

L'invention dans les sciences théoriques*

LOUIS DE BROGLIE

Au premier abord, il peut sembler qu'il y ait une différence fondamentale entre la découverte d'un fait expérimental, dans le monde physico-chimique, par exemple, et l'invention d'une théorie nouvelle dans le domaine des mathématiques pures ou dans celui de la philosophie naturelle. Dans le premier cas, en effet, avant la découverte, le fait à découvrir a beau être plus ou moins dissimulé sous le rideau des apparences, il est cependant là déjà et sa découverte n'est que la mise au jour d'un trésor caché. Dans l'invention théorique, il semble qu'il y ait vraiment création par la force de l'esprit de quelque chose d'entièrement nouveau, construction d'un édifice intellectuel qui ne préexistait d'aucune façon. Les mots même de "découverte" et "d'invention" qui viennent tout naturellement sur les lèvres quand on veut distinguer l'un et l'autre cas, semblent faits pour marquer la différence qui les séparent. La découverte, c'est l'acte de soulever le voile qui cache la réalité inconnue, mais préexistante ; l'invention, c'est essentiellement la création par la force de l'imagination, à tel point que le terme peut même être pris en mauvaise part et signifier création par l'imagination de chimères et de mensonges.

Mais, si tranchée que paraisse à première vue la distinction entre la découverte expérimentale et l'invention théorique, une étude plus attentive ne tarde pas à l'atténuer considérablement ; car elle montre que la découverte des faits expérimentaux, du moins dans la science actuelle, est à bien des égards une invention tandis que l'invention théorique est en

* Article extrait de *Science, l'Encyclopédie annuelle*, no 14, Centre International de Synthèse, Paris, 1937.

quelque mesure une découverte. C'est là ce que je voudrais commencer par expliquer en quelques mots.

Dans la science d'aujourd'hui qui a depuis longtemps dépassé le stade de la simple observation des phénomènes couramment visibles autour de nous, la découverte expérimentale est constamment guidée par des conceptions théoriques. Si ces conceptions ne sont pas toujours en état de nous faire prévoir exactement les phénomènes à découvrir, ce sont elles cependant qui indiquent à l'expérimentateur dans quelle voie il doit orienter ses recherches et comment il doit en interpréter les résultats. La plupart du temps, ce qui fait la valeur d'un résultat expérimental, c'est la manière dont nous l'interprétons. Quel intérêt aurait en lui-même le fait que dans une atmosphère sursaturée d'humidité nous apercevions dans certaines circonstances un alignement de gouttelettes de vapeur condensée dessinant une courbe ? Bien peu, évidemment, si nous nous bornions à la constatation du phénomène brut. Mais si nous interprétons la courbe dessinée par les gouttelettes de vapeur comme manifestant à nos yeux le trajet suivi par une particule à travers le gaz et si la théorie nous permet de déduire d'après la forme de la trajectoire la charge électrique de la particule ou telle autre indication sur sa nature, ce qui n'était qu'un fait en apparence quelconque peut devenir un renseignement d'une grande valeur scientifique et servir de base à quelque importante découverte. En fait, c'est par des observations de ce genre faites dans des chambres à détente de Wilson qu'ont été établies maintes propriétés importantes de particules antérieurement connues telles qu'électrons et protons, puis qu'a été découverte l'existence de particules jusqu'alors ignorées telles que neutrons ou électrons positifs.

Les conceptions théoriques, où l'imagination scientifique intervient toujours plus ou moins, sont donc indispensables pour l'interprétation des résultats de l'expérience ; mais leur rôle ne se borne pas là, car il est évidemment nécessaire que le dispositif expérimental ait été combiné de façon à pouvoir fournir les apparences dont on pense pouvoir tirer par une judicieuse interprétation de précieux renseignements. L'expérimentateur doit donc, avant d'entreprendre son travail, se livrer à un effort d'imagination où, combinant les prévisions suggérées par la théorie et les ressources fournies par la technique des laboratoires, il fait le plan de son expérience et invente ou perfectionne la méthode qu'il va employer. Et voilà pourquoi la découverte expérimentale, au moins dans la science affinée de nos jours, a pour condition l'activité créatrice de notre pensée et possède par là même les caractères d'une invention.

