



Philosophia Scientiæ

Travaux d'histoire et de philosophie des sciences

24-2 | 2020

Philosophies de la ressemblance

« La signification fondamentale des méthodes d'approximation en physique théorique » : Vladimir Fock épistémologue

« *The Fundamental Significance of Approximate Methods in Theoretical Physics* » : Vladimir Fock as an Epistemologist

Jean-Philippe Martinez



Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/philosophiascientiae/2354>

DOI : [10.4000/philosophiascientiae.2354](https://doi.org/10.4000/philosophiascientiae.2354)

ISSN : 1775-4283

Éditeur

Éditions Kimé

Édition imprimée

Date de publication : 25 mai 2020

Pagination : 171-190

ISSN : 1281-2463

Référence électronique

Jean-Philippe Martinez, « « La signification fondamentale des méthodes d'approximation en physique théorique » : Vladimir Fock épistémologue », *Philosophia Scientiæ* [En ligne], 24-2 | 2020, mis en ligne le 01 janvier 2021, consulté le 31 mars 2021. URL : <http://journals.openedition.org/philosophiascientiae/2354> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/philosophiascientiae.2354>

Tous droits réservés

« La signification fondamentale des méthodes d'approximation en physique théorique » : Vladimir Fock épistémologue

Jean-Philippe Martinez

Universidade Federal da Bahia,
Laboratório Ciência como Cultura – LACIC, Bahia (Brésil)

Résumé : Vladimir Fock (1898-1974) est un scientifique russo-soviétique connu pour diverses contributions à la physique moderne. Il en fut aussi un interprète, développant une position critique face à l'orthodoxie incarnée par Niels Bohr en mécanique quantique et Albert Einstein en relativité générale. Fock ayant adhéré au matérialisme dialectique, l'historiographie sur ses contributions aux débats d'interprétation met généralement l'accent sur sa défense d'une position réaliste, en faveur de l'objectivité du monde extérieur. Le présent article complète cette observation en s'appuyant sur un texte du physicien soviétique jusqu'alors peu connu : « La signification fondamentale des méthodes d'approximation en physique théorique ». En effet, il révèle une forme d'antiréductionnisme essentielle à la compréhension du discours de Fock sur l'interprétation des théories de la physique moderne.

Abstract: Vladimir Fock (1898-1974) was a Russian-Soviet scientist renowned for his several contributions to modern physics. He was also an interpreter and articulated a critical stance towards the orthodoxy embodied by Niels Bohr in quantum mechanics and Albert Einstein in general relativity. As Fock embraced dialectical materialism, historiography on his contributions to the interpretive debates generally emphasizes his defense of a realistic position, in favor of the objectivity of the outside world. The present article complements this view by drawing on a text by the Soviet physicist so far little known: "The fundamental significance of approximate methods in theoretical physics". Indeed, it reveals a form of antireductionism essential to the understanding of Fock's discourse on the interpretation of the theories of modern physics.

1 Introduction

Vladimir Fock (1898-1974) est un scientifique russo-soviétique connu pour diverses contributions à la physique moderne. En théorie quantique, il a notamment participé en 1930 à l'élaboration de la méthode de Hartree-Fock, qui permet l'approximation de la fonction d'onde dans le problème à plusieurs corps. On lui doit aussi l'espace de Fock (1932) utilisé pour décrire des états quantiques avec un nombre variable ou inconnu de particules. En relativité générale, il a contribué en 1939 à la résolution du problème du mouvement. Cependant, de nos jours, peu de physiciens connaissent aussi l'engagement de Fock à partir du milieu des années 1930 dans le débat pour l'interprétation de ces mêmes théories. En effet, le théoricien entendait démontrer leur compatibilité avec la philosophie marxiste du matérialisme dialectique, alors composante essentielle de l'idéologie d'État en vigueur en URSS. De cette position résulta une critique de la pensée de Niels Bohr en mécanique quantique et d'Albert Einstein en relativité générale.

L'historien des sciences américain Loren Graham est celui qui dès les années 1960 a commenté avec le plus d'assiduité la pensée de Fock [Graham 1966a, 1984, 1987, 1988]. Il souligna avec justesse que le physicien faisait partie de ces scientifiques qui sous l'impulsion du matérialisme dialectique s'affirment comme « des réalistes cognitifs, des savants qui acceptent l'objectivité du monde extérieur » [Graham 1966a, 409], conditionnant de fait qu'une grande partie du discours de Fock sur l'interprétation de la mécanique quantique et de la relativité générale ait été basée sur la nécessité de donner du contenu physique aux explications scientifiques. Mais il faut aussi noter qu'en matière de physique, Graham n'accorda en première instance qu'un rôle mineur au volet dialectique de la philosophie marxiste. En 1966, il écrivait :

Les lois de la dialectique ne jouent aucun rôle dans l'esprit des physiciens soviétiques sauf très rarement, peut-être, en tant que rappel que « la matière et ses lois sont plus compliquées qu'un simple matérialiste pourrait penser¹ ». [Graham 1966a, 409–410]

Il fut alors contredit par Fock en personne, qui lui répondit que « la dialectique joue un rôle essentiel dans l'obtention de nouvelles perspectives sur le monde extérieur et sur les moyens appropriés de sa description » [Fock 1966a, 412].

Suite à cet avertissement, Graham nuança ses propos sur la physique², mais il reste notable que ses considérations postérieures sur Fock continuèrent

1. Toutes les traductions vers le français, de l'anglais ou du russe, sont de l'auteur de cet article.

2. S'il affirmait toujours qu'elles n'avaient « aucune valeur prédictive », Graham reconnut que « [t]out au plus, les lois de la dialectique fournissent un *point d'appui* général utile au scientifique en lui rappelant à quel point l'explication de la nature peut être contradictoire et difficile, et combien il est dangereux de réduire les phénomènes complexes à des combinaisons de simples mécanismes à un niveau inférieur » [Graham 1966b, 420]. Plus tard, il définit le débat soviétique en mécanique quantique comme la

à privilégier une approche au prisme unique de la question du réalisme [Graham 1984, 1987]. C'est pourquoi, afin de compléter l'œuvre de l'historien américain et de mieux saisir les spécificités de la pensée du physicien soviétique, nous nous proposons de considérer ce qui dans la dialectique joua chez Fock un rôle essentiel pour la compréhension des théories de la physique moderne. Dans cette direction, nous nous appuyons sur un article qu'il publia en 1936 : « Printsipial'noye znachenije priblizhennykh metodov v teoreticheskoy fizike » (La signification fondamentale des méthodes d'approximation en physique théorique) [Fock 1936a]. En effet, il met en lumière un principe épistémologique fondamental de la pensée de Fock, un principe qui trouve sa source dans l'aspect dialectique de la philosophie marxiste : l'antiréductionnisme – ou pluralisme³.

