



HAL
open science

Vladimir Fock (1898-1974) : itinéraire externaliste d'une pensée internaliste. Antiréductionnisme et réalisme scientifique en physique moderne

Jean-Philippe Martinez

► To cite this version:

Jean-Philippe Martinez. Vladimir Fock (1898-1974) : itinéraire externaliste d'une pensée internaliste. Antiréductionnisme et réalisme scientifique en physique moderne. Histoire, Philosophie et Sociologie des sciences. Université Sorbonne Paris Cité, 2017. Français. NNT : 2017USPCC077 . tel-01953871

HAL Id: tel-01953871

<https://theses.hal.science/tel-01953871>

Submitted on 13 Dec 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Thèse de doctorat
de l'Université Sorbonne Paris Cité
Préparée à l'Université Paris Diderot
Ecole doctorale : **Savoirs scientifiques (ED 400)**
Laboratoire SPHERE

Vladimir Fock (1898-1974) : itinéraire externaliste d'une pensée internaliste

*Antiréductionnisme et réalisme scientifique
en physique moderne*

Par **Jean-Philippe Martinez**

Thèse de doctorat en Histoire et Philosophie des Sciences

Dirigée par Jan Lacki et Alexei Kojevnikov

Présentée et soutenue publiquement à Paris le 4 décembre 2017

devant le jury composé de :

Président / Rapporteur : **M. Scott WALTER** / Professeur à l'Université de Nantes
Rapporteur : **M. Olival FREIRE JR.** / Professeur à l'Université fédérale de Bahia
Examineurs : **Mme Sophie COEURÉ** / Professeure à l'Université Paris Diderot
M. Olivier DARRIGOL / Directeur de recherche au CNRS
M. Grégory DUFAUD / Maître de conférences à Science Po Lyon
M. James RITTER / Maître de conférences retraité de l'Université Paris VIII
Directeur de thèse : **M. Jan LACKI** / Directeur de recherche au CNRS
Co-directeur de thèse : **M. Alexei KOJEVNIKOV** / Professeur associé à l'Université de la
Colombie-Britannique

Titre :

Vladimir Fock (1898-1974) : itinéraire externaliste d'une pensée internaliste. Antiréductionnisme et réalisme scientifique en physique moderne

Résumé :

Vladimir Aleksandrovich Fock est un physicien largement reconnu par la communauté scientifique pour ses contributions de premier plan aux théories de la mécanique quantique et de la relativité générale. Il est aussi un acteur majeur du débat sur l'interprétation de ces deux théories du XX^e siècle, selon une approche qui se revendique clairement du matérialisme dialectique, une idéologie alors largement imposée par les autorités soviétiques en URSS. Notre étude porte principalement sur cet aspect de sa carrière, exploré jusqu'alors de façon trop partielle en histoire des sciences. Plus spécifiquement, nous nous penchons sur les racines scientifiques et philosophiques des interprétations non-orthodoxes des théories de la mécanique quantique et de la relativité générale que développe Fock. En reconstruisant son approche épistémologique nous mettons en évidence que le physicien est guidé par une vision antiréductionniste et réaliste scientifique de sa discipline. Cette base nous donne alors l'assise pour discuter des raisons pour lesquelles le matérialisme dialectique est une véritable influence pour la pensée du physicien soviétique. Par la suite, partant du constat de la sincère adoption par Fock de cette idéologie, nous replaçons la question de l'interprétation des théories de la physique moderne dans son contexte socio-culturel. Il est y notamment question d'observer le parcours du physicien en tant que défenseur des théories de la mécanique quantique et de la relativité face aux différentes attaques politiques et idéologiques qu'elles peuvent subir en Union soviétique, mais aussi d'étudier l'influence du contexte sur la formulation à proprement parler de leurs interprétations et dans un dernier temps de développer les questions relatives à la diffusion des idées de Fock dans la communauté locale et internationale des physiciens. En somme, cette thèse permet de reconsidérer l'intérêt que présente la pensée de Vladimir Aleksandrovich Fock dans l'histoire des théories de la physique moderne.

Mots clefs :

V. A. Fock, physique moderne, mécanique quantique, relativité générale, antiréductionnisme, réalisme, Union soviétique, matérialisme dialectique, interprétation, discours scientifique

Title:

Vladimir Fock (1898-1974): Externalist Itinerary of an Internalist Thought. Antireductionism and Scientific Realism in Modern Physics

Abstract:

Vladimir Aleksandrovich Fock is a physicist well-known by the scientific community for his important contributions to the theories of quantum mechanics and general relativity. He is also a major actor in the debate on the interpretation of these two major theories of the XXth century, following an approach that clearly claims dialectical materialism – an ideology then largely imposed by the Soviet authorities in the USSR - as fundamental. Our work mostly focuses on this aspect of Fock's career, explored too partially in the history of science. More specifically, we reconsider the scientific and philosophical roots of the non-orthodox interpretations of quantum mechanics and general relativity developed by Fock. By reconstructing his epistemological approach we put forward that the physicist was guided by an antireductionist and a scientific realist conception of his discipline. This basis gives us the possibility to discuss the reasons why dialectical materialism was a real influence on the scientist thought. Thus, by following the observation of the sincere adoption by Fock of the Soviet ideology, we put back the question of the interpretation of the theories of modern physics in its socio-cultural context. We observe Fock's trajectory as a defender of quantum mechanics and relativity theory against the different ideological and political attacks they may undergo in Soviet Union. We also study the influence of context on the actual wording of their interpretations and finally we develop the issues related to their diffusion in the local and worldwide community of physicists. To summarize, this thesis helps to reconsider the interest of Fock's thought in the history of modern physics.

Keywords:

V. A. Fock, modern physics, quantum mechanics, general relativity, antireductionism, realism, Soviet Union, dialectical materialism, interpretation, scientific discourse

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude envers Jan Lacki et Alexei Kojevnikov pour avoir accepté d'accompagner mon travail de recherche. Nos échanges, extrêmement vivifiants, ont été une constante source de motivation. Je tiens de plus à remercier chaleureusement Jan pour son inestimable accueil à Genève.

Je voudrais remercier tous ceux qui au fil du temps ont rendu ce travail possible. Je pense en particulier aux archivistes qui ont pu m'accompagner dans mes recherches aux quatre coins de l'Europe. Leur amabilité et leur disponibilité me fut précieuse. Je tiens aussi à remercier chaleureusement le Centre d'études franco-russe de Moscou, non seulement pour la bourse qui a pu m'être octroyée pour financer un séjour de recherche, mais aussi et surtout pour leur inestimable aide à chaque fois qu'il a été nécessaire d'obtenir un visa pour la Russie. Je remercie aussi Sandrine Pellé pour sa grande disponibilité.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers tous ceux qui ont pu au détour de mon parcours me faire partager leur expérience, me conseiller, m'orienter, voire même partager avec moi leurs travaux. Dans ce cadre j'ai notamment une pensée toute particulière pour Christian Joas et Roberto Lalli. J'ai aussi une pensée pour Virgile Besson qui, rencontré au hasard d'une conférence en 2014, est devenu depuis mon plus proche compagnon de thèse et avec qui les échanges furent stimulants. Je lui souhaite beaucoup de réussite.

J'aimerais remercier Bruno Peres et Sylvain Grille pour leurs précieuses relectures. Que ce dernier me pardonne pour mes innombrables « alors » et « notamment » sur lesquels j'aurai toujours un œil attentif à partir de maintenant.

J'ai une pensée pour tous mes amis qui ont donné à ces six dernières années une saveur toute particulière, et plus spécialement Lucas, Romain et Sylvain. Je songe aussi à toutes les formidables rencontres que j'ai pu faire en Russie, à tous ceux qui m'ont transmis l'amour du pays rendant cette recherche plus agréable au quotidien. En particulier, je remercie chaleureusement Elvira pour son aide avec la langue russe.

Je voudrais enfin remercier mes sœurs et dédier ce travail à mes parents qui m'ont toujours soutenu peu importe la direction que je prenais. La confiance qu'ils m'ont accordée est pour moi inestimable.

Table des matières

Remerciements	5
Table des matières	7
Table des illustrations	15
Avant-propos	17
Introduction	19
Chapitre premier - Devenir un physicien théoricien.....	39
1. Parfaire sa formation à l'étranger	42
1.1. L'équation de Klein-Gordon comme détonateur.....	43
1.2. Les bourses de la Fondation Rockefeller : une inestimable opportunité	45
1.3. Göttingen et principe adiabatique	48
1.4. Compléter sa formation en mécanique quantique.....	51
2. De retour en URSS : succès scientifiques et académiques	56
2.1. Des contributions majeures aux développements de la physique quantique	57
2.1.1. Investigations sur l'équation de Dirac	57
2.1.2. Electrodynamique quantique et espace de Fock.....	58
2.1.3. Collaborations internationales – Le cas de la seconde quantification.....	64
2.2. Une carrière académique accomplie	68
2.2.1. Un personnage clé de la physique soviétique	68
2.2.2. Une influence internationale assujettie au contexte national	73
3. Etude de cas : l'élaboration de la méthode de Hartree-Fock.....	75
3.1. Hartree : entre « vieille théorie de Bohr » et nouvelle mécanique quantique	77
3.2. Ansatz et principe d'exclusion de Pauli.....	79
3.3. Poser les fondations théoriques de la méthode : la contribution de Fock	82
3.4. Slater, à la recherche d'un formalisme alternatif	84
3.5. Un « physicien du calcul et de la classification » en opposition à un pur théoricien ..	87
3.6. Conclusion intermédiaire.....	93

