

Faut-il s'inquiéter de la sous-détermination des théories scientifiques par l'expérience, en général et en particulier s'agissant de la situation actuelle de la physique quantique ?¹

Léo Vacher² - EC2 du ME 903 - Janvier 2025

La sous-détermination (SD) des théories par l'expérience est l'existence de différentes théories scientifiques incompatibles entre elles, mais capables de prédire les mêmes résultats expérimentaux. La SD, mise en lumière par des auteurs comme [Duhem \(1906\)](#) et [Quine \(1951\)](#)³, présente un problème particulièrement critique pour l'épistémologie lorsque deux théories prédisent exactement et strictement les mêmes observations. On proposera alors de parler de théories strictement équivalentes empiriquement (TSEE) et d'une situation de stricte sous-détermination par les observations déduites (SSDOD).

Une telle configuration, si elle perdure, offre un défi majeur pour la vision commune des sciences. En particulier, elle menace la rationalité et l'objectivité des choix inter-théoriques (theory-choice), nécessaires pour permettre un monisme scientifique, selon lequel une seule théorie peut être établie à tout instant comme la plus précise (et éventuellement aussi la plus vraie) pour décrire un ensemble de phénomènes (voir e.g. [Acuña 2014](#)). Si ce monisme est remis en question, il devient envisageable qu'une pluralité de théories également valides puissent légitimement coexister (pluralisme), et que l'histoire des sciences ait pu sélectionner des théories et établir des résultats différents voire incompatibles avec ceux considérés comme vrai aujourd'hui au cours de son évolution (contingentisme). Un tel pluralisme présente une menace majeure pour le réalisme scientifique puisque deux théories proposant des descriptions du monde (ontologies) profondément différentes, voire incompatibles, peuvent co-exister en rendant identiquement compte des données empiriques (voir [Glymour 1970](#)).

Un cas de SSDOD particulièrement intéressant est donné par la situation contemporaine en mécanique quantique, pour laquelle une multitude de TSEE coexistent, tout en proposant des descriptions du monde physique profondément incompatibles. L'ampleur de cette SSDOD est particulièrement saillante en considérant la confrontation « SBQM » entre la mécanique quantique standard (SQM) et la mécanique quantique Bohmienne (BQM)⁴. SBQM fournit un exemple de SSDOD particulièrement intéressant puisqu'il est réel (issu de la pratique des physiciens), durable (depuis presque un siècle) et potentiellement permanent et insurmontable. SQM est aujourd'hui très largement préférée et est quasiment uniquement étudiée, pratiquée et enseignée alors que BQM, bien que tolérée, se voit ostracisée et marginalisée. Cependant, comme les deux sont des TSEE, on doit reconnaître qu'un tel choix inter-théorique n'a pu s'effectuer que sur des critères normatifs, potentiellement historiques et sociaux et non pas objectifs et rationnels.

Du point de vue de la perspective traditionnelle, la gravité d'une telle situation se voit cependant souvent minimisée, notamment à l'aide de deux arguments très communément invoqués. Premièrement, les situations SSDOD sont extrêmement rares, SBQM étant une exception. Il faut donc penser qu'une telle SD sera prochainement levée avec l'avènement d'une nouvelle théorie englobante⁵. Deuxièmement, un tel débat ne concerne pas les physiciens, mais les philosophes, puisqu'il s'agit avant tout d'interpréter une seule et unique théorie : «la théorie

¹ Nombre de caractères blancs inclus (hors biblio et notes de bas de page) : 15374.

² vacher.leo.etu@gmail.com

³ Au sujet de la SD, voir également notre contribution ici : https://leovacher.github.io/files/Devoir_philophy_Vacher.pdf et les références associées. L'essai concerne « L'expérimentation permet-elle de valider les hypothèses physiques? ».

