilson, testent un détecteur ultra-sensible d'ondes centimétriques, une antenne cornet ayant servi au suivi de satellites [7]. Leur instrument capte un bruit plus important que prévu. Ayant découvert des fientes d'oiseaux à l'intérieur, ils cherchent d'autres causes de dysfonctionnement, et découvrent que ce bruit excédentaire ne dépend pas de la direction dans laquelle est pointée l'antenne, reste constant jour et nuit et ne dépend pas de la saison. Ils en déduisent qu'il a une origine extragalactique, et obtiennent l'explication auprès de deux astrophysiciens de l'université voisine de Princeton, Bob Dicke et James Peebles : ce bruit, correspondant à une température de 2,7 K (soit -271 °C), était le rayonnement fossile du cosmos, prédit en 1948 par Ralph Alpher et Robert Hermann (parfois faussement attribué à George Gamow, en vertu de ce qu'il est convenu d'appeler en sociologie "l'effet Matthieu" [8]). Cette découverte est considérée comme l'une des preuves expérimentales les plus solides de l'existence du big-bang. Penzias et Wilson obtinrent le prix Nobel en 1978, mais curieusement ni Dicke et Peebles, ni Alpher et Hermann, ne furent récompensés.

Je viens de décrire trois exemples de découvertes faites par ce que d'aucuns appelleraient le "hasard", ou "la chance". Mais est-ce bien le hasard ? Si d'autres que Röntgen, Becquerel ou Penzias et Wilson s'étaient trouvés face aux événements auxquels ils ont été confrontés, auraient-ils fait les mêmes découvertes ? Y a-t-il ceux qui ont de la chance, et ceux qui n'en ont pas, ou ceux qui savent saisir la chance qui se présente à eux et ceux qui ne savent pas ? Probablement les deux ! On appelle "sérendipité" le fait de trouver autre chose que ce que l'on cherche, tel Christophe Colomb cherchant la route des Indes par l'ouest et découvrant l'Amérique. C'est d'après Sylvie Catelin [9] « l'art de prêter attention à ce qui surprend et d'en imaginer une interprétation pertinente ».

#### 4. Découvrir en ne trouvant pas ce qu'on cherche

De tout évidence, ne pas trouver ce qu'on cherche peut a priori sembler décevant, voire frustrant. Il est cependant des cas, évidemment rares, où ces tentatives apparemment infructueuses et négatives, permettent de bouleverser la conception que l'on se faisait de certains phénomènes physiques. Je citerai deux exemples.

Pour étudier des particules inconnues  $C$ , les physiciens des particules les bombardent avec des particules connues  $A$  : celles-ci "ricochent" sur la cible  $C$ , la répartition des particules  $A$  diffusées donne des informations sur la cible  $C$ . Si le faisceau

de particules  $A$  est suffisamment énergétique, les particules  $C$  peuvent être cassées, ce qui donne des informations sur la composition de  $C$ . C'est ce type d'expérience qui est effectué par exemple au Centre Européen de Recherche Nucléaire (CERN) à Genève. À la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, on croyait que tout le volume d'un atome était occupé par de la matière, c'était le modèle atomique de Joseph John Thomson (ou « modèle du plum pudding ») : on pensait que les électrons, de charge négative, étaient "englués" dans le noyau positif qui occupait tout le volume de l'atome. En 1911, Rutherford bombarde une feuille d'or avec des particules alpha : la feuille d'or est un assemblage d'atomes d'or, comme un mur de briques est un assemblage de briques. Les particules alpha sont des atomes d'hélium ayant perdu leurs électrons (ils sont dits ionisés, donc chargés positivement, ce qui permet de les accélérer au moyen d'un champ électrique et de les détecter). Bombarder une feuille d'or avec des particules alpha revient donc à lancer des cailloux contre un mur de briques. Rutherford s'attendait donc à ce que les particules alpha rebondissent sur la feuille d'or. À sa grande surprise, les détecteurs placés tout autour de la feuille d'or ont capté essentiellement des particules alpha ayant traversé directement la feuille d'or, très peu de particules alpha étaient déviées ou ricochaient : tout se passait comme si la feuille d'or était transparente ! Rutherford a ainsi découvert le contraire de ce qu'il croyait, à savoir que la matière est faite de vide ! Ceci le conduisit à supposer que la masse de l'atome était concentrée dans un noyau, de volume très petit par rapport à celui de l'atome. En le supposant ponctuel, il calcula que la proportion de particules déviées dans la direction faisant l'angle  $\theta$  avec la direction du faisceau incident était proportionnelle à  $1/\theta^4$ . Or ceci se trouva être en très bon accord avec ses résultats expérimentaux. C'est ainsi que Rutherford représenta l'atome comme analogue à un système planétaire, dont le noyau positif occuperait le centre, avec des électrons gravitant tout autour comme les planètes autour du Soleil. En fait ce modèle avait été proposé en 1904 par le japonais Hantaro Nagaoka mais était passé inaperçu : on y objectait que les électrons auraient dû rayonner en tournant autour du noyau central et donc perdre de l'énergie et s'écraser sur le noyau. Les résultats de Rutherford montrèrent que ce modèle était sans doute le bon, puisqu'il permettait de prévoir avec exactitude le taux de diffusion des particules alpha en fonction de l'angle de diffusion. Les dernières objections théoriques sur le rayonnement de l'électron tombèrent avec le début de la mécanique quantique de Niels Bohr.