Si nous discutons ici brièvement du contenu du matérialisme dialectique, nous tenons à préciser que la sincérité de l'adhésion de Fock à cette philosophie n'est en rien remise en question dans la littérature spécialisée, et que de ce fait nous n'abordons pas ce sujet. Aussi, nous souhaitons nous distancier d'un discours qui, en mettant l'emphase sur la question idéologique et en cherchant à tout prix à politiser les prises de position du théoricien dans le contexte soviétique, court le risque de tomber dans la caricature. Car en dépit d'une forme de politisation de la culture professionnelle de Fock, il est pertinent de considérer que sa volonté de donner sens aux théories de la physique moderne dans un cadre matérialiste dialectique s'expliquait avant tout par de fortes convictions scientifiques, et que ces dernières jouèrent un rôle majeur dans sa critique de Bohr et d'Einstein [Martinez 2019]. Ainsi, nous défendons l'idée qu'il concevait avant tout la philosophie marxiste comme une pensée possédant une épistémologie pertinente pour l'approche de sa discipline.

Par conséquent, cette contribution explicite dans un premier temps la nature antiréductionniste de l'épistémologie de Fock et en discute les implications du point de vue de la pratique scientifique sur la base de son article de 1936. Dans un second temps, elle approche respectivement les interprétations par le physicien des théories de la mécanique quantique et de la relativité générale,

combinaison d'« une hypothèse de l'existence indépendante et unique de la matière-énergie, et [d']une hypothèse d'un processus continu dans la nature conformément aux lois dialectiques » [Graham 1987, 5].

3. Si le terme pluralisme apparaît comme plus élégant, nous préférons antiréductionnisme pour des raisons historiques. En effet, la philosophie marxiste s'est en grande partie développée sur la base d'une pratique extensive de la critique, et par conséquent en affirmant une forme de rejet du réductionnisme. Notons que l'historiographie est lacunaire sur la question de l'antiréductionnisme dans la philosophie marxiste. Ce point fait l'objet de recherches par nos soins et devrait donner lieu à de futures publications.

Il est intéressant de souligner que la première citation de Loren Graham dans la note précédente démontre que l'historien avait perçu que l'antiréductionnisme pouvait jouer un rôle dans la pensée scientifique d'un physicien comme Fock. Nous regrettons simplement que les implications de ce fait n'aient pas été considérées à leur juste valeur.

afin de montrer comment son antiréductionnisme s’y manifeste et en quoi il définit leurs orientations.

2 Approximations, formation de notions et antiréductionnisme

2.1 Brève présentation de l’article

« La signification fondamentale des méthodes d’approximation en physique théorique » est un article publié en 1936 dans le journal *Uspekhi fizicheskikh nauk* (Progrès des sciences physiques) [Fock 1936a]. Après une longue introduction, il présente des considérations sur l’électrodynamique quantique, la théorie de la relativité, la mécanique quantique et deux méthodes d’approximation pour résoudre les problèmes de la mécanique quantique, à savoir la méthode de Hartree-Fock et la méthode des perturbations. Il inclut aussi de brèves considérations sur la vieille théorie de Bohr et sur la mécanique classique, ainsi qu’une courte conclusion. Outre l’objectif affirmé par le titre de discuter de la signification fondamentale des méthodes d’approximation en physique théorique, Fock y indique en introduction qu’il entend aussi se pencher sur la question de « la formation des notions physiques » [Fock 1936a, 1070]. C’est à cette double fin qu’il se lance dans un argumentaire qui fait appel à une large variété de théories de la physique moderne, et son propos forme en réalité un ensemble cohérent qui questionne la nature des relations inter-théoriques en physique moderne. Il signe ici un véritable article d’épistémologie.

Mais avant d’entrer dans les détails, une clarification est nécessaire : dans cet article, Fock approche avant tout les théories dans leur dimension phénoménologique. En évoquant la mécanique quantique, il ne fait pas référence à une théorie des principes de quantification, mais plus spécifiquement à ce que nous pourrions appeler la théorie de Schrödinger, qui s’apparente à une théorie de la dynamique des phénomènes pour lesquels la constante de Planck ne peut pas être négligée. De la même façon, lorsque le physicien se penche sur la théorie de la relativité, il a en tête une version relativiste de la théorie de Schrödinger, en d’autres termes, la théorie de l’électron de Dirac.

Le postulat de base qui détermine l’argumentaire de Fock est le suivant :

Les équations de la physique théorique ne peuvent jamais être absolument précises : il faut toujours ignorer tel ou tel facteur secondaire au cours de leur dérivation. [Fock 1936a, 1070]

En d’autres termes, « toute théorie physique, toute notion physique, est, en réalité, une approximation » [Fock 1936a, 1082]. Il en déduit l’existence de théories considérées comme « plus générales », d’autres comme « plus particulières » ou « simplifiées », et qui s’articulent par des relations d’approximation :

La transition vers une théorie simplifiée signifie, à vrai dire, l'usage de l'une ou l'autre méthode d'approximation basée sur la possibilité d'ignorer l'un ou l'autre facteur secondaire, l'une ou l'autre petite quantité du problème. [Fock 1936a, 1071]

C'est dans ce cadre que le théoricien soviétique formule alors un premier constat sur les notions physiques :

La transition d'[une] théorie particulière vers [une théorie] générale est certainement liée à l'introduction de nouvelles notions physiques. [...] Cependant, le développement de la physique durant les récentes décennies a montré que le processus opposé, soit le rejet de vieilles notions physiques, est étroitement lié à la généralisation d'[une] théorie. [Fock 1936a, 1070–1071]

La notion de simultanéité entre deux événements est une illustration de ce dernier point : absolue en mécanique newtonienne, elle est perdue en théorie de la relativité. Pour Fock, la généralisation d'une théorie s'accompagne de la création de nouvelles notions, mais aussi du rejet d'anciennes.

Le physicien souhaite attirer l'attention sur cet aspect, afin de dépasser le « facteur psychologique » qui tend à rendre l'abandon de notions usuelles plus difficile que l'assimilation de nouveaux concepts [Fock 1936a, 1071]. C'est pourquoi il procède à un examen de sa discipline dans le sens opposé à celui de son développement historique :

Si l'on suit cette direction [...] on se convainc qu'à chaque simplification, à chaque transition vers une théorie plus particulière, des notions physiques de plus en plus nouvelles apparaissent. Mais, par conséquent, il devient clair que le processus opposé – la transition d'une théorie plus particulière vers une théorie plus générale – doit être lié au rejet de quelques notions physiques.
[Fock 1936a, 1071]

Ce choix conditionne alors toute la structure de l'article ici discuté : les théories s'y enchaînent au travers de processus d'approximation pour lesquels Fock détaille systématiquement les facteurs négligés et expose les différentes notions physiques qui font leur apparition. La figure 1 schématise ce contenu.

