

Sous-détermination, incomplétude, incommensurabilité : la pensée des limites

V. Bontems*

Centre de Saclay, Laboratoire des Recherches sur les Sciences de la Matière, F-91191 Gif-sur-Yvette, France

T. Duguet[†]

*Centre de Saclay, IRFU/Service de Physique Nucléaire, F-91191 Gif-sur-Yvette, France and
KU Leuven, Instituut voor Kern- en Stralingsfysica, 3001 Leuven, Belgium and
National Superconducting Cyclotron Laboratory and Department of Physics and Astronomy,
Michigan State University, East Lansing, MI 48824, USA*

S. Panebianco[‡]

Centre de Saclay, IRFU/Service de Physique Nucléaire, F-91191 Gif-sur-Yvette, France

Atelier de l'Espace de Structure et réactions Nucléaire Théorique

12-16 Janvier 2015

CEA/SPhN, Orme des Merisiers, bat. 703, pièce 135, F-91191 Gif-sur-Yvette Cedex

I. CONTEXTE

Décrire et comprendre le monde physique implique, depuis Galilée, le développement de modèles mathématiques et de schémas conceptuels. Il s'agit donc de "réduire" la réalité physique à des notions théoriques abstraites dont le degré de sophistication s'avère dépendre des besoins descriptifs et de compréhension du phénomène. En particulier, l'élaboration des modèles physique nécessite l'objectivation de leurs hypothèses (et leur mise en évidence lorsqu'elles sont cachées), ainsi que l'explicitation d'un domaine de validité dans lequel s'inscrit leur pouvoir prédictif. Dans la pratique la plus commune, ces modèles sont ensuite mis à l'épreuve de l'expérience qui, croit-on, est en mesure de trancher de manière binaire entre le "vrai" et le "faux". Cependant, toute mesure est effectuée avec une plus ou moins grande précision au moyen d'instruments "phénoménotecniques" qui sont eux-mêmes des "théories matérialisées" (Cf. Gaston Bachelard) : il n'existe pas d'observation neutre et directe, mais une construction des phénomènes au travers d'une interaction, ce qui est particulièrement flagrant dans l'étude des systèmes quantiques et/ou relativistes. De plus, le résultat d'une mesure procède nécessairement d'un cadre interprétatif non-neutre, issu lui-aussi d'un paradigme conceptuel préexistant et doté d'un domaine de validité et d'applicabilité. L'articulation entre le développement des modèles physique d'une part et leur mise à l'épreuve par l'expérience d'autre part, présente des caractéristiques d'intrication non-triviales dont l'étude et la compréhension sont nécessaire à la pratique du physicien lorsqu'elle se veut consciente et profonde.

Dans la continuité des deux précédents ateliers organisés au sein de l'Espace de Structure et réactions Nucléaire Théorique, le SPhN et le Larsim se proposent de mener une réflexion sur cette thématique dans le but d'interroger la valeur des modèles et des théories physiques à partir de la considération de leurs limites intrinsèques au regard du domaine d'extension de l'expérience. On insistera en particulier sur le statut hypothétique des modèles (leur sous-détermination par rapport à l'expérience, leur éventuelle incomplétude) ainsi que sur les ruptures conceptuelles survenues entre les théories (incommensurabilité) comme sur les lacunes au sein de chacune d'entre-elles (inconsistance).

Cet éclairage critique ne vise pas à décourager les ambitions de la recherche scientifique ou à relativiser la validité des modèles et des théories, mais, bien au contraire, à montrer comment la conscience de la finitude de nos connaissances constitue un appui solide pour élaborer des théories effectives, c'est-à-dire opérationnelles dans un cadre de validité bien défini, et des modèles perfectibles, c'est-à-dire ouverts à des transpositions et à des révisions. La pensée des limites et de la précarité des fondations doit donc être conçue comme un exercice réflexif qui ouvre l'horizon d'une démarche constructive et inventive.