⁴ Sur SBQM, voir également notre contribution (et références associées) ici : <https://leovacher.github.io/files/BQM.pdf>, concernant la possibilité de justifier l'inévitabilité de SQM en reprochant l'impossibilité de généraliser BQM pour inclure la relativité restreinte. Nous y présentons brièvement les deux théories et leurs incompatibilités descriptives et normatives, ce que nous ne référons pas ici. Pour une défense robuste de BQM comme étant seule cohérente, contrairement à SQM, voir également [Barrett \(2003\)](#).

⁵ C'est à dire une théorie plus fondamentale (e.g. de gravité quantique ou de grande unification) qui serait uniquement compatible avec SQM et ne pourrait absolument pas être réécrite dans le langage de BQM.

quantique», les physiciens cherchant simplement à élaborer des théories empiriquement adéquates et n'ont pas à se préoccuper de leurs interprétations.

Nous souhaitons examiner brièvement ces arguments déflationnistes, et établir leur robustesse. Nous verrons d'abord que le premier axe de la réponse n'est pas tenable, puisque les configurations SSDOD sont omniprésentes en physique. Cependant, nous constaterons que celles-ci ne sont visiblement pas toutes considérées comme égales. Nous verrons que les TSEE en désaccord sur des critères normatifs de physicité sont les plus ostracisées. Nous verrons ensuite que le second axe n'est pas non plus tenable puisqu'il repose sur des critères normatifs contingents et non imposés par l'expérience. Ces critères sont mal définis et seulement partiellement appliqués. Nous concluons qu'embrasser un pluralisme de théories et de normes n'est pas une menace pour la physique, mais pourrait au contraire lui bénéficier.

Une investigation des théories physiques suffit à se convaincre que les cas SSDOD réels et durables, loin d'être des exceptions, sont plutôt la règle.

La mécanique classique du point matériel est décrite par plusieurs TSEE, dont la mécanique newtonienne, qui décrit le mouvement des corps comme résultant de forces agissant sur eux et les faisant accélérer. La mécanique Lagrangienne, qui établit que le mouvement des corps est toujours celui minimisant l'action, une quantité liée à l'énergie, sur leur trajectoire. La mécanique Hamiltonienne selon laquelle le mouvement des corps suit le « flot Hamiltonien », pouvant être compris comme un mouvement imposé au système par son énergie⁶. Cependant, contrairement au cas SBQM, ces trois théories co-existent et sont également enseignées et étudiées malgré le cas flagrant de SSDOD. Elles sont généralement considérées comme différentes formulations d'une même théorie, les formulations Lagrangiennes et Hamiltoniennes étant considérées comme plus avancées car permettant de résoudre plus facilement des problèmes complexes et plus facilement généralisables à d'autres cas d'études au delà de la mécanique classique. Une quatrième formulation, moins connue, permet d'interpréter la gravitation comme le mouvement des corps dans un espace-temps courbe⁷. Comparativement à BQM, ce cas n'est quasiment jamais étudié par les physiciens et a la préférence des philosophes et de certains mathématiciens.

Au delà des multiples formulations traditionnellement considérées comme des « interprétations » de la mécanique quantique — dont font parties SQM⁸ et BQM — différentes formulations mathématiques de ce qui est considéré comme SQM existent⁹, comme celle des intégrales de chemin, selon laquelle les particules ne prennent non pas aucune trajectoire — mais toutes les trajectoires à la fois ([Feynmann, 1948, 1985](#)). Cette formulation est aujourd'hui souvent valorisée et enseignée, car elle permet de résoudre de nombreux problèmes difficiles en mécanique quantique avancée¹⁰. Les différents formalismes associés à SQM sont souvent aussi considérés comme différentes formulations d'une même théorie — comme l'était l'exemple historique des mécaniques matricielle et ondulatoire (voir e.g. [Muller 1997](#)).

⁶ Bien que beaucoup plus rarement présentées, les mécaniques Lagrangiennes et Hamiltoniennes possèdent des réécritures et visualisations profondément géométriques, qui, interprétées littéralement pourraient être comprises comme des interprétations ou des théories alternatives. Pour une introduction à cette géométrie dite symplectique voir par exemple [Frankel \(1998\)](#) et [Miller \(2019\)](#).

