

L'expérimentation permet-elle de valider les hypothèses physiques ?*

Léo Vacher

2021

La physique contemporaine, considérée comme la "reine des sciences empiriques", est un édifice fondé par essence sur la pratique expérimentale ou expérimentation. L'expérimentation est aujourd'hui plus que jamais considérée comme la pierre angulaire de la démarche scientifique et est fortement valorisée comme source certaine (voir unique) d'acquisition du savoir. Nous nous demanderons ici si elle permet ou non de valider des propositions logiques sur la nature du monde matériel : les hypothèses physiques. Nous essayerons de clarifier le problème dans une première partie avant d'essayer d'y apporter des éléments de réponse en un deuxième temps.

L'expérimentation, au sens moderne du terme, telle qu'elle a été définie et motivée comme cruciale dans les milieux intellectuels post-révolution scientifique du 17^{ème} siècle mais aussi plus récemment par Claude Bernard [7], Francis Bacon [5] ou Auguste Comte (voir e.g. [9]), est l'observation contrôlée et préméditée des phénomènes visant à mettre en avant l'impact de certaines variables pertinentes que l'on peut isoler. Pour assurer la cohérence de l'édifice scientifique, les conclusions et résultats qui en découlent doivent idéalement être reproductibles, indépendants de l'expérimentateur et universels en ce qu'ils sont indépendants du temps et du lieu (en supposant toutes choses égales par ailleurs)¹.

Essayons tout d'abord de comprendre comment l'expérimentation entretient un lien avec la théorie physique en suivant la démarche proposée par l'*Empirisme logique*. Ce courant de pensée est représenté par les cercles de Vienne et de Berlin au début du XX^{ème} siècle avec des philosophes comme Rudolf Carnap ou Gustav Hempel. Une théorie physique est comprise comme un ensemble de propositions logiques élémentaires, les hypothèses physiques, énonçant des principes fondamentaux de la nature. Une telle proposition peut être donnée par le principe d'universalité de la chute libre (principe d'équivalence faible), au fondement de la théorie de la relativité générale (RG)² :

"P = Tous les corps tombent de la même manière dans le vide indépendamment de leur masse et de leur constitution."

Ces propositions élémentaires servent d'axiomes de base à tout un système logique, la théorie, on peut ainsi *déduire* de celles-ci des sous propositions particulières qui devront être vraies dans des situations expérimentales à l'aide d'implications logiques, comme par exemple :

"L = Un marteau en plomb et une plume tomberont identiquement sur la Lune".

On voit bien que $P \rightarrow L$ (au sens de la logique propositionnelle) car L est un cas particulier de la proposition universelle P . On distingue des propositions élémentaires les propositions empiriques E_i tirés de l'expérience ou de l'observation. Un exemple ici serait :

"E₀ = Nous sommes allés sur la Lune en 1971 et avons constaté que un certain marteau M et une certaine plume P tombent identiquement".

On retrouvera le compte rendu de l'expérience historique E_0 en [2] ainsi qu'une vidéo pour s'en convaincre en [32]. Tant que des expériences particulières $E_1, E_2, E_3 \dots$ du même types vérifierons indépendamment L , on pourra affirmer que P est une hypothèse physique crédible, il y a *adéquation empirique*. On dira que les expériences E_j confirment P par *induction*. Cependant, il est clair que bien que la quantité et la précision des E_j soient des critères importants pour une confirmation crédible de P , rien dans la notion d'induction seule ne permet de quantifier en quoi un seul E_0 permet de confirmer plus qu'une infinité de E_j . Il est alors nécessaire d'établir une *théorie de la confirmation* afin de pouvoir identifier et quantifier quand et comment des expériences peuvent permettre de confirmer une hypothèse. Détailler ici ces théories dépasse largement le cadre de cet essai mais on retiendra que des théories sophistiquées de la confirmation telles que les théories

*Nombre de caractères inclus hors bibliographie et notes de bas de page ~ 15400

¹Pour une discussion plus détaillée autour de l'histoire des questionnements sur le rôle de l'expérimentation, on pourra également se référer aux entrées 'Experiment in Physics' et 'scientific method' de la Stanford encyclopedia of philosophy [30]. On se référera également à [17] chap. IV et IX ou [18] chap. 2 à 4 qui ont servi de guides pour cette dissertation.