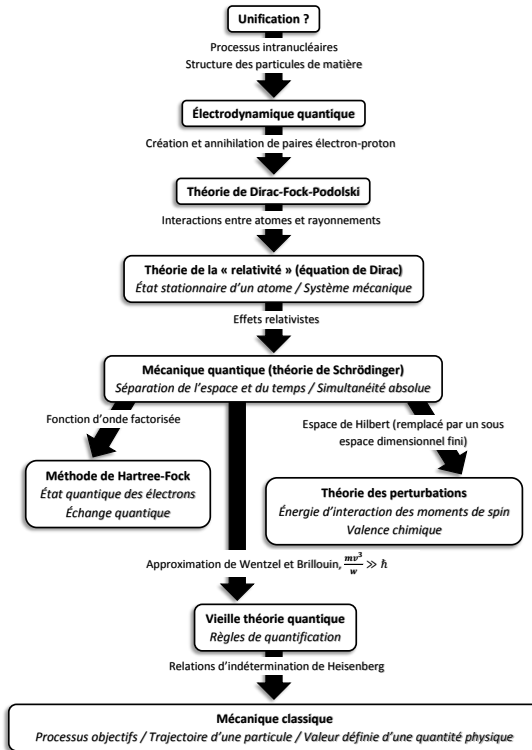


FIGURE 1 – Schéma des relations inter-théoriques développées par Fock en 1936 [Fock 1936a]. Les flèches représentent les processus d'approximations (ou facteurs ignorés) qui lient les théories. En italique, les nouvelles notions faisant leur apparition dans chaque théorie.

2.2 Analyse critique

Lorsqu'il est question de relations inter-théoriques et de l'apparition de nouvelles notions dans des théories scientifiques, deux principaux courants philosophiques s'opposent. D'une part, le réductionnisme considère que tout concept ou théorie peut être absorbé ou expliqué par un autre jugé plus fondamental. D'autre part, l'émergentisme définit une forme d'antiréductionnisme qui défend que la connaissance intégrale de propriétés, de concepts, d'objets, etc., qui font leur apparition à un niveau théorique donné ne peut se déduire de

ses composants fondamentaux [Kim 2006], [Kistler 2007]. Par exemple, on peut concevoir que l'émergence épistémologique est réalisée si les nouvelles notions apparaissant dans des théories approximées sont inexplicables dans le cadre des représentations les plus fondamentales de la nature, en d'autres termes, dans le cadre de théories plus générales [Batterman 2002]. Et ce fut exactement la direction prise par Fock en 1936 en approchant la théorie quantique au travers des différentes étapes de son développement historique.

Avant d'argumenter sur ce point, notons que le physicien soviétique ne fit jamais référence explicite au concept d'émergence durant sa carrière. En effet, comme mentionné en introduction, ses prises de position se faisaient dans le cadre intellectuel du matérialisme dialectique, et pour mieux comprendre sa démarche, il convient de formuler quelques commentaires préliminaires sur cette philosophie. Fock fut principalement inspiré par *Matérialisme et empiriocriticisme* de Vladimir I. Lénine, qui reprend en substance les principales positions sur les sciences naturelles présentées par Friedrich Engels dans l'*Anti-Dühring* [Engels 2007], [Lénine 1909], [Gorelik 1993]. Dans le prolongement du matérialisme historique, ces œuvres défendaient la nature matérielle de la réalité et son analyse à l'aide de la méthode dialectique. De cette dernière, notons la première « loi » de la dialectique, qui est pour nous la plus pertinente. Nommée loi du passage de la quantité à la qualité, elle est à la base des critiques marxistes du réductionnisme, car elle implique que chaque niveau « quantitatif » de l'être et de la matière possède ses propres caractéristiques qualitatives. Combinée à la défense par Engels d'un monde en perpétuelle évolution, elle sous-tend aussi la compréhension de la matière comme un concept à la richesse infinie.

Sur cette base, Engels, puis Lénine, considérèrent la question de la théorie de la connaissance et de la nécessité de refléter leurs conceptions ontologiques au travers d'un modèle épistémologique. C'est ainsi qu'ils ébauchèrent l'idée d'une progression asymptotique – car composée de différentes vérités relatives – et infinie de la connaissance en direction de la vérité absolue. Prenons l'exemple de la loi de Boyle-Mariotte. Elle relie la pression et le volume d'un gaz parfait à température constante, mais n'est pas valable à haute pression. Selon Engels, cela ne signifie pas qu'elle doit être considérée comme erronée, mais simplement qu'elle est une vérité relative qui « ne se revêl[e] donc exacte qu'à l'intérieur de limites déterminées » [Engels 2007, 120]. De façon similaire, Lénine défendit très clairement que « les limites de la vérité de toute proposition scientifique sont relatives » [Lénine 1909, 154].

C'est ainsi que, chez Fock, l'affirmation que toute théorie est une approximation doit être entendue dans le sens marxiste d'une vérité relative, à savoir, d'une vérité qui possède des propriétés qualitatives distinctes et pour laquelle le domaine d'application est limité. En 1936, le raisonnement détaillé du physicien soviétique sur le concept de simultanéité illustre cette dimension :

La notion de simultanéité est perdue en théorie de la relativité [...].
[Elle] devient une notion approximée, applicable seulement dans

les cas où il est possible de négliger l'intervalle de temps nécessaire pour que la lumière parcoure la distance entre les points où les événements discutés prennent place. [Fock 1936a, 1071]

Fock se saisit ainsi des enseignements antiréductionnistes du matérialisme dialectique, qui peuvent, par analogie, se rapprocher d'une forme d'émergentisme épistémologique. Pour appuyer ce point, soulignons qu'à plusieurs reprises il est explicite sur le fait que les nouvelles notions dont il note l'apparition au cours de son raisonnement n'ont pas de sens dans les théories dites plus générales⁴. Aussi, le théoricien discute de processus d'approximation qui peuvent directement impliquer des modifications des lois physiques. Il est notamment très équivoque lorsqu'il déclare que « les lois de la mécanique quantique rendent impossible une description objective du comportement détaillé des processus physiques », puis indique que l'objectivité est restaurée en mécanique classique [Fock 1936a, 1077–1082].

Dans son article, Fock souligne le caractère fondamental pour la physique des concepts faisant leur apparition dans des théories moins générales. Par exemple, la notion d'état individuel des électrons dans un atome, bien qu'absente en mécanique quantique – qui décrit seulement l'état de systèmes complets – est essentielle pour expliquer la structure du tableau périodique de Mendeleïev. L'énergie quantique d'échange, qui apparaît dans la méthode de Hartree-Fock, joue pour sa part un rôle décisif en chimie quantique [Fock 1936b, 1080]. Par conséquent, la hiérarchie induite initialement entre les théories par le scientifique soviétique ne s'accompagne en rien d'un jugement de valeur. Elle reflète une ontologie qui, dans le matérialisme dialectique, défend la nature infinie de la matière, et qui se traduit par une épistémologie concevant les progrès de la connaissance au travers d'une accumulation de vérités relatives. En traitant d'un domaine phénoménologique qui lui est propre, chaque théorie est pour Fock une richesse d'un point de vue physique et s'avère être un outil indispensable à une description complète de la nature. Dans ce cadre, les processus d'approximation jouent alors le rôle fondamental de pouvoir révéler cette richesse.