*Electronic address: vincent.bontems@cea.fr

[†]Electronic address: thomas.duguet@cea.fr

[‡]Electronic address: stefano.panebianco@cea.fr

L'atelier, d'une durée de cinq jours, s'adresse à un public large de physiciens, théoriciens ou expérimentateurs, s'intéressant aux fondements et aux limites de la pratique de la recherche en physique. Bien que les éléments conceptuels et méthodologiques discutés lors des deux précédents ateliers constituent un bagage utile, la participation à ce troisième atelier ne nécessite pas de connaissances préalables en philosophie (générale ou des sciences). Du fait des thématiques abordées, les physiciens subatomistes, et en particuliers ceux des particules, devraient pouvoir tirer profit de cet atelier.

Comme il est désormais d'usage, l'atelier s'articule autour de modules pédagogiques, en nombre de 15, et d'une séance de discussion quotidienne. Après l'habituelle introduction aux notions essentielles à la compréhension de la thématique, on s'intéressera à la sous-détermination des modèles physique au regard du domaine d'existence de l'expérience avant de discuter des techniques de réduction à l'information "utile" au sein d'un modèle. Ces deux modules nous permettront d'aborder une première discussion portant sur la notion même de modélisation et sur les enjeux de cette pratique scientifique.

Le concept de sous-détermination étant intimement relié à celui d'incomplétude, une présentation du célèbre débat autour de l'incomplétude en mécanique quantique montrera comment l'évolution des outils interprétatifs développés depuis les années 1930 nous empêche de trancher cette question de manière triviale et univoque. Cela nous amènera à constater que la question de l'incomplétude impose tôt au tard une comparaison entre des paradigmes conceptuels différents dont on peut questionner le caractère opérant au regard de l'incommensurabilité potentielle de ces paradigmes. Au coeur du paradigme quantique se loge notamment la notion "d'intrication" entre sous systèmes, notion sous tendue de manière très spécifique par la structure de produit tensoriel d'espaces de Hilbert mis en jeu dans le formalisme pour décrire la mise en corrélation de deux systèmes. Les caractéristiques de ce paradigme seront mis en question via l'étude de descriptions alternatives de l'intrication quantique nous permettant ainsi de mieux comprendre les raisons physiques qui font que le modèle canonique est celui décrit par la structure de produit tensoriel. Dans la foulée de ces trois modules se tiendra une discussion sur la possibilité d'obtenir une description complète de la réalité physique.

Le bagage conceptuel développé lors des deux premières journées nous permettra de nous atteler à une réflexion épistémologique sur l'articulation entre "théories fondamentales" et "théories effectives". En particulier, le passage de la chromo dynamique quantique à la théorie effective des champs chirale sera étudié à titre d'illustration. Dans ce cadre, le concept de "naturalité", souvent utilisé en théorie quantique des champs, notamment dans les approches fondées sur le "réglage fin" pour décrire la physique qui échappe aux contraintes du Modèle Standard, sera examiné. Afin de discuter plus avant le sens et les limites des théories effectives, une stratégie d'engagement fondée sur les travaux de F. Gonseth sera explicitée et suivie d'une discussion sur la notion d'unification en science physique.

Dans le but de questionner le concept d'incomplétude à un niveau d'abstraction plus élevé, l'atelier se poursuivra par une réflexion au niveau du langage même de la physique, les mathématiques, et portant sur le théorème d'incomplétude de Gödel et des connections qu'il entretient avec d'autres champs scientifiques; le modèle "computationnel" en psychologie cognitive par exemple. Cela nous amènera à discuter des limites du raisonnement rationnel avant d'affronter les limites de la pensée rationnelle elle-même. La discussion sur le théorème d'incomplétude de Gödel servira également de base pour illustrer la façon dont l'existence de propositions indécidables peut être surmontée pragmatiquement dans une démarche de construction d'idées innovantes. La tension entre la démarche constructiviste et la limite imposée par l'incomplétude fera l'objet d'une discussion qui clôturera la quatrième journée.

La gnoséologie et/ou la mise en évidence des limites méthodologiques débouchent souvent sur le relativisme. Cependant, l'évolution des critères éthiques, tout en ayant une influence décisive sur le développement des théories physique, peut s'articuler au moyen du concept de "référentiel" éthique dont l'incomplétude autorise l'idée de "progrès éthique". Cette analyse sera alors mise au regard de l'évolution des systèmes juridiques, dont l'incomplétude, tout comme en physique, constitue non pas une limite infranchissable mais un moteur puissant et efficace d'évolution des normes. Pour finir, une dernière discussion tentera de mettre en perspective l'approche normative avec les exigences descriptives et prédictives qui sont à la base de la recherche en physique et de la quête de compréhension de la réalité.