²Pour une présentation complète et technique des principes d'équivalences, leurs implications sur les théories de la gravitation et leurs test expérimentaux, on pourra se référer à [36]

hypothético-déductives existent et permettent de formaliser qualitativement la confirmation. Elles ne sont cependant pas exemptes de contradictions et la démarche à suivre - si elle existe - n'est pas consensuelle. Les méthodes statistiques avancées ouvrent également nouvelles portes pour quantifier la confirmation apportée à une théorie par des observations. C'est le cas notamment de l'analyse Bayésienne, omniprésente en analyse de données pour la physique contemporaine. Pour une discussion complète à ce sujet voir "confirmation et induction" de Mikaël Cozic dans [1].

C'est cette démarche qui est appliquée aujourd'hui avec des expériences comme MICROSCOPE [33], comparant la trajectoire de deux masses de composition différente en chute libre dans un satellite en orbite autour de la Terre. L'épistémologie décrite plus haut est encouragée par la solidité tacite qui semble avoir émergée du dialogue théorie/expérimentation durant les derniers siècles. La physique ne semble plus se contenter d'expliquer les phénomènes communs à l'aide de théorie mais réussit à prédire le résultat de certaines expériences encore jamais réalisées. Autrement dit, on peut tirer d'une proposition comme P des conséquences logiques L et anticiper le résultat d'une expérience. Les exemples sont nombreux, on pourra citer la découverte de Neptune par le Verrier, anticipée par le calcul des perturbations induite sur la trajectoire d'Uranus dans le cadre de la théorie de la gravitation Newtonienne (voir à ce sujet [13]) ou la mesure du redshift gravitationnel [26, 11] comme conséquence logique de P tel que énoncé plus haut. Il arrive également aussi que l'expérience ou l'observation précède la théorie et ainsi qu'un E anticipe une conséquence logique L que personne n'avait encore tiré de P : Dans notre exemple il pourrait s'agir de la valeur non nulle de la constante cosmologique [27, 24].

Le raisonnement inductif présente cependant une limite fondamentale : il n'assure pas directement un transfert de vérité. En effet, aussi nombreux et précis que soient les expériences E_j vérifiant P , on ne pourra pas à conclure logiquement qu'il existe une implication logique $E_j \rightarrow P$ i.e. on ne pourra pas montrer que aucune expérience possible ne violerait P . Ainsi les E_j peuvent confirmer P mais jamais le *vérifier* i.e. le proclamer comme vrai. On voit bien que si au contraire, on observe $\bar{E} = \neg E$ alors $\bar{E} \rightarrow \neg L \rightarrow \neg P$. Il semble donc possible de *falsifier* logiquement une proposition élémentaire à partir d'une proposition logique. Les expériences telles que MICROSCOPE ne pourraient donc que falsifier P en observant sa violation avec un événement de type \bar{E} . Popper tire des conclusions épistémologiques fortes de ce résultat [16, 15] : l'induction et la confirmation ne sont pas des bonnes sondes pour tester les hypothèses physiques. Celles-ci ne peuvent pas être validées mais seulement réfutées. Les échecs expérimentaux pour réfuter une hypothèse *corroboreront* celle-ci mais ne la confirmeront pas.

Cependant, en bien des aspects l'empirisme logique, même Popperien, présente une vision idéalisée de la science. On attribue à Duhem et plus tard à Quine et Sellars, les premières critiques fortes de celui-ci. La thèse de Duhem-Quine ou *Holisme épistémologique* soutient que les théories forment un tout organique et qu'il n'y a fondamentalement aucune distinction entre propositions théoriques et propositions expérimentales [21, 35, 34]. Ainsi, l'expérience ne peut jamais tester ou remettre en cause une proposition isolée mais toujours un faisceau complexe d'hypothèses et leurs conséquences interdépendantes sous formes d'un édifice de propositions logiquement reliés. Imaginons en effet qu'une expérience détecte une violation du principe d'équivalence. Il ne serait pas évident de savoir quelle hypothèse logique devra être remise en question. On pourra accuser un grand nombre d'erreurs systématiques ou un problème méthodologique au niveau de l'expérience. On pourra également maintenir que P est toujours valide mais qu'il existe une entité supplémentaire (comme un champ scalaire) qui a induit la déviation observée. Si finalement on choisit de s'attaquer à P il faudra de concert entraîner une refonte de notre théorisation de la gravitation, formée d'un ensemble complexe d'hypothèses interdépendantes. Cette dernière option ne sera a priori prise qu'en dernier recours, en cas de crise majeure et pourrait entraîner un changement de paradigme³. Le choix de(s) l'hypothèse(s) à sacrifier se fera en tout ou en partie sur des critères sociaux, historiques, pragmatiques et esthétiques (ou "thémata"[12]) fortement contingents par nature⁴⁵. L'existence de différentes écoles de pensées dans un même domaine scientifique influencera aussi fortement un tel choix et l'interprétation faite d'une expérience donnée. En effet, selon la formation et la communauté d'un scientifique, il ne sera pas enclin à considérer identiquement un résultat expérimental donné⁶. Plus généralement, le cadre théorique et la vision de la méthode scientifique contemporaine influencera très fortement le physicien au moment d'interpréter ses résultats car il le fera toujours à travers le prisme de la théorie qu'il a apprise, qu'il essaye de tester et qu'il a nécessairement utilisé pour construire son expérience, qui sont toutes inévitablement des 'théories matérialisées' (voir G. Bachelard [4]). On peut ainsi imaginer la difficulté qu'il pourrait y avoir à sortir du cadre de la RG en cas de détection d'une violation de P ⁷.