2.3 Enseignements pour la pratique scientifique

L'antiréductionnisme de Fock peut être spécifié avec plus de précision. En effet, le réductionnisme est une position philosophique qui peut prendre diverses formes, notamment ontologique, méthodologique et épistémologique [Ayala 1974]. Si la première concerne les entités qui composent le monde, la seconde est à mettre en relation avec les méthodes d'acquisition du savoir. La dernière s'intéresse à l'état de la connaissance, à nos modalités de représentation du

4. C'est le cas pour la simultanéité dans la théorie de la relativité, mais aussi pour les notions de masse en physique nucléaire et d'état d'un électron individuel dans un atome en mécanique quantique [Fock 1936a, 1072–1080].

monde. Ce sont les concepts, modèles ou théories qui sont alors considérés comme réductibles d'un niveau d'organisation à un autre. Le discours de Fock appartient exclusivement à cette catégorie, car s'il est vrai qu'un antiréductionnisme ontologique sous-tend l'épistémologie du matérialisme dialectique, le physicien n'en discute aucunement la nature et les implications. Une autre distinction est possible avec le réductionnisme synchronique – aussi appelé hétérogène – et diachronique – homogène [Andersen 2001]. « Synchronique » renvoie aux relations entre des objets appartenant à différents niveaux d'organisation, et « diachronique » à des théories qui ont un même objet d'étude. Cette seconde forme prend notamment une dimension historique, comme lors du passage de la mécanique classique à la mécanique quantique dans le sens où elles traitent toutes deux de la question du mouvement. Fock était ainsi un antiréductionniste épistémologique diachronique.

C'était aussi le cas de Werner Heisenberg, dont le pluralisme a été largement discuté dans la littérature, et qui peut nous servir d'intéressant point de comparaison [Chevalley 1988], [Bokulich 2004], [Bokulich 2008, 29–48]. En 1958, dans un ouvrage intitulé *Physics and Philosophy*, il explicite une approche de la physique comme composée de théories dites « closes » : la mécanique de Newton, la thermodynamique, un groupe formé de l'électrodynamique, la relativité restreinte, l'optique et le magnétisme, et enfin la théorie quantique [Heisenberg 1958, 93–100]. Selon le physicien allemand, elles se caractérisent par une grande précision et persistance au cours du temps dans leurs domaines respectifs, ainsi que par leur cohérence interne. Axiomes, définitions et lois de chaque théorie close fournissent une description précise et complète d'une branche donnée de la physique : elles possèdent un domaine d'application limité et ne prétendent pas à l'universalité. Mais notons qu'Heisenberg se contente de valoriser empiriquement la capacité des lois d'une théorie à décrire de façon précise les phénomènes. En d'autres termes, il nous explique que le domaine d'application des théories est le domaine où ses concepts peuvent être appliqués [Bokulich 2004, 380–381], [Bokulich 2008, 34] !

Chez Fock, ce problème reçoit un traitement plus convaincant. En effet, il suggère en 1936 la possibilité de mathématiser la question du domaine d'applicabilité à l'aide d'inégalités mathématiques :

La validité d'une méthode d'approximation donnée [...] peut être estimée à l'aide d'inégalités mathématiques usuelles, qui caractérisent le caractère négligeable des quantités omises dans cette situation. Cependant, cette « évaluation de l'erreur » dans un sens commun donne dans le même temps le critère d'applicabilité pour les notions physiques connectées à cette méthode d'approximation. Ainsi, une question logique – ou peut-être philosophique – plus difficile concernant l'applicabilité de certaines notions physiques acquiert ici une expression mathématique concrète.
[Fock 1936a, 1071]

Aussi, comme le montre la stratification théorique bien plus dense dans l'article de Fock, le pluralisme chez le physicien soviétique et chez son collègue allemand s'exprime de façons très différentes. Là où Heisenberg promeut des ruptures radicales et une vision relativement figée des sciences, Fock traite de processus d'approximation et se positionne dans une tradition dialectique qui conçoit la physique comme en évolution permanente, chaque étape de l'avancement de la connaissance, aussi infime soit-elle, possédant une valeur intrinsèque fondamentale pour la représentation du monde. Ainsi, l'approche antiréductionniste de Fock implique non seulement de définir avec précision le domaine d'application des théories, mais aussi, comme l'indiquent ses considérations sur la formation des notions physiques, d'accompagner chaque étape de la recherche d'une analyse conceptuelle complète. Ces deux aspects jouent alors un rôle important pour comprendre sa position sur les théories de la mécanique quantique et de la relativité générale.

Mais avant d'aborder ce point, notons que la perception qu'avait Fock de l'avancement de la connaissance nous invite aussi à poser la question de sa position vis-à-vis de la possibilité d'une théorie de l'unification. Sur la base de l'approche phénoménologique qui était la sienne, le physicien soviétique n'excluait pas la réalité de phénomènes « dans lesquels un rôle également important appartient aux [*sic*] lois de la gravitation et aux lois de la mécanique quantique » [Fock 1939, 82]. Mais en vertu de son antiréductionnisme, il était aussi très clair pour lui que le traitement scientifique de tels phénomènes ne pouvait résulter que d'une radicale révolution conceptuelle :

Selon l'opinion générale de tous les physiciens, le dépassement de ces limites [celles de la mécanique quantique] et la mise en place d'une nouvelle théorie plus générale qui unit la mécanique quantique et la théorie de la relativité, exige essentiellement de nouvelles idées associées à un abandon plus fort encore que pour la mécanique quantique, de l'évidente représentation classique.
[Fock 1936b, 951]

Cependant, il est difficile de commenter plus en détails cette question. En réalité, Fock ne participa pas aux débats sur l'unification durant sa carrière, ni même ne les commenta. Jugeait-il les tentatives de ses collègues trop consensuelles d'un point de vue conceptuel ? Peut-être, mais l'affirmer serait spéculer.

En revanche, nous avons une vision assez claire de la tournure que prit la carrière du théoricien à partir du milieu des années 1930, époque à laquelle il commença à développer ses considérations épistémologiques. Dans un contexte soviétique parfois hostile à la physique moderne, il s'engagea pleinement jusqu'à la seconde moitié des années 1950 dans sa défense, en tentant de démontrer sa compatibilité avec le matérialisme dialectique [Gorelik 1993], [Martinez & Lacki 2015], [Martinez 2019]. De cette posture résulta une attitude critique vis-à-vis des interprétations orthodoxes incarnées par Bohr en mécanique quantique et par Einstein en relativité générale. Et de cette attitude

critique résulta l'élaboration d'un point de vue relativement indépendant sur ces deux théories, dont la diffusion fut l'une des activités principales de Fock à partir de la seconde moitié des années 1950, le physicien restant globalement à l'écart des nouvelles avancées de la physique. Alors, durant toute cette période, l'antiréductionnisme qu'il mit en avant dans son article de 1936 contribua à forger l'originalité de son discours tant en mécanique quantique qu'en relativité générale.