Mais le plus célèbre exemple de "découverte négative" est sans doute l'expérience de Michelson-Morley. D'après les lois de la mécanique classique (Galilée et Newton), la vitesse d'un objet n'est pas la même par rapport à un repère fixe ou par rapport à un repère mobile : si dans un train qui roule vous vous déplacez vers l'avant du train, par rapport à la Terre vous allez plus vite que le train, et si vous vous déplacez vers l'arrière du train, par rapport à la Terre vous allez moins vite que le train ; et si vous vous déplacez perpendiculairement à la trajectoire du train, votre vitesse, dans cette direction, est la même par rapport au train et par rapport à la Terre. Afin d'étudier l'influence du mouvement de la Terre sur la vitesse de la lumière, Michelson a imaginé un appareil permettant de faire interférer des rayons lumineux voyageant dans des directions perpendiculaires. En réalisant deux expériences avec deux positions de son interféromètre, l'une parallèle au sens de déplacement de la Terre, l'autre perpendiculaire, Michelson pensait pouvoir détecter des différences d'ordre interférométrique d'environ quatre fois la précision de son appareil. Il n'a observé aucune différence entre les deux positions de l'appareil, en dépit des améliorations apportées à celui-ci, entre 1881 où il commença ses expériences seul, et 1887 où il les termina avec son assistant Edward Morley. Il annonça alors de façon définitive que l'expérience s'avérait négative, c'est-à-dire que la vitesse de la lumière était la même dans le sens de déplacement de la Terre sur son orbite, et perpendiculairement à ce sens. Ce résultat valut à Michelson le prix

Nobel de physique en 1907, car entre temps, en 1905, Albert Einstein établissait la théorie de la relativité restreinte, en partant de deux postulats :

- le principe de relativité, selon lequel deux expériences réalisées dans deux référentiels galiléens (ou inertiels, c'est-à-dire en translation uniforme l'un par rapport à l'autre) donnent le même résultat,
- le postulat suivant lequel la vitesse de la lumière est la même dans deux référentiels galiléens.

Einstein, 18 ans plus tard, tirait les conséquences de l'expérience négative de Michelson et Morley, qui a ainsi bouleversé les concepts de la mécanique classique : si, voyageant dans votre TGV, vous lancez des photons avec votre pointeur laser, ces photons se déplacent par rapport au TGV avec la même vitesse que par rapport à la Terre !

## 5. À la recherche du temps perdu

On l'a vu, les chercheurs consacrent à leurs études une énergie et une ténacité sans bornes. Il en va de même non seulement pour des individus, mais aussi pour des communautés entières de chercheurs.