³Idee centrale de la pensée de T.S. Kuhn [31], dans laquelle les paradigmes sont incommensurables.

⁴Embrasser complètement cette idée conduit P. Feyerabend à l'anarchisme épistémologique [22]

⁵Pour un exemple historique similaire à celui discuté avec P concernant les interprétations des observations astronomiques de Galilée voir [22]

⁶Un exemple historique est donné en physique des particules dans [23]

⁷Dans le cas extrême proposé par Hanson [20], on pourra même proposer que c'est la théorie elle-même qui forme le contenu des observations.

Il sera même en principe toujours possible de "torde" le faisceau d'hypothèses pour le rendre empiriquement équivalent à un autre dans une limite donnée. En effet de nombreuses théories au delà du modèle standard comme la théorie des cordes prédisent des violations de P . Face à une expérience comme MICROSCOPE qui n'en détecte aucune, on peut argumenter, par exemple, que la déviation a lieu encore plus bas en énergie en ajustant la valeur des nombreux paramètres inconnus du modèle. On peut ainsi imaginer à l'infini des modifications d'une des branches du faisceau d'hypothèses permettant d'accommoder l'édifice théorique de notre choix avec l'expérience. De plus, il existe toujours plusieurs théories empiriquement équivalentes et donc indistinguables expérimentalement, ou bien à cause de l'état actuel des pratiques expérimentales voir fondamentalement indistinguables. C'est le cas par exemple de la RG et de la gravité téléparallèle dans laquelle la torsion, nulle en RG, va venir jouer le rôle de la courbure [6] ou plus largement de toutes théories métriques de la gravitation, toutes incluant P . On pourra également mentionner les différentes interprétations de la mécanique quantique [3, 19, 28]. Le choix du faisceau à garder se fera alors purement sur des critères contingents. En raison de l'ensemble des points évoqués ci-dessus, on voit que les théories sont inévitablement sous-déterminées par l'expérience. Il est d'ailleurs intéressant de constater l'émergence en physique contemporaine de certaines hypothèses physiques qui ne sont intrinsèquement pas testables par l'expérimentation. C'est le cas notamment de l'existence des multivers (ou univers bulles) en théories des cordes.

Enfin, la démarche en physique expérimentale contemporaine nécessite des expériences gigantesques par la taille, le coût et la complexité. Les expertises se voient nécessairement fragmentées et les expériences extrêmement difficiles, voir impossibles, à répéter (voir [23]). Cela ne fera que renforcer l'ensemble des points évoqués plus haut : encore plus d'hypothèses sont ajoutées à notre faisceau augmentant la distance entre théorie et expérience. De plus, des considérations économiques et politiques fortes vont venir peser sur l'expérience et son interprétation. Comme discuté en [29], l'existence de savoirs expérimentaux tacites i.e. inexprimables, couplée aux transformations évoquées plus haut rendent les expériences extrêmement difficiles voir impossibles à reproduire et condamne la répétabilité et l'interchangeabilité des expérimentateurs: de part sa complexité et son coût, un scientifique, ou un groupe de scientifiques, aussi formés soient-ils, ne pourraient certainement pas répliquer une expérience telle que MICROSCOPE sans ce heurter à des difficultés potentiellement insurmontables. On peut ainsi concevoir que des configurations expérimentales incompatibles se stabilisent de manière synchroniques ou diachroniques (à des temps identiques ou différents). Des désaccords insurmontables sur le résultat et la reproduction d'une expérience peuvent ainsi apparaître entre scientifiques⁸. Le résultat qui sera admis par la communauté se fera alors sur des critères de crédibilité et puissance des différents chercheurs impliqués et on fera ainsi taire la controverse. Comme proposé notamment par Hacking et Pickering (voir e.g. [10, 25]), on peut étendre la thèse de Duhem-Quine mentionnée plus haut en incluant au faisceau de propositions logiques interdépendantes formant une théorie scientifique, un ensemble de configurations expérimentales stabilisées et non contradictoires. Il devient alors envisageable que la science suive une trajectoire historique alternative pour ce stabiliser vers une autre configuration théorique et expérimentale stable et auto-cohérente. La contingence d'un tel édifice conduit inévitablement à un affaiblissement du réalisme scientifique.