⁷ On parle fréquemment de théorie de « Newton-Cartan », pour une introduction voir e.g. [Malament 2012](#), Chapitre 4.

⁸ Il faut bien être conscient ici de l'ambiguïté concernant ce qu'est vraiment « SQM », puisque les présentations historiques faites par e.g. Niels Bohr, ou celles de différents manuels de physique diffèrent dans leur contenu exact. Nous ignorons cette subtilité ici en supposant qu'il existe une unique SQM bien définie. [ce choix me paraît impossible pour mener votre discussion... C'est pourquoi j'ai différencié 2 versions qui sont vraiment mutuellement incompatibles, celle de Bohr et celle des Manuels. Votre discussion exige d'indiquer en quoi les alternatives sont mutuellement incompatibles, et pour ça vous ne pouvez assimiler les 2 versions de SQM]

⁹ On pensera notamment aux représentations dites « de Schrödinger » ou « de Heisenberg ». Pour la première, les états sont dynamiques alors que les observables sont statiques et l'inverse pour la seconde. Bien qu'elles soient considérées comme deux formulations alternatives d'une même théorie, elles présenteraient clairement un cas de SSDOD dans une approche interprétative qui chercherait à réifier les états quantiques et les observables. Voir la discussion à ce sujet dans [Coffey 2014](#).

¹⁰ Particulièrement en théorie quantique des champs. Pour une introduction voir [Zee, 2010](#).

La relativité restreinte (RR) est également sujette à des cas de SSDOD, avec notamment la théorie dite de « la relativité Lorentzienne » (RL), qui est une TSEE à la RR standard, mais totalement incompatible avec celle-ci puisqu'elle suppose l'existence d'un éther et d'un temps absolu ([Szabó 2011](#), [Bradley 2019](#)). Semblable à BQM, cette théorie, fortement ostracisée par les physiciens, reçoit un très faible intérêt à travers la formulation de **théories** dites « néo-Lorentziennes », et n'est plus ou moins considérée que par les philosophes et les historiens¹¹.

La relativité générale (RG) est elle aussi au cœur de nombreux cas de SSDOD. La RG est une théorie largement considérée comme décrivant la gravitation comme résultant du mouvement des corps dans un espace-temps courbe. Il est cependant possible de dériver des TSEE à la RG dans un espace-temps plat, en faisant intervenir d'autres quantités géométriques strictement nulles en RG¹² ([Jiménez, 2019](#)). Plus largement, il est également possible d'interpréter exactement le contenu théorique de la RG comme décrivant un champ¹³ transmettant une force dans un espace-temps plat¹⁴, ou de reformuler la théorie entièrement algébriquement sans avoir à faire appel à la notion d'espace-temps (algèbres d'Einstein) ([Gerloch, 1972](#)). Bien que non enseignées et marginales, ces différentes approches sont valorisées comme point de départ pour chercher des extensions théoriques à la RG.

Enfin, bien que nous ne puissions pas les détailler ici, il existe de nombreux exemples plus poussés. Les théories de jauge, au cœur de la physique des particules, possèdent de nombreuses formulations mathématiques amenant également à des TSEE¹⁵ ([Healey, 2017](#)). Enfin, les études contemporaines en théorie des cordes sont particulièrement pertinentes pour notre discussion, car elles font apparaître de nombreuses descriptions de la réalité incompatibles entre elles, mais toutes TSEE (les dualités¹⁶). Ce dernier cas de SSDOD est un sujet actif de recherches puisque certains physiciens sont convaincus qu'il est la clef pour obtenir une théorie de la gravitation quantique.

