

Histoire récente de l'utilisation du concept de « modèle » en physique théorique

Congrès de la SFHST, Montpellier, 22 avril 2021

Thierry Masson

Centre de Physique Théorique & Centre Gilles Gaston Granger



Introduction, motivation et méthodologie

- **Motivation principale** : travail en philosophie des sciences pour évaluer la place épistémologique des théories et des modèles dans la physique contemporaine.
- **Méthodologie** : recherche d'occurrences des mots « modèle » et « théorie » dans les écrits des physiciens théoriciens du XX^e siècle.
 - ▶ articles de recherche, œuvres complètes, livres d'articles choisis, rapports des Congrès Solvay...
 - ▶ je n'ai pas pris en compte les commentaires des éditeurs de ces ouvrages...
- **Étendue de l'étude** : du début du XX^e siècle jusqu'à aujourd'hui en physique théorique.
- **Date de départ de l'étude** : l'article « Models » de Ludwig Boltzmann de 1902.

BOLTZMANN, L. (1902). « Models ». In : *Encyclopedia Britannica*. Adam & Charles Black, Edinburg & London; 'The Times' Printing House Square, London

Plan de l'exposé

- 1 1902 : L'article de Boltzmann et les modèles mécaniques
- 2 1902–1925 : Modèles et changement de paradigme (Mécanique Quantique)
- 3 1930–1970 : Les modèles exploratoires d'une théorie (Théorie Quantique des Champs)
- 4 1970 : Les modèles standards
- 5 Conclusions

1902 : L'article de Boltzmann et les modèles mécaniques

- 1 1902 : L'article de Boltzmann et les modèles mécaniques
- 2 1902–1925 : Modèles et changement de paradigme (Mécanique Quantique)
- 3 1930–1970 : Les modèles exploratoires d'une théorie (Théorie Quantique des Champs)
- 4 1970 : Les modèles standards
- 5 Conclusions

L'article de Boltzmann

[...] nos pensées sont liées aux choses de la même manière que les modèles le sont aux objets qu'ils représentent.

 BOLTZMANN, *Models* (1902)

- Boltzmann fait le bilan des types de modèles utilisés en physique jusqu'à la fin du XIX^e siècle. (mécanique des fluides, thermodynamique, électromagnétisme)

① Modèles mécaniques (ou cinématiques) :

- **nécessité intellectuelle** dans le cadre de l'électromagnétisme : comprendre, décrire, et guider la recherche ;
- liens avec la mécanique de Newton et la mécanique des fluides (pour décrire l'éther par exemple) ;

② Modèles mathématiques :

- **nécessité technique** pour la mécanique des fluides, l'élasticité et les déformations des matériaux, etc ;
- étudier des développements techniques, obtenir des résultats « exacts ».

- L'article est écrit avant les grandes révolutions en physique :
la Relativité Restreinte en 1905 ; la Relativité Générale en 1916 ; la Mécanique Quantique en 1925.

Modèles mécaniques (ou cinématiques)

Lorsque, par conséquent, nous nous efforçons de compléter [...] nos idées mécaniques et physiques par des modèles cinématiques, nous ne faisons qu'étendre et poursuivre le principe au moyen duquel nous comprenons les objets en pensée et les représentons dans le langage ou l'écriture.

[...]

L'importance variable que l'on a accordée ces derniers temps aux modèles de ce type est intimement liée aux changements qui se sont produits dans nos conceptions de la nature.

📄 BOLTZMANN, *Models* (1902)

- Modèles spécifiques à l'« école anglaise » (électromagnétisme).
- Très critiqués par Poincaré et Duhem (entre autres).
- Abandonnés avec l'arrivée de la Relativité Restreinte (éther superflu).

Modèles mathématiques

Les ressources des mathématiques pures étant particulièrement appropriées à la description exacte des relations entre quantités, l'école de Kirchhoff a mis l'accent sur la description par des expressions et des formules mathématiques, et le but de la théorie physique a été considéré comme étant principalement la construction de formules par lesquelles les phénomènes dans les diverses branches de la physique devraient être déterminés avec la plus grande approximation de la réalité. Cette conception de la nature de la théorie physique est connue sous le nom de phénoménologie mathématique; il s'agit d'une présentation des phénomènes par analogies, mais seulement par celles que l'on peut appeler mathématiques.

