

Alexis Rosenbaum

Sur le statut des diagrammes de Feynman en théorie quantique des champs

Avertissement

Le contenu de ce site relève de la législation française sur la propriété intellectuelle et est la propriété exclusive de l'éditeur.

Les œuvres figurant sur ce site peuvent être consultées et reproduites sur un support papier ou numérique sous réserve qu'elles soient strictement réservées à un usage soit personnel, soit scientifique ou pédagogique excluant toute exploitation commerciale. La reproduction devra obligatoirement mentionner l'éditeur, le nom de la revue, l'auteur et la référence du document.

Toute autre reproduction est interdite sauf accord préalable de l'éditeur, en dehors des cas prévus par la législation en vigueur en France.

revues.org

Revues.org est un portail de revues en sciences humaines et sociales développé par le Cléo, Centre pour l'édition électronique ouverte (CNRS, EHESS, UP, UAPV).

Référence électronique

Alexis Rosenbaum, « Sur le statut des diagrammes de Feynman en théorie quantique des champs », *Philosophia Scientiæ* [En ligne], 13-2 | 2009, mis en ligne le 01 octobre 2012, consulté le 06 janvier 2013. URL : <http://philosophiascientiae.revues.org/301> ; DOI : 10.4000/philosophiascientiae.301

Éditeur : Université Nancy 2

<http://philosophiascientiae.revues.org>

<http://www.revues.org>

Document accessible en ligne sur : <http://philosophiascientiae.revues.org/301>

Ce document est le fac-similé de l'édition papier.

Tous droits réservés

Sur le statut des diagrammes de Feynman en théorie quantique des champs

Alexis Rosenbaum

École Nationale Supérieure de Techniques Avancées

Résumé : Cet article s'efforce de présenter une conception du statut des diagrammes de Feynman appropriée à l'usage courant qui en est fait en théorie quantique des champs. Son objectif est de montrer que l'usage de ces diagrammes n'est pas susceptible de remettre en cause l'interprétation orthodoxe anti-réaliste de la mécanique quantique. Dans un premier temps est indiqué pourquoi les diagrammes de Feynman ne peuvent être considérés comme des représentations figuratives d'événements physiques. Dans un second temps, l'auteur explique pourquoi il semble préférable de concevoir ces diagrammes comme une notation graphique de termes algébriques. Le propos fournit l'occasion de réfléchir sur la capacité de la cognition humaine à intégrer des combinaisons hybrides de signes et d'images.

Abstract: This article is about the conceptual status of Feynman diagrams in Quantum Field Theory. It is aimed at showing that the standard use of these diagrams does not threaten the bohrian instrumentalist interpretation of quantum mechanics. Firstly, it is explained why Feynman diagrams cannot be considered as naturalist representations of physical events. Secondly, it is argued that these diagrams should better be conceived as a graphical notation of algebraic terms. This conception gives an opportunity to reflect upon the capacity of human cognition to integrate hybrid combinations of symbols and images.

Introduction

Au fil d'un ouvrage magistralement documenté, David Kaiser [Kaiser 2005] a pu retracer une histoire des diagrammes de Feynman et montrer la fulgurante ascension de ces modestes objets graphiques durant la seconde moitié du vingtième siècle. Inventés par un jeune physicien des années 1940, ils se diffusèrent en effet avec succès en physique nucléaire et en physique des particules, mais également à travers la théorie de la gravitation et la physique des solides, jusqu'à devenir une composante prévalente de l'imagerie de la physique

fondamentale. Diffusion dont l'une des caractéristiques les plus étonnantes est sans doute de s'être opérée à tous les niveaux de pratique de la physique, des manuels d'enseignement aux articles de recherche, en passant par les logiciels de calculs et l'évaluation heuristique des phénomènes.

Si leur histoire semble désormais avoir livré l'essentiel de ses secrets, ces diagrammes demeurent pourtant parfois l'objet d'un malentendu épistémologique. Richard Feynman rendit public leur usage dans le cadre de calculs de dispersion en électrodynamique quantique, une branche de la théorie quantique des champs. Tandis qu'il s'efforçait de calculer des amplitudes de probabilité de transition entre deux états d'un système, le physicien se trouvait en effet confronté à des développements perturbatifs complexes. Pour faciliter ses calculs, Feynman entreprit d'associer chaque terme mathématique à un graphe schématisant les événements intermédiaires ayant pu avoir lieu entre les deux états considérés. Les particules y étaient représentées par des lignes (qui pouvaient être dessinées de plusieurs façons en fonction du type de particule désigné) et leurs interactions par des vertex. Peu à peu, Feynman élaborait ces graphes de façon plus formelle et étendit leur portée. Mais cet usage, dès son origine, semblait contrevenir à un principe philosophique de l'interprétation orthodoxe de la mécanique quantique, à savoir l'impossibilité de contempler ou de représenter des événements quantiques. Ce principe renvoie comme on le sait à l'interprétation courante d'une des relations d'incertitude de Heisenberg, selon laquelle on ne saurait en aucun cas connaître de façon simultanée et aussi précise que souhaité la position et l'impulsion d'une particule. Il faut rappeler que le principe philosophique qui est dérivé de cette interprétation revêt une acception radicale dans les écrits de Niels Bohr, pour qui aucune imagerie — qu'elle soit matérielle ou mentale — ne peut prétendre à une valeur réaliste dans le domaine quantique. Selon Bohr, la physique quantique doit en effet abandonner le projet de *ressembler* à ce qu'elle prend comme objet d'analyse et accepter que la réalité subatomique n'est appréhendée qu'indirectement, c'est-à-dire seulement à travers un formalisme mathématique qui permet de calculer les effets produits par des dispositifs expérimentaux précis. Parce que les systèmes étudiés sont impossibles à séparer du cadre expérimental dans lequel ils sont décrits, toute tentative pour se représenter ces systèmes « en eux-mêmes » est pour Bohr vouée à l'échec. Et parce qu'elles sont dérivées de la perception de notre environnement, les images que nous sommes tentés d'échafauder pour la représentation des phénomènes quantiques sont par nature susceptibles d'être trompeuses. À commencer par les images de trajectoires d'objets en mouvement, dont l'inadéquation est une caractéristique inférée des paradoxes auxquels conduit systématiquement leur usage.

