

Bertrand Nicquevert

*Boson et vérité : donner du sens à la recherche,
À l'attention de l'Association internationale Gaston
Bachelard**

Dans un court roman de Véronique Bizot, *Mon couronnement*, le narrateur, un vieux monsieur de 87 ans, voit sa vie bouleversée par une invasion de visiteurs inattendus, venus le féliciter pour une découverte qu'il a effectuée bien des années auparavant, et qui « semble en passe d'ouvrir d'assez précieuses perspectives sur un problème [de santé] émergent ». Cette découverte avait été considérée à l'époque, écrit-il, comme « une fausse route scientifique, l'une de ces impasses scientifiques dans lesquelles nous autres chercheurs en recherche fondamentale nous fourvoyons constamment ». Elle avait été effectuée à une époque lointaine dont il a pratiquement tout oublié, « sinon le temps que nous consacrons à, jusqu'à preuve du contraire, tenir le probable pour faux ». Je vous révèle la chute de ce plaisant roman : le vieil homme est invité à son « couronnement » : « Quand j'eus gravi des marches à l'intérieur d'un édifice très éclairé, je vis, par la large embrasure d'une double porte, et sous les lustres et les brillances d'un vaste salon flanqué dans son fond d'une estrade et d'un micro, une foule de gens, [...] et je n'entraï pas ».

En peu de pages, ce sont ainsi les trois principales motivations possibles de la recherche scientifique qui sont évoquées : l'appétit de gloire, l'application sociétale, la quête de la vérité. En effet, qu'est-ce qui donne du sens à la recherche ? Qu'est-ce qui porte les chercheurs à s'adonner à cette pratique particulière ? Ce sera le thème des réflexions de ce jour, qui s'appuieront sur la découverte du désormais célèbre boson de Higgs.

Higgs, justement. Le professeur Peter Higgs était un vieux monsieur écossais de 84 ans lorsqu'il a vu sa vie bouleversée par une invasion de visiteurs, à vrai dire pas tout à fait inattendus quant à eux, et venus le féliciter en octobre 2013 pour une invention qu'il avait effectuée bien des années auparavant, en 1964 exactement, et qui « semble en passe d'ouvrir d'assez précieuses perspectives sur un problème » de physique assez fondamental : celui de l'origine de la masse.

Sans se plonger ici dans de longs développements, par ailleurs bien expliqués dans la littérature, que l'on retienne en peu de mots quelques considérations rapides et incomplètes sur les constituants ultimes de la matière et sur les forces fon-

* En guise de continuation à la visite du CERN, 1^{er} juin 2023.

damentales qui les relient. La matière stable qui nous entoure et dont nous sommes constitués est faite de quarks (qui par combinaison, composent les neutrons et les protons, constituants des noyaux des atomes), d'électrons (dont la probabilité de présence autour du noyau est régie par les lois de la mécanique quantique) et de neutrinos, particules élusives s'il en est. Par ailleurs, Modèle Standard de la physique retient quatre interactions fondamentales : la gravitation, surtout sensible aux échelles de l'infiniment grand ; la force électromagnétique, expliquant les relations entre particules chargées ; la force nucléaire dite « forte », permettant aux protons de demeurer au sein du noyau en dépit des forces de répulsion électromagnétique ; et enfin la force nucléaire dite « faible », à l'origine des désintégrations et de la radio-activité. Chacune de ces forces est portée par un boson : le graviton (pas encore découvert, mais on a déjà observé des ondes gravitationnelles en 2016, donc il n'est pas loin...) ; le photon pour la force électromagnétique, et dont la masse est nulle ; les gluons pour la force forte, de huit types différents, et tous de masse nulle ; et enfin, pour la force faible, les bosons poétiquement nommés W^+ , W^- et Z^0 . Et ces zozos-là ont une masse pas nulle du tout. Qu'a fait Higgs, ainsi que quelques autres physiciens, dans les années 1960 ? Inventer un mécanisme dit de « brisure spontanée de la symétrie électrofaible », à l'origine précisément de la masse de ces zozos, et de toutes les autres particules qui sont dotées de masse, par interaction plus ou moins intense avec un « champ de Higgs ». C'est précisément cette découverte théorique du professeur Higgs qui a été couronnée en octobre 2013 du prix Nobel de physique. Une récompense prestigieuse entre toutes, attribuée conjointement au professeur belge François Englert, les deux récipiendaires s'étant spontanément accordés pour y associer le nom du collègue du second d'entre eux, hélas décédé juste deux ans trop tôt : le professeur Robert Brout.

Le jour où le comité Nobel devait annoncer le nom des lauréats, Peter Higgs s'est éclipsé, volontairement – victime d'une affection bien particulière, la « nobélite ». Après l'annonce de la découverte du boson « qui porte mon nom », comme il aimait joliment à le dire, il se doutait bien que pareil destin le guettait. Il avait été si heureux que la découverte soit survenue « de [s]on vivant » ! C'est donc avec un mélange de fausse modestie et de réelle humilité que Peter Higgs avait fui ce jour-là la horde de journalistes qui a envahi sa vie, à l'image du héros de notre roman. Pas pour longtemps : Higgs est, quant à lui, bien entré « dans l'édifice très éclairé », et sur l'estrade, il a bien prononcé son « discours Nobel »¹. Higgs, comme Englert, ont en effet été couronnés le 10 décembre 2013 à Stockholm.