📄 BOLTZMANN, *Models* (1902)

- Utilisation de mathématiques dans des domaines de la physique très divers.
- Ces modèles mathématiques sont différents des mathématiques de la mécanique de Newton (= théorie).
- Types de modèles encore utilisés aujourd'hui.

1902–1925 : Modèles et changement de paradigme (Mécanique Quantique)

- 1 1902 : L'article de Boltzmann et les modèles mécaniques
- 2 1902–1925 : Modèles et changement de paradigme (Mécanique Quantique)**
- 3 1930–1970 : Les modèles exploratoires d'une théorie (Théorie Quantique des Champs)
- 4 1970 : Les modèles standards
- 5 Conclusions

Modèles et paradigmes...

- Kuhn a fondé son analyse des révolutions scientifiques sur les bouleversements du début du XX^e siècle :
 - ▶ la Relativité Générale ;
 - ▶ la Mécanique Quantique.

- Parfois des phénomènes ne peuvent pas être décrits et interprétés dans un cadre théorique donné.
 - ▶ Il faut changer le cadre de pensée, le « paradigme »...
 - ▶ Pour cela il faut décrire certains phénomènes avec des **modèles hors des cadres théoriques connus**.

- L'histoire de l'usage du mot modèle illustre ce type de période « instable » décrite par Kuhn.

KUHN, T. S. (1972). *La structure des révolutions scientifiques*. Flammarion

La Relativité Restreinte et la Relativité Générale

- Pour la Relativité Restreinte et la Relativité Générale, le mot modèle n'est jamais utilisé par Einstein.
- Einstein utilise souvent « modèle mécanique » dans le cadre de la Mécanique Classique, « modèle moléculaire » pour faire référence à l'hypothèse moléculaire...
- Dans le livre EINSTEIN, *The Meaning of Relativity* (1922), le mot « théorie » apparaît plus de 200 fois, le mot modèle n'apparaît qu'une seule fois hors d'un contexte physique...
- Les premiers cosmologistes utilisent le mot « univers » à la place de « modèle cosmologique » : “static universe”, “the metric structure of the universe”, “spherical universe”...

Des modèles pour construire la Mécanique Quantique

- Le besoin de nouveaux modèles est évoqué dès les premières expériences que n'arrivent pas à expliquer la Mécanique Classique ou l'électromagnétisme.

[...] nous devons affronter le problème de la constitution de l'atome, et voir si nous pouvons imaginer un modèle qui ait la possibilité d'expliquer les propriétés remarquables des substances radioactives.

📖 J. J. THOMSON, *Electricity and Matter* (1904)

- Congrès Solvay de 1911, dont le titre est « La théorie du rayonnement et des quanta » :
 - ▶ P. Langevin, L. Brillouin, A. Sommerfeld, W. Nernst, M. Curie... utilisent le mot modèle ;
 - ▶ H. Poincaré et A. Einstein ne l'utilisent pas !

Des modèles pour construire la Mécanique Quantique

- Dès 1913, Niels Bohr parle du travail de Rutherford (de 1912) comme d'un modèle.

(Rutherford ne parle pas de son travail comme d'un modèle)

[...] difficultés délibérément évitées dans les modèles atomiques précédemment considérés, par exemple, dans celui proposé par Sir J. J. Thomson. [...]

La principale différence entre les modèles atomiques proposés par Thomson et Rutherford réside dans le fait que les forces agissant sur les électrons dans le modèle atomique de Thomson permettent certaines configurations [...]

📖 BOHR, *On the constitution of atoms and molecules* (1913)

- De nombreuses occurrences du mot modèle chez Bohr est un mot composé : “atom-model”.

(Mot valise inspiré de la langue allemande?)

- D'autres scientifiques utilisent aussi le mot modèle, associé aussi au mot « atome ».