Il en est ainsi par exemple de la communauté mondiale des astrophysiciens. Après sa théorie de la relativité générale de 1915, Einstein prédit en 1916 l'existence d'ondes gravitationnelles : pouvant résulter d'énergies colossales libérées lors de cataclysmes cosmiques, elles se manifesteraient par des oscillations infimes (contractions et dilatations) de l'espace-temps. S'ensuit un siècle de traque par une communauté mondiale de chercheurs, constituée de plusieurs milliers d'astrophysiciens. À cet effet sont élaborés des programmes de recherche internationaux, pour construire en 1990 les deux interféromètres américains LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, ou « Observatoire d'ondes gravitationnelles par interférométrie laser ») et dans les années 2000 l'interféromètre européen Virgo. Le 14 septembre 2015, les chercheurs du LIGO annoncent la détection d'ondes gravitationnelles, provoquées par la coalescence de deux trous noirs, de masses égales à une trentaine de fois celle du Soleil, et de rayons approximatifs 75 km, situés à 1,3 milliards d'années-lumière. Les interférences détectées par LIGO sont dues à d'infimes modifications de la longueur des bras de l'interféromètre, résultant des modifications de l'espace-temps provoquées par les ondes gravitationnelles produites par la collision des deux trous noirs. En l'occurrence, la longueur des bras de l'interféromètre, de longueur 4 km, a été modifié de 10-18 m, soit environ un millième de la dimension d'un proton ! D'autres évènements similaires ont depuis été détectés par LIGO et Virgo.

Quel est l'intérêt de la détection d'ondes gravitationnelles ? Bien au-delà de la confirmation de la théorie de la relativité générale d'Einstein, elle nous donne un moyen supplémentaire d'observation de l'Univers. Pour observer l'Univers, jusqu'à présent l'on utilisait les ondes électromagnétiques (dont fait partie le spectre de la lumière visible), en d'autres termes nous avions des yeux. Dorénavant, nous avons aussi des oreilles, c'est-à-dire un capteur capable de détecter des vibrations de nature totalement différentes (les ondes gravitationnelles). Ainsi par exemple, les trous noirs ne peuvent pas être vus directement, car les photons ne peuvent pas s'en échapper, mais ils agissent par gravité. On peut donc espérer obtenir sur les trous noirs des informations jusqu'alors inaccessibles. De même, la théorie du big-bang, actuellement communément admise, nous dit que notre Univers s'est constitué à la suite d'une immense explosion originelle, dégageant une énergie telle que les particules qui constituent la matière que nous connaissons aujourd'hui n'étaient pas agrégées ; il a fallu attendre 380 000 ans que la

matière se refroidisse suffisamment, pour que se constitue un plasma composé d'atomes, de noyaux d'atomes positifs et d'électrons négatifs, capables d'absorber et d'émettre de la lumière par les sauts de leurs électrons entre niveaux d'énergie. Aucune radiation électromagnétique n'a donc été émise pendant ces 380 000 ans, il nous est donc impossible de détecter quoi que ce soit qui s'est passé pendant cette période : ce temps-là était perdu pour nos observations : la possibilité, qui nous est offerte maintenant, de détecter des ondes gravitationnelles, nous permet donc d'espérer obtenir des informations sur cette période, elle nous permet d'aller à la recherche de ce temps qu'on croyait perdu.

## 6. Vers les grands programmes de recherche internationaux

L'exemple de l'astrophysique, qui a été évoqué au paragraphe 5 ci-dessus, est caractéristique de l'évolution moderne de l'esprit de découverte en science. Cette évolution se manifeste par la mobilisation de communautés entières, comportant chacune plusieurs milliers de chercheurs, travaillant de façon coopérative dans le cadre de programmes internationaux concertés, orientés vers un objectif commun, mettant en jeu des instruments ou des programmes très sophistiqués et très onéreux, qu'une nation ne peut développer à elle toute seule, et qui ont vu le jour depuis le milieu du XX<sup>ème</sup> siècle. En voici quelques-uns :