Est-ce pour autant ce couronnement, si prestigieux soit-il, qui donne sens à ses travaux ? Ou bien sont-ce les applications potentielles de cette découverte qui motivent l'intérêt qu'on porte aujourd'hui à leur invention ? Ou plutôt le simple désir de comprendre, de distinguer le vrai du faux, bref, de « trouver la vérité » ? C'est ce à quoi je m'attacherai dans le présent article.

Le rôle du boson de Higgs est multiple : vers l'infiniment grand de la cosmologie, vers l'infiniment petit des constituants ultimes de la matière, et vers l'infini-

¹ The Nobel Banquet 2013, <http://www.nobelprize.org/ceremonies/archive/video/banquet/2013/index.html>.

niment complexe de l'ingénierie de la physique des particules d'une part, et de l'émergence de la vie d'autre part. C'est une histoire en soi. En très bref, ce boson responsable de la célèbre brisure spontanée de la symétrie électrofaible, brisure qui engendre des particules massives, c'est lui qui permet au soleil de fonctionner et à la vie d'apparaître. En d'autres termes, quoique le raccourci soit saisissant : sans lui, nous n'existerions pas.

Je voudrais ici nous faire avancer sur les sentiers plus ou moins obscurs de la science contemporaine, en détaillant par quelle méthode le boson a été découvert, et par là, illustrer les motivations des chercheurs et chercheuses, et voir quel sens donner à la recherche scientifique. Le petit roman évoqué en introduction indiquait trois pistes (parmi d'autres, sans doute) qui motivent la recherche scientifique : les applications, la reconnaissance, et la quête de vérité. Empruntons-les une à une.

Les applications de la science sont essentielles, assurément ; elles nourrissent la technique et irriguent la société, elles résolvent bien des problèmes, et à l'inverse elles en posent bien d'autres ; mais les applications ne sont pas la motivation première des chercheurs des disciplines fondamentales. Henri Poincaré l'a affirmé clairement : « Il suffit d'ouvrir les yeux pour voir que les conquêtes de l'industrie qui ont enrichi tant d'hommes pratiques n'auraient jamais vu le jour si ces hommes pratiques avaient seuls existé, et s'ils n'avaient été devancés par des fous désintéressés qui sont morts pauvres, qui ne pensaient jamais à l'utile, et qui pourtant avaient un autre guide que leur caprice »².

Au reste, nous sommes bien incapables à ce jour d'imaginer la moindre application au concept de boson de Higgs ! Mais qu'importe : une chose est sûre, s'il n'avait pas été découvert en 2012, on n'aurait aucune chance d'en élaborer une application, disons, en 2062, cinquante ans plus tard.

Prenez en effet l'exemple de l'électron : découvert en 1897, il a fallu attendre cinquante ans, 1947, pour que soit inventé le transistor, sa première application pratique. Et les exemples de ce genre abondent ! La recherche d'applications ne constitue donc pas la motivation profonde de la science fondamentale – même si elle est parfois utilisée comme argument pour convaincre les politiciens. (Une anecdote pour conclure sur ce point : un ministre britannique du XVIII^e siècle interroge Faraday sur les applications possibles de cette toute nouvelle découverte étrange, dénommée « électricité ». Celui-ci réplique : « Je n'en sais rien, mais je parie qu'un jour votre gouvernement la taxera »³).

Quant à la poursuite plus ou moins avide de reconnaissance institutionnelle, sous forme de prix, de primes ou de promotions, de gloire et de célébrité, elle ne saurait être retenue qu'en tant qu'adjuvant, certes parfois stimulant puissant, mais souvent parfaitement secondaire et collatéral. Représentons-nous ainsi le jeune Peter Higgs, à même pas 35 ans : il sue à grosses gouttes sur un article reprenant un

² Poincaré, H., *Science et méthode*, Paris, Flammarion, 2011.

³ Cette anecdote sans doute apocryphe est évoquée à propos de Sir Robert Peel, Premier ministre britannique, lors d'une visite des laboratoires de la Royal Society (dans les années 1820 vraisemblablement) sur l'utilité de la dynamo.

projet antérieur de publication, et qui vient d'être refusé. Il développe, complète, précise, et au détour du post-scriptum, il imagine, si j'ose dire presque « en passant », l'existence hypothétique d'un boson. Est-il raisonnable de penser qu'il se prête à tel labeur dans l'espoir d'obtenir le prix Nobel cinquante ans plus tard ? Assurément non : c'était la démarche intellectuelle qui le motivait, et le simple désir que ses idées soient diffusées et discutées, afin de faire progresser la manifestation de la vérité.