II. OBJECTIFS DE L'ATELIER

En résumé, les objectifs de l'atelier sont :

1. fournir aux physiciens, théoriciens et expérimentateurs, des outils conceptuels pouvant nourrir leur réflexion sur les concepts d'incomplétude, sous-détermination et sur la portée de l'expression "théorie effective",
2. exposer les physiciens subatomistes à l'état de l'art des réflexions philosophiques sur la valeur, la validité et la portée gnoséologique d'une théorie physique et de son articulation avec la mise en évidence expérimentale,
3. consolider les liens entre l'ESNT et le Larsim initiés lors des ateliers précédents et procéder à une ouverture en direction des physiciens des particules, aussi bien du CEA que du CNRS.

III. MODULES ET DISCUSSIONS

- **Module 1: Introduction aux notions**

V. Bontems (LARSIM-CEA)

On reviendra sur la définition des notions mises en jeu (sous-détermination, incomplétude et incommensurabilité) ainsi que sur quelques jalons de l'histoire de la philosophie qui ont contribué à complexifier la problématique qu'elles balisent : quelle relation établir entre les prétentions de "la" science à l'universalité et à l'efficacité ?

- **Module 2: Sous-détermination des modèles**

V. Bontems (LARSIM-CEA)

La sous-détermination des modèles physiques par rapport aux données expérimentales a été soulignée par P. Duhem dès 1906 (*La Théorie physique : sa structure, son objet*). L'importance de ce résultat épistémologique est souvent méconnue. Il rend intenable l'assez vague conception poppérienne qui domine, en général, les discussions sur la scientificité des énoncés, des modèles ou des théories.

- **Module 3: Réduction de modèles**

A. Nouy (Ecole Centrale Nantes)

Pour évaluer des quantités d'intérêt lors d'une expérience numérique (intervalles de confiance, indices de sensibilité, ...), il faut le plus souvent faire appel de nombreuses fois au code de calcul. Le temps de calcul permettant d'estimer correctement ces quantités d'intérêt peut alors devenir prohibitif. Diverses techniques permettent de réduire ce temps de calcul tout en maîtrisant les erreurs, i.e. en maîtrisant la perte d'information qui en résulte. Il s'agit soit de méthodes d'approximation ou des méthodes d'interpolation. Plusieurs de ces techniques seront présentées et comparées dans ce module.

- **Module 4: La Mécanique Quantique est-elle incomplète ? L'expérience EPR**

E. Klein (LARSIM-CEA)

En 1935, A. Einstein, B. Podolsky et N. Rosen publient un article qui fera date dans l'histoire de la mécanique quantique car il décrit une expérience de pensée dont le résultat paradoxal vise à établir "l'incomplétude" de la mécanique quantique. Cet argument n'a pas toujours été bien compris, à commencer par ceux à qui il s'adressait, et il faut prendre garde à cerner ce qu'entend Einstein par « incomplétude » avant de vouloir trancher la question.

- **Module 5: Le schisme de la physique et l'incommensurabilité**

V. Bontems (LARSIM-CEA)

L'incommensurabilité est une notion popularisée par l'ouvrage de T.S. Kuhn (*La structure des révolutions scientifiques*) qui affirme que deux "paradigmes" ne peuvent être comparés car il n'existe pas de méta-paradigme, ni de procédure de traduction parfaite entre eux. Cette thèse s'est imposée notamment en raison de la nouveauté radicale de la physique quantique. J-F. Sacchi (*Sur le développement des théories scientifiques*) montre toutefois que ce sont plutôt des "commensurations" ou "incommensurations" relatives qui s'opèrent.