Mais si une interprétation rigoureuse de la physique quantique requiert un abandon des images à vocation réaliste, que représentent donc les diagrammes de Feynman, abondamment utilisés en théorie quantique des champs ? Permettent-ils en un sens ou un autre de dépasser l'interdit bohrien de la représentation ? Il serait tentant de voir dans leur extraordinaire diffusion à travers plusieurs domaines qui relèvent de la mécanique quantique un démenti à

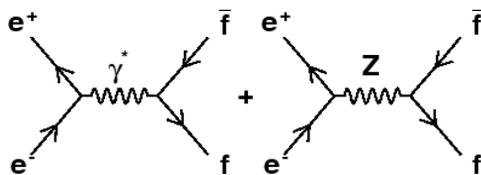


FIGURE 1: Deux diagrammes de Feynman pour un processus d'annihilation d'un électron et d'un positron suivi de la production d'une paire de fermions (quarks ou leptons).

l'« iconoclaste » de l'interprétation orthodoxe, voire à la conception anti-réaliste de la connaissance humaine promue par la majorité des défenseurs de cette interprétation. Certains physiciens, rappelle David Kaiser, en vinrent justement à considérer que les diagrammes de Feynman capturent dans une certaine mesure la réalité physique, en tout cas de façon plus directe que d'autres outils visuels [Kaiser 2005, 362, 368–9]. Cette tentation d'un réalisme d'« exception » réservé aux diagrammes de Feynman n'est pas surprenante. Après tout, ces diagrammes semblent bien prolonger — sur le papier et dans l'esprit des physiciens — les traces matérielles enregistrées dans les détecteurs de traces (chambres à bulles, chambres à brouillard, chambres à fils, émulsions photographiques. . .). Ces détecteurs, fort répandus en physique des particules, n'invitent-ils pas à représenter les processus quantiques invisibles sur le modèle des traces qu'ils fournissent [Harré 1988, 69]? Incarnation graphique de cette représentation de l'invisible, les diagrammes de Feynman réintroduiraient ainsi la possibilité d'une connaissance visuelle indirecte du monde quantique, c'est-à-dire la possibilité d'offrir un aperçu sur « ce qui se passe réellement derrière les équations », en réinfectant des images conformes à nos intuitions classiques, et notamment en rétablissant l'idée de trajectoire dans ses droits. Dès lors, la formidable popularité des diagrammes de Feynman ne serait-elle pas l'indice d'un retour partiel à des conceptions plus réalistes? Même si ces diagrammes ne représentent pas fidèlement les phénomènes quantiques, n'offriraient-ils pas à tout le moins un guide lorsque nous tentons de les imaginer [Meynell 2008]?

Nous voudrions montrer ici en quoi il est inapproprié de conférer aux diagrammes de Feynman une valeur figurative si l'on se réfère à l'usage courant qui en est fait en théorie quantique des champs, et pourquoi, par conséquent, ces objets graphiques n'infligent aucun démenti à l'anti-réalisme de l'interpré-

tation orthodoxe de la physique quantique. Pour ce faire, nous indiquerons tout d'abord pourquoi les diagrammes de Feynman ne sont nullement des images à vocation figurative. Puis nous présenterons le cadre conceptuel dans lequel il nous paraît plus légitime de situer leur statut.

1 Les diagrammes de Feynman ne représentent pas des événements physiques

Commençons par montrer que, dans l'usage standard de la théorie quantique des champs, les diagrammes de Feynman ne sont pas employés en tant que représentation figurative d'une réalité physique empirique¹. Nous procéderons en distançant progressivement ces diagrammes de leurs apparentes prétentions iconiques à l'aide de trois arguments (*A*, *B* et *C*), puis nous rappellerons le point de vue de Feynman lui-même (*D*).

A) Tout d'abord, nul physicien ne songerait à considérer un diagramme de Feynman comme le tableau fidèle d'une scène subatomique, et ce au moins pour trois raisons simples : un diagramme de Feynman ne contient pas de données quant à la position des particules désignées, il est dépourvu d'échelles et ses lignes ne représentent aucunement des distances. Ces trois éléments renvoient tout simplement au fait qu'un tel diagramme est un graphe qui, en tant que tel, n'a pas vocation à la fidélité figurative. En outre, tout diagramme de Feynman correspond à une infinité d'événements possibles : même dans le cas le plus simple d'une particule libre, un diagramme renvoie à une somme infinie de « chemins spatio-temporels »² que le calcul doit prendre en compte. En ce sens, un diagramme de Feynman ne peut être une image à vocation figurative, car celle-ci serait la représentation d'une scène unique et non d'une infinité de récits.