Faisant nécessairement intervenir dans sa préparation et dans son interprétation l'imagination théorique guidée et contrôlée par la raison, elle est loin d'être une passive constatation et porte la marque de notre activité spirituelle.

Mais, remarque peut-être plus surprenante, si la découverte expérimentale est en un sens une invention, par contre la création et l'invention dans le domaine de la science théorique possèdent à certains égards les caractères de la découverte. Pour mettre en lumière cette idée un peu subtile, il nous est nécessaire d'analyser la façon dont s'opère la création théorique et les stades successifs que traverse la pensée du théoricien inventeur. Chaque fois que l'on aborde l'étude d'un sujet, on se trouve nécessairement en présence d'un certain "état de la question". Certains faits sont bien connus, certaines interprétations bien établies, certaines idées généralement admises, certaines difficultés enfin ou franchement reconnues ou assez souvent habilement dissimulées. Or, parfois, il arrive qu'en étudiant un certain domaine de connaissances scientifiques, le théoricien inventeur éprouve une sorte de malaise qui va progressivement en croissant : il a le sentiment, peu à peu, de plus en plus net, qu'il manque dans nos interprétations un élément essentiel, qu'une idée fondamentale a été méconnue sans laquelle une véritable compréhension des faits est impossible. Les difficultés rencontrées par les théories antérieures lui apparaissent alors non plus comme des anomalies qu'une comparaison plus approfondie avec l'ensemble des conceptions reçues fera disparaître mais, au contraire, comme des symptômes éclatants de l'insuffisance de ces conceptions. A son attention dès lors éveillée s'impose une foule de petits faits épars et sans liens apparents entre lesquels il soupçonne maintenant une parenté cachée dont une théorie fondée sur des idées entièrement nouvelles, devrait pouvoir rendre compte. Tel le géologue parcourant du regard une vaste contrée formée d'alluvions récentes et y voyant émerger çà et là quelques pointements de granit soupçonne, soudain, que ces îlots épars sont les affleurements à la surface d'une couche profonde de terrains anciens qui forme le socle de toute la région et en explique la structure. Ainsi de petits faits qui ne semblaient qu'accidents ou anomalies apparaissent tout à coup comme les signes extérieurs d'une unité fondamentale jusqu'alors méconnue.

Prenons un exemple dans la Physique théorique. Quel lien un esprit superficiel eût-il pu apercevoir entre les faits que la distribution spectrale du rayonnement d'équilibre thermique n'obéit plus pour les basses températures ou les hautes fréquences aux prévisions des théories

classiques, que des écarts par rapport à la loi de Dulong et Petit se manifestent à la température ordinaire pour les corps solides très durs comme le diamant, qu'il existe une limite supérieure très nettement marquée pour le spectre continu émis par l'anticathode d'un tube à rayons X alimenté sous tension constante ou, enfin, qu'une relation linéaire relie l'énergie cinétique des électrons s'échappant d'une substance frappée par une radiation monochromatique à la fréquence de cette radiation ? Et cependant nous savons aujourd'hui que tous ces faits sans rapport apparent sont, comme bien d'autres encore, des aspects d'une seule grande réalité autrefois ignorée : l'existence du quantum d'Action.

Supposons donc, pour en revenir à notre sujet, que notre théoricien inventeur ait, grâce à un flair particulier, deviné qu'il y avait dans tel domaine un grand progrès à réaliser et qu'il soit ensuite parvenu à trouver les idées essentielles qui vont permettre ce progrès. Nous reviendrons tout à l'heure sur les circonstances où s'opère le plus souvent cet acte d'invention, mais pour l'instant nous le supposons effectué. Il arrive alors une chose fort remarquable : l'inventeur a tout à coup le sentiment très net que les conceptions auxquelles il vient de parvenir, dans la mesure où elles sont exactes, existaient déjà avant d'avoir jamais été pensées par le cerveau humain. Les difficultés qui l'arrêtaient, les anomalies qui l'intriguaient n'étaient, il s'en aperçoit maintenant, que le signe d'une vérité cachée, mais déjà existante. Tout s'est passé comme si en inventant des conceptions nouvelles, il n'avait fait que déchirer un voile, comme si ces conceptions enfin atteintes existaient déjà, éternelles et immuables, dans quelque monde Platonicien des Idées pures. Le fait même de les avoir cherchées lui paraît s'expliquer par une sorte de pressentiment de leur existence, pressentiment qui pourrait évoquer la phrase mystique : "Vous ne me chercheriez pas si vous ne m'aviez pas déjà trouvé". Et voilà pourquoi je disais qu'en un certain sens, l'invention dans la science théorique a le caractère d'une découverte, mais c'est une découverte dans le monde de l'esprit.