- en astrophysique : à la recherche des mécanismes régissant la naissance et le fonctionnement de l'Univers : LIGO : USA, 612 M\$ [11] ; Virgo : UE, 80 M€ ; LISA (Laser Interferometer Space Antenna, antenne spatiale à interféromètre laser) : programme de l'Union Européenne de 1 G€ (un milliard d'euros), de réaliser un interféromètre spatial constitué de 3 satellites formant un triangle équilatéral de 2,5 millions de km de côté (à comparer aux bras interférométriques actuels de 3 ou 4 km de LIGO et Virgo), lancement prévu en 2034 [12] ;
- en physique des particules : au CERN (Centre Européen de Recherche Nucléaire) de Genève, le LHC (Large Hadron Collider) est un gigantesque anneau de collision de 27 km de long comportant 9593 aimants à supraconducteurs, à la découverte des constituants et des lois de l'Univers : 3,94 G€ [13] ;
- en biologie : de 1990 à 2013 le projet de séquençage du génome humain (Human Genome Project, USA), 3,0 G€ ; le Human Brain Project de l'Union Européenne, porté par la Suisse, se proposant de modéliser le cerveau humain d'ici 2024 (1 G€) ;
- mais aussi en sciences humaines et sociales, par exemple les programmes internationaux de fouilles archéologiques (Carthage de 1973 à 1987 ; Égypte sous le contrôle du Conseil Suprême des Antiquités Égyptiennes ; etc.).

Ainsi, l'esprit de découverte, aujourd'hui, est-il bien éloigné de l'intuition fulgurante qui conduisit à l'illumination soudaine d'Archimède flottant dans sa baignoire ou de Newton voyant tomber une pomme.

## 7. À quel âge découvre-t-on en Sciences ?

Einstein aurait déclaré : « Celui qui n'apporte pas une contribution majeure à la science avant l'âge de 30 ans ne le fera jamais ». La réponse à la question posée nous est apportée par une étude de Jones, Reedy et Weinberg parue dans un article du National Bureau of Economic Research [10]. La figure 1 ci-dessous montre que les grandes découvertes, ou celles récompensées par un prix Nobel, peuvent se faire à tout âge, mais cependant ont lieu majoritairement à un âge compris entre 30 et 45 ans, plus précisément lorsque les découvreurs ont achevé leur formation et sont encore jeunes. Ainsi le sommet



de la courbe de la figure 1 est passé de 34 ans pour les découvertes faites avant 1935, à presque 40 ans pour celles faites après 1965, correspondant à l'allongement des études, nécessitées par l'acquisition d'un plus grand nombre de connaissances.

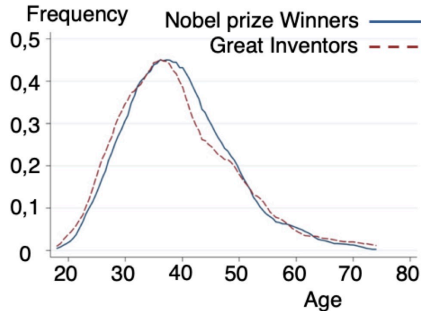


Figure 1 : Distribution des âges où ont été faites les découvertes essentielles pendant le XXème siècle (source : [10]).

## 8. De la découverte individuelle à la découverte collective

On le voit, la recherche et par conséquent les découvertes ont beaucoup évolué en particulier ces dernières décennies.

### 8.1. Quelques données chiffrées

De toute évidence, il existe un lien puissant entre les articles publiés dans les revues scientifiques et les découvertes, chaque article apportant par définition au moins un élément nouveau par rapport aux connaissances précédentes.

– Le nombre de chercheurs a considérablement augmenté. En France par exemple, il est passé (hors secteur défense) de 291 515 en 1992 à 342 307 en 2003 [14] et à 417 100 en 2016 [15] soit une augmentation de 43 % en seulement un quart de siècle (figure 2). Environ 1 français sur 150 travaille aujourd'hui dans le secteur de la recherche.

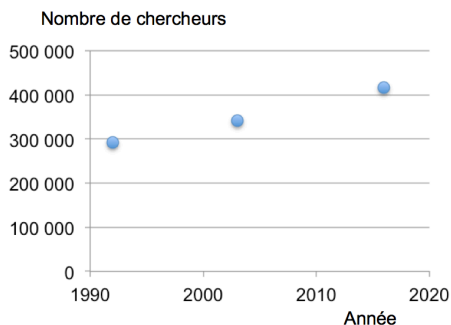


Figure 2 : Évolution du nombre de chercheurs (hors secteur défense) en France entre 1992 et 2016 [14][15]