Néanmoins, ce constat n'est pas rédhibitoire car on pourrait envisager qu'un diagramme de Feynman constitue une forme de représentation « élaguée » ou « épurée » : il pourrait conserver des propriétés topologiques d'une scène physique, à défaut d'en conserver les propriétés géométriques, ou constituer une sorte de représentation idéalisée d'un ensemble de scènes physiques, à la manière d'un prototype. Après tout, la plupart des diagrammes que nous employons ne sont que des représentations schématiques destinées à présenter la disposition des parties d'un système ou son fonctionnement (on peut songer à la célèbre carte du métro londonien, ou à la représentation d'une installation électrique, par exemple). Leur objectif véritable n'est pas l'exactitude,

1. Ce qui n'empêche pas que des usages différents des diagrammes de Feynman aient pu exister ou existent, ce que Kaiser [Kaiser 1999] a pu notamment montrer en ce qui concerne les adeptes du programme de la Matrice *S*.

2. Nous employons ici une expression associée à la formulation de la théorie quantique des champs en termes d'intégrales de chemin, qui avait les faveurs de Feynman.

mais l'illustration de traits ou de relations importantes que l'auteur du diagramme souhaite exhiber. Il convient donc de montrer pourquoi un diagramme de Feynman ne peut même pas prétendre à ce statut plus modeste.

B) Les diagrammes de Feynman employés en théorie quantique des champs correspondent à des éléments d'une somme conduite sur des amplitudes de probabilité et non des probabilités physiques. Les différents diagrammes correspondant aux termes d'une somme figurent donc non pas des événements physiques à proprement parler, mais des « subpossibilités » nécessaires au calcul quantique. Chaque graphe correspond à une subpossibilité qui se « superpose » aux autres ou qui « interfère » avec les autres. Pour un état initial et un état final physiques donnés peuvent ainsi être tracés et comptabilisés des graphes qui mettent en jeu un nombre différent de particules et même des types de particules différents [Weingard 1988].

Comme ces subpossibilités sont par définition inobservables, les physiciens nomment souvent les particules en question des « particules virtuelles ». Par opposition aux particules « réelles » qui désignent les états initial et final physiques, ces particules virtuelles ne figurent qu'en position intermédiaire dans les diagrammes et sont par définition exclues de toute mesure. Si les particules impliquées dans les parties intermédiaires des graphes possédaient une réalité empirique, les diagrammes de Feynman seraient effectivement incompatibles avec les principes formels de la mécanique quantique, car ils correspondraient à des termes mathématiques assignant des trajectoires à ces particules. Mais ce problème ne se pose pas avec les particules virtuelles, auquel le principe d'incertitude ne s'applique pas³.

Certains interprètes considèrent que la raison profonde de cet état de fait est que les diagrammes de Feynman employés en théorie quantique des champs correspondent *seulement* à des éléments d'un développement perturbatif — une approximation en série de puissances — de la solution des équations concernées. Un diagramme de Feynman serait alors le reflet non d'une solution exacte, mais d'un « détour » mathématique. Et l'on pourrait imaginer que la solution exacte échappe, elle, à la mise en diagramme : Lacki [Lacki 1998] suggère que si nous possédions cette solution exacte, nous la comprendrions peut-être moins bien que l'approximation perturbative qui nous est devenue familière. Formulé en termes plus radicaux, cela signifie que les particules virtuelles pourraient être de simples artefacts de l'expansion perturbative [Rohrlich 1999, 363]. Même si on ne souscrit pas à cette dernière formulation radicale, elle rappelle à quel point la figuration des particules virtuelles doit être objet de circonspection. Certes, tout physicien sait que les particules réelles occupent les entrées et sorties des diagrammes, tandis que

3. À l'écoute de la première présentation par Feynman de sa théorie à Pocono (1948), Bohr se leva en protestant contre l'attribution de trajectoires aux particules dans les diagrammes, usage qui lui semblait violer directement le principe d'incertitude. À tort. Bohr vint s'excuser peu après, suite aux « éclaircissements » de son fils Aage [Schweber 1986, 495].

les particules virtuelles, qui désignent les contributions des subpossibilités nécessaires au calcul, ne sont présentes que dans les parties intermédiaires. Mais il n'en reste pas moins que la coprésence de particules réelles et virtuelles sur un même graphe contribue à brouiller la différence de leur statut.

L'argument B) nous semble suffisant pour écarter l'interprétation réaliste des diagrammes de Feynman, en ce qui concerne l'usage standard qui en est fait dans la théorie quantique des champs, puisqu'il permet de comprendre que ces diagrammes n'ont pas vocation à être des images, même épurées, de scènes physiques dans l'espace-temps classique [Fox 2008].

C) Nous ajouterons toutefois, à titre d'indice supplémentaire (ou d'élément à charge au dossier), que les diagrammes de Feynman utilisés le plus couramment pour le calcul perturbatif sont tracés dans un espace abstrait où chaque ligne correspond à une valeur possible de l'*impulsion* d'une particule. Cette complication supplémentaire peut sembler étrange, car les subpossibilités ou « pseudo-événements » intermédiaires pourraient tout simplement être dénombrés dans un diagramme d'espace-temps, à la manière des diagrammes de Feynman qui figurent dans les ouvrages de vulgarisation. Mais en pratique (pour des raisons que nous ne précisons pas ici), les calculs s'avèrent en général plus faciles à conduire à partir de la « représentation en impulsion ». Ceci éloigne pour ainsi dire d'un degré supplémentaire les chemins figurés dans les diagrammes des tracés de trajectoire au sens visuel du terme, puisque la référence à l'espace physique est écartée des diagrammes dans cette représentation en impulsion.