Abandonnant maintenant cette comparaison entre découverte et invention, nous allons examiner de plus près comment apparaissent à l'esprit du théoricien inventeur les conceptions nouvelles et originales. Nous l'avons dit plus haut, il y a d'abord une sorte de période d'incubation où, progressivement, en approfondissant l'état de la question étudiée, on se rend compte des difficultés à lever, des lacunes à combler et aussi des analogies à expliquer, des parentés réelles ou apparentes à élucider. Peu à peu, et en grande partie dans les profondeurs du subconscient, se forment les idées directrices et s'organisent

les courants de pensée qui vont orienter le travail de création. Puis, soudain, généralement avec une grande brusquerie, se produit une sorte de cristallisation : l'esprit du chercheur aperçoit en un instant, avec une grande netteté et d'une manière dès lors parfaitement consciente, les grandes lignes des conceptions nouvelles qui s'étaient formées obscurément en lui et il acquiert d'un seul coup l'absolue certitude que la mise en œuvre de ces nouvelles conceptions va permettre de résoudre la plupart des problèmes posés et d'éclairer toute la question en mettant bien en lumière des analogies et des harmonies ignorées jusque-là. Bien souvent cette étape essentielle de la découverte théorique ne se produit point pendant une période de travail. Certes, c'est en travaillant à son bureau ou à son tableau noir que le savant théoricien peut scruter à fond les questions qui l'intéressent et en étudier minutieusement les divers aspects, mais il semble que la tension nerveuse provoquée chez lui par cet effort tend plutôt à empêcher cette réorganisation spontanée des idées, cette sorte de tassement pathologique, dont jaillit tout à coup la lumière. C'est plutôt dans une période de repos ou de détente, en se promenant par exemple, que l'on aperçoit soudain l'idée vainement cherchée dans l'ardeur de l'étude : on l'avait inutilement poursuivie sans pouvoir l'atteindre pendant de longues heures et la voilà qui, sortant du subconscient où elle s'est lentement formée, vient spontanément à vous au moment où on ne la cherchait plus. Ce fait singulier a été plus d'une fois signalé par des savants illustres : Henri Poincaré, notamment, dans son article sur l'invention mathématique (qu'on trouve reproduit dans "Science et Méthode"), en a donné de curieux exemples tirés de son expérience personnelle.

Il ne faudrait évidemment pas en conclure, pour la plus grande joie des paresseux, qu'il est bien inutile de travailler, que les découvertes viennent d'elles-mêmes et que pour les faire, il suffit d'aller se promener. Si, souvent, le fruit de notre effort s'offre à nous pendant une période de repos ou de détente, c'est qu'il a été longuement mûri par l'étude et la méditation.

Continuons notre analyse du développement de l'invention théorique. Nous supposons que le grand pas a été fait, que les principes nouveaux dont la lumière va jaillir ont été clairement aperçus par le théoricien novateur. Malgré la joie que cette découverte lui procure, il s'en faut qu'il soit alors au bout de ses peines. Il lui faut maintenant tirer de ces principes nouveaux tout ce qu'ils peuvent fournir : il lui faut patiemment développer les raisonnements et dévider les formules par lesquels