– Le nombre d'articles scientifiques a évolué de façon parallèle : le nombre de mots publiés dans les revues de base dans le monde a été multiplié par 256,5 entre 1894 et 1966 [16]. De 466 419 articles parus dans le monde en 1988, on est passé à 698 726 en 2003 [17], soit une multiplication par 1,5 en seulement 15 ans. Selon un rapport de

l'UNESCO [18], ce nombre était de 1 029 471 en 2008 et 1 270 425 en 2014, en raison notamment de l'augmentation des publications chinoises ; en 2014 environ 3500 articles scientifiques paraissent chaque jour dans le monde. Les découvertes applicatives ne sont pas en reste, puisque, en 2011, 181 900 brevets ont été déposés dans le monde, soit près de 500 par jour [19]. On peut donc affirmer qu'entre publications et brevets, environ 4000 découvertes sont faites dans le monde chaque jour !

– L'organisation de la recherche s'est mondialement structurée : l'art et la connaissance n'ont pas de frontières. Traditionnellement ouverte et transnationale (54,1 % des publications des chercheurs français en 2016 ont été faites en collaboration avec des étrangers [15]), la recherche s'est, notamment depuis trois siècles, petit à petit spécialisée en disciplines qui se sont structurées en communautés scientifiques nombreuses, puissantes et efficaces. Dans de nombreuses disciplines, la recherche n'est plus le fait d'un individu, mais d'une équipe, d'un groupe, d'une communauté, pour preuve le nombre de signataires des publications scientifiques : d'un à trois ou quatre individus dans les années 1950, on passe aujourd'hui souvent à 10 ou 20 cosignataires (voir par exemple la référence [20]). Ce phénomène est particulièrement frappant en génomique et en physique des particules, domaines qui battent des records. Ainsi par exemple :

– le séquençage d'une partie seulement du génome de la mouche drosophile, qui a paraît-il conservé intactes les sections clés de ce génome pendant 40 millions d'années, a fait l'objet d'un article [21] comportant 1114 signataires (parmi lesquels plus de 900 étudiants, dont le travail, pour la plupart, a consisté à corriger les erreurs du logiciel et à annoter cette série) ;

– ils font pâle figure à côté des 2700 signataires d'un article de la revue *Nature* [22] portant sur une désintégration rare ;

– mais il y a encore mieux : après la découverte en 2012 du boson de Higgs, qui gouverne la masse de l'Univers, deux équipes ayant réalisé des expériences au LHC (Large Hadron Collider) du CERN, ont publié un article en 2015 [23] où la masse du boson de Higgs est affinée à  $125,09 \pm 0,21$  GeV au lieu des 129 GeV de l'article initial : ce nouvel article est cosigné par...5154 co-auteurs ! Il comporte 33 pages, dont 9 pages d'explications scientifiques et 24 pages de noms d'auteurs ! C'est semble-t-il le record actuel...

Cette évolution a des conséquences, par rapport à l'époque où la recherche et la découverte étaient œuvres individuelles.

## 8.2. Quelques conséquences

### *Au plan individuel :*

Chaque chercheur, dans son domaine, à la fois collabore avec ses collègues de la même spécialité (les publications cosignées en sont la preuve), et en même temps est en concurrence avec eux. Aux jeux olympiques, le second et le troisième sont honorés. En recherche, il n'y a de place que pour le premier découvreur :

- Lorsque Penzias et Wilson découvrent par hasard le fond diffus du rayonnement cosmique, Dicke, Roll et Wilkinson à qui ils en parlent sont en train de construire une antenne pour le détecter ; s'ensuivent deux articles, l'un signé Penzias et Wilson décrivant l'appareillage, les mesures, la découverte du fond diffus cosmologique, l'autre signé Peebles et l'équipe de Dicke, décrivant les conséquences cosmologiques : Penzias et Wilson reçoivent le prix Nobel, plus personne ne parle de l'équipe de Dicke ; celui-ci aurait dit, en apprenant la découverte de Penzias et Wilson : « Well boys, we have been scooped » (« Bon les gars, nous nous sommes faits doubler »).