Ceci nous suggère aussi qu'il existe une autre origine au malentendu réaliste que nous souhaitons dissiper. Est en effet source d'erreur le fait que certains diagrammes de Feynman reprennent la convention de représentation des diagrammes d'espace-temps, en particulier les diagrammes de Minkowski avec lesquels il arrive qu'ils soient confondus. Le problème tient parfois au fait que certains manuels introduisent d'abord les diagrammes de Feynman en les présentant comme des diagrammes d'espace-temps, puis passent aux diagrammes d'impulsion pour engager les calculs. Peut-être la ressemblance entre diagrammes de Minkowski et diagrammes de Feynman explique-t-elle d'ailleurs partiellement pourquoi les seconds ont été si facilement acceptés par tant de physiciens, dans la mesure où les premiers faisaient déjà partie de leur bagage culturel. Mais en réalité, les diagrammes de Feynman ne contiennent nulle indication de position spatiale ou temporelle (si l'on excepte la distinction triviale entre lignes entrantes et sortantes).

L'ensemble de ces arguments permet de conclure que les diagrammes de Feynman ne figurent pas une réalité physique empirique, pas même de façon simplifiée. Ils ne représentent pas des événements qu'on pourrait voir où que ce soit, ou qu'un quelconque appareil de mesure pourrait donner à regarder, ou encore qu'une quelconque prise de vue pourrait surprendre. Cette conclusion a pour conséquence que même en tant que simple « image mentale », le caractère figuratif peut être selon nous dénié aux diagrammes de Feynman,

dans la mesure où une telle image mentale ne serait que la version intérieure d'une image matérielle possible, alors qu'aucune procédure imaginable ne peut justement offrir l'image matérielle en question. Les diagrammes de Feynman ne peuvent même pas prétendre représenter ce qui se passe « dans le noir » hors de toute mesure ou perturbation extérieure.

D) Il ne nous semble pas sans utilité de rappeler que Feynman lui-même n'attribuait pas de fidélité figurative à « ses » diagrammes. Kaiser [Kaiser 2005, 176–7] rappelle certes que le jeune physicien des années 40 élaborait ces graphes dans le cadre d'efforts personnels pour imaginer les phénomènes physiques dénotés par les équations de la théorie des champs. Il est également vrai que les pratiques de Feynman tranchaient sur l'austérité graphique entretenue par une partie des pères fondateurs de la mécanique quantique⁴. Et il est vraisemblable que le statut de ses diagrammes fut, même pour lui, sujet à réflexion, puisque, si l'on en croit son collaborateur Freeman Dyson, il les considéra d'abord comme des images ajoutant une dimension intuitive à la compréhension des processus physiques [Kaiser 2005, 189–90]⁵.

Toutefois, il n'existe à notre connaissance aucune déclaration écrite ou orale de Feynman selon laquelle les diagrammes constitueraient l'image figurative d'une réalité empirique. Au contraire, il mettait en garde contre l'illusion qui consisterait à le croire. Il insistait en effet sur la *commodité* de ce type d'images, qu'elles soient matérielles ou mentales, et prenait garde de ne pas leur attribuer une valeur plus fondamentale. Le comportement des objets subatomiques lui semblait énigmatique, bien éloigné de celui des objets macroscopiques, et seulement analysable dans les termes abstraits du formalisme. S'il était attaché à mieux « comprendre » les équations à l'aide d'images qu'il se constituait et qui faisaient partie intégrante de son travail de recherche, il ne conférerait pas pour autant un statut théorique à cette démarche [Gleick 1994, 276–8]⁶.

4. Même si les diagrammes de Feynman s'inscrivent dans une tradition visuelle plus ancienne, durant les années où Feynman est étudiant, la mécanique quantique ne possédait pas véritablement d'imagerie constituée. Pour se confronter aux comportements « contre-intuitifs » des objets quantiques, les représentations matérielles utilisées étaient assez pauvres : parmi elles figure en particulier le diagramme des transitions entre niveaux d'énergie, emprunté à la spectroscopie. Le premier texte influent qui tranche sur cet état de fait semble être un manuel de 1943 rédigé par Gregor Wentzel (*Einführung in die Quantentheorie der Wellenfelder*), qui contient une description d'un processus d'échange de particules préfigurant les diagrammes de Feynman [Miller 1984, 166].

5. Il existe également quelques notes prises par des étudiants de Feynman qui témoignent en ce sens [Kaiser 2005, 186–7 & note 27], mais elles restent sujettes à caution.

6. On peut sentir cette démarche « pragmatique » notamment dans une lettre de février 1947 : “I dislike all this talk of others [of there] no being a picture possible, but we only need know how to go about calculating phenomenon. True we only *need* calculate. But a picture is certainly a *convenience* & one is not doing anything wrong in making one up. It may prove to be entirely haywire while the equations are nearly right—yet for a while it helps” (citée in [Schweber 1986]).

En ce sens, l'invention de Feynman n'entraîne nullement en contradiction avec les conceptions « orthodoxes ». Même si, contrairement à Bohr, le physicien américain n'était guère enclin à statuer en toute généralité sur la possibilité ou l'impossibilité de la représentation, il ne se méfiait probablement pas moins que Bohr des images classiques dans le domaine quantique. Après tout, il ne s'agissait pas non plus pour Bohr d'interdire *en pratique* tout recours aux images. Les physiciens étaient même invités par le physicien danois à faire usage d'images empruntées au monde macroscopique, mais seulement en tant qu'elles pouvaient servir d'analogies et d'auxiliaires pour la pensée. Comme on le sait, dans ses travaux épistémologiques, Bohr s'efforça en particulier de montrer l'importance de deux images empruntées à la physique classique, celle des objets matériels à trajectoire continue et celle des ondes, chacune pouvant être convoquée pour appréhender certaines caractéristiques des phénomènes quantiques en relation avec des instruments de mesure spécifiques. C'est seulement en tant qu'image à vocation réaliste que Bohr leur déniait toute valeur. On aura compris que l'usage courant des diagrammes de Feynman en théorie quantique des champs ne contrevient justement pas à cette conception.

