

Théories effectives, une méthodologie dialectique, ouverte à l'expérience

Gilles Cohen-Tannoudji

www.gicotan.fr

Laboratoire de recherche sur les sciences de la matière
(LARSIM CEA-Saclay)

La théorie quantique des champs

Théorie quantique des champs, seconde quantification et non individualité des particules

- Le point de vue de [Weinberg](#) (arXiv:hep-th/9702027) :

“Although this is often talked about as **second quantization**, I would like to urge that this description should be banned from physics, because **a quantum field is not a quantized wave function**. (...) In its mature form, the idea of quantum field theory is that quantum fields are the basic ingredients of the universe, and **particles are just bundles of energy and momentum of the fields**. In a relativistic theory the wave function is a functional of these fields, not a function of particle coordinates. **Quantum field theory hence led to a more unified view of nature than the old dualistic interpretation in terms of both fields and particles.**”

- Le point de vue de **Schrödinger** (*La signification de la mécanique ondulatoire* in Louis de Broglie, physicien et penseur, Albin Michel 1953): « On doit regarder l'observation d'un électron comme un **événement** qui se produit à l'intérieur d'un train d'ondes Broglie quand un dispositif est interposé dans ce train, **dispositif qui de par sa nature même peut répondre seulement par réponses discontinues** : émulsion photographique, écran luminescent, de Geiger. (...) Ces incohérences seront évitées par un retour à une théorie ondulatoire que n'annuleraient pas continuellement des miracles analogues à un coup de dés ; non pas – cela va de soi – à la naïve théorie ondulatoire de jadis, mais à une plus subtile, fondée sur **la seconde quantification et la non-individualité des particules**».

Les objections d'Einstein à la physique quantique

Et ce qui apparaît essentiel dans cet arrangement des choses introduites en physique, c'est qu'à un moment donné ces choses revendiquent une existence autonome dans la mesure où elles se trouvent dans des « parties différentes de l'espace ». **Sans cette hypothèse d'existence autonome (un « être ainsi ») des choses spatialement distantes – hypothèse issue, à l'origine, de notre expérience de tous les jours –, la pensée physique, au sens qui nous est habituel, serait impossible.** On ne voit pas non plus comment, sans cette disjonction bien nette, il serait possible de formuler des lois physiques et de les vérifier. **La théorie du champ a développé à l'extrême ce principe,** dans la mesure même où les choses **élémentaires**, existant de façon indépendante les unes des autres, sur lesquelles elle se fonde, ainsi que les lois élémentaires qu'elle postule pour celles-ci, y sont localisées à l'intérieur d'éléments spatiaux (à quatre dimensions) infiniment petits. L'idée qui caractérise l'indépendance relative des choses distantes spatialement (A et B) est la suivante : toute influence extérieure s'exerçant sur A n'a aucun effet sur B qui ne soit médiatisé. Ce principe est appelé « **principe des actions par contiguïté** » et **seule la théorie du champ en a fait une application conséquente. L'abolition complète de ce principe fondamental rendrait impensable l'existence de systèmes (quasi) fermés et donc l'établissement de lois empiriquement vérifiables, au sens habituel du terme.**

A. Einstein, *Mécanique quantique et réalité*, Contribution au numéro de Dialectica sur la complémentarité, traduit en français dans Albert Einstein, œuvres choisies, Tome 1 Quanta, pp.244-247, Seuil CNRS

« En théorie quantique, on décrit un état réel d'un système par une fonction normée des coordonnées ψ (de l'espace de configuration). L'évolution dans le temps est donnée de façon non équivoque par l'équation de Schrödinger. On aimerait bien pouvoir dire : ψ est coordonnée de façon biunivoque à l'état réel du système réel. Le caractère statistique des résultats de mesure est à mettre exclusivement au compte des appareils de mesure. Quand ça marche, je parle de description complète de la réalité par la théorie. Mais, si une telle interprétation s'avère impraticable, je dis que la description théorique est 'incomplète'. »

Albert Einstein, Physique, philosophie, politique, textes choisis et commentés par Françoise Balibar, Éditions du Seuil, collection Points Sciences, p. 468

Le modèle standard de la physique des interactions fondamentales

- **Quantification canonique**

- Interprétation de h = limitation
- Espace de Hilbert: états = vecteurs, observables = opérateurs. Règles de commutation.
- De la mécanique quantique à la théorie quantique des champs = seconde quantification. Espace de Fock

- **Intégrale de chemins**

- h = unité d'action
- Intégrale de chemins = intégrale fonctionnelle de l'exponentielle de i fois l'action classique en unités de \hbar