4.	<i>Conclusion</i>	94
	<i>Chapitre deuxième – Antiréductionnisme</i>	97
1.	<i>La méthode de Hartree-Fock : complications</i>	99
1.1.	Difficultés numériques	100
1.2.	Un insaisissable nouveau phénomène : l'échange quantique.....	103
1.3.	1951 : bilan et nouvelles perspectives	111
1.4.	Conclusion intermédiaire.....	116
2.	<i>Réductionnisme et physique moderne</i>	118
2.1.	Réductionnisme – Définitions	119
2.2.	Emergence, incommensurabilité : concepts de l'antiréductionnisme	121
2.3.	La physique, championne du réductionnisme ?	123
2.4.	Diversité du point de vue des fondateurs de la mécanique quantique.....	126
2.4.1.	Bohr : considérations synchroniques.....	126
2.4.2.	Heisenberg et Dirac : considérations diachroniques	129
3.	<i>Fock, un pluraliste en série</i>	132
3.1.	La signification fondamentale des méthodes d'approximation en physique théorique.....	132
3.2.	Électrodynamique quantique.....	141
3.2.1.	Inégalités mathématiques : la mesure des champs.....	141
3.2.2.	Réflexions sur une théorie de l'unification	146
4.	<i>Conclusion</i>	150
	<i>Chapitre troisième – Réalisme scientifique</i>	153
1.	<i>Mécanique quantique et observabilité : l'interprétation de Copenhague</i>	157
1.1.	Les relations d'indétermination de Heisenberg	158
1.2.	Heisenberg face à Bohr	161
1.3.	Bohr et la complémentarité.....	162
2.	<i>Le paradoxe EPR et l'inévitable question du réalisme</i>	164

2.1.	Présentation du paradoxe	165
2.2.	La réponse de Bohr.....	167
2.3.	La question du réalisme.....	169
3.	<i>Fock : un réaliste scientifique</i>	171
3.1.	Contexte et aperçu général.....	171
3.2.	Les notions classiques et quantiques d' « état »	175
3.3.	Les mathématiques comme langage de la nature	177
3.4.	L'importance de la « signification physique »	182
3.5.	Une nécessaire rigueur physique	186
4.	<i>Conclusion</i>	189
 <i>Chapitre quatrième – Interprétation des théories modernes de la physique ...</i>		193
1.	<i>Interprétation de la mécanique quantique</i>	197
1.1.	La critique de Bohr en 1951	198
1.2.	La physique quantique et les idéalizations classiques	205
1.2.1.	Les limites de la description classique des phénomènes.....	206
1.2.2.	Le principe de relativité par rapport aux moyens d'observation	208
1.2.3.	Possibilité potentielle	210
1.3.	Conclusion intermédiaire.....	213
2.	<i>Interprétation de la relativité générale</i>	216
2.1.	Considérations historiques	216
2.1.1.	Frederiks et Friedmann, figures de proue de la relativité en URSS	217
2.1.2.	Le jeune Fock et la théorie de la relativité.....	219
2.1.3.	La généralisation de la théorie quantique comme point de contact.....	222
2.2.	1939 : Une importante percée dans le monde de la relativité générale	224
2.2.1.	Problème du mouvement.....	225
2.2.2.	Coordonnées harmoniques	227
2.2.3.	Contenu physique.....	229
2.3.	La relativité physique ne peut être générale et la relativité générale ne peut être physique	233
2.3.1.	Relativité restreinte et relativité générale : domaines d'applicabilité	234

2.3.2.	Espaces inhomogènes et principe d'équivalence	238
2.3.3.	Covariance des équations.....	240
2.3.4.	Principe de relativité.....	241
2.3.5.	Coordonnées privilégiées	244
2.3.6.	Conclusion intermédiaire.....	245
3.	Conclusion	246
Chapitre cinquième – Matérialisme dialectique.....		249
1.	Qu'est-ce que le matérialisme dialectique ?.....	252
1.1.	Définitions préliminaires	253
1.1.1.	Matérialisme.....	253
1.1.2.	Dialectique.....	254
1.2.	Mise au point du matérialisme dialectique : Marx et Engels	256
1.3.	Sur les sciences : le point de vue de Lénine.....	259
1.4.	Conclusion intermédiaire.....	266
2.	Le matérialisme dialectique dans la vie scientifique de Fock	267
2.1.	Fock et la lecture des auteurs marxistes.....	268
2.2.	Apport du point de vue épistémologique : la dialectique	269
2.3.	Prédispositions de Fock à l'acceptation du matérialisme dialectique : réalisme	276
2.4.	Conclusion intermédiaire.....	280
3.	La rupture du stalinisme.....	281
3.1.	Une altération de la philosophie au service de la politique	281
3.2.	Un impact notable sur la philosophie des sciences	285
4.	Conclusion	288
Chapitre sixième – Défense des théories modernes de la physique		293
1.	Avant-guerre – l'impossible conciliation ?.....	296
1.1.	Une progressive dégradation de la situation en physique	297
1.1.1.	Réorganisation disciplinaire.....	297
1.1.2.	Attaques philosophiques : la Session de Mars en 1936.....	299
1.1.3.	La Grande Terreur.....	301

1.2. Fock, physicien philosophe en action	304
1.2.1. Une personnalité directement attaquée	305
1.2.2. Une confrontation directe avec les autorités	307
1.2.3. Compatibilité des théories modernes avec le matérialisme dialectique.....	311
1.3. Conclusion intermédiaire.....	316
2. Défense des théories modernes - Après-guerre	317
2.1. La science en danger : la doctrine Jdanov	318
2.2. Physique et biologie, même combat ?.....	320
2.2.1. L'affaire Markov.....	321
2.2.2. Différents académiques.....	323
2.2.3. La conférence qui n'a jamais eu lieu	324
2.3. Fock et la critique ignorante de la physique moderne.....	331
2.3.1. Poursuite des attaques contre les sciences modernes.....	331
2.3.2. 1953 : le « bouclier nucléaire » au soutien de Fock.....	333
2.4. Une lente normalisation de la situation	337
2.4.1. L'exemple de l'Université d'Etat de Moscou	338
2.4.2. Des débats philosophiques pacifiés.....	340
3. Conclusion	342
Chapitre septième – Discours scientifique.....	347
1. Spécificités du discours scientifique en URSS.....	350
1.1. Rhétorique et rituels staliniens	350
1.2. 1949 – Fock est-il paradoxal ?	354
2. Fock et la critique scientifique	357
2.1. Einstein et Bohr : deux figures internationales objets de la critique de Fock.....	358
2.1.1. Au-delà du jubilé : Einstein	358
2.1.2. L'idéalisme de Bohr	362
2.2. Fock à l'assaut des physiciens soviétiques	367
2.2.1. Mandelstam et la relativité générale.....	367
2.2.2. Interprétations statistiques de la mécanique quantique : Blokhintsev.....	371
3. Conclusion intermédiaire.....	376

3.	<i>Au travers du discours : la place de la science, de la politique et de la philosophie chez Fock</i>	377
3.1.	La primauté du contenu scientifique	377
3.1.1.	Le recours à l’histoire des sciences	377
3.1.2.	La valeur des outils rhétoriques	379
3.2.	Énoncés épistémologiques versus énoncés philosophiques	383
3.2.1.	Un discours à neutralité idéologique variable	383
3.2.2.	Science et philosophie	386
3.3.	Conclusion intermédiaire	389
4.	<i>Conclusion</i>	390
	<i>Chapitre huitième – Diffusion des interprétations</i>	393
1.	<i>Disputes et diffusion à l’international</i>	396
1.1.	Infeld : de Léninegrad à Berne	397
1.1.1.	Un débat scientifique sur un support philosophique	398
1.1.2.	Le colloque de Berne	404
1.2.	La dispute avec Bohr	409
1.2.1.	Voyage à Copenhague	409
1.2.2.	Échos de la dispute	415
1.3.	Conclusion intermédiaire	423
2.	<i>Parcours institutionnel à l’étranger</i>	424
2.1.	Comité international : séjours à l’étranger, multiplication des contacts	425
2.2.	La conférence de Tbilissi : un succès en trompe l’œil ?	430
2.2.1.	Des préparatifs enthousiastes	430
2.2.2.	L’affaire israélienne	433
2.2.3.	Fock au cœur de la tourmente	436
2.3.	Une autorité limitée : Fock face à Ivanenko	444
2.4.	Conclusion intermédiaire	450
3.	<i>Réception de la pensée de Fock</i>	454
3.1.	En mécanique quantique	454
3.2.	En relativité générale	459

3.3. Conclusion intermédiaire.....	464
4. Conclusion	465
<i>Conclusion générale</i>	469
<i>Œuvres de Fock</i>	489
<i>Archives</i>	527
<i>Bibliographie générale</i>	529
<i>Index des noms</i>	574