C'est donc cette quête de vérité qui, à elle seule, motive la recherche fondamentale et lui donne son sens. Non pas tant « l'art pour l'art », mais « la science pour la science », si l'on veut. La raison d'être des chercheurs est ailleurs que dans la quête de gloire ou de richesse : la curiosité, l'envie comprendre le monde qui nous entoure, le désir d'élaborer une explication rationnelle des phénomènes observés, voilà différentes façons de l'exprimer. La clé réside donc dans cette méthode scientifique, considérée par les savant·e·s comme le chemin menant à cette vérité. C'est pourquoi, afin de comprendre comment elle fonctionne, nous allons maintenant observer par quel processus l'invention théorique de 1964 est devenue une découverte expérimentale établie, et ce que cela signifie d'affirmer que l'existence du boson de Higgs est « scientifiquement prouvée ».

Selon les critères actuels, Higgs n'aurait sans doute aucune chance d'être publié... C'est dire à quoi cela tient : victime de l'adage de la pression sur le chercheur, *publish or perish*, le boson aurait alors sombré avec son créateur éponyme, et la face de la physique en eût été bien changée. Mais son article a été publié – et le boson découvert. Retraçant son histoire, nous y verrons à l'œuvre trois figures archétypiques de scientifiques : le théoricien, l'expérimentateur, l'instrumentateur.

Première étape, donc : un individu, Peter Higgs, « invente » (c'est le terme consacré) une nouvelle particule. Cette particule est la conséquence logique du mécanisme imaginé pour expliquer la brisure spontanée de la symétrie électrofaible, un mécanisme (mathématique) inventé de manière indépendante et simultanée (quoique sous une forme différente) par Robert Brout et François Englert, et qui porte leur nom à tous les trois, le mécanisme dit BEH : Brout – Englert – Higgs. Mais seul Higgs a évoqué dans son article l'existence concomitante de ce que l'on appelle dans le jargon de la physique contemporaine un « boson scalaire associé » ; et c'est pourquoi ledit boson se voit baptisé de son seul nom. Toutes ces réflexions s'inscrivent en 1964 dans une dynamique qui a impliqué de nombreux autres physiciens⁴. Retenons que, pour expliquer un phénomène physique, la brisure spontanée de la symétrie électrofaible, voici notre boson inventé par quelques cerveaux en ébullition.

Les expérimentateurs s'emparent alors progressivement de l'idée et imaginent des expériences plus ou moins cruciales pour déceler la bête. Et j'utilise à dessein

⁴ Voir Carroll, S., *Higgs, le boson manquant*, Paris, Belin, 2013, et Cohen-Tannoudji, G. ; Spiro, M., *Le boson et le chapeau mexicain*, Paris, Gallimard, 2013.

cette expression, “la bête”, puisque la bible du domaine, parue dès 1989, s’intitule *The Higgs Hunter’s Guide*, le Manuel du chasseur de Higgs⁵.

(De là à parler de chasse au bison de Higgs, il n’y a d’ailleurs qu’un pas, allègrement franchi par l’illustratrice Lison Bernet⁶).

Que trouve-t-on dans ce manuel, fort peu recommandable au néophyte ? Entre autres, la description de tous les modes possibles de désintégration du boson de Higgs en d’autres particules déjà connues, avec leur probabilité respective d’occurrence. Et tout cela aide le physicien expérimentateur à concevoir ses expériences : si le Higgs se désintègre en telle ou telle particule selon tel ou tel mode, alors il faut pouvoir les détecter de telle ou telle manière. Je n’en évoquerai qu’un seul : la désintégration du Higgs en quatre muons. Un très bon canal (c’est le terme usité), car une telle signature est facile à repérer, son rapport signal / bruit étant très bon – en d’autres termes, les processus autres que la désintégration du Higgs et qui possèdent la même signature sont relativement rares. On va donc pouvoir compter parmi les résultats expérimentaux, et comparer avec la prévision de la théorie : combien de fois prévoit-on la survenue de cette signature si le Higgs n’existe pas, et combien de fois s’il existe ? Ensuite, il suffit de faire la somme. Si c’est le second chiffre qui l’emporte, c’est que le Higgs existe. Sinon c’est qu’il n’existe pas. Facile !

La stratégie expérimentale semble donc facile, mais pour chasser le Higgs potentiellement créé par le LHC, il faut être dûment équipé. D’où les deux énormes détecteurs polyvalents construits et installés au CERN, ATLAS et CMS. Car chasser le Higgs sans eux, c’est comme traquer un colibri de nuit avec une sarbacane : bonne chance. C’est là qu’intervient la troisième figure, celle de l’instrumentateur, concepteur et réalisateur de tels instruments. Lesquels instruments seront exploités par les groupes d’expérimentateurs pour valider ou réfuter les modèles des théoriciens, pour peu qu’ils aient été proprement adaptés à l’observation.