- Les américains du projet LIGO et les européens du projet Virgo travaillent ensemble, ils ont même conclu un accord de partage de données et de cosignature des articles

scientifiques. Mais lorsque LIGO détecte la première onde gravitationnelle en 2015, Virgo est en travaux pour augmenter sa précision et ne détecte rien : Barish, Thorne et Weiss obtiennent le prix Nobel en 2017, ce qui laissera un goût amer à leurs homologues européens de Virgo, en particulier les français Alain Brillet et Thibault Damour et l'italien Adalberto Giazotto.

Avec l'augmentation du nombre de cosignataires des articles scientifiques :

– comment évaluer la contribution de chacun, sachant que l'avancement de la carrière des chercheurs dépend essentiellement de leur apport scientifique ?

– la part de l'initiative individuelle, l'originalité d'une découverte ne risquent-elles pas d'être étouffées par de telles masses de chercheurs persuadés de la véracité des modèles en vigueur ? Par exemple, quelle chance peut avoir aujourd'hui d'émerger et de se développer une théorie qui serait alternative au big-bang ? Ou un modèle d'évolution climatique différent de ceux en vigueur aujourd'hui ?

*Sur le plan collectif :*

– la coopération et la co-publication font qu'il y a beaucoup moins d'aléas qu'autrefois et une meilleure garantie de pertinence et de qualité des résultats par contrôle mutuel,

– la mobilisation de communautés nombreuses garantit que la continuité des recherches est assurée, le travail du groupe dépend beaucoup moins du départ ou de l'indisponibilité d'un de ses membres.

## 9. Conclusions

Nous avons montré tout au long de cet exposé l'inexorable évolution de la recherche et de la découverte :

– au début fruit d'initiatives individuelles, elles sont devenues le résultat d'un travail collectif ;

– mises en œuvre autrefois par quelques individus, elles mobilisent aujourd'hui des communautés entières de chercheurs dans chaque discipline ;

– effectuées autrefois dans un garage ou sur un coin de table (Becquerel a découvert la radioactivité naturelle dans un placard !), elles avancent souvent aujourd'hui grâce à des programmes internationaux gigantesques mettant en œuvre des appareillages onéreux et sophistiqués.

Certes les découvertes se font, encore de nos jours, au hasard de l'intuition et du génie de tel ou tel. Pourtant, on peut affirmer, aujourd'hui encore plus qu'hier, ***qu'il n'y a pas de hasard dans le hasard des découvertes***. En d'autres termes, n'en déplaise à l'amour propre de chaque chercheur, ***la science avance grâce aux découvertes mais indépendamment des découvreurs***, en ce sens que, si telle découverte n'avait pas été faite à tel moment par tel chercheur, un autre ou des autres auraient fait la même découverte un peu plus tard. Certes certains savants, Einstein en particulier, ont considérablement marqué la science de leur empreinte. Mais on sait qu'une controverse s'est installée concernant la paternité de la relativité, Einstein, Lorenz et Poincaré étant parvenu à peu près au même moment à des conclusions similaires. Einstein lui-même a déclaré en 1946 [24] : « Il est hors de doute que si l'on jette un coup d'œil rétrospectif sur son évolution, la théorie de la relativité était mûre en 1905. Lorentz avait déjà découvert, par l'analyse des équations de Maxwell, la transformation qui porte son nom. De son côté, H. Poincaré a pénétré plus profondément dans la nature de ces relations... » ; en d'autres termes, le moment était venu où la relativité devait être découverte. De même, à la fin du XV<sup>ème</sup> siècle, l'Amérique devait être découverte ; si Christophe Colomb ne l'avait pas fait en 1492, un autre l'aurait fait quelques années plus tard, le moment propice était venu : le monde était psychologiquement prêt et les moyens

techniques étaient disponibles. Le modèle planétaire de l'atome avait été proposé en 1904 par le japonais Hantaro Nagaoka mais il était passé inaperçu ; il a été admis en 1911, grâce à l'apport convergent des expériences de Rutherford et de la théorie de la mécanique quantique : en 1911, les moyens techniques étaient disponibles, ils ne l'étaient pas en 1904.