Le paradigme de QED

- Équation de Dirac et courant conservé

- Lagrangien de Dirac

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{\text{Dirac}} &= \frac{i}{2} \left[\bar{\psi} \gamma^\mu (\partial_\mu \psi) - (\partial_\mu \bar{\psi}) \gamma^\mu \psi \right] - m \bar{\psi} \psi \\ &\equiv \bar{\psi}(x) (i \gamma^\mu \partial_\mu - m) \psi(x)\end{aligned}$$

- Équation de Dirac et possible **courant conservé**

$$\begin{aligned}(i \gamma \cdot \vec{\partial} - m) \psi &\equiv (i \not{\partial} - m) \psi = 0; \bar{\psi} (i \gamma \cdot \vec{\partial} + m) = 0 \\ \Rightarrow \partial_\mu j^\mu &= 0 \text{ si } j^\mu = q \bar{\psi}(x) \gamma^\mu \psi(x)\end{aligned}$$

- Le lagrangien de QED

$$\mathcal{L}_{\text{QED}} = \mathcal{L}_{\text{Maxwell}} + \mathcal{L}_{\text{Dirac}} + \mathcal{L}_{\text{Interaction}}$$

$$\mathcal{L}_{\text{Maxwell}} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}; F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$

$$\mathcal{L}_{\text{Dirac}} = \bar{\psi} (i \gamma^\mu \partial_\mu - m) \psi$$

$$\mathcal{L}_{\text{Interaction}} = -e \bar{\psi} \gamma^\mu A_\mu \psi$$

- La fonctionnelle génératrice

$$K(j_\psi, j_{\bar{\psi}}, j_A) = \int D\psi D\bar{\psi} DA \exp \left\{ \frac{i}{\hbar} \int d^4x (\mathcal{L}_{\text{QED}} + j_\psi^\Delta \psi + j_{\bar{\psi}}^\Delta \bar{\psi} + j_A^\Delta A) \right\}$$

$j_{\psi, \bar{\psi}, A}^\Delta$ détecteurs des champs avec la résolution Δ

- Développement en puissance des j = **fonctionnelle génératrice des fonctions de corrélation** (« fonctions Green)
- Développement en puissance de e = **développement perturbatif**; problème des infinis et **renormalisation**
- Développement en puissances de \hbar = évaluation des effets des **fluctuations quantiques**

TQC, théorie locale, complète, mais ouverte à l'expérience

- **Intrication** entièrement contenue dans les corrélations
 - The actual specific values of the correlated quantities in the actual specific world we know, are beyond the powers of physics to articulate. The answer to the question “what has physical reality?” depends on the nature of “what.” The answer is “everything!” if one is asking about correlations among subsystems, but “Nothing!” if one is asking about particular values for the subsystem correlata. (N. D. Mermin What is quantum mechanics trying to tell us?)
- **Critère de complétude d'Einstein satisfait** car seule dépendance dans la résolution est dans les sources non-dynamique j
- Théorie renormalisable = théorie effective ouverte à l'expérience, la constante de couplage renormalisée est tirée de l'expérience

• Les théories quantiques des champs effectives

• Les théories effectives

D'après H. Georgi
"Effective field
theory" *Ann. Rev.
Nucl. Sci.* 1993, 43,
209-52

- À toutes les échelles de distances, il y a des phénomènes physiques intéressants (voir l'emboîtement des structures)
- On peut diviser l'espace des paramètres en régions différentes dans chacune desquelles il y a une **théorie effective**, qui est une description **appropriée** de la physique **importante**
 - **Importante**: les processus physiques à considérer diffèrent d'une région à l'autre
 - **Appropriée**: il n'y a pas de description unique utile partout dans l'espace des paramètres
- **Idée de base des théories effectives**: s'il y a des paramètres très grands ou très petits par rapport aux quantités physique d'intérêt (de même dimension), **on peut obtenir une description approchée plus simple de la physique en mettant à zéro les paramètres très petits et à l'infini les paramètres très grands**. Les effets finis de ces paramètres sont alors traités en perturbation par rapport à ce point de départ approximatif
- En physique des particules, le paramètre pertinent est l'échelle de distance. La stratégie des théories quantiques des champs effectives (TQCE) consiste à mettre à zéro les aspects de la physique qui impliquent des distances petites devant l'échelle de distance considérée. **L'intérêt de cette stratégie réside dans le fait que parmi les aspects qui peuvent être ignorés, se trouvent les particules trop lourdes pour pouvoir être produites.**

- "Tours d'interactions"

- Une théorie effective dépend de l' énergie E et d'un degré de précision e

- L'effet de la physique de haute énergie sur la physique à l'échelle E est décrit par une "tour d'interactions" dont les couplages ont une dimension (en unité d'énergie ou de masse) k

- Il y a un nombre fini d'interactions à chaque dimension k

- Les coefficients de ces termes d'interaction sont de l'ordre $1/M^k$ où M est une masse supérieure à E , indépendante de k

- La contribution d'une interaction non renormalisable de dimension k est proportionnelle à $(E/M)^k$