(À vrai dire, la réalité de terrain est un peu plus complexe que ce “pas de deux” entre le théoricien et l’expérimentateur : il existe toute une gradation de nuances, depuis le théoricien le plus éthéré jusqu’à l’expérimentateur le plus bricoleur. Peter Galison⁷ souligne que les groupes expérimentaux possèdent leurs “propres” théoriciens, des théoriciens qui travaillent sur le concret, et non pas sur des considérations spéculatives extérieures, mais suffisamment proches de la spécificité d’une machine pour qu’ils puissent commencer à mettre les données dans une forme comparable aux résultats des modèles issus de la théorie. Du côté de la théorie aussi, on commence à considérer les “phénoménologistes”, dont le travail consiste à imaginer des conséquences expérimentalement vérifiables des théories, leurs variantes et leurs concurrentes. Schématiquement, plutôt que de la simple comparaison théorie ↔ expérience, on a plutôt affaire à une

⁵ Cité moins de 5 fois par an en moyenne jusqu’en 2012, il l’a été plus de 50 en 2013, environ 80 fois durant les trois premiers mois de l’année 2014, et des milliers de fois depuis. Le boson est tué, et c’est maintenant que semblent s’éveiller les chasseurs...

⁶ Site <http://www.lhc-france.fr/1-aventure-humaine/la-bd-du-lhc/>.

⁷ Galison, P., *Image & Logic*, Chicago, Chicago Univ. Press, 1997.

chaîne de comparaisons : théorie ↔ phénoménologie des théoriciens ↔ théorie des expérimentateurs ↔ expérience.)

C'est précisément ce que Bachelard appelait la « phénoménoteknik » : les instruments scientifiques sont pour lui des « théories matérialisées ».

À ce stade, revenons au comité Nobel et à son communiqué, que je vous redonne in extenso en français : le prix Nobel de physique 2013 est décerné conjointement à François Englert et à Peter W. Higgs pour « la découverte théorique d'un mécanisme contribuant à notre compréhension de l'origine de la masse des particules subatomiques, et qui a été récemment confirmée, grâce à la découverte de la particule fondamentale prédite, par les expériences ATLAS et CMS sur le grand collisionneur de hadrons du CERN »⁸. Les deux lauréats n'ont pas manqué de rendre un hommage appuyé aux travaux du CERN et des deux expériences, et c'est donc un long travail collectif qui est ainsi indirectement récompensé. Le travail de ceux que Bachelard désigne sous le magnifique terme de « travailleurs de la preuve »⁹.

Résumons : en 1964, quelques théoriciens inventent un mécanisme théorique supposant l'existence d'une nouvelle particule, le boson dit de Higgs. Le dit boson est intégré dans le Modèle Standard de la physique des particules. Des expérimentateurs élaborent des expériences susceptibles d'en prouver l'existence, en calculant les probabilités relatives de ses modes de désintégration. Puis des instrumentateurs imaginent d'une part une machine suffisamment puissante pour créer l'animal – c'est le collisionneur LHC ; et d'autre part deux détecteurs particulièrement réactifs et d'une acuité hors du commun, ATLAS et CMS, afin d'observer les traces de la désintégration spontanée du boson, les empreintes de la bête.

(Pourquoi tant de temps entre l'invention et la découverte, pourra-t-on légitimement s'interroger. Un demi-siècle, une paille ! C'est le temps de concevoir techniquement et d'organiser un tel effort financièrement, politiquement et en termes de conduite de projet. Je prends juste un exemple, qui sera parlant pour souligner la complexité récursive de la méthode scientifique : pour atteindre les champs magnétiques nécessaires, il fallait recourir à la technologie des aimants supraconducteurs. Laquelle n'a été développée que dans les années 1970, et réellement comprise qu'à partir de 1986. La supraconductivité est par ailleurs basée sur un effet quantique particulier, une brisure spontanée de symétrie découverte à la fin des années 1950. Laquelle avait inspiré par analogie, cela ne s'invente pas, l'un des théoriciens étudié par... Peter Higgs soi-même¹⁰ ! La supraconductivité, issue de la théorie des quanta, est à l'origine non seulement de la découverte expérimentale du boson, grâce aux aimants supraconducteurs, mais aussi de son invention théorique !)

⁸ Voir le développement proposé dans Klein, E. ; Depambour, G., *Idées de génies, 33 textes qui ont bousculé la physique*, Paris, Champs-Flammarion, 2021.

⁹ Bachelard, G., *Le rationalisme appliqué*, Paris, Les Presses universitaires de France, 1949.

¹⁰ Blundell, S., *La supraconductivité, 100 ans après*, Paris, Belin, 2011, p. 92.

La bête est donc enfin saisie, et le trophée arboré au fronton de la science en gloire le 4 juillet 2012. Comment fut-elle attrapée ? Quelle preuve de son existence a-t-on rapporté ? A-t-on pu flasher son visage ? Quel critère d'existence de cette évasive particule ?