Table des illustrations

<i>Figure 1. Soleil couchant sur la Neva et le Kunstkamera</i>	<i>21</i>
<i>Figure 2. Présidium de l'Académie des sciences russe</i>	<i>27</i>
<i>Figure 3. Vladimir Fock en 1957 à Copenhague [Niels Bohr Archive, Copenhague].....</i>	<i>38</i>
<i>Figure 4. Max Born [Portrait]</i>	<i>49</i>
<i>Figure 5. Paul Dirac [Portrait].....</i>	<i>52</i>
<i>Figure 6. Douglas Rayner Hartree [Portrait]</i>	<i>77</i>
<i>Figure 7. John Clarke Slater [Portrait]</i>	<i>112</i>
<i>Figure 8. Schéma des relations interthéoriques développées par Fock en 1936.</i>	<i>135</i>
<i>Figure 9. Schéma complété des relations interthéoriques développées par Fock en 1936 ...</i>	<i>137</i>
<i>Figure 10. Niels Bohr à Kharkov en 1934 [Photographie de groupe].....</i>	<i>172</i>
<i>Figure 11. Vladimir Fock et Niels Bohr en discussion à Moscou en 1961.....</i>	<i>199</i>
<i>Figure 12. Vladimir Fock [Portrait]</i>	<i>292</i>
<i>Figure 13. Vladimir Fock, Igor Tamm et Niels Bohr en discussion à Moscou en 1961.</i>	<i>361</i>
<i>Figure 14. Léopold Infeld en 1960 [Portrait]</i>	<i>398</i>
<i>Figure 15. Obreimov I. V., Fock V. A., Bohr N. et Kapitsa P. L. en 1961 à Moscou.....</i>	<i>422</i>
<i>Figure 16. Dmitri Ivanenko [Portrait]</i>	<i>444</i>

Avant-propos

Pour la translittération du cyrillique j'ai fait le choix d'utiliser le système BGN/PCGN qui fait appel au tableau de correspondance suivant :

а	б	в	г	д	е	ё	ж	з	и	й	к	л	м	н	о	п	р	с	т	у	ф
a	b	v	g	d	e	ë	zh	z	i	y	k	l	m	n	o	p	r	s	t	u	f

х	ц	ч	ш	щ	ы	э	ю	я	ъ	ь
kh	ts	ch	sh	shch	y	e	yu	ya	''	'

Bien que ce système corresponde à une tradition anglo-saxonne plutôt que francophone – qui privilégie généralement le système ISO 9 – j'en ai fait le choix pour des raisons pratiques. Tout d'abord, par expérience, j'ai pu constater qu'il était relativement intuitif tout aussi bien pour les francophones, que pour les anglophones et les russophones, mais aussi qu'il se prêtait bien à l'exercice de la prononciation orale. Mais surtout, dans un monde où l'informatique et internet sont devenus nos principaux outils de travail, il faut noter qu'en ne faisant appel à aucun caractère spécial ce système est très facile d'usage. De plus, Google Traduction, qui pourrait venir en aide aux non-russophones, l'interprète sans aucune difficulté.

Notons toutefois que pour les noms communs nous avons fait le choix de respecter les usages devenus courants en langue française. Pour exemple, on conserve l'orthographe *Lénine* alors que la translittération voudrait que ce soit *Lenin*. L'existence d'une page Wikipédia a parfois pu me servir de référence sur ce qui représente l'usage courant en français. Notons que faire preuve de flexibilité sur ce point n'est que rendre justice à Fock lui-même, dont une translittération rigoureuse du nom, selon tout système en vigueur, conduirait à le nommer *Fok*. En effet, il est amusant de noter que tout au long de sa carrière le physicien n'a cessé de rappeler que son nom doit être orthographié *Fock* en raison de ses origines ouest-européennes¹.

¹ Voir la lettre de Morris D. Friedman, traducteur, en date du 28 janvier 1959 à destination de Fock (ARAN SPb, 1034-3-732), mais aussi celles de ce dernier à l'Institut soviético-roumain le 16 août 1961 (ARAN SPb, 1034-2-217), et à S. Müller-Markus le 25 août 1965 à (ARAN SPb, 1034-3-118).

Les traductions du russe vers le français sont miennes, sauf mention contraire, et c'est aussi le cas de quelques rares traductions de l'allemand. En bibliographie, les titres dans ces deux langues sont aussi traduits. Selon l'usage répandu, l'anglais est pour sa part conservé, à l'exception – pour des raisons de style – des courtes citations incluses dans le corps de texte. Il faut noter que lorsqu'il existe déjà dans la littérature secondaire une traduction anglaise d'une citation en russe ou en allemand, c'est elle que je reprends ici, afin d'éviter la tentation de la double traduction, l'anglais étant pour moi une langue plus accessible.

En bibliographie j'ai fait le choix de reproduire intégralement la liste des œuvres de Fock, classées par ordre chronologique, qui est séparé du reste des sources. Le lecteur retrouve donc en fin de ce volume une bibliographie dédiée aux publications de Fock, la liste des centres d'archives visités, et enfin la bibliographie générale. Afin de ne pas surcharger les notes de bas de page, un système de renvoi entre crochets, composé des quatre premières lettres de l'auteur – ou une combinaison en cas de co-auteurs – associées à l'année de première publication, est utilisé. L'ajout d'une apostrophe peut indiquer une réédition ou une traduction, l'année originale étant cependant conservée pour permettre une meilleure navigation au sein de la bibliographie. Ces publications d'un même contenu sont regroupées sous la même entrée.

Introduction

Préambule

Je me souviendrai toujours de ce mois de septembre 2012, où guidé par la nécessité du travail d'archives de la présente recherche, je me rends en Russie. C'est alors la première fois que je foule le sol d'un pays de l'ex-URSS. L'ironie de l'histoire veut que peu de temps avant de me rendre sur place j'apprenne que les archives que je voulais consulter seraient fermées. Ce n'est alors que le début d'un parcours semé d'embûches sur lequel je reviendrai dans un instant. Quoi qu'il en soit, le visa délivré, les billets d'avion réservés, le séjour prévu relativement court, il ne me reste plus à ce moment-là qu'à découvrir un pays dont j'avais décidé à l'aveugle de faire mon quotidien. En effet, trois ans plus tôt, lorsque j'entre en master d'histoire et philosophie des sciences à l'Université Paris Diderot, le directeur du laboratoire SPHERE, David Rabouin, me suggère de travailler sur l'Union soviétique. Après une expérience infructueuse en physique fondamentale – un domaine à mes yeux trop coupé des sciences sociales que j'avais déjà expérimentées au travers d'une licence d'histoire en parallèle de mon parcours en physique à l'Université de Pau et des Pays de l'Adour – j'avais décidé de me tourner naturellement vers l'histoire de cette dernière avec la volonté de mieux comprendre les liens entre science, politique et idéologie. C'est toujours ce qui me motive aujourd'hui, et de ce point de départ, l'URSS émerge naturellement comme un champ d'étude qui exemplifie de manière extrême les problématiques qui y sont liées.

Après un mini-mémoire de Master 1 sur la délégation soviétique du second Congrès international d'histoire des sciences et techniques tenu à Londres en 1931 [Mart 2010], je retourne en Master 2 vers la physique théorique avec une étude sur Lev Landau [Mart 2011]. L'apprentissage du russe m'accompagne aussi, et passionné par les différentes trajectoires historiques qui se dévoilent sous mes yeux, je décide de poursuivre en thèse sous la direction de Jan Lacki. Le sujet est initialement pensé comme relativement large : la réception de la mécanique quantique en URSS. C'est alors qu'Alexei Kojevnikov, qui devient rapidement mon co-directeur, me suggère de consulter à Saint-Pétersbourg les archives de Vladimir Fock, jusque-là relativement inexploitées. Je ne le sais pas encore mais le physicien pétersbourgeois deviendra rapidement mon unique objet d'étude, ses travaux en relativité générale intégrant

à cette occasion le spectre de ma recherche. C'est donc dans la cité de Pierre le Grand que je fais mes premiers pas russes en 2012, et touriste bien malgré moi, une relation fusionnelle avec cette ville grandiose naît rapidement.

Inconsciemment, chacun de mes pas dans la cité des tsars est un pas sur les traces du personnage qui va bientôt accompagner mon quotidien. Je me souviens encore descendre la perspective Nevski depuis la cathédrale Notre-Dame-de-Kazan en direction de la lauré Saint-Alexandre-Nevski, avant de prendre sur la droite le long de la Neva et de rester un long moment à observer les interminables trains de marchandise traverser l'immense pont ferroviaire de Finlande. C'est le sourire aux lèvres que j'apprendrai plus tard que le petit Odik grandit dans ce quartier, et qu'il en garde une véritable passion pour les trains¹. Odik, c'est le diminutif donné par sa famille à Vladimir Aleksandrovich Fock, le héros de notre histoire. Il est né le 22 décembre 1898 – le 10 décembre du calendrier julien alors en vigueur – à Saint-Pétersbourg. Son père, Aleksandr Aleksandrovitch Fock, est arpenteur-géomètre, ingénieur des forêts, auteur de différents travaux scientifiques en lien avec le milieu forestier au sein du Ministère de l'agriculture et des propriétés d'État. Après la Révolution d'Octobre il est transféré au Commissariat du peuple² à l'Agriculture jusqu'à sa mort en 1921. La mère de Vladimir Fock, Nadejda Alekseevna Chervinska, fille de sénateur, est enseignante à domicile. Ensemble, ils ont cinq enfants. Odik donc, et quatre filles, toutes plus âgées que lui, qui se prénomment Nadezhda, Natal'ya, Tamara et Yuliya. La famille est aisée, son entourage se compose de nobles, de généraux, de sénateurs ou encore d'éminents professeurs³. Elle appartient à une forme d'aristocratie tsariste⁴ et à la maison on parle bien évidemment russe,

¹ Vladimir Fock s'est peu exprimé sur son enfance. Les anecdotes un tant soit peu personnelles que nous communiquons ici proviennent essentiellement des souvenirs publiés en 1993 par son fils, Mikhail V. Fock [Fock 1993], mais aussi d'une discussion avec son petit-fils Vladimir, à l'hiver 2014-2015. Plus généralement, nos sources principales pour discuter de la jeunesse de Fock sont des études biographiques, par Smirnov et Vredenkovskoy en 1956 [SmVr 1956], ainsi que plus récemment, et de façon plus complète, par Vladimirova [Vlad 2012].