s'exprime le contenu, souvent presque inépuisable, de l'idée directrice. Il lui faut patiemment comparer les conséquences déduites des raisonnements et les prévisions extraites des formules avec l'ensemble des faits réels. Labeur ardu, parfois même ingrat, où l'on rencontre mille petites difficultés de détail, où l'on doit éviter maints pièges, où l'on doit vingt fois sur le métier remettre son ouvrage pour le polir et le repolir sans cesse. Au cours de ce travail, le chercheur scrupuleux se fait à lui-même des objections, les examine, les classe soit comme peu importantes, soit au contraire comme sérieuses. Peu à peu, tout en vérifiant et en précisant ses idées nouvelles, il en aperçoit aussi les limites ; car il n'est pas de grande offensive victorieuse de la science qui, après avoir annexé de vastes territoires, ne viennent tôt ou tard se heurter aux "positions de repli" de l'inconnu. Aucune théorie, si fructueuse soit-elle, ne peut tout expliquer : il reste toujours un certain nombre de faits incompréhensibles ou troublants pour nous avertir qu'au delà des conquêtes nouvelles il y a encore bien d'autres terres à explorer.

Et puis, plus la science progresse, plus ses théories doivent entamer des couches profondes de la réalité : il en résulte que nous sommes forcés d'introduire dans nos théories des conceptions de plus en plus éloignées de celles que nous suggérait l'expérience vulgaire. Alors, tandis que certaines idées radicalement nouvelles nous permettent, nous le constatons, d'expliquer des faits naguère incompréhensibles, ce sont ces idées de base elles-mêmes que souvent nous ne sommes plus sûrs de bien comprendre et de maîtriser dans toute leur étendue. C'est là un point intéressant qu'il me paraît utile d'illustrer par quelques exemples.

Quand la Physique de la fin du XIX^e siècle a découvert l'électron, bien des phénomènes ont pu être expliqués grâce à l'existence et aux propriétés de ce corpuscule élémentaire : on sait, en particulier, quels immenses services a rendu la théorie électronique de Lorentz. Mais si l'électron nous a servi à comprendre beaucoup de choses, nous n'avons jamais bien compris l'électron lui-même. Comment, en effet, cette petite boule d'électricité d'un seul signe n'explose-t-elle pas sous l'action des répulsions électriques mutuelles de ses parties. Quelle peut être l'origine de cette mystérieuse pression imaginée par Henri Poincaré qui assurerait sa stabilité ? Si l'électron est ponctuel, comment son énergie interne n'est-elle pas infinie ? Et s'il est étendu, comment nous figurer sa structure interne, car, ayant expliqué l'électricité par l'électron, nous ne pouvons plus sans cercle vicieux expliquer l'électron par l'électricité ? Telles sont les questions que la Physique au temps de Lorentz a dû

laisser sans réponse et qui le sont encore à l'heure actuelle où elles se posent, d'ailleurs, un peu différemment.

Passons à un autre exemple. Tout à l'heure, nous rappelions comment la merveilleuse hypothèse introduite par Planck, celle de l'existence du Quantum d'Action, nous avait fait comprendre la véritable nature d'un grand nombre de phénomènes inexplicés et montré leur parenté jusqu'alors cachée. Mais, ici encore, ce Quantum d'Action dont la découverte nous a fait comprendre tant de faits mystérieux, nous ne le comprenons guère. Son existence exprime une solidarité entre l'aspect spatio-temporel des phénomènes et leur aspect dynamique, solidarité qui non seulement était ignorée de la science classique, mais qui, aussi, il faut bien l'avouer, est restée à peu près lettre close pour notre raison. Nous ne voyons aucunement, même aujourd'hui, pourquoi l'énergie d'un mouvement et sa durée, la quantité de mouvement d'un mobile et l'extension spatiale où il évolue, sont des choses si intimement liées que nous n'avons pas le droit de les dissocier et des les considérer isolément. Nous sommes sûrs cependant qu'il en est bien ainsi dans la réalité, nous savons traduire ces circonstances dans nos théories, mais franchement nous ne comprenons pas bien ce que cela veut dire.