La formulation de la découverte est ainsi formulée, à l'issue de deux publications de 30 pages de calculs et figures (et autant de pages consacrées à lister les près de 3000 auteurs pour chaque expérience, parmi lesquels votre humble serviteur au sein de la collaboration ATLAS) : « L'observation atteint une signification de 5,9 sigma, correspondant à une probabilité de fluctuation du bruit de fond de $1,7 \times 10^{-9}$, elle est donc compatible avec la production et la désintégration du boson de Higgs du Modèle Standard »¹¹.

Est-ce là une preuve bien convaincante ? Pourquoi ces presque six sigma et cette « signification », et en quoi sont-ils une preuve d'existence ? Et d'ailleurs, c'est quoi un « sigma » ? Et surtout, en quoi constituerait-il un critère universel ? (Et au reste, la science est-elle universelle... Vaste sujet s'il en est.)

Notre vieil homme du roman l'avait relevé fort subtilement : il s'agit de « tenir le probable pour faux, jusqu'à preuve du contraire ». Or, sigma, l'écart-type, est en statistique la « moyenne des écarts à la moyenne » ; c'est donc en fait une sorte de probabilité.

Tentons une explication simple et assez éclairante de ce que représente un sigma, inspirée des éclaircissements proposés par un physicien, ancien directeur général du CERN. « En physique des particules, le caractère significatif d'une observation est mesuré en termes d'écarts-types, en abrégé, sigma. L'écart-type mesure la probabilité qu'une observation soit due au hasard au lieu de signaler une découverte. Des effets de deux sigma sont susceptibles de se produire avec une régularité comparable à celle de deux jets de dé produisant deux six consécutifs. L'effet de trois sigma correspond à une probabilité de quelques millièmes qu'une observation soit due au hasard : il s'agit du point auquel il est généralement admis qu'une observation devient intéressante. Pour qu'il y ait découverte, il faut cependant cinq sigma ; à ce point, on considère qu'il y a moins d'une chance sur un million que l'observation soit l'effet du hasard »¹².

Retenons de ces explications « officielles » deux éléments fondamentaux.

Le premier élément, c'est qu'une telle découverte, dans le monde de la physique des particules contemporaine, ne s'obtient plus par une belle photographie d'un golden event, un « événement en or » qui montrerait l'animal en pleine course sur fond de chambre à bulles (c'était encore le cas dans les années 1960). Au XXI^e siècle, une découverte en physique des particules est fondée sur une accumulation statistique de données numériques : l'on récolte beaucoup, mais alors vraiment beaucoup de données, l'on reconstitue les événements dont elles sont la trace, l'on effectue un nombre considérable de calculs statistiques, et enfin, l'on regarde si une certaine somme de

¹¹ ATLAS Collaboration. Aad, G., et al., Observation of a New Particle in the Search for the Standard Model Higgs Boson with the ATLAS Detector at the LHC. Physics Letters B, Vol. 716, No 1, pp. 1-29, 2012. doi:10.1016/j.physletb.2012.08.020.

¹² Heuer, D., « Une fin d'année pleine de suspens », <http://cds.cern.ch/record/1416005?ln=fr>.

certaines événements est suffisante pour distinguer l'hypothèse « le boson de Higgs existe » de l'hypothèse « le boson de Higgs n'existe pas » (Pour paraphraser audacieusement Camus, c'est un peu « je récolte, donc nous sommons »...).

Au fil du temps, l'on a commencé par le stade de l'indice, ou du soupçon, à 3 sigma, dont l'intérêt peut retomber (ce fut le cas lors de la fin du LEP, en novembre 2000, où l'on avait atteint 2,8 sigma, lesquels se sont estompés ensuite, et à vrai dire, le signal n'était pas au bon endroit, ce que l'on ne sait que maintenant) ; puis l'on a atteint le stade de l'annonce de la découverte d'un boson « Higgs-like » (semblable au Higgs) lors de l'annonce du 4 juillet 2012) à environ 4,9 sigma : quasi cinq ! Puis l'on est parvenu à la preuve définitive de son existence (dès la mi-septembre et les articles cités plus haut) ; et enfin il fut démontré (à Moriond, en mars 2013) que les caractéristiques de ce « Higgs-like » étaient bien celles du boson de Higgs théorique du Modèle Standard, ce qui ouvrit définitivement la voie à l'attribution du Nobel.

C'est là que réside le deuxième élément fondamental, qui ne manquera sans doute pas d'étonner : le critère de vérité serait-il arbitraire ? Plus exactement, il est construit et négocié : c'est par convention qu'est fixé le seuil de découverte à 5 sigma. Pas 4, ni 6 ; 5. Alors, quelle sorte de preuve scientifique est-ce donc là ?

Tâchons de prendre un peu de recul sur cette méthode scientifique, en s'adonnant à un peu de philosophie des sciences, ce qui est sans doute une autre bonne façon de donner du sens à la recherche. Ce caractère conventionnel de l'établissement de la preuve n'est pas propre à la physique des particules, même s'il y est peut-être un peu mieux formalisé et plus visible. Le processus de validation des connaissances scientifiques, via les publications qui en sont la pierre de touche, est un processus de validation par les pairs, c'est-à-dire par les homologues.