² Le Commissariat du peuple est en URSS l'équivalent de ce que nous connaissons sous le nom de ministère.

³ Voir Vladimirova sur la famille de V. A. Fock [Vlad 2012, pp. 15-19].

⁴ Dans différents questionnaires officiels à destination de l'administration soviétique Fock n'hésite pas à mentionner qu'il appartient à la catégorie sociale « noble ». Voir Gorelik qui mentionne un document de 1938 [Gore 1993, p. 312] ou encore le « Lichnyy listok po uchetu kadrov » (Formulaire individuel du personnel) daté du 7 juillet 1942, contenu dans le dossier personnel de Vladimir Fock des archives de l'Institut Ioffé.

mais aussi allemand et français¹. C'est que l'on cultive aussi dans la famille une certaine fierté vis-à-vis de ses origines d'Europe de l'Ouest, et plus tard, Fock aime à raconter qu'il est un descendant de constructeurs de navire hollandais, emmenés en Russie par Pierre le Grand².

Si l'on remonte la perspective Nevski dans l'autre sens, vers l'Ermitage, puis que l'on traverse le pont Dvortsoviy, on est accueilli sur l'île Vassilievski par le magnifique bâtiment vert du *Kunstkamera*, en français la « Chambre des curiosités », musée d'ethnographie et d'anthropologie de l'Académie des sciences de Russie. Sur la droite, cachée discrètement dans une cour intérieure, l'entrée des archives de cette dernière institution. Fermées en 2012, je n'ai d'autre choix dans ma marche que de contourner le bâtiment pour découvrir que s'étendent devant moi les hauts lieux historiques de la vie académique de Saint-Pétersbourg.

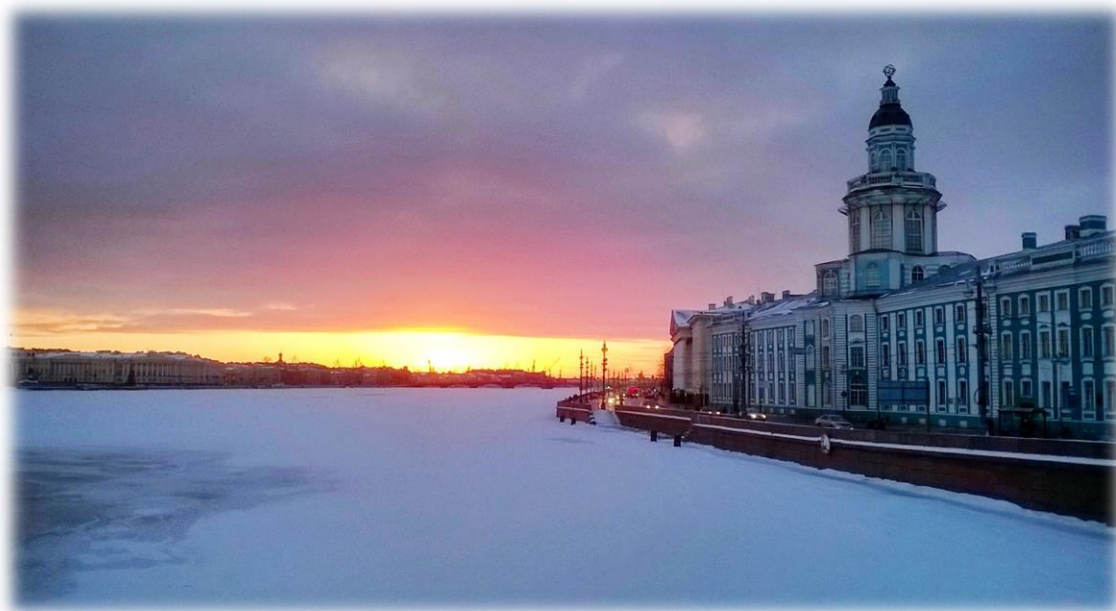


Figure 1. Soleil couchant sur la Neva et le Kunstkamera [Photographie : Jean-Philippe Martinez, 2015].

Sur l'île s'étend l'Université d'Etat de Saint-Pétersbourg et à nouveau je suis les traces d'Odik. Ce dernier est plutôt bon élève, et en 1916 il termine à Pétrograd³ la *Realschule*, qui délivre

¹ Fock apprend en revanche l'anglais à l'école.

² Voir Graham [Grah 1982, p. 128] et Vladimirova pour de plus amples développements sur les ancêtres et la famille de Fock [Vlad 2012, pp. 15-19].

³ Pétrograd n'est autre que Saint-Pétersbourg. Mais cette dernière dénomination étant jugée trop germanique elle est changée durant la première guerre mondiale, dès 1914. A la mort de Lénine en 1924, elle est renommée Léninegrad, nom qu'elle garde jusqu'en 1991 où un référendum populaire plébiscite le retour du nom Saint-Pétersbourg.

un enseignement secondaire à vocation scientifique¹. Puis il intègre l'Université de la ville des tsars pour une première année à la Faculté physico-mathématique. Son cursus est cependant interrompu en février 1917 lorsqu'il décide d'effectuer volontairement son service militaire et intègre très rapidement l'école d'artillerie de Pétrograd². Après avoir suivi un programme accéléré il est envoyé en septembre sur le front roumain comme officier d'artillerie. Cependant, le 9 février 1918 il est démobilisé en raison de problèmes de surdité³. Cela restera un trait important du personnage qui aura besoin tout au long de sa vie d'être équipé d'un appareil auditif pour pouvoir communiquer avec son entourage. Il est possible que ce facteur ait forgé son caractère. Car il est un homme assez détaché des réalités, très indépendant, et profondément absorbé par la science, domaine auquel il se dévoue⁴.

Ainsi, suite à sa démobilisation, Fock revient rapidement à l'Université et se consacre à la physique. La face du pays est alors profondément changée : le tsar Nicolas II est destitué le 15 mars 1917 et suite à la Révolution d'Octobre on entre dans l'ère bolchévique. Mais l'empreinte tsariste pour la physique est forte. S'il ne fallait citer qu'un personnage de cette époque pour symboliser la physique russe, ce serait probablement Piotr Lebedev (1866-1911) qui à partir de l'année 1891 travaille à l'Université de Moscou et y établit l'une des premières écoles de physique⁵. Il incarne avant tout l'idée qu'à la charnière du XX^e siècle c'est Moscou qui se distingue en URSS dans le domaine scientifique. Mais Saint-Pétersbourg va progressivement renverser la tendance, du moins pour la physique, et Fock va se retrouver dans un environnement privilégié à l'échelle du pays. C'est notamment le cas sous l'impulsion des professeurs I. I. Borgman (1849-1914) et O. D. Khvol'son (1852-1934) que la cité de la Baltique voit son niveau d'enseignement s'améliorer. Tout d'abord, ces deux acteurs jouent

¹ Les cours suivis par Fock sont le russe, l'allemand, le français, l'anglais, l'arithmétique, l'algèbre, la géométrie, la trigonométrie, les sciences naturelles, la physique, le dessin et les lois divines [Vlad 2012, p. 19].

² Sur le parcours militaire de Fock voir Vladimirova [Vlad 2012, p. 22-27]. La première Guerre mondiale est une épreuve traumatisante pour lui. En effet, deux de ses sœurs, Nadezhda et Natal'ya, y perdent la vie. La première, médecin de campagne, tombe gravement malade sur le front ; la seconde décède alors qu'elle est infirmière à l'hôpital de Tchernivtsi, dans l'ouest ukrainien.

³ Il est possible que cette surdité soit initialement causée par une otosclérose.

⁴ Sur le caractère de Fock voir Gorelik [Gore 1993, pp. 321 et 325].

⁵ Sur une approche historique de la physique en tant que discipline à l'époque tsariste et au début de la période bolchévique, voir en particulier Josephson [Jose 1991] mais aussi Vizgin et Gorelik pour un compte-rendu plus condensé [ViGo 1987].

un rôle particulier dans la Société russe de physique-chimie, une organisation qui réunit les physiciens russes et publie ce qui est alors la principale revue pour la discipline : *Zhurnal russkogo fiziko-khimicheskogo obshchestva, chast' fizicheskaya* (Journal de la Société russe de physique-chimie, partie physique). Mais surtout, avec l'arrivée d'une nouvelle génération de physiciens incarnée par A. F. Ioffé (1880-1960), D. S. Rozhdestvenskiy (1876-1940) mais aussi P. Ehrenfest (1880-1933), qui ont connu l'expérience de l'étranger et qui collaborent avec leurs aînés, on assiste à Saint-Pétersbourg à l'émergence d'un programme de mathématiques dédié à la physique qui marque une nouvelle dynamique pour la discipline.