Plus récemment encore, le développement de la Mécanique ondulatoire nous offre une illustration nouvelle du même fait. En posant à la base de ses explications le dualisme des ondes et des corpuscules, elle nous a ouvert de vastes horizons : elle nous a révélé l'analogie profonde de phénomènes qui paraissaient entièrement différents comme la progression des corpuscules et la propagation des ondes ; elle nous a permis de prévoir et d'interpréter des faits tout à fait inattendus comme la diffraction des électrons par les cristaux ; elle a jeté un flot de lumière sur la signification des états quantifiés des édifices atomiques en nous montrant qu'ils peuvent s'interpréter comme analogues aux états stationnaires d'un système vibrant ; en un mot, elle a entièrement renouvelé la Physique atomique. Et cependant, ici, de nouveau, l'idée de base, si fructueuse et si bien vérifiée qu'elle ait été, reste par bien des côtés enveloppée d'une certaine obscurité. Le dualisme des ondes et des corpuscules n'est plus douteux : nous savons l'exprimer en formules précises où apparaît le quantum d'Action et de ces formules nous tirons d'admirables conséquences. Mais les images que nous nous faisons des deux termes de ce dualisme, de l'onde et du corpuscule, sont devenues beaucoup plus floues que par le passé. Le corpuscule n'est plus un petit objet bien défini et son existence ne se manifeste plus pour nous, d'après

la nouvelle théorie, que par le caractère discontinu et localisé de ces manifestations successives. Quant à l'onde, elle n'est plus en Mécanique ondulatoire la vibration de quelque milieu plus ou moins subtil : elle a revêtu un caractère symbolique et mathématique de plus en plus accentué. Ainsi chaque synthèse nouvelle, en nous faisant pénétrer plus avant dans les harmonies du monde physique, nous apprend aussi combien les éléments mêmes de nos interprétations dépassent notre intuition et combien nous parvenons plus aisément à établir des relations entre ces éléments qu'à en comprendre entièrement la nature.

Ces quelques exemples permettent d'apercevoir aisément pourquoi, après la réalisation d'une découverte théorique, à l'immense joie de mieux connaître se mêle toujours, chez son auteur, un léger sentiment d'amertume : celui de constater en fin de compte le caractère nécessairement fragmentaire et limité du progrès réalisé. Celui qui a créé une théorie nouvelle est aussi le plus souvent celui qui en aperçoit le mieux les lacunes et les obscurités et en connaît le mieux les bornes. C'est pourquoi parfois des disciples imprudents ou aveuglés par un enthousiasme sans discernement transforment en dogme rigide et définitif ce qui, à l'esprit plus critique du maître, paraissait seulement un des chaînons incomplets et provisoires dans la chaîne sans fin des tentatives et des approximations successives réalisées par la pensée scientifique au cours de sa marche en avant.

Peut-être vaut-il mieux, d'ailleurs, que la joie de découvrir ne soit jamais complète, que le léger sentiment d'amertume dont je parlais tout à l'heure vienne toujours nous rappeler que l'effort doit succéder à l'effort. Voir après une importante progression se dresser devant nous de nouveaux obstacles ne doit pas, après tout, nous décourager, car si l'obstacle représente pour nous un nouvel et pénible assaut à tenter, il représente aussi la possibilité de victoires futures.

Je ne puis terminer cet exposé sans dire encore quelques mots du rôle que joue souvent le sentiment esthétique dans l'invention des théories. Le but des théories scientifiques est d'interpréter les phénomènes et de traduire leurs relations mutuelles. Au premier abord on ne voit pas bien comment le sentiment esthétique peut intervenir en pareille matière. Néanmoins, c'est un fait curieux, mais indéniable, que ce sentiment sert souvent de guide dans l'élaboration des théories de la philosophie naturelle. Une doctrine qui parvient d'un seul coup à réaliser une vaste synthèse en montrant l'analogie profonde de phénomènes en apparence étrangers les uns aux autres produit incontestablement sur l'esprit du

théoricien une impression de beauté et l'incline à croire qu'elle renferme une grande part de vérité. Il ne s'agit pas ici de la fameuse "économie de pensée" dont on a, à mon avis, un peu exagéré l'importance. Assurément une large théorie synthétique, en renversant les barrières qui séparent des régions différentes de nos connaissances et en rattachant toute une poussière de faits à une même idée centrale, peut réaliser une économie de pensée, mais ce point de vue plutôt pratique n'a rien à voir avec le sentiment artistique qui est essentiellement désintéressé. De plus, nombreuses sont aujourd'hui les théories de la Philosophie naturelle qui, par leur caractère élevé et leur complexité ne constituent nullement des économies de pensée, mais entraînent, au contraire, de grandes dépenses de pensée et n'en sont pas moins des œuvres admirables. Leur beauté ne vient pas de ce qu'elles sont simples ou compendieuses, mais de ce qu'elles nous révèlent une harmonie cachée derrière la diversité des apparences, de ce qu'elles nous permettent de ramener la multiplicité des phénomènes à une sorte d'unité organique.