2 Les diagrammes de Feynman constituent une notation graphique de termes mathématiques

Indiquons maintenant comment situer conceptuellement le statut des diagrammes de Feynman. Nous montrerons en quoi il est plus approprié de considérer ces diagrammes comme une notation graphique de termes mathématiques (*A*), puis tenterons de réfléchir sur le statut hybride du concept de notation graphique (*B*). Enfin, à la lumière de cette interprétation, nous reviendrons une dernière fois sur la tentation réaliste évoquée précédemment (*C*).

A) Quitte à inverser la direction de l'intuition, il nous semble préférable de considérer que les diagrammes de Feynman constituent avant tout une notation graphique de termes mathématiques. Par notation graphique, nous entendons un répertoire de formes spatiales, combinables selon des règles spécifiées et destinées à représenter symboliquement un ensemble d'éléments donnés ainsi que leurs relations. Le choix d'une notation graphique, en ce sens, est partiellement conventionnel, comme l'atteste la multiplicité des notations graphiques qui peuvent être employées en musique, par exemple, ou en généalogie (à travers la représentation du système de parenté).

Pour ce qui nous concerne ici, il convient de remarquer d'abord que le recours aux diagrammes de Feynman en théorie quantique des champs n'est pas indispensable : les calculs perturbatifs peuvent être menés en leur absence. Car il existe une équivalence entre termes algébriques et graphes. Une fois connues les conventions de construction des diagrammes, leur tracé se déduit

de l'expression algébrique de la somme perturbative. Dans l'usage courant des diagrammes de Feynman en théorie quantique des champs, la série des termes permet de construire la série des graphes sans ambiguïté. Inversement, on peut reconstituer la série des termes algébriques à partir de la série des graphes grâce à des règles qui fournissent l'équivalent algébrique de chaque type de ligne et chaque type de vertex (ces règles sont d'ailleurs le plus souvent appelées « règles de Feynman »). Les termes mathématiques épuisent *en ce sens* le contenu des diagrammes de Feynman : ceux-ci ne disent rien de plus que l'expansion perturbative.

Cette équivalence peut surprendre car si les diagrammes de Feynman ne « disent » rien de plus, ils sont pourtant beaucoup plus « parlants ». Une image vaut mille mots, dit l'adage, et un diagramme fait souvent apparaître de façon plus immédiate ou plus saillante certaines informations contenues dans un terme algébrique, jusqu'à rendre parfois explicite ce que celui-ci masque [Larkin & Simon 1987]. Plus généralement, la spatialisation des informations peut donner lieu pour le physicien à des inférences plus rapides ou plus aisées, ce que chacun constate d'ailleurs en passant de l'expression analytique d'une fonction à sa courbe [Brown 1996]. Même lorsque le terme mathématique et l'objet graphique sont équivalents d'un point de vue informatif, leur efficacité inférentielle et leur pouvoir expressif peuvent donc être différents pour la cognition humaine [Barwise & Etchemendy 1990], [Recanati 2005]. En l'occurrence, dans le cas des diagrammes de Feynman, le praticien est vite séduit par l'aide visuelle que ceux-ci apportent à la compréhension et au calcul de la somme perturbative, ainsi que par la facilité avec laquelle on peut les manipuler, que ce soit sur le papier ou, dans une certaine mesure, mentalement. Pour être plus précis :

- d'une part, les diagrammes de Feynman facilitent le dénombrement et la classification des subpossibilités sur lesquelles porte le calcul perturbatif, autorisant un inventaire visuel sans lequel un terme risquerait par exemple d'être oublié ou deux termes confondus. Les diagrammes de Feynman constituent en ce sens un livre de comptes des termes de la somme algébrique, ce qui leur confère un avantage à la fois mnémonique (en tant qu'« aide-mémoire » pour le calcul) et heuristique. À partir du dénombrement des diagrammes, le physicien peut passer au calcul proprement dit ;
- d'autre part, les diagrammes de Feynman permettent de donner une valeur narrative à la somme algébrique, en présentant un scénario correspondant à chacun des termes. Une fois traduit en diagramme, le terme mathématique acquiert une lisibilité particulière non seulement parce qu'il s'offre plus facilement à l'inspection directe, mais aussi parce qu'il peut être lu à la manière d'une histoire : une particule virtuelle est « émise », puis elle « transite » jusqu'à une seconde particule qui l'« absorbe », pendant qu'une troisième se « transforme » en une paire de particules nouvelles, etc. Comment l'aridité du développement algé-

brique serait-elle aussi parlante⁷ ? On peut ainsi comprendre pourquoi tant de physiciens ont choisi de conserver cet outil graphique, capable de faciliter et améliorer grandement l'efficacité des raisonnements. Mais on peut comprendre aussi pourquoi jusqu'à la fin de sa vie, le grand rival intellectuel de Feynman — Julian Schwinger — y voyait une invention plus pédagogique que physique.