3 Mécanique quantique

Afin de comprendre la position de Fock sur la mécanique quantique, il faut tout d'abord expliciter que sa défense de la théorie dans le contexte soviétique fut étroitement liée à l'interprétation dite de Copenhague – au principe de complémentarité de Niels Bohr – dont il souhaitait démontrer la compatibilité avec le matérialisme dialectique⁵. Dès 1938, l'article intitulé « K diskussii po voprosam fiziki » (Au sujet des discussions sur les problèmes de la physique) [Fock 1938] poursuivait explicitement cet objectif, et c'est ainsi que Fock, pour reprendre les mots de Max Jammer, « pava la route pour un *rapprochement* de la philosophie soviétique avec l'idée de complémentarité » [Jammer 1974, 250]. Cependant, ce rapprochement ne se fit pas à sens unique. Car si Fock défendit le noyau dur de l'interprétation de Copenhague, il fut aussi l'auteur d'une critique épistémologique détaillée de la pensée de Bohr, en particulier dans le courant des années 1950⁶.

Celle-ci s'illustre notamment par un article paru en 1951, « Kritika vzglyadov Bora na kvantovuyu mekhaniku » (Critique des vues de Bohr sur la mécanique quantique), mais aussi au travers de la rencontre entre les deux hommes en 1957 à Copenhague, un épisode déjà bien connu de la littérature [Graham 1988], [Selleri 1989, 104–107], [Freire 1994], [Skaar Jacobsen 2012, 291–301]. Fock y affirme deux piliers de son approche de la mécanique quantique qui marquent une rupture avec le discours de Bohr⁷ : d'une part, la nécessité de valoriser l'étude des propriétés des objets atomiques au travers de la fonction d'onde ; d'autre part, le rejet d'une interprétation du formalisme

5. Le présent article ne prétend pas à l'exhaustivité sur l'interprétation par Fock de la mécanique quantique. Comme suggéré en introduction, nos développements visent notamment à compléter les considérations de Graham [Graham 1987, 337–343].

6. Si nous ne nions pas que le contexte politique ait pu inciter Fock à développer publiquement sa critique, rappelons que nous défendons ici la sincérité de ses prises de position scientifiques. Pour le lecteur soucieux d'approfondir ces problématiques, cf. [Gorelik 1993], [Martinez 2019].

7. Pour la rencontre à Copenhague nous nous appuyons sur deux documents d'archive intitulés « My reply to Professor Niels Bohr », datés respectivement du 23 février et du 1^{er} mars 1957 – Niels Bohr Archives (Copenhague) : Microfilm B. S. C. 1930-1945, n° 28 ; Niels Bohr Scientific Correspondence, Supplement, 1910-1962, folder 96.

mathématique comme possédant une valeur purement symbolique. Si ces deux points expriment une forme de réalisme scientifique qui s'appuie sur l'idée que le langage mathématique est celui qui nous permet une représentation objective de la réalité du monde extérieur⁸, il faut aussi noter que le premier élément entre dans le cadre de nos développements sur l'antiréductionnisme. En effet, comme l'affirme Fock, il implique de vastes considérations conceptuelles :

Sur la base de vos [Bohr] idées, on peut et doit introduire des concepts de mécanique quantique. Ils ne sont pas symboliques, mais tout à fait physiques. Il n'y a aucune raison de les éviter dans la description de la nature⁹.

Ainsi, la critique de Bohr par Fock ne doit pas être perçue comme une tentative de remise en question du principe de complémentarité, mais bien comme la volonté du physicien soviétique de dépasser l'approche de son collègue danois et d'affirmer son engagement en faveur d'une épistémologie réaliste et antiréductionniste. De cette position découla toute l'originalité du discours de Fock, que nous nous proposons de discuter sur la base d'un article en français publié en 1965 dans *Dialectica* : « La physique quantique et les idéalizations classiques » [Fock 1965]. Il offre une synthèse relativement complète du point de vue du théoricien, et présente aussi l'avantage d'illustrer avec force la nature antiréductionniste de sa pensée. En effet, il vise en particulier à mettre en avant les disparités conceptuelles entre mécanique classique et quantique ainsi que leurs domaines d'application respectifs.

Fock commence par y expliquer que la description classique des phénomènes a pour caractéristiques d'être absolue, détaillée et déterministe. Absolue car elle repose sur l'indépendance supposée du phénomène vis-à-vis des conditions dans lesquelles il est observé. Détaillée car elle présuppose la possibilité, en modifiant les conditions d'observation puis en combinant les données obtenues, de connaître tous les aspects d'un seul et même phénomène. Enfin, déterministe car il est possible de considérer l'évolution de l'état physique d'un système au cours du temps. Le physicien est cependant explicite sur le fait que, pour lui, absolutisme, détaillisme et déterminisme « ne forment nullement une prémisse nécessaire, et donnée une fois pour toutes, pour la description scientifique des phénomènes naturels » [Fock 1965, 229]. C'est pourquoi, sur cette base, dans la logique antiréductionniste qui est la sienne,

8. Notons qu'en raison de ce rapport aux mathématiques, il est possible pour Gennady Gorelik de reconnaître chez Fock « quelque chose proche de l'idéalisme platonicien (véritablement mathématique) » [Gorelik 1993, 325]. Pourtant, rien ne suggère dans le discours du physicien la réification de choses immatérielles, ni même le royaume des idées de Platon. Fock s'intéressait avant tout aux objets physiques décrits par le formalisme mathématique d'une théorie, et nous préférons ainsi parler de matérialisme pour qualifier son réalisme.

9. Vladimir Fock, « My reply to Professor Niels Bohr » – Niels Bohr Archives (Copenhague) : Niels Bohr Scientific Correspondence, Supplement, 1910-1962, folder 96.

il pose la question de savoir « quelle est la limite d'applicabilité et quelle est la précision de la méthode classique de description ? » [Fock 1965, 230].

Pour y répondre, Fock s'appuie bien évidemment sur les relations de Heisenberg, en tant qu'inégalités mathématiques. Mais il est intéressant de noter qu'il insiste sur le fait qu'elles « ne fixent aucunement des limites à notre connaissance de la nature » [Fock 1965, 232]. Il ne considère en rien les quantités Δx , Δp_x , etc. comme des « erreurs » ou « inexactitudes » des résultats de la mesure, car elles présupposeraient l'existence de valeurs exactes des quantités mesurées. Au contraire, pour Fock, les inégalités de Heisenberg sont par essence l'expression d'une inexistence et non d'une simple impossibilité :

En réalité, la vraie cause de l'impossibilité de mesurer exactement [en mécanique quantique] réside dans la nature de la particule qui n'admet pas de localisation simultanée dans l'espace ordinaire et dans celui des impulsions, sa nature étant à la fois corpusculaire et ondulatoire. En d'autres termes, si certaines quantités ou groupes de quantité ne sont pas mesurables, c'est que leurs valeurs exactes n'existent pas. [Fock 1965, 231]

Le physicien soviétique souhaite ici affirmer une position réaliste dans le débat, mais aussi mettre l'accent sur la rupture conceptuelle en jeu dans la transition de la mécanique classique vers la mécanique quantique.