Diplômé de l'Institut d'Etat de technologie de Saint-Pétersbourg, Ioffé passe deux ans à Munich où il prépare son doctorat sous la direction de celui qui a obtenu le premier prix Nobel de physique en 1901 pour la découverte des rayons X, Wilhelm Röntgen. Il y devient un expérimentateur de talent, possédant un véritable intérêt pour les problèmes théoriques. Rozhdestvenskiy est quant à lui diplômé de l'Université de Saint-Pétersbourg et séjourne aussi à l'étranger, auprès d'Otto Wiener à Leipzig en 1901 puis de Paul Drude à Giessen en 1903. Lui aussi expérimentateur, il est spécialiste de l'analyse spectrale. Avec Ioffé ils vont jouer un rôle majeur dans la structuration de la physique, surtout suite à la Révolution d'Octobre où ils vont obtenir le soutien des autorités bolchéviques. En particulier, Ioffé est l'un des fondateurs et directeur jusqu'en 1950 de l'Institut physico-technique de Léninegrad, qui porte aujourd'hui son nom¹. Dans le courant des années 1920 c'est l'institut de physique le plus prestigieux d'URSS. C'est en son sein qu'en septembre 2012, au grès de rencontres fortuites, j'ai la chance de consulter quelques documents personnels sur les physiciens théoriciens qui y travaillent à cette période. D'un intérêt mineur en comparaison de ce qui est conservé à l'Académie, ils en restent néanmoins mon premier contact avec les archives russes. Le dernier personnage que nous avons susmentionné, Paul Ehrenfest, a pour sa part une trajectoire éphémère à Saint-Pétersbourg, où il ne reste que de 1907 à 1912. Mais son impact est immense, en particulier pour la physique théorique. Autrichien, il est initialement élève de Boltzmann à Vienne, avant de rejoindre Göttingen et de compléter sa formation en mathématiques auprès de Félix Klein et David Hilbert. Sur place, tombé éperdument amoureux d'une jeune russe, il décide de rejoindre Saint-Pétersbourg, où il n'obtiendra jamais de position fixe à l'Université. Il y donne

¹ De 1918 à 1921, où il devient une entité indépendante, l'Institut est en réalité un département de l'Institut d'Etat de röntgenologie et radiologie. Sur sa fondation voir Josephson [Jose 1991, pp. 82-96].

tout de même un cours à l'Institut polytechnique en 1910 sur les équations de physique mathématique pour lequel Ioffé juge qu'il « combinait les mathématiques et la physique en une unité harmonieuse » jamais connue auparavant¹. Il organise de plus un séminaire de physique théorique qui fait naître dans la cité des tsars une véritable école de la discipline en devenant un rendez-vous essentiel suivi par les plus brillants jeunes physiciens pétersbourgeois. Rozhdestvenskiy, Baugmart, Bursian, Weihardt, Krutkov mais aussi des mathématiciens comme Bernstein, Tamarkin ou Friedmann y assistent. Après le départ de Ehrenfest pour Leyde en 1912, ce sont d'ailleurs Bursian et Weihardt qui font perdurer le séminaire, puis Semenov et Obreimov après 1915. Grâce à cette impulsion donnée par Ehrenfest la physique théorique devient alors un véritable centre d'intérêt pour la communauté².

C'est donc au contact de cette génération éveillée aux problèmes les plus modernes de la physique que Fock poursuit son cursus universitaire en 1918. Mikhail, son fils, nous décrit une université vidée de ses étudiants, mais qui a pour avantage de voir la communication avec les enseignants facilitée. Le jeune Vladimir s'y entoure alors de personnages qui plus encore que des professeurs restent par la suite de véritables amis. C'est notamment le cas de Yuri Krutkov qui enseigne la mécanique, et qu'il prend plaisir à qualifier de « grand sybarite » [Fock 1993, p. 133]. Mais parmi les rencontres que Fock fait à l'époque, Dmitri Rozhdestvenskiy est probablement la plus importante. En effet, ce dernier l'invite en février 1919 à rejoindre l'Institut d'optique d'État qui se cache lui aussi quelques centaines de mètres derrière la *Kunstkamera* sur l'île Vassilievski. Outre la dimension scientifique de cet événement, il est avant tout essentiel car Fock considère qu'il l'a sauvé de la famine³. L'institut de Rozhdestvenskiy, nouvellement ouvert, reçoit en effet le soutien du gouvernement bolchévique afin de surmonter les problèmes causés par la Révolution d'Octobre 1917 et la guerre civile qui en découle. Alors que le pays est en proie à de graves troubles, Fock intègre un groupe de « techniciens » qui reçoivent une bourse (*stipendatov*). Son salaire : deux cents

¹ Cité par M. J. Klein [Klein 1985, p. 89]

² Sur le rôle joué par le *kruzhok* de Ehrenfest pour la physique théorique soviétique voir Josephson [Jose 1991, pp. 32-34]

³ Sur cet épisode voir les souvenirs de son fils Mikhail [Fock 1993, p. 133].

roubles et deux *pirojki*¹. C'est suffisant pour penser à l'avenir, et Fock, qui conserve ce statut jusqu'en 1923, poursuit relativement sereinement son cursus universitaire².

La situation du jeune physicien marque le caractère assez particulier de la science vis-à-vis des événements politiques que connaît la Russie. Avec la succession de la Grande Guerre, de la Révolution russe et de la guerre civile, le pays est ravagé. Mais l'idéologie bolchévique se veut résolument moderniste et la science joue un rôle primordial dans le processus de construction de ce que les dirigeants politiques soviétiques appellent dans leur programme « la première société socialiste ». Ainsi, pour que la science puisse contribuer à l'effort collectif, il faut aussi que l'État lui en donne les moyens et les scientifiques bénéficient en fin de compte d'un traitement de faveur. Alors :

During the Civil war, amid economic destruction and hardships, radical institutional changes in the social infrastructure of science were pushed forward with astonishing ease. As the war and the attendant isolation of Russian science ended in 1921, the foundation of a novel government-sponsored system of research and development was already in place [Koje 2004, p. 23].

En effet, ce dont souffre la physique avant tout à cette époque, c'est de son isolement international. Mais la jeune communauté de Saint-Pétersbourg est dynamique sur ce point, comme en témoignent en décembre 1919 l'envoi d'un télégramme par Rozhdestvenskiy, Krutkov et Frederiks à Lorentz et Ehrenfest à Leyde leur demandant de pallier l'absence de littérature scientifique étrangère qui les touche depuis 1917. En juin 1920, suite au rétablissement des liaisons postales, cette demande est renouvelée auprès d'Ehrenfest par Ioffé. Plus encore, dès 1921, ce sont les voyages de scientifiques – parmi lesquels Ioffé, A. N. Krylov, Rozhdestvenskiy ou encore Khvol'son – vers l'ouest qui permettent de collecter des instruments et de la littérature scientifique en quantités remarquables³.

Selon son fils Mikhail, Fock s'essaie à l'expérimentation à cette époque, mais sans véritable succès [Fock 1993, p. 133]. Ce fait est d'autant plus anecdotique que comme Fock en a

¹ Les *pirojki* (*pirojok* au singulier) sont une spécialité culinaire russe. Ce mot générique regroupe toute une variété de petits pains de taille individuelle, cuits ou frits, fourrés à la viande, aux champignons, aux légumes...

² Sur l'intégration de Fock à l'Institut d'optique d'Etat voir Smirnov et Vreden-Kovetskoy [SmVr 1956, p. 5] et Vladimirova [Vlad 2012, p. 36-38].

³ Voir Vizgin et Gorelik [ViGo 1987, pp. 284-285]

témoigné auprès de Kuhn, il se prédestinait avant d'entrer à l'université à une carrière d'ingénieur [Kuhn 1967]. Mais il avait alors suivi la volonté de son père qui, ayant des aspirations intellectuelles au rang de son statut social, souhaitait le voir poursuivre tout d'abord un enseignement universitaire, et notamment acquérir un haut niveau en mathématiques. Alors, avec le temps, c'est la physique théorique que Fock choisit, et nul ne doute que le confort qui lui est donné à l'Institut d'optique conforte son choix. Il est de plus talentueux, et lorsqu'en 1922 il est diplômé du département de physique de la Faculté physico-mathématique de l'Université de Pétrograd, il est déjà l'auteur d'une publication dans le domaine de la physique mathématique [Fock 1922]. Dans le courant de l'été il se penche avec Krutkov sur un problème de théorie quantique qui donnera lieu à sa première publication internationale en 1923 dans les *Zeitschrift für Physik* [KuFo 1923]. Ces travaux incitent les enseignants de l'Université, conscients de son talent, à le garder auprès d'eux pour le préparer à l'enseignement¹. C'est dans le même temps qu'il deviendra l'un des plus grands physiciens théoriciens de l'histoire de l'Union soviétique.

Perception moderne de Vladimir Fock :

Après Saint-Pétersbourg, mon séjour russe de 2012 me conduit à Moscou, où j'ai la chance de pouvoir pénétrer les bâtiments de l'Académie des sciences afin d'assister à un colloque sur les échanges intellectuels franco-russes. Je quitte donc Fock sur l'île Vassilievski et songe à l'ombre des « cerveaux dorés » de la perspective Lénine à la trajectoire des plus grands noms de la physique soviétique : à Piotr Kapitsa, dont la maison, qui est un havre de paix au cœur de la perpétuelle ferveur moscovite, est située dans le parc de l'Institut pour les problèmes physiques qu'il a dirigé une bonne partie de sa carrière à quelques mètres du lieu où je me trouve, à Lev Landau, qui y a travaillé de longues années, mais aussi à Vladimir Fock, qui élu Académicien en 1939 n'a en définitive que le prix Nobel à leur envier. Car Fock est sans conteste un physicien d'exception, et il est alors une description qui revient régulièrement dans les textes pour qualifier le physicien qu'il est : la combinaison rare d'une incroyable intuition physique et d'une extraordinaire maîtrise des mathématiques [SmVr 1956, p. 8 ; Alld

¹ Faddeev L. D., Khalfin L. A. et Komarov I. V. mentionnent en effet en préface des *Selected Works* de Fock que « Fock's talent was noticed by the teachers and he was kept to the University to prepare for professorship » [Fock 2004, p. vii].

1988, p. 106 ; Novo 1999a, p. 1150]. En d'autres termes, pour d'autres, l'accent doit être mis sur l'éclairage qu'il apporte à la « signification fondamentale des méthodes mathématiques modernes pour la physique théorique » [Fock 2004, viii]. Ses contributions concernent des domaines aussi variés que la physique quantique, la relativité générale, la mécanique, la physique mathématique mais aussi les mathématiques pures, l'optique, la physique des milieux continus et notamment la théorie des ondes¹. Dans le premier domaine en particulier, Fock laisse son nom à la postérité et est bien connu des physiciens de nos jours au travers de précieux outils comme la méthode de Hartree-Fock, l'espace de Fock ou encore la représentation de Fock.