- **Module 6: La sous-détermination du modèle quantique ?**

A. Grinbaum (LARSIM-CEA)

La frontière entre la physique classique et la physique quantique passe par une caractérisation quantitative de la force des corrélations entre les sous-systèmes d'un système composé. Pourquoi est-ce alors la borne quantique des inégalités de Bell qui s'impose? Explorer les variantes de la mécanique quantique, c'est tâcher de comprendre les principes physiques qui motivent la valeur de cette borne.

- **Module 7: Théories effectives et théories fondamentales**

U. van Kolck (IPNO-CNRS)

Les théories effectives sont les théories qui présupposent l'existence d'une théorie (plus) fondamentale sous-jacente sans toujours pouvoir l'exhiber ou pouvoir démontrer le principe de leur fondation dans celle-ci. On peut illustrer cette situation épistémologique par l'exemple de la relation entre la chromo-dynamique quantique et la théorie effective des champs chirale.

- **Module 8: La "naturalité" au-delà du modèle standard**

A. Grinbaum (LARSIM-CEA)

Les arguments basés sur la "naturalité" sont fréquents dans les articles sur le "réglage fin" de la théorie quantique des champs et cette notion esthétique assez vague a reçu une définition très précise dans les débats sur le mécanisme de Higgs. Nous verrons comment elle peut servir à comparer différents modèles qui s'aventurent au-delà du modèle standard tout en montrant qu'il s'agit, au mieux, d'un critère socio-historiquement surdéterminé.

- **Module 9: Théories effectives et stratégie d'engagement**

G. Cohen-Tannoudji (LARSIM-CEA)

F. Gonseth défend l'idée que d'un horizon profond de réalité peuvent émerger plusieurs horizons apparents divergents. Plutôt que de chercher à fonder à l'avance les conditions de la scientificité, il préconise alors l'adoption d'une stratégie d'engagement, qui vise à développer les théories effectives et à les articuler. On peut adopter cette démarche à partir de la considération des constantes universelles et des quantifications possibles.

- **Module 10: Incomplétude (Gödel) et incalculabilité (Turing) en mathématiques**

J.-P. Delahaye (LIFL-Université Lille 1/CNRS)

Le théorème d'incomplétude de K. Gödel (1931) n'est pas seulement un résultat décisif de logique mathématique sur la question du fondement des mathématiques. C'est aussi le point de départ d'une réflexion sur la redéfinition de l'activité du mathématicien, sur la connexion des mathématiques avec les autres champs et, en particulier, sur les limites du modèle "computationnel".

- **Module 11: Cohen et la construction de concepts innovants**

A. Hatchuel (Mines-ParisTech)

Dans le prolongement de la preuve de l'existence de propositions indécidables, les travaux de P. Cohen sur le *forcing* ont mis en évidence la possibilité d'une démarche constructiviste. Cette méthode peut être transposée aux problèmes de la conception innovante et éclairer les pratiques de la recherche scientifique et technique.

- **Module 12: Raisonnement, argumentation, et science**

H. Mercier (L2C2-CNRS)

Le raisonnement est souvent compris comme une capacité essentiellement individuelle : en examinant les raisons pour nos croyances et nos décisions, le raisonnement nous permettrait de les améliorer. Cependant, la psychologie expérimentale a révélé que le raisonnement ne parvient souvent pas à remplir cette fonction. Pour expliquer ces résultats, nous suggérons que la fonction du raisonnement est argumentative, et qu'il donnerait donc de meilleurs résultats lorsque les gens échangent des arguments que lorsqu'ils raisonnent seuls. Des résultats soutenant cette hypothèse seront présentés. En conclusion, je discuterai du cas particulier du raisonnement scientifique et de la place de l'argumentation dans la science.

- **Module 13: Les limites de la pensée rationnelle**

A. Vallet (Adamant-Hôpitaux de Saint Maurice)

La folie est souvent ce moment de bascule où le rideau déchiré de la réalité plonge le sujet au coeur du Réel. Ce dévoilement le projette dans une quotidienneté caractérisée par le règne de l'Inquiétante Étrangeté (Unheimlich). Nous tenterons de revenir, à travers des exemples cliniques mais aussi de la figure de Kurt Gödel ou de Philip K. Dick, sur les limites de la science médicale et de la pensée rationnelle dans le champ de la folie ainsi que sur les concepts à y fonder de manière permanente pour s'y tenir, entre science et fiction.