Le savoir scientifique serait-il donc pour autant une construction purement conventionnelle, soumise au relativisme le plus appuyé, et sans réelle confrontation avec le réel ?

Je m'en tiendrai ici à quelques premiers éléments, sans doute pas aussi subtils et complexes qu'il serait nécessaire, mais qui nous seront suffisants à ce stade pour analyser la découverte du boson de Higgs. Il n'est pas encore temps de tirer les conclusions d'un travail en cours : comme le souligne Bachelard, « on ne pourra dessiner le simple qu'après une étude approfondie du complexe »¹³, et le complexe, c'est un peu long à étudier en profondeur.

La plupart des scientifiques estiment que « les connaissances scientifiques sont l'aboutissement d'une réflexion et d'une pratique rationnelles », et qu'en science « on ne croit à rien, on ne compare pas des opinions, on ne soumet pas un résultat au vote populaire »¹⁴; ce que l'on fait, c'est que l'on démontre, que l'on doute et réfute, que l'on vérifie et réplique, et que l'on corrige si nécessaire. La dimension rationnelle du travail est indéniable, et sans doute

¹³ Bachelard, G., *La philosophie du non*, Paris, PUF, 1940.

¹⁴ Balibar, S., *Chercheur au quotidien*, Paris, Seuil, 2014, p. 69.

indispensable pour la distinguer d'autres modes de production de connaissance du monde.

Mais est-il suffisant d'être rationnel pour être scientifique ? Considérons davantage la démarche scientifique comme une démarche collective, au cours de laquelle les scientifiques traquent systématiquement l'erreur possible, et progressent pas à pas dans l'établissement d'une représentation du monde commune, d'une *Weltanschauung* qui soit aussi conforme que possible, à un moment donné, aux phénomènes tels qu'observés à ce moment donné. Car les phénomènes aussi sont observés et obtenus à un moment donné, et leur qualité et leur précision évoluent au gré des progrès de l'instrumentation scientifique.

La science établit une description et une explication des phénomènes qui soit la plus plausible possible à un moment donné, et qui fasse consensus au sein de la communauté scientifique. Hubert Reeves aime à dire que « la science n'est pas le terrain de la vérité, mais le champ du plausible »¹⁵.

De fait, les vérités d'aujourd'hui sont les controverses d'hier, et les erreurs de demain. Victor Hugo l'a admirablement formulé : « La science est l'asymptote de la vérité. Elle approche sans cesse, et ne touche jamais »¹⁶.

Je propose en guise de synthèse un chemin vers la sagesse qui serait inspiré par la démarche de la recherche scientifique, au travers de trois étapes progressives : récolter des données, en tirer des informations, et les transformer en connaissance. Partir des données issues de l'observation des signaux émis par des phénomènes physiques, puis les transformer en informations élaborées à partir de l'interprétation de ces données, et enfin utiliser ces informations pour forger de la connaissance scientifique (théories, hypothèses, lois). Cette connaissance est validée à un moment donné, après confrontation avec les données et informations, par sa capacité à expliquer de manière plausible lesdites données et informations, et elle offre en retour un modèle pour filtrer les observations et interpréter les données.

Appliqué à notre cher boson, voir le tableau ci-dessous, au niveau instrumental, cette démarche se traduit schématiquement ainsi : les détecteurs récoltent des données, sous forme d'une position spatiale et d'une datation d'un signal électrique ou optique généré par le passage d'une particule : quelque chose est passé à tel endroit à tel instant. Puis les données sont traitées, soit par de l'électronique embarquée, soit par des puissants algorithmes tournant dans des fermes de milliers d'ordinateurs, pour produire une information : celle de l'existence et de la forme de la trajectoire d'une particule, présentant des caractéristiques géométriques particulières. Confrontées au contexte dans lequel cette particule évolue (à savoir la présence et la valeur vectorielle d'un champ magnétique, ainsi que la nature du matériau traversé), l'information sur la trajectoire devient, par reconnaissance de

¹⁵ Émission de France-Culture « La méthode scientifique », 25 février 2017.

<https://www.radiofrance.fr/franceculture/podcasts/la-methode-scientifique/lecon-de-cloture-par-hubert-reeves-2221540>.

Voir aussi <http://lecheneparlant.blogspot.com/2017/03/hubert-reeves-lultime-guerrier-de-la.html>.

¹⁶ Hugo, V., *William Shakespeare*, Première partie, Livre III "L'Art et la science", IV.

sa charge, de sa quantité de mouvement, de son énergie, une connaissance de la nature même de la particule ainsi détectée.

À un stade expérimental, les données sont constituées des connaissances du stade instrumental précédent : la nature des particules détectées. À partir de ces données, d'autres puissants algorithmes établissent une nouvelle information, celle de la fréquence respective de survenue de telle ou telle particule. Ces résultats sont ensuite comparées avec les probabilités d'occurrence qui sont issues de simulations (qui sont des modèles interprétatifs issus de la théorie du Modèle Standard de la physique des particules), et aboutissent à une connaissance : le boson de Higgs existe.