Il y aurait ici matière à de nombreuses comparaisons avec les œuvres d'art au sens ordinaire du mot. Ce qui fait la beauté d'une œuvre d'art, ce n'est pas la simplicité de ces parties, c'est plutôt une sorte d'harmonie globale qui donne à l'ensemble un aspect d'unité et d'homogénéité malgré la complication parfois très grande des détails. Les monuments du style gothique ou du style arabe, par exemple, si l'on examine les finesses de leur structure, présentent souvent une extrême complexité, mais de leur ensemble se dégage une impression d'unité organisée qui fait apparaître l'œuvre entière avec ses innombrables aspects locaux comme un tout solidaire et indivisible, comme une sorte de condensation sous forme matérielle d'un seul élan de la pensée. La beauté des théories scientifiques nous paraît essentiellement de la même nature : elle s'impose quand, dominant sans cesse les raisonnements et les calculs, se retrouve partout une même idée centrale qui unifie et vivifie tout le corps de la doctrine.

Mais, dans cette question de la beauté propre aux théories, le point le plus curieux me paraît être le suivant : comment peut-il se faire que la beauté ou l'élégance d'une théorie soit souvent un signe de leur valeur et de leur exactitude ? Il me paraît, en effet, certain que le travail du théoricien est très souvent orienté et guidé par le sentiment esthétique dont nous parlons. Certes, on ne saurait prétendre qu'une belle théorie est nécessairement vraie et ce serait s'exposer à de graves mécomptes que d'adopter systématiquement un tel critérium pour juger les théories. Néanmoins, nous avons une certaine tendance instinctive à admettre

qu'une théorie dont la beauté nous frappe a des chances d'être vraie et il semble bien que très souvent cette intuition ne soit pas trompeuse. Est-ce là une illusion de notre esprit qui, involontairement, projette ses propres tendances sur les explications qu'il cherche à construire des phénomènes naturels ? Ou faut-il voir la preuve de quelque mystérieuse concordance entre notre sentiment esthétique et la nature profonde des choses justifiant l'adage philosophique que le Beau est la splendeur du Vrai ? Je ne veux point tenter de résoudre ces questions, mais je ferai à ce sujet une remarque. Toute l'œuvre de la science – tout au moins de la science théorique, de celle qui ne se borne pas à la simple observation des faits, mais cherche à les interpréter – repose sur le postulat suivant : "Il est possible d'obtenir des interprétations, au moins partielles, de la réalité physique en s'appuyant sur les règles de notre raison". Or, ce postulat, que l'on admet généralement sans discussion, est au fond d'une hardiesse extrême. En affirmant ainsi qu'il existe une certaine concordance entre notre raison et les choses, on s'avance peut-être presque autant qu'en admettant la valeur du sentiment esthétique comme guide sur le chemin de la vérité. Et il y a beaucoup plus de mystère qu'on ne le croit souvent dans le simple fait qu'un peu de science est possible.

Mais ce serait trop s'avancer pour le physicien que je suis de se mettre à disserter sur les rapports du Vrai et du Beau sans compter que, pour compléter une trinité bien connue de la Philosophie classique, il faudrait y adjoindre le Bien et ceci risquerait vraiment de m'entraîner singulièrement loin de mon sujet. Je m'arrêterai donc ici. Je ne sais si j'ai traité mon sujet comme vous souhaitiez qu'il fût traité. Si j'ai été inférieur à ma tâche, vous m'en excuserez en songeant que j'ai plus l'habitude de chercher des théories scientifiques que d'étudier comment on les cherche.