Des modèles dans le paradigme de la Mécanique Quantique

- La Mécanique Quantique est élaborée en 1925.
➔ Dès cette époque Bohr ne parle plus de modèle d'atomes.
- Wolfgang Pauli a anticipé ce changement dès 1924.

Dans votre présentation de la structure des complexes, j'ai trouvé particulièrement intéressant que vous ayez omis toute référence à des modèles. Le concept de modèle est maintenant dans une crise fondamentale grave, qui, je crois, ne prendra fin que par un renforcement nouveau et radical des disparités entre la théorie classique et la théorie quantique.

📧 Lettre de W. Pauli à A. Sommerfeld, 6 décembre 1924

📖 STOLZENBURG, *Niels Bohr Collected Works, Volume 5, The Emergence of Quantum Mechanics (Mainly 1924–1926)* (1984)

- La physique a un nouveau paradigme, celui de la Mécanique Quantique.
➔ Des modèles au sein de la Mécanique Quantique sont construits pour comprendre et décrire le magnétisme, les atomes complexes, la supraconductivité...
- Concernant la structure du noyau atomique, le mot théorie est favorisé...
(Sauf pour des « modèles phénoménologiques » utilisés en physique nucléaire)

1930–1970 : Les modèles exploratoires d'une théorie (Théorie Quantique des Champs)

- 1 1902 : L'article de Boltzmann et les modèles mécaniques
- 2 1902–1925 : Modèles et changement de paradigme (Mécanique Quantique)
- 3 1930–1970 : Les modèles exploratoires d'une théorie (Théorie Quantique des Champs)**
- 4 1970 : Les modèles standards
- 5 Conclusions

1930–1950 : L'épisode QED

- **QED** = “Quantum Electrodynamics” en anglais = « Électrodynamique Quantique » en français.
 - ▶ Élaborée dans les années 1930–1940.
 - ▶ Électromagnétisme de Maxwell + Mécanique Quantique (équation de Dirac) + Relativité Restreinte.
- **La QED n'a pas été envisagée comme un modèle**, mais comme un cadre théorique général.
 - ▶ Même statut que la Mécanique Quantique et la Relativité Restreinte.
 - ▶ Résolution de problèmes de calculs divergents (infinis) via la **méthode de renormalisation**.
 - ▶ Très grand succès empirique à la fin des années 1940.
- Années 1950–1960 : découverte de nombreuses particules subatomiques (accélérateurs et collisionneurs).
➔ La QED ne permet pas d'expliquer cette phénoménologie nouvelle.
- La QED sert de prototype pour construire la **Théorie Quantique des Champs (TQC)**.
 - ▶ Théorie très nouvelle dans ses principes.
 - ▶ Nombreuses années pour l'explorer : manipuler les structures, mener des calculs, gérer les quantités infinies...
 - ▶ Problèmes formels à étudier : différentes procédures de quantification, symétries, théories de jauge...

Les « modèles exploratoires » en Théorie Quantique des Champs

- Des « modèles exploratoires », “toy models” en anglais, ont permis d'explorer la TQC.

Les modèles de ce type [modèles exploratoires] ne remplissent pas une fonction de représentation et ne sont pas censés nous instruire sur quoi que ce soit au-delà du modèle lui-même. L'objectif de ces modèles est de tester de nouveaux outils théoriques qui seront utilisés ultérieurement pour construire des modèles représentatifs.

📖 FRIGG et HARTMANN, *Models in Science* (2020)

- Quelques usages de ces modèles en TQC :

- ① Lien entre les différentes **méthodes de quantification**.
- ② Explorer des modèles avec des types de **champs variés** (électromagnétiques, scalaires, de spineurs...).
- ③ Systématiser les **techniques de calculs** : développements perturbatifs, diagrammes de Feynman.
- ④ Adapter et analyser les méthodes de **renormalisation** inventées pour la QED.
- ⑤ Étudier les **théories de jauge**, dont l'électromagnétisme est le prototype.
(En 1954, Yang et Mills généralisent ce principe)
- ⑥ Donner des masses à des champs non massifs (**brisure spontanée de symétrie**).