Ainsi, alors qu'il reproche usuellement à Bohr de donner trop d'importance aux questions d'observation et de négliger l'étude des propriétés des objets atomiques, ce sont bien les notions physiques de la mécanique quantique que Fock entend pour sa part mettre en avant. Dans cette direction, il cherche à expliciter la signification physique de la fonction d'onde et propose de subdiviser les processus de mesure dans la théorie, distinguant une « expérience initiale » et « une expérience finale » [Fock 1965, 235–237]. La première concerne la préparation du système à étudier et inclut sa partie active, celle où les phénomènes quantiques se produisent indépendamment des questions d'observation. La seconde correspond à l'opération de mesure pour laquelle les résultats dépendent de la nature classique de l'appareil de mesure. Fock explicite alors que dans le formalisme mathématique la fonction d'onde donne les probabilités de résultats pour l'expérience finale, quelle qu'elle soit, découlant d'une expérience initiale donnée : elle est la même pour toutes les quantités physiques. Par conséquent, elle permet une représentation à part entière des phénomènes physiques au cours de l'expérience initiale.

Le scientifique se penche alors plus précisément sur la notion d'« état » décrite par la fonction d'onde, et lui adjoint le concept de « possibilité potentielle », qui représente la probabilité pour un objet quantique d'avoir tel ou tel comportement en fonction de chaque influence externe possible, pour chaque type d'expérience finale [Fock 1965, 234–240]. Ainsi, c'est l'acte de la mesure qui transforme le virtuellement possible pour chaque quantité physique

– les possibilités potentielles – en un fait accompli. En introduisant ce concept, Fock affirme que la fonction d'onde contient non seulement une description des propriétés des objets physiques, mais également de leur comportement vis-à-vis des moyens d'observation : les probabilités sont comprises comme une propriété physique réelle du système étudié¹⁰.

Durant sa carrière, Fock n'était pas dupe sur la nécessité de considérer les opérations de mesure en mécanique quantique. Il développa notamment l'idée de relativité par rapport aux moyens d'observation, qui fut considérée par Jammer comme « l'une des formulations les plus tranchantes et approbatives de la version relationnelle de la complémentarité », telle que défendue par Bohr [Jammer 1974, 202]. Mais avec l'introduction de la notion de possibilité potentielle, le physicien soviétique participait aussi d'une reconstruction conceptuelle de la théorie quantique en vue d'en spécifier le caractère unique. Sous l'impulsion de ses positions épistémologiques, et notamment de son antiréductionnisme, il se voulait explicite sur le fait que les situations d'observation ne devaient pas être considérées comme une négation de la réalité du monde atomique. C'est pourquoi, face à la tentation de vouloir expliquer la théorie uniquement sur la base de concepts classiques, Fock n'aura eu cesse de valoriser l'importance des notions physiques qui lui sont propres.

4 Relativité générale

Lorsque Fock décida à la fin des années 1930 de se pencher sur la théorie de la relativité générale¹¹, son épistémologie de la physique était déjà bien définie. Ainsi, dès son article fondateur de 1939 traitant de la résolution du problème du mouvement, il affirma son engagement en faveur d'une épistémologie de la physique résolument réaliste et antiréductionniste [Fock 1939]. Ce second aspect est notamment manifeste dans un addendum qu'il composa à la hâte afin de souligner les différences de sa méthode avec celle d'Einstein, Infeld & Hoffmann, qui peu de temps auparavant avaient aussi publié un article traitant du même problème [Einstein, Infeld *et al.* 1938]. En effet, le physicien soviétique y estime que le trio a eu tort de se laisser guider par « l'ancien point de vue d'Einstein selon lequel le but ultime de la théorie consiste dans l'explication des particules élémentaires comme points singuliers du champ » [Fock 1939, 115], en somme, un point de vue qui considère la relativité générale comme une étape intermédiaire vers une théorie unifiée des interactions gravitationnelles et électromagnétiques. Fock souhaitait au contraire considérer la théorie pour ce qu'elle est concrètement, à savoir « une théorie de la gravitation » qui possède un domaine d'applicabilité bien défini :

10. Si les idées de Fock rappellent celles de Karl Popper et son concept de propension, notons qu'elles sont formulées de façon indépendante.

11. Comme pour la mécanique quantique, nous ne prétendons pas à l'exhaustivité sur la relativité générale. Pour approfondir ces questions, cf. [Graham 1987, 367–375], [Gorelik 1993].

Pour nous, cette théorie [la relativité générale] est avant tout une théorie de la gravitation. Elle joue un rôle prépondérant, c'est-à-dire, en premier, aux phénomènes de l'échelle astronomique. Nous pensons en conséquence que les problèmes de la théorie de la relativité générale ne sauraient avoir rien de commun avec celui de la structure des particules élémentaires et, plus généralement avec les problèmes de l'échelle atomique [...]. Pour résumer, nous pouvons dire, que conformément à notre point de vue, le sujet de la théorie de la relativité générale est l'étude des phénomènes de la gravitation, tandis que les questions du monde atomique sont du ressort de la mécanique quantique. [Fock 1939, 82]

Mais les conséquences épistémologiques de l'antiréductionnisme de Fock ne se limitèrent pas à cet aspect. En effet, dans son article de 1939, le théoricien se montre minutieux quant à l'analyse conceptuelle des notions utilisées, car il souhaite dévoiler les « conséquences physiques » de la relativité générale [Fock 1939, 115]. De cette approche découle une nouvelle différence fondamentale avec Einstein, Infeld & Hoffmann : pour Fock, il pourrait exister dans la théorie d'Einstein des systèmes de coordonnées privilégiés. Dans le problème du mouvement, tel qu'abordé en 1939, ce serait notamment le cas du système de coordonnées harmoniques, pour lequel le physicien soviétique souligne le « très grand avantage [...] sur tous les autres systèmes » [Fock 1939, 87]. Fock y voit une raison mathématique, en raison de simplifications apportées à l'expression du tenseur de Ricci – utilisé pour définir la courbure de l'espace-temps –, mais aussi un indéniable avantage du point de vue physique :

Dans une théorie où sont permises des transformations de coordonnées presque arbitraires (qui ne sont soumises qu'à certaines conditions très générales), il devient parfois difficile de donner une interprétation intuitive aux paramètres qu'on emploie pour coordonnées. Ces difficultés sont considérablement réduites si l'on se sert du système de coordonnées harmoniques. Ces coordonnées sont celles dont les propriétés se rapprochent autant qu'il est possible aux [*sic*] propriétés des coordonnées cartésiennes et du temps ordinaire de l'espace-temps de Minkowsky [*sic*]. C'est pourquoi les formules de la relativité générale, exprimées au moyen de ces coordonnées se distinguent par la facilité de leur interprétation physique. [Fock 1939, 88]