Après ce bref tour d'horizon, nous avons donc vu que le cas SBQM est loin d'être isolé. Il apparaît cependant clair que tous les cas de SD ne sont pas équivalents, en particulier dans la manière dont ils sont considérés par la communauté des physiciens. Certains sont vus comme des reformulations d'une même théorie, d'autres comme différentes interprétations et rares sont les cas effectivement traités comme différentes théories ou considérés comme problématiques.

Puisque tous les cas SSDOD ne se valent pas, il faut réussir à les différencier. En particulier, il est crucial de déterminer si et dans quel cas deux TSEE sont vraiment différentes théories incompatibles. En effet, on pourrait imaginer construire une TSEE en traduisant une théorie existante dans une autre langue, ou en utilisant d'autres symboles. Il apparaît pourtant clair qu'il s'agirait d'une simple reformulation et qu'un tel cas ne peut pas être suffisant pour former deux TSEE à partir d'une et menacer sérieusement le réalisme scientifique. Il faudra alors établir où se situe la limite, et en quoi, par exemple, le cas SBQM présente deux théories

¹¹ On pensera également aux reformulations de la RR (ou de SQM) avec différents outils géométriques, tels que les algèbres de Clifford (ou géométriques), proposant des ontologies potentiellement incompatibles avec les théories standards. Comme pour BQM, ces formulations sont acceptées mais considérées uniquement par un petit nombre de chercheurs. Voir [Doran et Lasenby 2003](#).

¹² Il s'agit de la torsion (on parle de gravité télléparallèle, [Bahamonde+ 2021](#)) et de la non-métricité (gravité non métrique).

¹³ Le champ métrique, de spin-2.

¹⁴ Une telle approche est souvent utilisée e.g. en théorie des cordes, dans lesquelles la gravitation peut émerger de l'interaction de cordes microscopique vivant dans un espace-temps plat.

¹⁵ Plus largement, il serait également possible d'interpréter chaque choix de jauge comme une différente théorie, toutes étant des TSEE. Il s'agit là d'un cas tout à fait similaire (mais plus abstrait) du cas de TSEE à la mécanique newtonienne pour lequel le système solaire a une vitesse non nulle proposé par [Bas van Fraassen \(1976\)](#).

¹⁶ Un cas particulièrement intéressant pour notre discussion serait celui de la correspondance dite AdS-CFT ou dualité gauge/gravité que nous ne détaillerons cependant pas plus avant ([Maldacena 1998](#)). Nous ne discuterons pas plus avant les dualités ici mais renvoyons à [Rickles \(2011, 2017\)](#) pour une discussion philosophique à ce sujet en lien direct avec la SD.

distinctes, là où les intégrales de chemins n'offrent qu'une différente formalisation de SQM. Différentes approches ont été proposées pour établir des critères formels permettant d'établir si deux formulations théoriques sont équivalentes ou non. Par exemple, on peut chercher des relations structurelles entre les théories pour montrer leur équivalence, ce sont les propositions de l'équivalence définitionnelle (fondée sur la logique du premier ordre), ou l'équivalence catégorique (basée sur la théorie des catégories)¹⁷. Cependant, ces méthodes peuvent montrer assez rapidement leurs limites pour **categoriser** en pratique la complexité des théories physiques¹⁸. Une autre approche, **l'équivalence** interprétationnelle, propose d'établir que deux théories sont équivalentes s'il est possible d'en donner une même interprétation physique ([Coffey 2014](#), [Nguyen 2017](#)). Une telle approche, qui nous paraît particulièrement pertinente, permettrait de mettre au jour de nombreuses TSEE inéquivalentes à partir de la liste précédente^{19,20}.