Toutefois, cela ne veut pas dire que des avancées importantes, voire des *ruptures* dans les progrès de la connaissance, ne puissent plus dorénavant être le fait d'individus ou de petits groupes de chercheurs. En effet, si la recherche a fortement évolué et s'est fortement structurée, "l'esprit de découverte" est resté intact. De même que Christophe Colomb et les navigateurs de son époque voulaient découvrir la planète, le scientifique moderne veut découvrir la matière, les origines de la vie, le cosmos, l'univers. L'esprit de découverte n'a probablement pas fondamentalement changé depuis la nuit des temps : il est fondé sur la curiosité, le goût de l'aventure, les nécessités du moment, qui ont fait qu'un groupe d'Homo Sapiens, né peut être dans le Djebel Irhoud (Maroc actuel, Sahara à l'époque verdoyant) il y a environ 300 000 ans [20], a commencé à émigrer il y a 120 000 ans pour découvrir et envahir notre planète. Il a fallu à ces hommes préhistoriques de l'intuition, de l'audace, de l'intelligence, de la persévérance, pour surmonter les embûches innombrables qu'ils ont trouvé sur leur route, de l'esprit d'à-propos et du discernement pour exploiter ce que le hasard a mis sur leur chemin.

Le chercheur scientifique est animé par les mêmes idéaux, les mêmes espoirs, les mêmes doutes. Certes il ne met pas en jeu sa propre survie, tout au plus sa carrière, mais sa soif de connaissance est restée inchangée.

L'esprit de découverte reste l'un des principaux moteurs des progrès de l'humanité. Et l'on retrouve ici, déjà cité dans un précédent paragraphe, le roman "*À la recherche du temps perdu*" de Marcel Proust, dont le cinquième tome, "*La prisonnière*", contient cette phrase qui me semble particulièrement pertinente [25] : « Si nous allions dans Mars et dans Vénus en gardant les mêmes sens, ils revêtraient du même aspect que les choses de la Terre tout ce que nous pourrions voir. Le seul véritable voyage, le seul bain de Jouvence, ce ne serait pas d'aller vers de nouveaux paysages, mais *d'avoir d'autres yeux* ». Voire le monde avec d'autres yeux, telle est bien la caractéristique principale de l'esprit de découverte. C'est probablement la raison essentielle qui fait que les grandes découvertes ont été en général faites par des chercheurs jeunes au début de leur carrière.

## REFERENCES

- [1] <https://www.nouvelobs.com/rue89/rue89-hotel-wikipedia/20141018.RUE0848/des-chercheurs-qui-cherchent-on-en-trouve-des-chercheurs-qui-trouvent-on-en-cherche-la-phrase-que-de-gaulle-n-aurait-jamais-dite.html>, (site consulté le 8 mai 2018).
- [2] H. Poincaré, *La Science et l'Hypothèse*, éd. Flammarion, Paris, 1902, p. 112.
- [3] R.A. Millikan, *The autobiography of Robert A. Millikan*, Prentice Hall, New York, 1950, chap. 9, p. 102-103 : « After ten years of testing and changing and learning and sometimes blundering, all my efforts being directed from the first toward the accurate experimental measurements of the energies of emission of photoelectrons, now as a function of temperature, now of wavelength, now of material (contact E.M.F. relations), this work resulted, contrary to my first expectation, in the first direct experimental proof in 1914 of the exact validity, within narrow limits of