Plusieurs publications d'après-guerre dévoilent avec précision le raisonnement ayant conduit Fock à de telles conclusions [Fock 1964, 1966a, 1967]. Elles mettent toutes en avant l'idée qu'au cours de la transition entre la théorie de la relativité restreinte et celle de la relativité générale, le principe de relativité n'est en rien généralisé. Pour le démontrer, le théoricien s'appuie notamment sur une différence fondamentale entre les deux théories : la première repose sur l'espace homogène – uniforme – de Minkowski et la seconde sur l'espace inhomogène – non-uniforme – d'Einstein. Fock considère en effet que le principe

de relativité – qui énonce que les lois de la physique s’expriment de façon identique dans tous les systèmes de référence inertiels – est « étroitement connecté au concept d’uniformité » [Fock 1964, 6], et par conséquent, que l’idée d’Einstein de covariance généralisée des équations ne permet pas de lui adjoindre de façon effective la gravitation. C’est que le scientifique soviétique fait en réalité appel dans son argumentaire à un principe étendu de relativité – appelé parfois « principe de relativité physique » – qui implique que non seulement les lois physiques, mais aussi les « conditions physiques » associées, s’expriment identiquement dans tous les systèmes de référence inertiels [Fock 1966*b*, 207].

Mathématiquement, il faut alors « tenir compte de toutes les équations qui déterminent le cours d’un phénomène physique et non seulement des équations différentielles du champ (ou du mouvement) » [Fock 1966*b*, 208]. Or, la covariance générale des équations ne permet pas de remplir cet objectif : sous un changement de coordonnées, elle ne concerne que les relations fonctionnelles et non les conditions initiales et aux limites qui s’en trouvent modifiées. Considérant de plus que tout type d’équation peut être exprimé sous forme covariante à l’aide de l’addition d’une fonction auxiliaire, Fock perçoit en réalité la covariance comme un pur artifice mathématique inutile à l’interprétation de la théorie : « [...] la covariance des équations en elle-même n’est en aucun cas l’expression d’une quelconque loi physique » [Fock 1964, 5].

Afin de préserver la relativité, il est alors essentiel de considérer « l’espace comme un ensemble » et de se montrer particulièrement attentif aux conditions initiales et aux limites [Fock 1964, 2–3]. C’est pour restaurer ces dernières après un changement de coordonnées que Fock introduit le « principe d’adaptation physique », qui est satisfait lorsque toutes les fonctions décrivant un phénomène se comportent comme des invariants après un changement de coordonnées. Le théoricien soviétique défend ainsi l’idée que la « relativité physique » est obtenue seulement si « l’adaptation physique » est vérifiée, étendant à cette occasion l’exigence de covariance des équations. Dans le cas des transformations de Lorentz en relativité restreinte, il est supposé que l’adaptation physique est toujours possible, et cela explique pourquoi la relativité physique est pour Fock une propriété liée à l’uniformité de l’espace. Cependant, ce n’est pas le cas pour des transformations arbitraires des coordonnées, et « le “principe de relativité générale” (si on lui donne la seule interprétation non contradictoire possible de covariance générale) est donc purement formel et non pas physique » [Fock 1966*b*, 209]. Fock admet toutefois que par un choix judicieux de coordonnées, l’adaptation physique peut aussi être réalisable dans certains cas de la relativité générale. Le système des coordonnées harmoniques dans le cadre du problème du mouvement en 1939 en est pour lui une illustration, car sous les transformations de Lorentz « le tenseur métrique reprend sa forme primitive après une adaptation du champ gravifique effectué par un choix convenable de la répartition et du mouvement des masses » [Fock 1966*b*, 209]. En ce sens, il est pour le physicien un système de coordonnées privilégié.

En résumé, pour Fock, « la relativité physique ne peut être générale et la relativité générale ne peut être physique » [Fock 1966*b*, 212]. Durant sa carrière, il pensait avoir montré que la signification physique usuellement donnée à la théorie n'était pas justifiée. Il appelait ainsi à l'abandon du nom qui lui était généralement attribué et qui pour lui résultait de « l'interprétation incorrecte de la théorie par son auteur » [Fock 1966*b*, 206]. Guidé par son antiréductionnisme, c'est au prix d'une minutieuse analyse de la signification physique, mais aussi des domaines d'application des notions en jeu, que Fock parvint à un tel résultat. La question du principe d'équivalence, fortement critiqué par le théoricien, en est un autre exemple flagrant non évoqué jusqu'à présent. En effet, alors que Fock voulait bien lui reconnaître un caractère heuristique en vue de l'élaboration de la relativité générale, il jugeait son caractère local comme totalement inadapté à la compréhension de cette dernière [Fock 1966*b*, 209–210].

5 Conclusion

Dans son approche de la physique moderne, Vladimir Fock se positionnait comme un matérialiste, un réaliste scientifique qui ambitionnait de redonner du sens physique aux théories. Mais il se revendiquait aussi de la dialectique, clamant que cette composante de la philosophie marxiste « joue un rôle essentiel dans l'obtention de nouvelles perspectives sur le monde extérieur et sur les moyens appropriés de sa description » [Fock 1966*a*, 412]. Alors, « La signification fondamentale des méthodes d'approximation en physique théorique » est un article du physicien soviétique qui apporte un éclairage tout particulier sur cet aspect. En effet, on y découvre que Fock concevait la physique dans un cadre antiréductionniste épistémologique diachronique. Plus encore, on y distingue comment cette approche pouvait influencer sa pratique scientifique et sa compréhension des théories modernes de la physique. L'antiréductionnisme de Fock l'a astreint au cours de sa carrière à une forme de rigueur physique qui l'a poussé à questionner les fondements de la mécanique quantique et de la relativité générale. En particulier, il l'a conduit à se pencher sur la nature de leurs concepts et de leurs domaines d'application. C'est pourquoi l'originalité des positions défendues par le théoricien soviétique ne peuvent pas se résumer aux questions de réalisme et d'objectivité que l'on prête traditionnellement aux auteurs marxistes.

Dans la foulée de l'emblématique prise de position antiréductionniste de Philip W. Anderson en 1972, la question du réductionnisme en physique est apparue sur le devant de la scène [Anderson 1972]. De nos jours, elle conditionne notamment différents débats sur la compréhension des théories effectives qui, en tant qu'approximations, jouent un rôle majeur en théorie quantique des champs. Dans ce cadre, notons que Tian Y. Cao & Silvan S. Schweber revendiquent une approche antiréductionniste, évoquant l'idée

d'une « tour infinie » de théories effectives et d'une représentation du monde physique comme « décomposé en domaines quasi autonomes, chaque niveau ayant sa propre ontologie et ses propres lois fondamentales » [Cao & Schweber 1993, 72]. La proximité de ce point de vue avec les idées de Fock est frappante. Elle témoigne de toute la vigueur et de la modernité de son raisonnement sur sa physique et nous invite ainsi à reconsidérer l'importance historique et philosophique de son épistémologie.