Plus généralement, une théorie peut être considérée comme composée de trois sous parties : **1)** Un formalisme mathématique et des connexions opérationnalisantes mettant en relations certains éléments du formalisme et des situations empiriques observables **2)** Une description de la réalité physique étudiée **3)** Une conception normative de la théorie physique et plus généralement de la physique. Les cas que nous avons vus plus haut ne diffèrent pas tous sur **les même** points. Tous sont en désaccord a minima sur 2) ou sur 1), et plus rarement sur 3). Un bref résumé sous forme de tableau peut être trouvé en annexe à ce document. On aura tendance à qualifier d'interprétations différentes les cas en désaccord sur 2), et de reformulations les cas en désaccord sur 1). Alors que tous les cas en désaccord sur 2) menacent clairement l'objectivité des choix inter-théoriques et le réalisme scientifique, les cas différant sur 3), comme BQM (et RL) semblent être ceux qui inquiètent le plus les physiciens, provoquant le rejet le plus fort, par ce qu'ils ne participent pas à « de la bonne science ».

L'incompatibilité **interprétationnelle** des TSEE, omniprésente, n'est donc généralement pas perçue comme problématique. Une telle position peut être justifiée en rétorquant qu'interpréter n'est pas perçu comme étant le travail du physicien, mais celui du philosophe. Le critère le plus important étant qu'une théorie respecte des critères de physicit , généralement de beauté et de simplicit ²¹. Certaines TSEE seraient alors valorisées, non pas par ce qu'elles expliquent mieux le monde, mais car elles facilitent certains calculs, ou ouvrent de nouveaux horizons th oriques²². Une telle conclusion révèle cependant une ambigu it  dans la pratique des physiciens, qui agissent pourtant généralement comme des réalistes monistes. En effet, à la lecture d'ouvrages de vulgarisation, ou des cours de physique, il est clair que les trajectoires n'existent pas en mécanique quantique, que la relativité restreinte **a rejetée** le concept d'éther et que la relativité générale parle d'espace-temps courbe. Les physiciens — a minima lorsqu'ils enseignent — font

¹⁷ Pour une revue de ces différentes approches, voir e.g. [Weatherall 2019a,b](#) et [Le Bihan et Read \(2018\)](#).

¹⁸ Pour une discussion plus avancée sur équivalence (ou non) des théories listées plus haut, voir par exemple [\(Weatherall 2018\)](#) et les références incluses. On constate que, même à l'aide de cadre formels comme les équivalences définitionnelle et catégorique, différents auteurs ne sont pas d'accord sur l'équivalence de certaines paires de théories. Il est particulièrement intéressant de constater qu'il n'est pas du tout clair que certaines théories étant très largement considérées par les physiciens comme des reformulations l'une de l'autre le sont vraiment (e.g. les mécaniques Hamiltoniennes et Lagrangiennes). Voir à ce sujet [\(Barrett 2017\)](#).

¹⁹ A minima, mécanique newtonienne et théorie de Newton-Cartan, SQM et BQM, RR et LR, RG et ses alternatives géométriques ainsi que les théories reliées par dualité semblent être clairement des TSEE in quivalente selon cette approche. Les autres cas comme la mécanique Lagrangienne/Hamiltonienne ou la formulation en intégrale de chemin sont ambigus et il semble plus difficile de trancher.

²⁰ Pour une approche opposée à la notre, défendant l'inexistence de TSEE incompatible et rejetant le problème de la SD, voir [Norton 2008](#).

²¹ Il est en effet très largement reproché à BQM et à LR d'ajouter des structures et des concepts « inutiles », dont peuvent se passer SQM et RR. Cependant, si ces critères étaient les seuls, des théories comme les algèbres d'Einstein (permettant de réécrire la RG sans avoir besoin de l'espace-temps) devraient supplanter la relativité générale. Il faut donc constater que de nombreux autres critères tacites — certainement historiques et sociaux — sont également à considérer.

²² Il est donc important de noter ici que ces critères de **sélection** sont normatifs (et donc contingents) et absolument pas donnés de manière objective par **l'experience**, comme il est souvent **sous entendu** dans les textes de physique (  supposer que des TSEE alternatives soient seulement mentionnées).

donc systématiquement des présentations **ontologistantes**, monistes et réalistes de leurs théories, en contradiction avec l'existence des TSEE et avec les normes proposées pour sélectionner les théories à valoriser.