Théorie Quantique des Champs et physique des particules

- Période 1960–1975 : les physiciens sont des “model builders”...
 - ▶ Nombreuses découvertes de particules subatomiques, phénoménologie qui se précise...
 - ▶ Grand usage des “toy models” qui sont assemblés pour former des modèles plus réalistes.

- Pendant cette période, les mots « modèle » et « théorie » sont souvent utilisés l'un pour l'autre.

- Le statut de « théorie » pour la QED s'est effrité.

Chaque physicien semble choisir une sémantique selon ses affinités et son point de vue.

 - ▶ Logique de construire une extension de QED ➔ théorie
 - ▶ Reproduire une partie de la réalité empirique ➔ modèle
 - ▶ Choix conscients ou inconscients ?

(La pratique de la physique théorique ne requiert pas nécessairement une réflexion sur les structures manipulées !)

- Congrès de Solvay de 1961, dont le titre est « La théorie quantique des champs » :
 les physiciens parlent de “phenomenological view”, “phenomenological description”,
 “phenomenological treatment”, “phenomenological analysis”...

Comparaison MQ *versus* TQC

- La **Mécanique Quantique** a été construite à partir de phénomènes à expliquer.
 - ▶ Les physiciens ont commencé par des modèles « hybrides » : Mécanique Classique + principes extérieurs.
 - ▶ Des règles sont alors apparues.
 - ▶ La théorie a été proposée puis vérifiée.

- La **Théorie Quantique des Champs** a été développée à partir de la QED.
 - ▶ Le formalisme théorique a été construit par généralisation d'une théorie.
 - ▶ Des “toy models” ont permis aux physiciens de comprendre différents aspect de la TQC : structures, implications, contraintes générales, limites, défauts, avantages, possibilités descriptives...
 - ▶ Cette « trousse à outils de modèles simples » a facilité la construction de modèles réalistes.

1970 : Les modèles standards

- 1 1902 : L'article de Boltzmann et les modèles mécaniques
- 2 1902–1925 : Modèles et changement de paradigme (Mécanique Quantique)
- 3 1930–1970 : Les modèles exploratoires d'une théorie (Théorie Quantique des Champs)
- 4 1970 : Les modèles standards**
- 5 Conclusions

Un modèle pour les guider tous...

- Les modèles construits selon la démarche décrite précédemment s'affinent années après années.
➔ Ils convergent vers un modèle unique qui explique toute la phénoménologie.

- Ce modèle prend le nom de **modèle standard**.

Cela a conduit à un certain modèle de jauge à quatre quarks $SU(2) \otimes U(1)$ que nous appellerons ici le modèle « standard ».

📖 PAIS et TREIMAN, *How Many Charm Quantum Numbers are There?* (1975)

- En cosmologie, une (première?) occurrence de cette notion est antérieure de 2 ans :

Le modèle standard de l'univers primitif est celui étudié par Gamow et ses collègues [...]

📖 HARRISON, *Standard model of the early universe* (1973)

- Le choix sémantique de « modèle standard » :

- ▶ ce modèle est choisi sur des critères empiriques parmi d'autres propositions semblables ;
- ▶ ce n'est pas une structure qui serait « unique » à cause de contraintes ou de principes théoriques ;
- ▶ ce modèle est un **modèle de référence** voué à être modifié par de nouvelles découvertes.

- À partir des années 1970 : vérifications, confirmations et tests de ces modèles standard.

Conclusions

- 1 1902 : L'article de Boltzmann et les modèles mécaniques
- 2 1902–1925 : Modèles et changement de paradigme (Mécanique Quantique)
- 3 1930–1970 : Les modèles exploratoires d'une théorie (Théorie Quantique des Champs)
- 4 1970 : Les modèles standards
- 5 **Conclusions**

Conclusions

- L'usage du mot modèle accompagne le développement de la physique théorique du XX^e siècle. (l'usage du mot théorie est à prendre en compte aussi...)
- L'usage du mot s'est diversifié en fonction des besoins, aussi bien techniques que intellectuels.
- Ces usages ne se sont pas toujours substitués les uns aux autres.
- La façon dont les physiciens ont usé de modèles est le reflet de la démarche de la recherche.
 - ▶ La Mécanique Quantique s'est construite « par le bas » : modèles au plus près des données empiriques.
 - ▶ La TQC s'est construite « par le haut » : modèles au plus près des structures théoriques et du formalisme.
- Le succès de ces approches prend corps dans les « Modèles Standard ».
(infiniment petit, infiniment grand)
- Autres types de modèles non abordés dans cette étude : les « modèles numériques ».