- experimental error, of the Einstein equation, and the first direct photoelectric determination of the "Planck constant  $h$ " ».
- [4] Al. Einstein, B. Podolski et N. Rosen, *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete ?*, Phys. Rev., vol. 47, 1935, p. 777-780.
- [5] J.S. Bell, *On the Einstein Podolsky Rosen Paradox*, Physics 1 (1964), 195.
- [6] A. Aspect, P. Grangier, G. Roger, *Experimental realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment : A new violation of Bell's inequalities*, Physical Review Letters, Vol. 49, n° 2, p. 91-94 (1982).
- [7] Voir par exemple les sites :  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Fond\\_diffus\\_cosmologique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fond_diffus_cosmologique), ou :  
<http://www.scilogs.fr/signal-sur-bruit/les-50-ans-de-la-decouverte-du-rayonnement-de-fond-cosmologique/>.
- [8] L'effet Matthieu décrit le fait qu'on attribue plus volontiers des découvertes à d'éminents scientifiques qu'à des inconnus, conformément aux termes de l'évangile de Matthieu (25:29) « Car à tout homme qui a, l'on donnera davantage et il sera dans l'abondance, mais celui qui n'a rien, on enlèvera même le peu qu'il a ». Voir aussi Matt. 13:11-12, Marc 4:25, Luc 8:18, Luc 19:26.
- [9] Sylvie Catelin : *Sérendipité : Du conte au concept*, 2014, Éd. Seuil, Coll.: Science ouverte, (ISBN 2021136825).
- [10] Benjamin Jones, E.J. Reedy, and Bruce A. Weinberg, *Age and Scientific Genius*, NBER (National Bureau of Economic Research) Working Paper, No. 19866, January 2014, JEL No. J11,O31 (cet article peut être consulté sur le site : <http://www.nber.org/papers/w19866.pdf> . Un résumé en français est disponible sur le site : <http://www.slate.fr/life/83583/decouvertes-genie-trentaine-age-nobel>).
- [11] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Laser\\_Interferometer\\_Gravitational-Wave\\_Observatory](https://fr.wikipedia.org/wiki/Laser_Interferometer_Gravitational-Wave_Observatory).
- [12] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Laser\\_Interferometer\\_Space\\_Antenna](https://fr.wikipedia.org/wiki/Laser_Interferometer_Space_Antenna).
- [13] <https://home.cern.fr/resources/faqs/facts-and-figures-about-lhc>.
- [14] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Statistiques\\_mondiales\\_de\\_recherche\\_et\\_developpement](https://fr.wikipedia.org/wiki/Statistiques_mondiales_de_recherche_et_developpement).
- [15] État de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche en France, n° 10, Avril 2017, ISSN 978-2-11-152028-8.
- [16] Boutry, G.-A., *L'Évolution des publications scientifiques primaires*, Bulletin des bibliothèques de France (BBF), 1969, n° 11, p. 425-454. Disponible en ligne : <<http://bbf.enssib.fr/consulter/bbf-1969-11-0425-001>>. ISSN 1292-8399.
- [17] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Production\\_mondiale\\_d%27articles\\_scientifiques](https://fr.wikipedia.org/wiki/Production_mondiale_d%27articles_scientifiques).
- [18] <https://fr.unesco.org/node/252295>.
- [19] <https://www.planetoscope.com/Commerce/1477-depots-de-brevets-dans-le-monde.html>.
- [20] Daniel Richter, Rainer Grün, Renaud Joannes-Boyau, Teresa E. Steele, Fethi Amani, Mathieu Rué, Paul Fernandes, Jean-Paul Raynal, Denis Geraads, Abdelouahed Ben-Ncer, Jean-Jacques Hublin, Shannon P. McPherron, *The age of homonin fossils from Jebel*

- Irhoud, Morocco, and the origins of the Middle stone Age*, Nature, vol. 546, 8 june 2017, p. 293.
- [21] Leung, W. et al, Drosophila Muller F Elements Maintain a Distinct Set of Genomic Properties Over 40 Million Years of Evolution, *G3 : Genes|Genomes|Genetics*, vol. 5 n°5, (1 may 2015), p. 719-740, <https://doi.org/10.1534/g3.114.015966>.
- [22] CMS Collaboration & LHCb Collaboration, Observation of the rare  $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$  decay from the combined analysis of CMS and LHCb data, Nature, 522, p. 68–72 (04 June 2015).
- [23] G. Aad *et al.* (ATLAS Collaboration, CMS Collaboration), Combined Measurement of the Higgs Boson Mass in  $pp$  Collisions at  $\sqrt{s}=7$  and 8 TeV with the ATLAS and CMS Experiments, Phys. Rev. Lett. **114**, 191803 (14 May 2015).
- [24] in Paul Arthur Schilpp, *Albert Einstein : Autobiographical Notes*, Open Court Pub Co, février 1979, 95 p. (ISBN 978-0875483528), cité par wikipedia : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Controverse\\_sur\\_la\\_paternité\\_de\\_la\\_relativité](https://fr.wikipedia.org/wiki/Controverse_sur_la_paternité_de_la_relativité).
- [25] M. Proust, *La prisonnière*, éd. Gallimard, 1925, p. 69.