Ces diagrammes nous paraissent donc constituer une excellente notation graphique, dans la mesure où ils permettent de traduire sans ambiguïté des termes algébriques et de bénéficier des commodités d'une représentation spatiale dont les éléments sont facilement manipulables et combinables. En somme, les diagrammes de Feynman possèdent bien un statut *pictural* (puisqu'ils sont dessinés) et *narratif* (puisqu'ils évoquent une série d'événements), mais non une valeur *figurative*. Remarquons que le premier scientifique à en avoir formalisé l'usage de façon rigoureuse, le mathématicien Freeman Dyson [Dyson 1949], ne s'y était pas trompé : dès qu'il s'attela à élaborer une dérivation des diagrammes à partir des équations de la théorie quantique des champs, il choisit de les considérer comme un outil de comptabilité perturbative et fit abstraction de leurs prétentions figuratives [Kaiser 2005, 188–95]⁸.

B) Reste que nos formulations semblent s'appuyer sur une distinction contestable en donnant l'impression que tracer un diagramme de Feynman consiste à traduire un objet mathématique d'un format vers un autre, de nature radicalement différente. Si le graphe est la version spatialisée, *partes extra partes*, d'un membre de la série algébrique, on pourrait en effet conclure qu'il existe d'une part une représentation algébrique qui relèverait du format « linguistique », et d'autre part une représentation graphique qui relèverait du format « spatial ». Pour éviter de laisser entendre que nous souscrivons à cette bipolarisation abrupte, il nous paraît important de préciser notre propos en rappelant qu'il est en réalité fort difficile de tracer une frontière stricte entre ces deux types de représentation, et que les diagrammes de Feynman en sont justement, à leur manière, une illustration.

Remarquons d'abord, au risque du truisme, que le recours à l'espace n'est pas propre aux images. Toute notation logique ou algébrique recourt elle aussi

7. Les « histoires » dont il s'agit sont toutefois en un sens contenues dans le développement algébrique si on adopte la formulation en termes d'intégrales de chemin. L'apport narratif saute davantage aux yeux lorsqu'on passe de la formulation canonique de la théorie aux diagrammes.

8. Kaiser [Kaiser 2005, 189] exhibe un extrait de notes prises par des étudiants lors de conférences données en 1951. Dyson y affirme qu'il est préférable d'utiliser les diagrammes seulement comme aide pour visualiser les formules (“*only as a help in visualising the formulae*”). Visualiser les formules, donc, et non les processus physiques. Même si une note de cours est sujette à caution, la formulation est éloquente. Kaiser exploite d'ailleurs le décalage entre la conception « intuitive » de Feynman et la conception « déductive » de Dyson pour structurer une partie de sa propre présentation [Kaiser 2005, 175–95, 263–70].

à un certain type d'occupation de l'espace. Dans la notation standard des fractions, par exemple, le numérateur est au-dessus du dénominateur, ce qui est bien entendu conventionnel : d'autres dispositions auraient pu être choisies, d'autres relations spatiales mises en jeu. Il arrive même que certains symboles logiques aient une valeur iconique (on peut penser notamment aux parenthèses [Recanati 2005]). Pour prendre un autre exemple, les formules employées en chimie retiennent certaines propriétés spatiales des molécules qu'elles désignent. Dans l'histoire de la chimie, le choix des notations a largement évolué, mais l'idée d'une homomorphie minimale entre les formules et les objets désignés a souvent été maintenue, ne serait-ce qu'à travers le principe de la notation des composés à partir de leurs éléments [Klein 2001]. La distinction pure et simple entre « écriture digitale » et « image analogique » serait ici simpliste : les pratiques des chimistes ont bien plutôt dévoilé une riche gamme de solutions entre ces deux pôles de représentation, une combinatoire de signes et d'images qui est l'indice du fonctionnement pragmatique et ouvert de leurs notations. Inversement, plusieurs types d'objets apparemment graphiques peuvent prétendre à un statut intermédiaire entre image et signe, dans la mesure où ils intègrent des éléments linguistiques dans une structure globalement homomorphique [Hall 1996], [Galison 1998]. Remarquons enfin que la distinction que nous sommes spontanément tentés de tracer entre le signe linguistique et l'image est peut-être un préjugé issu de notre écriture alphabétique (qui, après tout, est notre notation-mère). Une forme d'hybridation existe au contraire d'emblée dans l'aire culturelle sinisée à travers la notation utilisée par la langue chinoise, si bien que l'idée d'une synonymie entre termes symboliques et termes graphiques y est peut-être plus facile à accepter.

Quant aux images mentales, il est fréquent qu'elles mettent justement en jeu des déplacements et des combinaisons entre les deux « formats » évoqués, selon le tempérament cognitif des physiciens. De ce point de vue, Feynman n'était pas en reste puisque, dans ses représentations mentales, les symboles mathématiques se mêlaient de son propre aveu aux images picturales, sans qu'il parvienne à savoir précisément comment [Feynman 1979, 360–1]. La grande créativité de son imagerie semble avoir puisé dans des ressources très variées : l'intuition physique, affirment ceux qui connurent le physicien américain, n'était pas chez lui seulement d'ordre visuel mais également d'ordre auditif et cénesthésique [Gleick 1994, 276]. Ses images mentales paraissent avoir été des objets hybrides, faits de formes, de symboles, de sons ou de couleurs, accompagnés de sentiments physiques comme ceux du mouvement ou de l'accélération. Il y a tout lieu de penser que les célèbres diagrammes étaient issus de cette imagerie toute personnelle :