Nous avons donc vu que les TSEE sont omniprésentes en physique. Cependant, elles ne sont pas traitées de manière égale. Les théories qui contreviennent à certains critères normatifs sont fortement ostracisées, tandis que celles qui diffèrent uniquement par leur description de la réalité physique ou leur formulation mathématique semblent susciter moins d'inquiétude.

Pourtant, ces dernières constituent une menace tout aussi sérieuse pour l'objectivité des choix inter-théoriques et pour le réalisme scientifique. Cette attitude révèle une position ambiguë des physiciens face au monisme et au réalisme. La pluralité théorique est donc existante en pratique, mais elle est rarement assumée²³. Est-ce car elle est perçue comme une menace pour le sérieux et la crédibilité de la discipline ?

Malgré le clair affaiblissement du réalisme causé par l'existence de TSEE, la SD ne réduit pas tout **l'édifice** théorique à une pile d'élucubrations incohérentes. En particulier, on pourra se réjouir de la capacité qu'on eu certaines théories à anticiper l'existence de nouveaux phénomènes avant même qu'ils aient pu être observés²⁴. De telles réussites suggèrent que, malgré la multiplicité des formulations et des interprétations, les théories ne sont pas purement arbitraires. Toutes les théories ne sont pas possibles : seules celles qui s'inscrivent dans des « réseaux de croyances »²⁵ cohérents peuvent émerger. Construire de tels réseaux est loin d'être trivial. En ce sens, les TSEE nous offrent une multitude de « mondes possibles » qui mettent souvent à l'épreuve nos intuitions classiques, qu'il s'agisse de la localité, du déterminisme ou d'autres principes fondamentaux. La physique n'a donc pas à craindre cette pluralité et devrait au contraire s'en réjouir, car elle peut l'aider à progresser et à mieux comprendre non pas le, mais les mondes possibles.

Il semblerait ainsi préférable d'adopter un pluralisme scientifique pleinement assumé, intégrant non seulement la diversité des cadres théoriques mais aussi, et surtout, des cadres normatifs présents en physique. Une telle posture ne se réduirait pas à un simple éclatement des perspectives, mais proposerait au contraire une représentation plus authentique et nuancée de la discipline, dans toute sa richesse. Il est de notre avis qu'une telle approche devrait être ouvertement discutée au sein de la communauté des physiciens, qui en bénéficierait grandement.

²³ Il me semble qu'une telle approche est particulièrement source de confusion pour les étudiants. Le statut de l'interprétation des théories et l'existence des TSEE n'est jamais clairement explicité et la question ne semble pas intéresser. Une telle situation peut être décourageante et amener le sentiment de « ne rien comprendre à la physique ». La réponse la plus souvent adoptée (à regret) et de ce dire que, le rôle du physicien n'est pas de comprendre (d'interpréter) mais simplement de maîtriser des outils pour faire des prédictions (il s'agit là d'une position normative sur le rôle du physicien, bien résumée par le « shut up and calculate », parfois attribué à tort à Richard Feynmann ([Mermin 2004](#)). Il me semble à titre personnel que les étudiants comme les physiciens de profession souffrent du poids de ce critère normatif qui détériore le rapport qu'ils entretiennent avec leur discipline. Une vision honnête, discutant les diverses TSEE et les enjeux de leurs interprétations, semblerait pédagogiquement préférable.

²⁴ Par exemple, la mécanique quantique relativiste a prédit l'existence de l'antimatière, la relativité générale celle des ondes gravitationnelles ou l'apparence des trous noirs, et les théories de jauge celle du boson de Higgs ... De tels succès ne peuvent pas sauver à eux seuls le réalisme scientifique de la SD, mais restent des démonstrations puissantes que nos théories — loin d'être de simples tautologies — peuvent tout de même « dire quelque chose sur le monde ». Cet argument, est une forme du bien connu «no miracles argument». Pour une revue, voir e.g. [Chakravarty 2017](#).