Nous avons ainsi essayé de définir l'expérimentation et son lien avec les théories scientifiques en tant que systèmes logiques avec comme fil rouge l'exemple du principe d'équivalence faible. Il nous est apparu clair que, de part la nature même du raisonnement inductif, il était impossible de valider logiquement une hypothèse physique. Il faut alors se demander comment écrire une théorie de la confirmation fiable. Un tel travail n'est pas aisé et on peut en venir à la conclusion forte que seule la réfutation des hypothèses par l'expérience est légitime. Cependant, c'est là aussi idéaliser le fonctionnement des sciences où en pratique, une hypothèse, quelle qu'elle soit, n'est jamais testée seule. De plus, malgré son désir d'objectivité, il est impossible de retirer à la science ses acteurs et de son contexte. Elle est avant tout une construction humaine et sociale, et ainsi (en tout ou en partie) contingente par essence. De nombreuses pistes essentielles peuvent continuer à enrichir ce débat et on regrette de ne pas avoir pu les explorer ici, tel que la place de la simulation numérique, omniprésente en physique moderne⁹, la distinction à effectuer entre expérience et observation¹⁰ ainsi que les domaines de la physique où celle-ci est fondamentalement non répétable, unique et non contrôlable comme en cosmologie pour laquelle il n'y a qu'une seule réalisation d'univers¹¹ ou en mécanique quantique et systèmes dynamiques chaotiques dans laquelle le stochastique a un rôle fondamental au niveau même de la théorie, impliquant un affaiblissement de la répétabilité et du contrôle.

⁸Un exemple est donné par Collins sur la détections des ondes gravitationnelles par Weber [8].

⁹On pourra se référer au Chapitre 11 "Le tournant computationnel et l'innovation théorique" de [28].

¹⁰que nous avons, à tort, utilisés interchangeablement dans le texte.

¹¹pour une discussion détaillée autour de la philosophie de la cosmologie voir [14].