Figure 2. Aspect futuriste à Moscou pour le Présidium de l'Académie des sciences russe, surmonté de ses « cerveaux dorés ». Le bâtiment date de 1989 [Photographie : Jean-Philippe Martinez, 2012].

Cette physique, c'est celle du physicien de Saint-Pétersbourg. Mais dans l'histoire qui est la nôtre, dans notre souhait d'étudier science, politique et idéologie comme un ensemble, cette dimension locale ne pouvait plus suffire. Alors, en nous rendant à Moscou, sur la place Rouge et au Kremlin, nous suivons le pouvoir, l'autorité soviétique. Car si la ville des tsars a

¹ Un aperçu assez complet de cette variété est donné dans sa biographie publiée en 1956 par l'Académie des sciences de l'URSS [SmVr 1956].

été faite capitale russe en 1712 par Pierre le Grand, le 12 mars 1918, les bolchéviques transfèrent le pouvoir à Moscou. L'Académie des sciences elle-même, fleuron russe créé en 1724 à Saint-Pétersbourg est transféré en 1934. Car la politique est faite à Moscou, et on le sait bien, c'est le pouvoir, en définissant directement l'idéologie soviétique, qui fait la curiosité de tout historien pour l'URSS. Son expression directe, le matérialisme dialectique, est la philosophie que tout citoyen, toute institution doit adopter, et à laquelle Fock lui-même adhère. Alors, à l'image du grand écart entre l'uniformisme architectural de la ville de Pierre le Grand et le grand désordre qui vous assaille lorsqu'au petit matin en sortant de la gare Léninegrad de la capitale moscovite vous faites face à la place Komsomolskaïa et découvrez les gratte-ciels staliniens, la carrière de Fock gagne aussi en aspérités. Et le lecteur l'aura compris, ce sont vers ces aspects que mes travaux souhaitent avant tout se tourner, au-delà d'une simple histoire des réalisations scientifiques.

Fock est un physicien d'un environnement postrévolutionnaire. Politique bien entendu, mais physique aussi, avec l'immense chambardement de la discipline créé par la théorie quantique et de la relativité. Et pour toute révolution, après le temps des bouleversements, vient le temps de l'application et des difficultés qui y sont liées : pour la physique, c'est la nécessité d'une interprétation qui se manifeste, alors qu'en politique, c'est le risque de tomber dans l'autoritarisme. Dans ce cadre, l'historien découvre alors de nouvelles facettes de la trajectoire scientifique de Fock, qui devient d'une part interprète, et de l'autre défenseur, des théories de la physique quantique et de la relativité générale. Le premier volet se revendique matérialiste dialectique et s'éloigne des points de vue jugés orthodoxes sur les théories, alors que le second s'exprime contre la critique ignorante des philosophes, eux aussi marxistes. Ainsi, alors que ces aspects deviennent le quotidien de Fock dès 1936, les écarter pour ne mettre l'accent que sur sa production « technique » – questions d'interprétation mises à part – priverait quiconque de traits essentiels du personnage historique qu'il est réellement.

Considérations générales sur la littérature concernant Fock

La littérature secondaire sur Fock n'est pas naïve des différents aspects de sa carrière qui sont globalement tous traités. Même s'ils seront détaillés de façon plus spécifique en introduction de chaque chapitre, et ainsi en fonction de nos différentes attentes, je souhaite ici faire quelques commentaires généraux quant aux principaux documents qui définissent la

perception commune de Vladimir Fock, et ce afin d'identifier les différentes problématiques qui vont nous occuper et de déceler d'éventuelles lacunes. À ma connaissance, il n'existe qu'une unique biographie de Fock, publiée récemment en Russie par Larissa F. Vladimirova [Vlad 2012]. Or, sur les aspects qui nous intéressent, celle-ci apparaît comme bien trop consensuelle et passe quasi-totalement sous silence l'engagement de Fock pour l'interprétation des théories et leur défense. Le contraste est cependant étonnant avec le fait que si Fock n'est pas un personnage ignoré de la littérature historique sur la physique soviétique, c'est avant tout en raison de son action pour la défense des théories modernes de la physique. En effet, il est un personnage récurrent des diverses études qui se penchent sur une approche socio-politique de la physique soviétique, tel Josephson avec *Physics and Politics in Revolutionary Russia* [Jose 1991], Kojevnikov avec *Stalin's Great Science* [Koj 2004], et Sonin avec *Fizicheskiy idealizm* (Idéalisme physique) [Soni 2017]. Son rôle en est glorifié, mais on y argumente simplement sur Fock comme un physicien ayant proposé une conciliation entre les théories modernes de la physique et l'idéologie soviétique face aux attaques contre ces dernières des chiens de garde de la philosophie marxiste. Ainsi, ils ne donnent pas de véritables réponses sur la démarche intellectuelle de Fock au-delà de son action politique.

Mais d'autres auteurs se sont penchés plus près sur ce qu'il en est des interprétations des théories par Fock, et il faut saluer l'œuvre de Loren Graham qui a permis, tant pour la mécanique quantique que pour la relativité, de mettre en lumière la pensée du physicien de Leningrad. Il est l'auteur de diverses études qui font office d'autorité dans le domaine [Grah 1966a ; 1987 ; 1988], et qui bien qu'elles ne se focalisent pas sur Fock, en font un acteur de premier plan. Avec d'autres, en particulier Gorelik qui est l'auteur d'un article détaillant l'approche par Fock de la relativité générale d'un point de vue plus socio-culturel que scientifique [Gore 1993], Graham montre très clairement que le physicien se revendique du matérialisme dialectique et qu'une approche de sa pensée ne peut être dissociée de cet aspect ; je consacre bien évidemment une place dans mon étude à ce point précis. Ainsi, une fois dépassée la question de la production purement « technique » de Fock, il est vrai que Graham et Gorelik sont en mesure de mettre en avant les différentes facettes de la carrière du scientifique, et notamment la façon dont son engagement dans la défense des théories fait corps avec la question de leurs interprétations.

Mais ils laissent à mon sens diverses questions irrésolues qui pêle-mêle viennent justifier la nécessité d'une nouvelle approche de la figure de Fock. Par exemple, ils ne peuvent expliciter concrètement la nature du lien entre le matérialisme dialectique et les interprétations par le physicien soviétique des théories modernes de la physique. On peut aussi se demander dans quelle mesure la question de l'interprétation des théories peut être réellement approchée indépendamment de celle de la pratique scientifique chez le soviétique ? Car en se penchant sur les questions relatives au domaine de l'interprétation à partir du simple postulat que Fock est influencé par son environnement et le matérialisme dialectique, on prend le risque de voir leur contenu scientifique être occulté par un simple discours sur le contexte. Des hypothèses en tout genre peuvent alors surgir, y compris celle du scientifique, qui purement contraint par la pression politique de son environnement, fait le choix de mimer son adhésion à la philosophie marxiste. Si Graham ne va jamais dans ce sens, sa démarche ne lève pas totalement le doute, et il me semble qu'une telle hypothèse se doit d'être infirmée en se penchant plus spécifiquement sur la nature même de l'approche des sciences par le physicien. Et dans le fond, répondre à une telle question, c'est aussi se pencher sur celle de la cohérence générale du scientifique. Ici, bien que Graham questionne tour à tour Fock sur la mécanique quantique puis sur la relativité générale, on constate que jamais dans la littérature les deux sujets ne fusionnent en vue d'une compréhension plus globale de la pensée du physicien. Et quand bien même ce dernier manquerait de cohérence, rendant une telle approche impossible, il est du rôle de l'historien de le mettre en avant. Notons enfin qu'à l'exception de considérations sur son action « politique » en Union soviétique, il n'y a pas d'études sur la façon dont Fock diffuse ses idées après la seconde guerre-mondiale tant en URSS qu'à l'international.

Commentaires méthodologiques généraux

En 2015, lors d'une école d'été à Moscou dédiée aux écritures de soi, je m'immisçais au sein de la jeune communauté des historiens – au sens strict du terme – et attirais leur attention en discutant d'une spécificité bien connue de ma discipline, la tension entre l'internalisme et l'externalisme. Cette occasion unique d'être confronté à un public différent de celui de l'histoire et philosophie des sciences, était aussi celle de prendre du recul sur ma propre recherche, et il semble alors nettement moins hasardeux de voir aujourd'hui apparaître dans le titre de ma thèse de doctorat les termes « internaliste » et « externaliste ».

Cependant, ce fait mérite d'être ici commenté pour éviter tout amalgame. Bien évidemment, la démarche qui a été la mienne depuis le début de ma recherche, en souhaitant discuter avant tout des liens entre science, idéologie et politique, apparaît comme celle de l'historien externaliste, qui part en quête des facteurs externes susceptibles d'influencer l'évolution et l'élaboration du savoir scientifique, et ici plus spécifiquement la pensée de Fock. Pour autant, il s'agissait avant tout d'un choix thématique et je ne me revendique pas d'un externalisme fort, mais simplement d'une forme d'héritage kuhmien qui récuse une distinction tranchée entre le rôle des facteurs internes et externes. Pourquoi donc dans le titre faire appel à ce vocabulaire susceptible de raviver d'intenses débats historiographiques ? Pour répondre à cette question, j'anticipe ici certaines des conclusions que j'aurai en fin de cette étude, car il faut tout simplement noter qu'au fil de ma recherche sur Fock, je n'ai pu que constater d'avoir affaire à un personnage qui en dépit d'un parcours fortement dépendant des spécificités de son environnement, avec des contraintes externes aussi fortes que celles imposées par le contexte soviétique, se trouvait être guidé par l'idée d'une science indépendante de toute influence, qui triompherait d'elle-même de toute entrave à sa bonne conduite. Plus encore, pour saisir la véritable valeur de la pensée de Fock, y compris l'influence du matérialisme dialectique, j'ai dû m'intéresser de façon très précise au contenu de sa production scientifique, à sa teneur épistémologique. C'est donc avant tout cette tension permanente que le titre vient illustrer. Ainsi, l'emploi du terme internaliste vient qualifier le regard de Fock sur sa discipline, alors que celui d'externaliste vient spécifier l'idée que le physicien est aussi étudié dans son environnement.