Merci

Les modèles selon Boltzmann

Les modèles sont de la plus haute importance dans les sciences mathématiques, physiques et mécaniques. Depuis longtemps, la philosophie a considéré que l'essence de notre processus de pensée résidait dans le fait que nous attachons aux divers objets réels qui nous entourent des attributs physiques particuliers – nos concepts – et qu'à l'aide de ceux-ci, nous essayons de représenter ces objets à notre esprit. De tels points de vue étaient autrefois considérés par les mathématiciens et les physiciens comme de simples spéculations stériles, mais plus récemment, J. C. Maxwell, H. v. Helmholtz, E. Mach, H. Hertz et bien d'autres les ont mis en relation étroite avec l'ensemble de la théorie mathématique et physique. Dans cette approche, nos pensées sont liées aux choses de la même manière que les modèles le sont aux objets qu'ils représentent.

📄 BOLTZMANN, *Models* (1902)

Boltzmann et les analogies mathématiques

Une autre circonstance est intervenue. Des analogies très surprenantes et d'une grande portée se sont révélées entre des processus naturels apparemment très disparates. Il semblait que la nature avait construit les choses les plus diverses sur exactement le même modèle ; ou, selon les mots crus de l'analyste, les mêmes équations différentielles s'appliquent aux phénomènes les plus divers.

❗ Populäre Schriften, Essay 1, “On the Methods of Theoretical Physics”, 1892

📄 MCGUINNESS et BOLTZMANN, *Theoretical Physics and Philosophical Problems* (1974)

Léon Brillouin cite William Thomson (Lord Kelvin)

Faut-il s'arrêter là ? Doit-on se contenter d'avoir traduit en équations une partie des lois des phénomènes électriques et borner là sa curiosité ? Je ne le crois pas ; je pense, avec bon nombre de physiciens, que le désir de comprendre est légitime et fructueux, et c'est à Sir W. Thomson que j'emprunterai la définition de ce mot. « Il me semble que le vrai sens de la question "Comprenons-nous ou ne comprenons-nous pas un sujet particulier en Physique ?" est "Pouvons-nous faire un modèle mécanique correspondant ?" J'ai une extrême admiration pour le modèle mécanique de l'induction électromagnétique, dû à Maxwell ; il a créé un modèle capable d'exécuter toutes les opérations merveilleuses que l'électricité fait dans les courants induits, etc., et il ne peut être douteux qu'un modèle mécanique de ce genre est extrêmement instructif et marque un pas vers une théorie mécanique de l'électromagnétisme. » (*Molec. Dyn.* p. 132)

« Je ne suis jamais satisfait, tant que je n'ai pas pu faire un modèle mécanique de l'objet ; si je puis faire un modèle mécanique, je comprends ; tant que je ne puis pas faire un modèle mécanique, je ne comprends pas, et c'est pour cela que je ne comprends pas la théorie électromagnétique de la lumière. Je crois fermement en une théorie électromagnétique de la lumière ; quand nous comprendrons l'électricité, le magnétisme et la lumière, nous les verrons comme des parties d'un tout ; mais je demande à comprendre la lumière le mieux possible sans introduire des choses que je comprends encore moins. Voilà pourquoi je m'adresse à la Dynamique pure. » (*Molec. Dyn.* p. 270)

📌 Note I, Sur les dimensions des unités électriques, par M. Brillouin

📖 W. THOMSON, *Conférences scientifiques et allocutions* (1893)

Poincaré et les modèles mécaniques

Ce n'est pas d'ailleurs la première tentative que l'on faisait dans ce sens. Il est impossible de ne pas rapprocher les hypothèses de Hertz de la théorie de lord Kelvin sur l'élasticité gyrostatique.