References

- [1] M. Cozic A. Barberousse D. Bonnay. *Précis de philosophie des sciences*. première édition. Vuibert, 2011.
- [2] J. Allen. “Apollo 15 Preliminary Science Report”. In: *NASA SP-289*, (1972).
- [3] H. Zwirn B. d’Espagnat. *Le monde quantique: Les débats philosophiques de la physique quantique*. deuxième édition. Editions materiologiques, 2014.
- [4] G. Bachelard. *Le Nouvel Esprit scientifique*. PUF, 1934.
- [5] F. Bacon. *Advancement of learning and Novum organum*. New York, Colonial Press, 1899.
- [6] S. Bahamonde et al. “Teleparallel Gravity: From Theory to Cosmology”. In: *arXiv e-prints*, arXiv:2106.13793 (June 2021), arXiv:2106.13793. arXiv: 2106.13793 [gr-qc].
- [7] C. Bernard. *Introduction à l’étude de la médecine expérimentale*. réédition de 1966. Éditions Garnier-Flammarion, 1865.
- [8] H. M. Collins. “The Seven Sexes: A Study in the Sociology of a Phenomenon, or the Replication of Experiments in Physics”. In: *Sociology* 9.2 (1975), pp. 205–224. DOI: 10.1177/003803857500900202. eprint: <https://doi.org/10.1177/003803857500900202>. URL: <https://doi.org/10.1177/003803857500900202>.
- [9] J. Grange. *La Philosophie d’Auguste Comte*. Presses Universitaires de France, 1996.
- [10] I. Hacking. “The Self-Vindication of the Laboratory Sciences”. In: *Science as Practice and Culture* (1992), pp. 29–64.
- [11] J. B. Holberg. “Sirius B and the Measurement of the Gravitational Redshift”. In: *Journal for the History of Astronomy* 41.1 (2010), pp. 41–64. DOI: 10.1177/002182861004100102. eprint: <https://doi.org/10.1177/002182861004100102>. URL: <https://doi.org/10.1177/002182861004100102>.
- [12] G. Holton. *L’imagination scientifique*. Gallimard, 1981.
- [13] J. Laskar. *Des premiers travaux de Le Verrier à la découverte de Neptune*. fhal-01612311f, 2017.
- [14] K. Chamcham, J. Silk. *Philosophy Of Cosmology*. 2e édition. Cambridge University Press, 2017.
- [15] K. Popper. *La Logique de la découverte scientifique*. 1934.
- [16] K. Popper. *Le réalisme et la science*. Editions Hermann, 1990.
- [17] L. Soler. *Introduction à l’épistémologie*. deuxième édition. Ellipses, 2009.
- [18] M. Esfeld. *Philosophie des sciences: Une introduction*. deuxième édition. Presses polytechniques et universitaires romandes, 2009.
- [19] M. Esfeld. *Physique et métaphysique: une introduction à la philosophie de la nature*. première édition. Presses polytechniques et universitaires romandes, 2012.
- [20] N. R. Hanson. *Patterns of Discovery*. 1959.
- [21] P. Duhem. *La théorie physique. Son objet, sa structure*. Librairie Marcel Rivière, 1914.
- [22] P. Feyerabend. *Contre la méthode, Esquisse d’une théorie anarchiste de la connaissance*. 1975.
- [23] P. Galison. *Image and logic : a material culture of microphysics*. 1997.
- [24] S. Perlmutter et al. “Measurements of Ω and Λ from 42 High-Redshift Supernovae”. In: *astrophysical Journal* 517.2 (June 1999), pp. 565–586. DOI: 10.1086/307221. arXiv: astro-ph/9812133 [astro-ph].
- [25] C.A. Pickering. *The Mangle in Practice*. Time, Agency and Science, The University of Chicago Press, 1995.
- [26] R. V. Pound and G. A. Rebka. “Apparent Weight of Photons”. In: *Phys. Rev. Lett.* 4 (7 Apr. 1960), pp. 337–341. DOI: 10.1103/PhysRevLett.4.337. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.4.337>.
- [27] Adam G. Riess et al. “Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant”. In: *Astronomical Journal* 116.3 (Sept. 1998), pp. 1009–1038. DOI: 10.1086/300499. arXiv: astro-ph/9805201 [astro-ph].
- [28] S. Le Bihan. *Précis de philosophie de la physique*. première édition. Vuibert, 2013.
- [29] L. Soler. “Les expérimentateurs sont-ils substituables les uns aux autres ? Opacité des pratiques expérimentales, fragmentation de l’expertise, désaccords irrésolus entre praticiens : quelles conséquences épistémologiques ?” In: *Le Philosophoire* (2011). URL: <https://www.cairn.info/revue-le-philosophoire-2011-1-page-65.html>.
- [30] *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. URL: <https://plato.stanford.edu/index.html>.

- [31] T. S. Kuhn. *La Structure des révolutions scientifiques*. Flammarion, 1983 (édition française).
- [32] *the apollo 15 hammer feather drop*. URL: <https://moon.nasa.gov/resources/331/the-apollo-15-hammer-feather-drop/>.
- [33] et al Touboul P. “MICROSCOPE Mission: First Results of a Space Test of the Equivalence Principle”. In: *Phys. Rev. Letter* 119.23, 231101 (Dec. 2017), p. 231101. DOI: 10.1103/PhysRevLett.119.231101. arXiv: 1712.01176 [astro-ph.IM].
- [34] W. Sellars. *Empirisme et philosophie de l’esprit*. réédition. Eclat, 1992. (1984 original).
- [35] W. V. O. Quine. *Two Dogmas of Empiricism*. The Philosophical Review, 1951.
- [36] C. M. Will. “The Confrontation between General Relativity and Experiment”. In: *Living Reviews in Relativity* 17.1, 4 (Dec. 2014), p. 4. DOI: 10.12942/lrr-2014-4. arXiv: 1403.7377 [gr-qc].