J'ai mentionné en première page de cette introduction un « parcours semé d'embûches » lorsqu'il est question d'archives en Russie, et dans l'étude que j'ai menée, avec un fond documentaire principal relativement lointain et dans une langue qu'il m'a fallu approcher sur le tard, le travail de terrain prend une signification toute particulière. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, la complication principale que j'ai rencontrée n'était pas véritablement celle d'une difficulté à accéder aux documents : une simple lettre de l'administration universitaire m'a ouvert tous les fonds d'archives auxquels je souhaitais accéder, et en leur sein on ne m'a refusé la possibilité de consulter que très peu de documents classifiés pour des raisons qui pourraient être invoquées n'importe où ailleurs. Non, le problème principal est celui de la lenteur du processus de leur délivrance. Dans les archives de l'Académie des

sciences à Saint-Pétersbourg où est situé le fond Fock, ce sont au mieux dix dossiers par semaine qui sont accessibles, un dossier pouvant parfois se limiter à un unique feuillet. De plus la prise de photographies m’y était interdite. Il m’a donc fallu multiplier les séjours en Russie, mais de façon limitée en vertu de certaines contraintes personnelles. Ainsi, le fond Fock, qui est relativement riche en quantité, n’a pu être exploré que de façon partielle. Pour en affiner les conséquences, notons que celui-ci est divisé en quatre catégories de documents :

- Travaux scientifiques
- Documents biographiques, pédagogiques et sur l’organisation des sciences
- La correspondance
- Travaux d’autres individus

Mentionnons tout d’abord que la dernière catégorie n’avait que peu d’intérêt pour moi, ne regroupant majoritairement qu’une série d’articles déjà publiés. Il faut alors noter qu’en diversifiant la nature des documents consultés sur les trois autres catégories, il m’a été possible au fil du temps de tirer certaines conclusions importantes qui minimisent les carences induites par une étude partielle des archives. La première d’entre elles est que Fock est un physicien qui a beaucoup publié, et que dans une très large proportion le contenu des archives se reflète directement dans la littérature. La catégorie « travaux scientifiques » possède notamment l’ensemble des manuscrits des articles de Fock, mais en consultant certains d’entre eux j’ai aussi pu constater qu’ils ne permettaient pas vraiment de mettre en avant le processus intellectuel suivi par Fock dans la rédaction de ses articles. Les manuscrits ne sont en effet que rarement annotés, et souvent dans une forme déjà très proche de la publication finale. On trouve aussi dans cette catégorie le texte des conférences données par Fock. Mais ici aussi, peu de nouveauté. Elles finissent bien souvent par faire l’objet d’une publication ou en sont tout simplement une reprise directe. Bien évidemment, certains documents sortent du lot, mais je pense qu’en ayant rapidement identifié ce qui était relatif aux sources publiées, j’ai pu par les choix que j’ai faits extraire l’essentiel pour ma recherche de cette catégorie de documents.

Le second groupe, qui s’est révélé très précieux pour mon travail, regroupe les documents qui relient Fock à sa hiérarchie et aux autorités. C’est celle qui dans une certaine limite se reflète déjà le plus dans la littérature secondaire. La biographie de Vladimirova en est pour une bonne partie une reconstruction lorsqu’il s’agit du matériel compris comme

« biographique », et pour ce qui est du rapport aux autorités, l'histoire politique de la physique soviétique dans laquelle Fock joue un rôle décisif s'appuie déjà beaucoup sur ce type de documents. J'ai cependant identifié deux catégories qui me semblaient inexploitées. D'une part la correspondance entre Fock et les revues ou maisons d'éditions avec lesquelles il collabore, et d'autre part, les documents relatifs aux relations internationales. C'est donc principalement sur celles-ci que j'ai porté mon attention.

Enfin, la correspondance est probablement la catégorie de documents la plus aléatoire. J'ai essayé de limiter les surprises en me concentrant sur les acteurs que je savais essentiels à mon histoire mais aussi sur les échanges les plus fournis. Cependant, j'ai pu remarquer que dans sa correspondance Fock n'entre que très rarement dans un débat sur les questions d'interprétation, et lorsqu'il le fait c'est uniquement en fin de carrière alors que sa pensée a déjà été rendue claire à tous. Car c'est aussi un constat général du fond d'archive. Fock est avare lorsqu'il est question de parler de philosophie et de politique dès lors que l'on s'écarte du discours scientifique à proprement parler. Les archives donnent des pistes, des indications, mais en fin de compte c'est bien l'historien qui est en charge de reconstruire l'essentiel de la pensée du physicien.

Objectifs poursuivis étant donné l'état de la littérature

Afin de répondre aux différentes problématiques laissées ouvertes par la littérature secondaire, je me propose donc dans ce travail de fournir une première étude complète sur la question de l'interprétation des théories modernes de la physique par Vladimir Fock. Car notre objet d'étude n'est pas tant Fock lui-même que sa pensée sur la mécanique quantique et la relativité générale. Par étude « complète », j'entends bien évidemment souligner l'idée que ce sont les deux théories majeures du début du siècle dernier qui font l'objet de ma recherche, mais aussi plus spécifiquement que je souhaite en explorer les racines scientifiques et philosophiques chez Fock, ainsi que leur place dans le contexte socio-culturel soviétique, l'influence du politique sur leur formulation et enfin les questions relatives à leur diffusion dans la communauté des physiciens. Par cette approche j'entends aussi reconsidérer l'intérêt que présente la pensée de Fock pour l'histoire des théories de la physique moderne. En effet, le modernisme est généralement vu comme un courant antiréaliste et réductionniste – deux concepts philosophiques sur lesquels je reviendrai plus en détail – et la physique ne semble pas échapper à cette dynamique. Dans la lignée du positivisme de Mach, les révolutions

conceptuelles de la théorie de la relativité et de la mécanique quantique donnent la sensation de consacrer une approche instrumentaliste en physique et, par conséquent, une forme d'antiréalisme. De plus, le caractère fondamental que l'on prête à ces théories s'inscrit parfaitement dans un idéal réductionniste. Or, je montrerai que dans le cas de Fock il est possible d'approcher de façon consistante la physique moderne en prenant une position épistémologique qui est à la fois réaliste et antiréductionniste et que celle-ci ouvre de nouvelles perspectives vis-à-vis des théories de la relativité et de la mécanique quantique.

Dans ce cadre ce sont donc quatre points principaux que j'ambitionne de revaloriser :

- Tout d'abord, je souhaite explorer la nature des différentes passerelles entre l'interprétation de la mécanique quantique et de la relativité générale qui peuvent se manifester chez Fock, afin de montrer qu'il existe chez le physicien soviétique une véritable cohérence qui puisse dépasser le simple constat d'une adhésion au matérialisme dialectique. Il apparaît sensé de rechercher cette cohérence en tentant d'extraire les racines épistémologiques de la pensée de Fock. Dans ce but, il sera essentiel de recentrer le débat sur la pratique scientifique du physicien ainsi que de considérer les diverses problématiques qui y sont associées. Comme le suggèrent nos commentaires précédents, c'est de réalisme et d'antiréductionnisme dont il sera alors principalement question.
- Sur cette base, ma seconde ambition est de reconsidérer le rapport de Fock au matérialisme dialectique afin de pouvoir évaluer plus concrètement ce qui l'a séduit dans cette philosophie et ce qui a véritablement pu influencer sa pensée, dépassant ainsi l'idée d'une simple imposition dogmatique subie passivement par le physicien.
- Par conséquent, au cours de cette recherche, il sera intéressant de se pencher à nouveau sur la stratégie employée par Fock dans la protection des théories modernes de la physique en URSS. En effet, un regard nouveau sur la pensée du physicien soviétique doit aussi permettre de reconsidérer l'impact du totalitarisme soviétique sur celle-ci.
- Plus globalement, j'ambitionne de mieux saisir les mécanismes de la diffusion des idées de Fock, aussi bien localement que d'un point de vue international. L'objet de cette enquête est de reconsidérer le rôle joué par le physicien dans l'histoire de sa discipline, au-delà de sa simple contribution aux développements théoriques de la mécanique quantique et de la relativité générale.