- Pour obtenir la précision ε on n'inclura que les interactions de dimension k_ε tel que

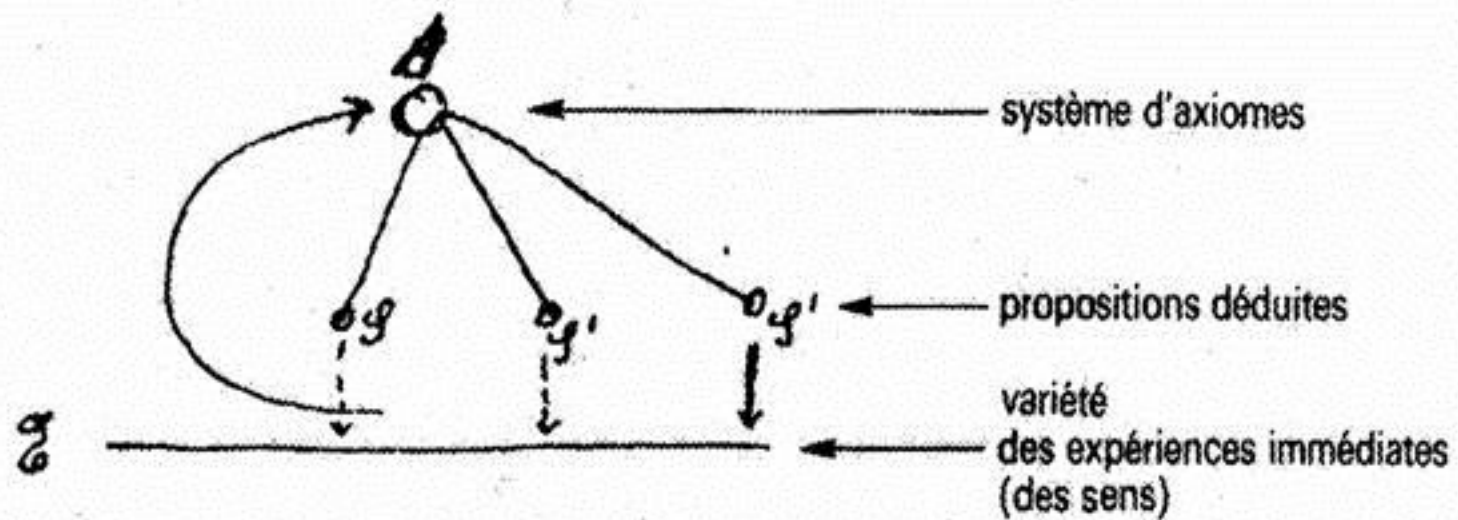
$$\frac{\varepsilon E}{M} \sim \frac{1}{M^k} : e^{\otimes k_\varepsilon} : \frac{\text{Ln}(1/e)}{\text{Ln}(M/E)}$$

- Quand on monte en énergie, si k_ε croît, ceci signale que l'on s'approche d'une nouvelle physique, et qu'il va falloir changer de théorie effective.

- Dans la nouvelle théorie effective, impliquant une échelle de masse plus élevée M' , les interactions non-renormalisables de la première théorie effective auront disparu et apparaîtront comme renormalisables (ou moins « non-renormalisables »).

- Les théories effectives successives sont raccordées l'une à l'autre grâce au équations du groupe de renormalisation

Théories effectives, épistémologie d'Einstein et méthodologie de Gonseth



« le but de la science est, d'une part, la compréhension, aussi complète que possible, et la mise en relation des expériences sensibles dans toute leur variété, et, d'autre part, le parachèvement de ce but en employant un minimum de concepts primaires et de relations. »

Dans sa première phase, la science utilise la totalité des concepts primaires, et si elle devait s'en tenir à ce niveau qui manque totalement d'unité logique, rien ne la distinguerait de la pensée de tous les jours. La science établit donc un « système secondaire », plus pauvre en concepts et en relations, mais qui gagne en unité logique. L'opération peut se poursuivre par la construction d'un système tertiaire encore plus pauvre en concepts mais comportant encore plus d'unité logique, et ainsi de suite jusqu'à ce qu'on atteigne « un système de la plus grande unité concevable et à la plus grande pauvreté de concepts des fondements logiques qui soit encore compatible avec l'observation faite par nos sens. »

« le rapport [d'indépendance logique des concepts de l'expérience sensible] n'est pas analogue à celui du bouillon à la viande de bœuf, mais plutôt à celui du numéro de vestiaire au pardessus. »

Le schéma d'Einstein dialectisé et interprété selon la méthodologie ouverte de Gonseth

La méthodologie dialectique et ouverte à l'expérience de Ferdinand Gonseth

- **Les trois moments de la méthodologie**

- Le modalités informationnelles révisibilité, incomplétude, schématisation
- Les quatre phases
- Les quatre principes