- **Module 14: Relativité des évaluations et ouverture des référentiels**

V. Bontems (LARSIM-CEA)

La relativité des évaluations morales et politiques en fonction des positions et des trajectoires sociales impose-t-elle un "relativisme sceptique" ? En repartant de la notion de "référentiel" chez Gonsseth et, en particulier, de l'incomplétude des valeurs-cadres qui donnent sens aux normes, on interrogera la possibilité d'un progrès éthique. On présentera les analyses sociologiques de P. Bourdieu sur la détermination sociale du jugement de goût comme une illustration possible de cette thèse.

- **Module 15: La place dans le droit de la vérité et de la réalité**

M.-A. Frison-Roche (Sciences Po)

Le droit prétend être un système autonome, produisant sa propre réalité, incontestable. Acte de langage, il est performatif, en cela souverain. La mondialisation le permet-elle encore ? Pourtant, le droit étant aussi une pratique sociale, soit il prend son objet comme limite (il ne peut dire qu'il fait jour la nuit), soit il prend son objet comme maître : le droit nazi établit la "loi du sang". Aujourd'hui, l'économie est-elle la loi du droit ? En outre, le droit n'est-il pas positif qu'une fois appliqué ? Dès lors, le droit recherche l'adhésion, par un discours qui séduit et balance les intérêts. Mais dans le même temps, le droit veut de plus en plus refléter la réalité. Sa première évolution l'éloigne de la vérité pour aller vers le consensus, la seconde prétend la rapprocher. Par exemple, qui décide de la filiation ? On en vient à douter que le Politique ou la morale aient encore une place dans le système juridique.

- **Discussion 1: Les enjeux de la modélisation.**

- **Discussion 2: La compréhension physique de la réalité peut-elle être "complète" ?**

- **Discussion 3: Quelle unité pour la science physique ?**

- **Discussion 4: Les incertitudes de la recherche.**
- **Discussion 5: Analogies et contrastes entre systèmes normatifs et descriptifs.**

IV. BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

- **Module 1: Introduction aux notions**

1. E. Agazzi (éd.), *La comparabilité des théories scientifiques*, Fribourg, Editions universitaires de Fribourg, 1990.
2. G. Bachelard, *L'activité rationaliste de la physique contemporaine*, Paris, Presses universitaires de France, 1951.
3. L. Laudan, *Progress and its problems. Towards a theory of scientific growth*, Berkeley, University of California Press, 1978.

- **Module 2: Sous-détermination des modèles**

1. P. Duhem, *La théorie physique, sa structure, son objet*, Paris, Vrin, 1906.
2. K. Popper, *La logique de la découverte scientifique*, Paris, Payot, 1973.
3. J. Leroux, *Une histoire comparée de la philosophie des sciences*, Laval, Presses universitaires de Laval, 2010.

- **Module 3: Réduction de modèles**

1. L. Grasedyck, D. Kressner, and C. Tobler, *A literature survey of low-rank tensor approximation techniques*, GAMM-Mitteilungen, 2013.
2. A. Nouy, *Proper Generalized Decompositions and separated representations for the numerical solution of high dimensional stochastic problems*, Archives of Computational Methods in Engineering, 17(4):403-434, 2010.
3. A. T. Patera and G. Rozza, *Reduced basis approximation and a posteriori error estimation for parametrized partial differential equations*, Version 1.0, Copyright MIT 2006.

- **Module 4: La Mécanique Quantique est-elle incomplète? L'expérience EPR**

1. A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?*, Phys. Rev. 47 (1935) 777.
2. A. Aspect, P. Grangier, G. Roger, *Experimental realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A new violation of Bell's inequalities*, Phys. Rev. Lett. 49 (1982) 91.
3. .

- **Module 5: Le schisme de la physique et l'incommensurabilité**

1. T. S. Kuhn, *La structure des révolutions scientifiques*, Paris, Flammarion, 1983.
2. K. Popper, *La théorie quantique et le schisme en physique*, Paris, Payot, 1973.
3. J.-C. Sacchi, *Sur le développement des théories scientifiques*, Paris, L'Harmattan, 2000.