The diagram is really, in a certain sense, the picture that comes from trying to clarify visualization, which is half-assed kind of vague, mixed with symbols. It is very difficult to explain, because it is not clear (...). It is hard to believe, but I see these things not as mathematical expressions, but a mixture of mathematical

expressions wrapped into and around, in a vague way, around the object. I see all the time visual things associated with what I am trying to do. (cité in [Schweber 1986, 504–5])

C) Enfin, l'interprétation préconisée ici peut susciter une certaine frustration. Affirmer que les diagrammes de Feynman sont des représentations de termes mathématiques donne l'impression de les éloigner doublement du réel (en tant que représentations de représentations), alors qu'ils paraissent ressembler davantage à notre perception de la réalité physique que les termes algébriques. En les disjoignant de toute valeur figurative, ne risque-t-on pas de se replier sur un pragmatisme qui échoue à éclairer leur fécondité ? Faut-il voir une coïncidence dans le fait qu'une simple notation corresponde à une image d'apparence figurative ? Comme l'indiquait Richard Mattuck [Mattuck 1967, 72], "*The diagrams are so vividly "physical-looking" that it seems a bit extreme to completely reject any sort of physical interpretation whatsoever*". Bref, en choisissant la prudence contre l'intuition, ne se prive-t-on pas d'un versant essentiel de leur signification ?

Il est indéniable que nous sommes habitués à concevoir ce qui relève du symbolisme mathématique ou linguistique comme une représentation dérivée de nos représentations visuelles : réfléchir à quelque chose que l'on connaît, c'est souvent se référer à une image mentale « première », les mots et les équations paraissant « seconds ». Toutefois, l'objectif n'est pas ici de discuter de l'ordre chronologique de nos représentations, mais de conférer aux diagrammes de Feynman un statut épistémologique approprié à leur usage. Or, leur usage est avant tout d'ordre calculatoire. Le physicien réfléchit et progresse dans ses calculs en se déplaçant entre le plan des équations et celui des graphes : cela n'exige nullement de supposer que l'un des deux plans relève plus intimement du « réel » que l'autre, quel que soit le sens prêté à ce dernier comparatif. Nous pouvons en revanche affirmer avec confiance que le physicien peut tantôt s'appuyer sur les équations pour tracer des diagrammes, tantôt à l'inverse s'appuyer sur des diagrammes pour poursuivre son travail algébrique. En ce sens, il nous semble suffisant autant qu'approprié de considérer termes algébriques et diagrammes comme des outils de calcul de forme différente.

Le fait que les diagrammes offrent une lisibilité supérieure, aussi troublant soit-il, n'impose aucune conclusion métaphysique. Le choix d'une notation judicieuse peut parfaitement être décisif pour la résolution de problèmes (des exemples de l'influence des notations abondent par exemple dans l'histoire des mathématiques). Et le statut de notation n'empêche nullement les physiciens de faire *comme si* les diagrammes de Feynman avaient une valeur de représentation. Pour ses calculs, chacun est libre de recourir aux images (matérielles ou mentales) de son choix pour autant qu'elles lui paraissent fructueuses. Le praticien du domaine quantique sait très bien ce qu'il a le droit ou pas de faire lorsqu'il manipule des représentations qui n'ont pas de vocation figurative. À chacun de se bricoler des images-outils variées pour guider ses pensées à propos d'espaces différents de l'espace perçu, sans pour autant prétendre figu-

rer la réalité physique « elle-même ». Cette liberté a évidemment une grande valeur heuristique. Est-ce l'une des raisons pour lesquelles la conception que nous esquissons ici a depuis longtemps les faveurs de nombreux physiciens ? Elle semble en tout cas les protéger contre un réalisme naïf, tout en leur garantissant la pleine liberté de se représenter (mentalement ou matériellement) les systèmes étudiés dans la voie qui leur paraît la plus *utile*⁹.

Conclusion

Nous avons essayé d'expliquer pourquoi l'usage qui est fait des diagrammes de Feynman en théorie quantique des champs n'implique aucun retour à un réalisme pré-quantique. L'aspect dynamique et narratif de ces diagrammes exerce certes une véritable force de séduction, en paraissant offrir une contrepartie physique aux calculs mathématiques. Mais une fois la distinction entre particules réelles et virtuelles correctement caractérisée, il apparaît que ces diagrammes ne sont pas destinés à constituer une représentation naturaliste — pas même simplifiée ou caricaturale — de la réalité.

Nous avons ensuite tenté de montrer en quoi il nous semble plus approprié de considérer les diagrammes de Feynman comme une notation graphique de termes algébriques, une forme de sténographie hybride et adaptée aux calculs perturbatifs. N'oublions pas que ces calculs peuvent théoriquement être menés dans leur intégralité sans diagrammes. Au fond, la théorie quantique des champs ne requiert *a priori* pas plus d'image pour être pratiquée de façon correcte et complète que la mécanique quantique des pères fondateurs. Il s'agit d'un ensemble formel qu'un aveugle de naissance peut théoriquement apprendre et employer pour mener à bien ses calculs. En tant qu'auxiliaires graphiques de ces calculs, les diagrammes de Feynman nous paraissent donc