Bibliographie

- ANDERSEN, Hanne [2001], The history of reductionism versus holistic approaches to scientific research, *Endeavour*, 25(4), 153–156, doi : 10.1016/S0160-9327(00)01387-9.
- ANDERSON, Philip Warren [1972], More is different. Broken symmetry and the nature of the hierarchical structure of science, *Science*, 177(4047), 393–396, doi : 10.1126/science.177.4047.393.
- AYALA, Francisco José [1974], Introduction, dans *Studies in the Philosophy of Biology : Reduction and Related Problems*, édité par Fr.J. Ayala & Th. Dobzhansky, Londres : Macmillan Education UK, vii–xvi, doi : 10.1007/978-1-349-01892-5_1.
- BATTERMAN, Robert [2002], *The Devil in the Details : Asymptotic Reasoning in Explanation, Reduction, and Emergence*, Oxford : Oxford University Press, doi : 10.1093/0195146476.001.0001.
- BOKULICH, Alisa [2004], Open or closed? Dirac, Heisenberg, and the relation between classical and quantum mechanics, *Studies in History and Philosophy of Science Part B : Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 35(3), 377–396, doi : 10.1016/j.shpsb.2003.11.002.
- [2008], *Reexamining the Quantum-Classical Relation. Beyond Reductionism and Pluralism*, Cambridge : Cambridge University Press, doi : 10.1017/CBO9780511751813.
- CAO, Tian Yu & SCHWEBER, Silvan S. [1993], The conceptual foundations and the philosophical aspects of renormalization theory, *Synthese*, 97(1), 33–108, doi : 10.1007/BF01255832.
- CHEVALLEY, Catherine [1988], Physical reality and closed theories in Werner Heisenberg's early papers, dans *Theory and Experiment : Recent Insights and New Perspectives on Their Relation*, édité par D. Batens & J.P. Van Bendegem, Dordrecht : Springer Netherlands, 159–176, doi : 10.1007/978-94-009-2875-6_10.

- EINSTEIN, Albert, INFELD, Leopold *et al.* [1938], The gravitational equations and the problem of motion, *Annals of Mathematics*, 39(1), 65–100, doi : 10.2307/1968714.
- ENGELS, Friedrich [2007], *Antidürring*, Montreuil-sous-Bois : Éditions Science Marxiste, trad. fr. par A. Cervetto, 2007.
- FOCK, Vladimir Aleksandrovich [1936a], Printsipial'noye znachenije priblizhennykh metodov v teoreticheskoy fizike, *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 16(8), 1070–1083, doi : 10.3367/UFNr.0016.193608d.1070.
- [1936b], Problema mnogikh tel v kvantovoy mekhanike, *Usp. Fiz. Nauk*, 16(7), 943–954, doi : 10.3367/UFNr.0016.193607g.0943.
- [1938], K diskussii po voprosam fiziki, *Pod znamenem marksizma*, 1, 140–159.
- [1939], Sur le mouvement des masses finies d'après la théorie de gravitation einsteinienne, *Journal of Physics (USSR)*, 1–2, 81–116.
- [1964], *The Theory of Space, Time and Gravitation*, Londres : Pergamon Press, 2^e éd.
- [1965], La physique quantique et les idéalizations classiques, *Dialectica*, 19(3–4), 223–245, doi : 10.1111/j.1746-8361.1965.tb00471.x.
- [1966a], Comments, *Slavic Review*, 25(3), 411–413, doi : 10.2307/2492852.
- [1966b], Les principes physiques de la théorie de la gravitation d'Einstein, *Annales de l'I.H.P. Physique théorique*, 5(3), 205–215, http://www.numdam.org/item/AIHPA_1966__5_3_205_0/.
- [1967], *Teoriya Eynshteyna i fizicheskaya otnositel'nost'*, Moscou : Znaniye.
- FREIRE, Olival Jr [1994], Sobre o diálogo Fock-Bohr, *Perspicillum*, 8(1), 63–84.
- GORELIK, Gennady [1993], Vladimir Fock : Philosophy of gravity and gravity of philosophy, dans *The Attraction of Gravitation : New studies in the history of general relativity*, édité par J. Earman, M. Janssen & J. D. Norton, Boston : Birkhäuser, 308–331.
- GRAHAM, Loren R. [1966a], Quantum mechanics and dialectical materialism, *Slavic Review*, 25(3), 381–410, doi : 10.2307/2492851.
- [1966b], Reply, *Slavic Review*, 25(3), 418–420, doi : 10.2307/2492854.

- [1984], The reception of Einstein’s ideas : Two examples from contrasting political cultures, dans *Albert Einstein, Historical and Cultural Perspectives The Centennial Symposium in Jerusalem*, édité par G. Holton & Y. Elkana, Princeton : Princeton University Press, 107–136, doi : 10.1515/9781400855438.107.
- [1987], *Science, Philosophy, and Human Behavior in the Soviet Union*, New York : Columbia University Press.
- [1988], The Soviet reaction to Bohr’s quantum mechanics, dans *Niels Bohr : Physics and the World*, édité par H. Feshbach, T. Matsui & A. Oleson, Chur ; New York : Harwood Academic, 305–317, 2014.
- HEISENBERG, Werner [1958], *Physics and Philosophy : The Revolution in Modern Science*, New York : Harper & Row.
- JAMMER, Max [1974], *The Philosophy of Quantum Mechanics. The Interpretations of Quantum Mechanics in Historical Perspective*, New-York : John Wiley & Sons.
- KIM, Jaegwon [2006], Emergence : Core ideas and issues, *Synthese*, 151(3), 547–559, doi : 10.1007/s11229-006-9025-0.
- KISTLER, Max [2007], La réduction, l’émergence, l’unité de la science et les niveaux de réalité, *Matière Première*, 2, 67–97.
- LÉNINE, Vladimir Ilich [1909], *Matérialisme et empiriocriticisme*, Montreuil-sous-Bois : Éditions Science Marxiste, trad. fr. par A. Cervetto, 2009.
- MARTINEZ, Jean-Philippe [2019], The “Mach Argument” and its use by Vladimir Fock to criticize Einstein in the Soviet Union, dans *Ernst Mach – Life, Work, Influence*, édité par Fr. Stadler, Cham : Springer International Publishing, 259–270, doi : 10.1007/978-3-030-04378-0_20.
- MARTINEZ, Jean-Philippe & LACKI, Jan [2015], Vladimir Fock and the defense of modern theories in Soviet Union, *Communications de la SSP*, 46, 41–45.
- SELLERI, Franco [1989], *Quantum Paradoxes and Physical Reality*, Dordrecht : Kluwer Academic Publisher, doi : 10.1007/978-94-009-1862-7.
- SKAAR JACOBSEN, Anja [2012], *Léon Rosenfeld. Physics, Philosophy, and Politics in the Twentieth Century*, World Scientific Publishing Co, doi : 10.1142/7776.