- **Module 6: La sous-détermination du modèle quantique?**

1. A. Grinbaum, *Mécanique des étreintes : intrication quantique*, Paris, Encre Marine, 2014.
2. A. Grinbaum, *Reconstruction of quantum theory*, British Journal for the Philosophy of Science 58 (2007) 387.

- **Module 7: Théories effectives et théories fondamentales**

1. S. Hartmann, *Effective field theories, reductionism and scientific explanation*, Stud. Hist. Phil. Mod. Phys. 32 (2001) 267.
2. U. van Kolck, *Effective field theories of loosely bound nuclei*, C. Scheidenberger and M. Pfützner editors, Lecture Notes in Physics, Vol. 879, Springer Berlin Heidelberg, pp. 123, 2014.

• **Module 8: La "naturalité" au-delà du modèle standard**

1. A. Grinbaum, *Which fine-tuning arguments are fine?*, Foundations of physics 42 (2012) 615; arXiv:0903.4055.

• **Module 9: Théories effectives et stratégie d'engagement**

1. <http://www.gicotan.fr/divers/blog/63-blog/284-resume-de-mes-interventions-prevues-le-15-le-20-et-le-22-novembre-prochains.html>.

• **Module 10: Incomplétude (Gödel) et incalculabilité (Turing) en mathématiques**

1. K. Gödel, *Collected works I. Publications 1929-1936*, S. Feferman et al. (eds.), 1986, Oxford University Press.
2. J.-P. Delahaye, *L'intelligence et le calcul: de Gödel aux ordinateurs quantiques*, Belin/Pour la science, 2002.
3. J.-P. Delahaye, *La logique un aiguillon pour la pensée*, Belin/Pour la science, 2012.

• **Module 11: Cohen et la construction de concepts innovants**

1. A. Hatchuel, B. Weil, *Les nouveaux régimes de la conception*, Paris, Hermann, 2014.
2. A. Hatchuel, B. Weil, *C-K design theory: an advanced formulation*, Research in Engineering Design 19 (2009) 181.

• **Module 12: Raisonnement, argumentation, et science**

1. H. Mercier, D. Sperber, *Why do humans reason? Arguments for an argumentative theory*, Behavioral and Brain Sciences 34 (2011) 57.

• **Module 13: Les limites de la pensée rationnelle**

1. *Création et Schizophrénie*, Jean Oury, Editions Galilée, 1989.
2. *Si ce monde vous déplaît...*, Philip K. Dick, Editions de l'éclat, 1998.
3. *Les démons de Gödel, logique et folie*, Pierre Cassou-Noguès, Editions du Seuil, 2007.

• **Module 14: Relativité des évaluations et ouverture des référentiels**

1. F. Gonseth, *Le référentiel, univers obligé de médiation*, Lausanne, L'âge d'homme, 1975.
2. P. Bourdieu, *Les règles de l'art*, Paris, Le Seuil, 1992.

• **Module 15: La place dans le droit de la vérité et de la réalité**

1. H. Kelsen, *Théorie pure du droit*, extrait (sur les rapports entre le droit et la nature), 1931; trad. française de la 2^{ième} éd. de Reine Rechtslehre par C. Eisenmann, Dalloz, Paris, 1962
2. H. Motulsky, *Principes d'une réalisation méthodique du droit privé - La théorie des éléments générateurs des droits subjectifs*, extrait (introduction et début de l'ouvrage relatif à la règle de droit), 1948; Dalloz, Paris, 2002
3. C. Perelman, *Logique juridique. Nouvelle rhétorique*, extrait (introduction), 1978 ; 2^{ième} éd., coll. "Méthodes du droit", Dalloz, Paris, 1978
4. J. Carbonnier, *Le Code civil*, in P. Nora, *Les lieux de mémoire, III. La Nation, 2. Le territoire, l'Etat, le patrimoine*, coll. "nrf - Bibliothèque illustrée des histoires", Gallimard, Paris, 1986, p.293
5. N. Luhmann, *L'unité du système juridique*, in Archives de Philosophie du Droit (APD), *Le système juridique*, 1986, p.163