Cette connaissance sur l'existence du boson devient à son tour une donnée pour le théoricien, qui élimine ainsi toutes les élaborations théoriques fondées sur l'hypothèse de la non-existence dudit boson, ou celles qui supposaient que sa masse était par exemple supérieure à celle du quark top. L'existence du Higgs et ses caractéristiques quantiques mesurées, masse, spin, sont ensuite interprétées pour produire une information sur les nouvelles particules théoriquement prédites, par exemple sur les particules supersymétriques. Une nouvelle théorie, connaissance scientifique (encore hypothétique à ce stade), est alors élaborée ou affinée, et appliquée aux données initiales : ces nouvelles particules interagissent-elles avec le boson ? En entrevoit-on des indices expérimentaux ?

Et ainsi de suite, de manière récursive et complexe.

Théorie, expérience, instrument

	Instrument (Détecteur ATLAS)	Expérience (Analyse ATLAS et CMS)	Théorie (Physique)
Wisdom Savoir	Solutions optimales pour une sensibilité et une performance élevées	Stratégies et algorithmes améliorés	Progrès de la science, et de la technique
Knowledge Connaissance	Nature de la particule (charge, masse, spin)	Existence et masse du boson BEH	Prédictions théoriques des propriétés de nouvelles particules
Information	Reconstruction de la forme de la trajectoire d'une particule	Probabilité de son implication dans la désintégration du boson BEH	Contraintes sur les théories au-delà du Modèle Standard
Data Donnée(s)	Position spatiale et temporelle d'un signal électrique	Nature de la particule (charge, mass, spin)	Existence et masse du boson BEH

Couronnement d'un siècle de physique inauguré par l'année miraculeuse d'Einstein en 1905, le boson de Higgs pourrait ainsi, de manière symétrique, constituer le

socle sur lequel se construit le siècle suivant. Le boson tant recherché, conceptualisé voici 50 ans, a été découvert hier ; il devient objet d'étude dès aujourd'hui ; et le même boson sera demain instrument de mesure lui-même, étant potentiellement sensible aux particules élusives qui constituent l'énigmatique matière sombre.

Le travail est au reste déjà engagé, et les premiers articles qui fixent les premières limites aux propriétés de ces particules ont été publiés dès 2014¹⁷. Et jusque-là il est resté sans résultat : aucun indice expérimental d'une nouvelle physique au-delà du Modèle Standard n'a été décelé, on n'a pour l'instant rien trouvé, ou pour le dire plus exactement, on a trouvé qu'il n'y avait rien à trouver, ce qui n'est pas tout à fait la même chose d'ailleurs. Mais ce n'est pas fini ! On continue à puiser dans les données, à augmenter les énergies, les intensités et les luminosités, à accumuler les calculs et les simulations. Cycle sans fin, mouvement perpétuel, l'aventure scientifique et humaine continue. La fièvre des particules n'est pas près de tomber.

Et la sagesse dans tout cela ? On peut la voir comme une synthèse des connaissances, qui aboutit à cette représentation du monde, à cette cosmogonie cosmologique qui permet de comprendre le lien intime entre physique des particules et astrophysique, entre infiniment grand et infiniment petit, lien tissé par l'infiniment complexe.

Peut-être la sagesse consiste-t-elle surtout à saisir que la vérité n'est jamais acquise, et que le seul élément de certitude scientifique tient dans la démarche elle-même. Hugo, encore lui, l'a saisi d'une formule extraordinaire : « La science cherche le mouvement perpétuel. Elle l'a trouvé ; c'est elle-même. » Après tout, n'est-ce pas la science elle-même qui a établi que toute connaissance est à jamais indéterminée (Heisenberg et son principe), incomplète (Gödel et son théorème) et autoréférente¹⁸ (Kant et sa Critique de la raison pure : « C'est notre faculté de connaître qui organise la connaissance, et non pas les objets qui la déterminent ») ?

Arrivé à ce point, notre réflexion pourrait s'enfoncer profondément dans les sous-bois sur ces Holzwege, ces chemins qui semblent ne mener nulle part¹⁹. Le voyage que nous avons entrepris nous fait longer des abysses conceptuellement aussi vertigineux que ceux de l'infiniment petit, de l'infiniment grand et de l'infiniment complexe réunis... Avancer davantage requiert des approfondissements qui seront l'objet de travaux ultérieurs. J'escompte y faire partager mon affection pour Bachelard, et sur la manière dont il dépasse de manière admirable la tension dialectique entre réalisme et rationalisme. Il faudra aussi présenter les épistémologies constructivistes, qui revisitent de manière radicale les perspectives traditionnelles des modes d'acquisition de la connaissance. La matière à réflexion ne manque point.