9. Attribuer aux diagrammes de Feynman le statut de notation graphique n'invite à aucun engagement ontologique particulier. Rappelons qu'il n'existe pas aujourd'hui d'accord sur l'ontologie fondamentale de la théorie quantique des champs. Par « ontologie fondamentale » nous entendons l'ensemble des éléments irréductibles que suppose une théorie pour rendre compte du réel. On peut soutenir que l'ontologie fondamentale la plus appropriée pour la théorie quantique des champs est une ontologie des champs, des événements, des processus ou encore des tropes [Kuhlmann, Lyre & Wayne 2002]. Il n'existe pas non plus d'accord sur le fait que les différentes formulations mathématiques de cette théorie (représentation dans l'espace de Fock, représentation en termes d'intégrales de chemin, formulation algébrique. . .) renvoient à la même ontologie fondamentale. Quand bien même un tel accord existerait, il ne nous procurerait de toute façon que des réponses de portée provisoire. Car en des temps où recherches et controverses sont si ouvertes au cœur de la physique fondamentale, le seul consensus que nous pourrions recueillir est que la théorie quantique des champs sera tôt ou tard supplantée. Si c'est le cas, que deviendront les diagrammes de Feynman ? Apparaîtront-ils comme de simples artefacts des calculs perturbatifs propres à un schéma théorique spécifique et obsolète ? Comme des approximations d'élaborations plus « profondes » ? Comme la préfiguration d'une réalité encore insoupçonnée ? Il semblerait bien téméraire de répondre *a priori* à ces questions.

finalement s'inscrire sans rupture épistémologique dans l'histoire du rapport de la théorie quantique aux représentations visuelles.

Bibliographie

BARWISE, J. & ETCHEMENDY, J.

1990 Visual Information and Valid Reasoning, in G. Allwein & J. Barwise (eds.), *Logical Reasoning with Diagrams*, Oxford: Oxford University Press, 3–25.

BOHR, N.

1991 *Physique atomique et connaissance humaine*, Paris : Gallimard.

BROWN, J. R.

1996 Illustration and Inference, in B. Baigrie (ed.), *Picturing Knowledge: Historical and Philosophical Problems Concerning the Use of Art in Science*, Toronto: University of Toronto Press, 250–68.

DYSON, F. J.

1949 The Radiation Theories of Tomonaga, Schwinger, and Feynman, *Physical Review*, 75, 486–502.

FEYNMAN, R.

1979 *Le Cours de Physique de Feynman*, Tome 2, première partie, Paris : InterEditions.

FOX, T.

2008 Haunted by the Spectre of Virtual Particles: A Philosophical Reconsideration, *Journal for General Philosophy of Science*, 39 (1), 35–51.

GALISON, P.

1998 Judgment Against Objectivity, in C. Jones & P. Galison (eds.), *Picturing Science, Producing Art*, New York: Routledge, 327–59.

GLEICK, J.

1994 *Le génial professeur Feynman*, Paris : Odile Jacob.

HALL, B. S.

1996 The Didactic and the Elegant: Some Thoughts on Scientific and Technological Illustrations in the Middle Ages and Renaissance, in B. Baigrie (ed.), *Picturing Knowledge: Historical and Philosophical Problems Concerning the Use of Art in Science*, Toronto: University of Toronto Press, 3–39.

HARRÉ, R.

- 1988 Parsing the Amplitudes, In H.R. Brown, & R. Harré (eds), *Philosophical Foundations of Quantum Field Theory*, Oxford: Clarendon, 59–71.

KAISER, D.

- 1999 Do Feynman Diagrams Endorse a Particle Ontology? The Roles of Feynman Diagrams in S-Matrix Theory, in T.Y. Cao (ed.), *Conceptual Foundations of Quantum Field Theory*, New York: Cambridge University Press, 343–356.
- 2005 *Drawing Theories Apart: The Dispersion of Feynman Diagrams in Postwar Physics*, Chicago: University of Chicago Press.

KLEIN, U.

- 2005 The Creative Power of Paper Tools in Early Nineteenth-Century Chemistry, in U. Klein (ed.), *Tools and Modes of Representation in the Laboratory Sciences*, Dordrecht: Kluwer, 13–34.

KUHLMANN, M., LYRE, H. & WAYNE, A. (EDS.)

- 2002 *Ontological Aspects of Quantum Field Theory*, Singapore: World Scientific.

LACKI, J.

- 1998 Some Philosophical Aspects of Perturbation Theory, *Revue internationale d'histoire et de philosophie des sciences et des techniques*, 2 (1), 41–60.

LARKIN, J. & SIMON, H.

- 1987 Why a Diagram is (Sometimes) Worth Ten Thousand Words, *Cognitive Science*, 11, 65–99.

MATTUCK, R.

- 1967 *A Guide to Feynman Diagrams in the Many-Body Problem*, New York: Mc Graw-Hill.

MEYNELL, L.

- 2008 Why Feynman Diagrams Represent, *International Studies in the Philosophy of Science*, 22 (1), 39–59.

MILLER, A. I.

- 1984 *Imagery in Scientific Thought. Creating Twentieth Century Physics*, Cambridge (Ma): MIT Press.

RECANATI, C.

- 2005 Raisonner avec des diagrammes : Perspectives cognitives et computationnelles, *Intellectica*, 40, 9–42.

ROHRLICH, F.

- 1999 On the Ontology of Quantum Field Theory, in T.Y. Cao (ed.), *Conceptual Foundations of Quantum Field Theory*, Cambridge: Cambridge University Press, 357–67.

SCHWEBER, S. S.

- 1986 Feynman and the Visualization of Space-Time Processes, *Review of Modern Physics*, 58 (2), 449–508.
- 1994 *QED and the Men Who Made It: Dyson, Feynman, Schwinger, and Tomonaga*, Princeton (NJ): Princeton University Press.

WEINGARD, R.

- 1988 Virtual Particles and the Interpretation of Quantum Field Theory, in H. Brown & R. Harré (eds.), *Philosophical Foundations of Quantum Field Theory*, Oxford: Clarendon, 43–58.