²⁵ En référence au « web of belief » de [Quine, et Ullian \(1970\)](#).

Bibliographie:

- **Acuña, P. (2014).** Empirical Equivalence and Underdetermination of Theory Choice: a philosophical appraisal and two case studies. 10.13140/RG.2.1.1716.4404.
- **Bahamonde+ (2021).** "Teleparallel Gravity: From Theory to Cosmology". In: arXiv e-prints, arXiv:2106.13793
- **Bradley, C. (2019).** The Non-Equivalence of Einstein and Lorentz. The British Journal for the Philosophy of Science. ISSN 1464-3537.
- **Barrett, J. A. (2003)** "Are Our Best Physical Theories (Probably and/or Approximately) True?" Philosophy of Science 70, no. 5 : 1206–18. <https://doi.org/10.1086/377401>.
- **Barrett, T. W., (2017).** Equivalent and inequivalent formulations of classical mechanics. British Journal for Philosophy of Science. <http://philsci-archive.pitt.edu/13092>
- **Chakravartty, A. (2017),** "Scientific Realism", *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Summer 2017 Edition), Edward N. Zalta (ed.), URL = <<https://plato.stanford.edu/archives/sum2017/entries/scientific-realism/>>.
- **Coffey, K. (2014).** Theoretical Equivalence as Interpretative Equivalence. British Journal for the Philosophy of Science 65 (4):821-844.
- **Doran C. et Lasenby A. (2003).** *Geometric Algebra for Physicists*. Cambridge University Press.
- **Duhem, P. (1906).** La théorie physique: son objet et sa structure. Revue Philosophique de la France Et de l'Etranger 61:324-327.
- **Healey, R. (2007).** Gauging What's Real: The Conceptual Foundations of Contemporary Gauge Theories. Oxford, GB: Oxford University Press.
- **Jiménez+, 2019:** J.B. Jiménez, L. Heisenberg, T. S. Koivisto - 2019 - The Geometrical Trinity of Gravity. *Universe* 2019, 5(7), 173; <https://doi.org/10.3390/universe5070173>.
- **Feynman, R. P. (1948).** Brown, L. M. (ed. 2005). Feynman's Thesis — A New Approach to Quantum Theory. World Scientific. Bibcode:2005ftna.book.....B. doi:10.1142/5852. ISBN 978-981-256-366-8.
- **Feynman, R.P. (1985).** QED: The strange theory of light and matter. Princeton University Press. ISBN 0-691-08388-6.
- **Frankel, T. M. (1998).** The Geometry of Physics: An Introduction, *Physics Today* vol. 51 iss. 12, 51, doi: 10.1063/1.882494
- **Geroch, R (1972).** Einstein algebras. *Commun.Math. Phys.* **26**, 271–275 (1972). <https://doi.org/10.1007/BF01645521>
- **Glymour, C. (1970).** Theoretical Realism and Theoretical Equivalence. PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association, 1970, 275–288. <http://www.jstor.org/stable/495769>
- **Le Bihan B et Read J.A.M (2018).** Duality and ontology. *Philosophy Compass*; 13:e12555. <https://doi.org/10.1111/phc3.12555>
- **Malament, D. (2012)** Topics in the Foundations of General Relativity and Newtonian Gravitation Theory. University of Chicago Press, Chicago. <http://dx.doi.org/10.7208/chicago/9780226502472.001.0001>
- **Maldacena, J (1998).** « The Large N limit of superconformal field theories and supergravity », *Advances in Theoretical and Mathematical Physics*, vol. 2, 1998, p. 231–252
- **Mermin N.D (2004);** Could Feynman Have Said This?. *Physics Today* 1 May 2004; 57 (5): 10–11. <https://doi.org/10.1063/1.1768652>
- **Miller, N. (2019)** Visualizing the Inverse Noether Theorem and Symplectic Geometry https://scholar.harvard.edu/files/noahmiller/files/visualizing_noether.pdf
- **Muller, F. A., (1997).** The equivalence myth of quantum mechanics, part I and II. *Studies in History and Philosophy*.