L'on dit communément que "c'est vrai, puisque c'est scientifiquement prouvé". J'espère vous avoir quelque peu sensibilisé au fait que la preuve scientifique tient davantage de la marche en avant pétrée de doute que de la vérité intangible et

¹⁷ ATLAS collaboration, Aad et al., Search for Dark matter in Events with a Hadronically Decaying W or Z Boson and Missing Transverse Momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS Detector, Phys. Rev. Letters, 112, 041802, 2014.

¹⁸ Voir par exemple Gigand, G., *La trialectique, un outil transdisciplinaire*, Paris, Ed. Sociales, 2010.

¹⁹ Allusion à Heidegger, M., *Holzwege : chemins qui ne mènent nulle part* [1950], Paris, Gallimard, 1986.

éternelle : ce qui est scientifiquement prouvé ne l'est en fait qu'ici et maintenant et, n'est scientifique que ce qui est réfutable. Impermanence de la connaissance, fragilité de la vérité, dynamique de la pensée. Citons Gonseth, ce mathématicien et philosophe suisse contemporain de Bachelard : « La recherche ne serait pas ce qu'elle est si elle ne pouvait pas être appelée à témoigner contre elle-même. [...] Cette mise en accusation continue de l'ancien par le nouveau n'a rien d'arbitraire, elle est comme la respiration même de la recherche »²⁰. Cette respiration-là gagnerait assurément à ne pas être réservée à la recherche scientifique...

Comme l'a écrit Saint-Bernard, « que ceci soit la fin du livre – mais non la fin de la recherche »²¹.

Bertrand Nicquevert
en congé spécial du CERN, Genève, Suisse,
détaché au Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley USA
chercheur associé à l'ENS Paris-Saclay
Bertrand.Nicquevert@cern.ch

Références

- ATLAS collaboration, Aad et al., Search for Dark matter in Events with a Hadronically Decaying W or Z Boson and Missing Transverse Momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS Detector, Phys. Rev. Letters, 112, 041802, 2014 ;
- ATLAS Collaboration. Aad, G., et al., Observation of a New Particle in the Search for the Standard Model Higgs Boson with the ATLAS Detector at the LHC. Physics Letters B, Vol. 716, No 1, pp. 1-29, 2012 doi:10.1016/j.physletb.2012.08.020 ;
- Bachelard, G., *La philosophie du non*, Paris, PUF, 1940 ;
- Bachelard, G., *Le rationalisme appliqué*, Paris, Les Presses universitaires de France, 1949 ;
- Badaut, F., Busato, E., Madar, R., Orloff, J., *Sur La route du Boson*, Paris, Ed. Reflets d'ailleurs, 2015.
- Balibar, S., *Chercheur au quotidien*, Paris, Seuil, 2014 ;
- Bizot, V., *Mon couronnement*, Arles, Actes Sud, 2011 ;
- Blundell, S., *La supraconductivité, 100 ans après*, Paris, Belin, 2011 ;
- Carroll, S., *Higgs, le boson manquant*, Paris, Belin, 2013 ;
- Cohen-Tannoudji, G. ; Spiro, M., *Le boson et le chapeau mexicain*, Paris, Gallimard, 2013 ;
- Duby, G., *L'art cistercien*, Paris, Flammarion, 1998 ;
- Émission de France-Culture « La méthode scientifique », 25 février 2017 ;
- Gagnon, P., *Qu'est-ce que le boson de Higgs mange en hiver*, Éd. Multimondes, 2015.
- Galison, P., *Image & Logic*, Chicago, Chicago Univ. Press, 1997 ;
- Gigand, G., *La trialectique, un outil transdisciplinaire*, Paris, Ed. Sociales, 2010 ;
- Gonseth, F., *Mon itinéraire philosophique*, Paris, Ed. de l'aire, 1994 ;
- Heidegger, M., *Holzwege : chemins qui ne mènent nulle part* [1950], Paris, Gallimard, 1986 ;
- Heuer, D., « Une fin d'année pleine de suspens », [http://cds.cern.ch/record/1416005?ln=fr; https://www.radiofrance.fr/franceculture/podcasts/la-methode-scientifique/lecon-de-cloture-par-hubert-reeves-2221540](http://cds.cern.ch/record/1416005?ln=fr;https://www.radiofrance.fr/franceculture/podcasts/la-methode-scientifique/lecon-de-cloture-par-hubert-reeves-2221540);
- Hugo, V., *William Shakespeare*, Première partie, Livre III "L'Art et la science", IV ;

²⁰ Gonseth, F., *Mon itinéraire philosophique*, Paris, Ed. de l'aire, 1994, pp. 19-20.

²¹ Duby, G., *L'art cistercien*, Paris, Flammarion, 1998 [Arts et Métiers Graphiques, 1976], p. 197.

- Klein, E. ; Depambour, G., *Idées de génies, 33 textes qui ont bousculé la physique*, Paris, Champs-Flammarion, 2021 ;
- Levinson, M., Kaplan, D., Le film *Particle Fever*, 2014, <http://particlefever.com>
- Poincaré, H., *Science et méthode*, Paris, Flammarion, 2011.