- **Les quatre phases**

- Problème apparaissant dans la situation de départ
- Formulation d'une hypothèse
- Mise en œuvre de cette hypothèse
- Retour à la situation de départ

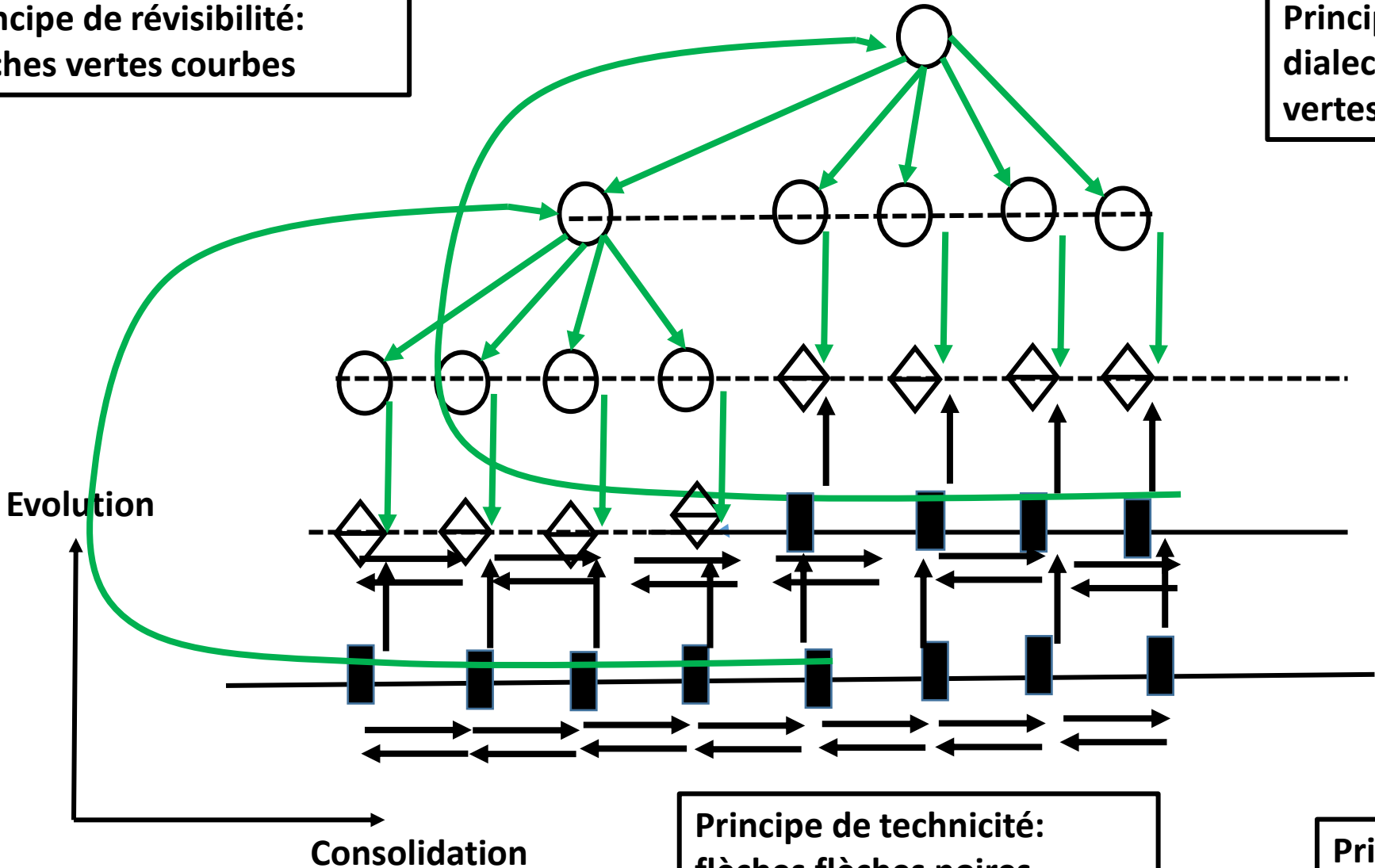
- **Les quatre principes**

- Révisibilité
- Dualité ou structuralité
- Technicité
- Solidarité

De la mesure du temps à la méthode de la recherche:
[cinq articles de Ferdinand Gonseth](#)

Principe de révisibilité:
flèches vertes courbes

Principe de dualité dialectique des flèches vertes et des flèches noires



Horizon profond n
Horizon apparent n+1
Palier n+2

Horizon profond n-1
Horizon apparent n
Palier n+1

Horizon profond n-2
Horizon apparent n-1
Palier n

Principe de technicité:
flèches flèches noires
ascendantes

Principe de solidarité:
flèches noires horizontales

Réserve