Lord Kelvin, on le sait, a cherché à expliquer les propriétés de l'éther sans faire intervenir aucune force. Il a même donné une forme définitive à son hypothèse et représente l'éther par un de ces modèles mécaniques comme les aiment les Anglais. Les savants anglais, satisfaits d'avoir donné un corps à leurs idées, de les avoir rendues tangibles, ne sont pas effrayés par la complication de ces modèles où l'on a multiplié les tringles, les bielles, les coulisses, comme dans un atelier de mécanicien.

Décrivons, pour en donner une idée, le modèle qui représente l'éther gyrostatique. L'éther serait formé d'une sorte de réseau. Chaque maille de ce réseau est un tétraèdre. Chacune des arêtes de ce tétraèdre est formée de deux tiges, l'une pleine et l'autre creuse, coulissant l'une dans l'autre; cette arête est donc extensible, mais non flexible.

Dans chaque maille se trouve un appareil formé de trois lignes invariablement fixées l'une à l'autre et formant un trièdre trirectangle. Chacune de ces trois tiges s'appuie sur deux des arêtes opposées du tétraèdre; enfin, chacune d'elles porte quatre gyroscopes.

📄 POINCARÉ, *Les idées de Hertz sur la mécanique* (1897)

Bohr et l'abandon des modèles mécaniques

Le développement des théories électromagnétiques dans la seconde moitié du siècle dernier, suite aux découvertes d'Oersted et de Faraday, a entraîné une profonde généralisation des concepts mécaniques. Si, au départ, les modèles mécaniques jouaient un rôle essentiel dans l'électrodynamique de Maxwell, on s'est vite rendu compte de l'intérêt de dériver, à l'inverse, les concepts mécaniques de la théorie du champ électromagnétique. [...]

Au début de cet article, nous avons mentionné les difficultés fondamentales que présente la construction d'images de l'interaction entre les atomes, soit par rayonnement, soit par collisions. Ces difficultés semblent exiger justement l'abandon des modèles mécaniques dans l'espace et dans le temps, qui est un trait si caractéristique de la nouvelle mécanique quantique.

📄 BOHR, *Atomic Theory and Mechanics* (1925)

Dyson et la QED

L'électrodynamique quantique occupe une position unique dans la physique contemporaine. C'est la seule partie de notre science qui a été complètement réduite à un ensemble d'équations précises. C'est le seul domaine dans lequel nous pouvons choisir une expérience hypothétique et prédire le résultat à cinq décimales près, en étant sûrs que la théorie tient compte de tous les facteurs en jeu. L'électrodynamique quantique nous donne une description complète de ce que fait un électron ; par conséquent, dans un certain sens, elle nous permet de comprendre ce qu'est un électron. Ce n'est qu'en électrodynamique quantique que notre connaissance est si exacte que nous pouvons avoir le sentiment d'avoir une certaine compréhension de la nature d'une particule élémentaire.

📌 DYSON, F. J. (1953). Field theory. *Scientific American* 188.4, p. 57-65 (mais pas retrouvé dans ce texte...)

📖 SCHWEBER, *QED and the men who made it : Dyson, Feynman, Schwinger, and Tomonaga* (1994)

Higgs : théorie ou modèle ?

La théorie la plus simple qui présente ce comportement est une version invariante de jauge d'un modèle utilisé par Goldstone lui-même [...]

Lorsqu'on considère des modèles théoriques dans lesquels la brisure spontanée de la symétrie sous un groupe semi-simple se produit, on rencontre une variété de situations possibles correspondant aux diverses représentations irréductibles distinctes auxquelles les champs scalaires peuvent appartenir ; [...]

Il convient de noter qu'une caractéristique essentielle du type de théorie décrit dans cette note est la prédiction de multiplets incomplets de bosons scalaires et vectoriels. On peut s'attendre à ce que cette caractéristique apparaisse également dans les théories dans lesquelles les champs scalaires brisant la symétrie ne sont pas des variables dynamiques élémentaires mais des combinaisons bilinéaires de champs de Fermi.

📄 HIGGS, *Broken symmetries and the masses of gauge bosons* (1964)