- **Nguyen, J. (2017).** Scientific Representation and Theoretical Equivalence. *Philosophy of Science* 84 (5):982-995.
- **Norton, J. D. (2003).** Must evidence underdetermine theory. *The Challenge of the Social and the Pressure of Practice*:17–44. of *Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 28 (1), 35–61.
- **Quine, W. V. O. (1951).** Two Dogmas of Empiricism. *Philosophical Review* 60 (1):20–43.
- **Quine, W.V.O et Ullian, J. S. (1970).** *The web of belief*. New York,: Random House. Edited by J. S. Ullian.
- **Rickles, D. (2011).** A philosopher looks at string dualities. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 42(1), 54–67.
- **Rickles, D. (2017).** Dual theories: ‘Same but different’ or ‘different but same’? *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 59, 62–67.
- **Szabó, L.E. (2011).** Lorentzian Theories vs. Einsteinian Special Relativity — A Logico-empiricist Reconstruction. In: Máté, A., Rédei, M., Stadler, F. (eds) *Der Wiener Kreis in Ungarn / The Vienna Circle in Hungary*. Veröffentlichungen des Instituts Wiener Kreis, vol 16. Springer, Vienna. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-0177-3_9
- **Van Fraassen, B. C. (1976).** To Save the Phenomena. *The Journal of Philosophy*, 73(18), 623–632. <https://doi.org/10.2307/2025818>
- **Weatherall, J. O. (2018).** “Why Not Categorical Equivalence?” Hajnal Andréka and István Németi on Unity of Science (2018).
- **Weatherall, J. O. (2019a).** Part 1: Theoretical equivalence in physics. *Philosophy Compass* 14 (5):e12592.
- **Weatherall, J. O. (2019b).** Part 2: Theoretical equivalence in physics. *Philosophy Compass* 14 (5):e12591.
- **Zee, A. (2010).** *Quantum Field Theory in a Nutshell* (Second ed.). Princeton University Press. ISBN 978-0-691-14034-6.

Annexe: comparaison des TSEE discutées

Mécanique du point	Points de désaccord avec mécanique newtonienne (MN)	Remarques
Mécanique Lagrangienne	1) 2)	Considérée comme standard, plus avancée mais équivalente à MN.
Mécanique Hamiltonienne	1) 2)	Considérée comme standard, plus avancée mais équivalente à MN.
Newton-Cartan	1) 2) 3(?)	Considérée comme non standard et peu étudiée. Non ostracisée et relativement valorisée même si très marginale chez les physiciens.

Relativité restreinte	Points de désaccord avec RR	Remarques
Relativité Lorentzienne	1) 2) 3)	Fortement ostracisée, considérée comme non standard. Semblable à BQM, en ce qu'il attribue une réalité à des éléments « non nécessaires » à la théorie, en contradiction avec les normes de physicités adoptés pour RR.
Mécanique quantique	Points de désaccord avec SQM	Remarques
Intégrales de chemin	1) 2(?)	Considérée comme standard, plus avancée mais équivalente à SQM.
BQM	1) 2) 3)	Généralement considéré comme une interprétation alternative de SQM. Largement ostracisée.
Relativité générale	Points de désaccord avec RG	Remarques
Alternatives géométriques (torsion, non métricité)	1) 2)	Considérée comme non standard. Étudiés dans la recherche d'extensions à la RG.

Relativité restreinte	Points de désaccord avec RR	Remarques
Algèbres d'Einstein	1) 2) 3)	Considérée comme non standard. Étudiées principalement par les mathématiciens et les philosophes des sciences.
Non géométrique (champ métrique en espace-plat)	2) 3(?)	Considérée comme non standard. Étudiées dans la recherche d'extensions à la RG.