Thèse et structure de l'argumentation

En définitive, dans ce travail, je souhaite défendre l'idée qu'à l'image de ce qu'a été la carrière de Fock, un discours sur le contenu de son interprétation des théories modernes de la physique peut tout à fait s'affranchir de considérations concernant le dogmatisme de l'idéologie soviétique, alors qu'en revanche, une étude de l'évolution du physicien dans son environnement et de l'impact de son travail sur la communauté scientifique ne peut y échapper. En effet, le matérialisme dialectique, bien qu'ayant une réelle influence sur la pensée de Fock, n'est pas un postulat nécessaire à la compréhension de cette dernière, car il peut être explicité chez le physicien sous la forme de principes épistémologiques qui sont par ailleurs discutés de façon généralisée au sein de la communauté scientifique. Par conséquent, il n'apparaît jamais comme une philosophie inspirée à Fock par un régime autoritaire qui commande une modification brutale et dogmatique de sa pensée. Cependant, il reste évident que les contraintes imposées par ce même régime conditionnent la façon dont Fock l'exprime et la diffuse. Ainsi, les huit chapitres de mes travaux s'articulent en deux grandes parties qui dessinent les contours de cette opposition. Les quatre premiers se penchent sur le physicien Fock, sur ses travaux, sur sa pratique scientifique, sur les principes épistémologiques qui guident sa pensée, et sur le contenu de ses interprétations des théories modernes de la physique. L'accent est mis sur la science pour elle-même. Les trois derniers chapitres sont en revanche du domaine du contexte, de l'évolution du scientifique dans son environnement et de la diffusion de ses idées. Le cinquième chapitre, dédié au matérialisme dialectique fait charnière entre ses deux grandes parties, c'est-à-dire entre ce qui est du domaine de la pensée pure et ce qui relève du contexte.

De façon plus spécifique la répartition des chapitres est la suivante :

- Le premier chapitre est consacré à une poursuite du préambule de cette introduction, afin de décrire le processus qui fait de Fock un physicien théoricien de premier plan mondial mais aussi de souligner quelques spécificités de sa pratique scientifique. Notons ici qu'étant donné que mes développements n'ont pas pour objet de faire un compte-rendu complet de la production scientifique de Fock, j'ai dû me limiter à un certain nombre de ses travaux, et comme vous l'aurez compris aux domaines de la théorie quantique et de la relativité. Mes choix sont alors guidés d'une part par l'importance et l'écho dans la communauté des contributions de Fock, et d'autre part

par la cohérence générale de mes propos¹. Soulignons aussi que pour des raisons de structure et de temporalité ce chapitre premier parle quasi-exclusivement de théorie quantique alors que celle de la relativité fait son apparition au chapitre quatre.

- Les chapitres deux et trois sont consacrés à la mise en évidence des principes épistémologiques qui guident la pensée et le travail scientifique de Fock. Il est question dans un premier temps de réductionnisme en physique et dans un second temps de réalisme scientifique. Dans chaque cas je prends soin de montrer en quoi la communauté est particulièrement concernée par ces problématiques. Plus précisément je me pencherai sur les années 1930, période à laquelle Fock manifeste une véritable prise de recul vis-à-vis de sa discipline.
- Le chapitre quatre est dédié à une exposition de l'interprétation par Fock de la théorie de la mécanique quantique puis de la relativité générale, explicitées au prisme des développements précédents sur son épistémologie. Il prend le soin de démontrer la cohérence de l'approche générale de la physique par le physicien soviétique.
- Le chapitre cinq est celui qui traite du matérialisme dialectique, et qui réévalue son rôle dans la pensée de Fock. Il montre ce qui est de l'ordre de l'influence directe sur le physicien, mais discute aussi des facteurs qui prédéterminent l'adhésion de ce dernier à cette philosophie. Il joue aussi un rôle charnière avec les questions contextuelles en discutant de sa place dans la société soviétique.
- Le chapitre six traite de Fock dans le contexte politique de l'Union soviétique et de son combat pour la défense des théories modernes de la physique contre la critique ignorante de certains philosophes marxistes. Il témoigne de l'engagement tout particulier du physicien lorsqu'il est question de débattre des questions d'interprétation des théories.
- Le chapitre sept questionne les modalités du discours scientifique de Fock afin de réévaluer la véritable influence du contexte sur ses travaux. Il montre que le physicien

¹ Il apparaît alors au fil des développements à suivre que le présent travail omet en définitive de mentionner deux contributions de Fock à la mécanique quantique qui ne sont pas négligeable dans l'histoire de la discipline. La première concerne ses travaux sur la théorie du positron [Fock 1933b], et la seconde sur la symétrie de l'atome d'hydrogène [Fock 1935b]. Pour la seconde, ce n'est pas rendre hommage à Fock, et nous souhaitons faire amende honorable, étant donné que le Soviétique semblait considérer lui-même ce travail comme son plus bel accomplissement (entretien non enregistré de Mr. Fock, petit-fils de V. A. Fock, avec le présent auteur).

est particulièrement attentif à la formulation de sa pensée, souhaitant constamment conserver intact son volet scientifique, mais modulant si nécessaire la forme de son expression concrète.

- Enfin, le chapitre huit s'intéresse à la question de la diffusion et de la réception de la pensée de Fock, notamment à l'étranger. À partir des années 1950, le physicien est plongé dans un contexte international qui conditionne grandement ses succès institutionnels et scientifiques au sein de la communauté. L'accent est mis dans ce chapitre sur la capacité de Fock à faire entendre sa voix.

Enfin, en guise de préambule à la conclusion générale je souhaite simplement souligner ici que si la dualité du sujet mise en évidence par la structure de mon argumentation peut laisser penser qu'à partir du cas de Fock il est possible de reconsidérer de façon plus globale les problématiques de la science soviétique, on observera en réalité qu'il s'avère être un objet d'étude trop spécifique pour être véritablement représentatif.



Figure 3. Vladimir Fock en 1957 à Copenhague [Niels Bohr Archive, Copenhague].

Chapitre premier – Devenir un physicien théoricien

Those in my generation came just at the right time to be meeting these revolutionary discoveries during our most productive years, the 20s. Physicists mature early and even one as young as I could be in on the most exciting developments¹.

Ces mots sont du physicien américain John Clarke Slater, né en 1900, qui devient au début du XX^e siècle l'une des principales références de la physique théorique de son pays. Ici, il a bien évidemment à l'esprit les théories de la relativité et de la mécanique quantique qui révolutionnent au début du siècle le paysage de la physique mondiale. Dans son étude sur la physique théorique aux États-Unis entre 1920 et 1950, Silvan S. Schweber associe en particulier la révolution quantique aux changements institutionnels qui accompagnent de façon généralisée la forte croissance de la discipline :

Both the old and the new quantum theories required for their application a knowledge of mathematical techniques and a possession of analytical skills not usually found among experimentalists. Professional theorists multiplied because they were useful to experimentalists [...] The number of theoretical physicists increased as a consequence of the variety of physical phenomena under fruitful study and of the difficulty of the physics itself [Schw 1986, p. 57].

Né en 1898, Fock est de la même génération que Slater, et il connaît une destinée similaire. Même si l'étudiant qu'il était ne se prédestinait pas à cette discipline, le contexte, la dynamique évoquée par Slater et bien évidemment son talent naturel le propulsent aux sommets de la physique théorique soviétique. À l'image d'un Lev Landau (1908-1968), d'un Yakov Frenkel (1894-1952) ou d'un Igor Tamm (1895-1971), qui suivent en réalité tous des trajectoires similaires, Fock devient une référence en URSS, mais aussi une figure internationale de son domaine.

¹ John Clarke Slater, dans le « Prologue » de son autobiographie non publiée : « A physicist of the lucky generation ». Cité par Schweber [Schw 1990, p. 340].

Ainsi, au travers de ses contributions à la physique quantique, le présent chapitre souhaite mettre en avant chez Fock le processus de construction de l'étudiant talentueux vers le physicien théoricien reconnu internationalement. Il poursuit alors plusieurs objectifs. Dans un premier temps, il complète les bases biographiques apportées en introduction, et nous aide à mieux saisir la place de Fock dans l'histoire de sa discipline. Dans un second temps, il se penche aussi sur le style de Fock en tant que physicien, afin d'ouvrir la voie aux chapitres suivants. Ces derniers, qui traiteront plus spécifiquement des questions d'interprétation des théories, feront en effet appel à différentes caractéristiques ici mises en avant. Par conséquent, il est vrai que le présent chapitre prend une place à part dans la globalité de notre travail en s'apparentant davantage à une large extension de l'introduction à notre future argumentation. Il est cependant nécessaire car le rôle joué par Fock dans la communauté scientifique sous-tend non seulement le développement de sa pensée épistémologique, mais aussi l'écho que celle-ci peut avoir.

La première section de ce chapitre concerne l'éclosion de Fock comme physicien théoricien de premier plan. En effet, nous évoquerons sa dynamique à la fin de son parcours universitaire, afin d'observer comment il bénéficie de la possibilité de parfaire sa formation en Europe de l'Ouest au contact des fondateurs de la mécanique quantique. La seconde section entend montrer comment, à son retour en URSS, Fock assoit sa stature de physicien de premier plan par des productions scientifiques de qualité, mais aussi des collaborations de renom, qui lui assurent une véritable reconnaissance académique locale. Nous soulignerons en revanche que son influence internationale est assujettie au contexte national soviétique en raison de la progressive rupture des contacts avec ses collègues étrangers au cours des années 1930. Enfin, dans un dernier temps, nous développerons de façon plus approfondie l'une des contributions de Fock à la physique quantique afin de caractériser plus spécifiquement sa pratique scientifique. Notre choix s'est tourné vers la méthode de Hartree-Fock, notamment car la diversité des acteurs qu'elle implique nous permet de mettre en relief les spécificités de l'approche de physicien de Leningrad. Mais il s'avère aussi qu'en abordant au début du deuxième chapitre certaines questions soulevées par cette méthode, une transition toute faite nous est donnée pour la suite de nos développements.

Sources :

Ce chapitre est celui qui se rapproche le plus d'une biographie, au sens étymologique du terme : « écrire la vie ». Il convient alors de souligner la publication récente, en 2012, d'une biographie russe de Fock écrite par Larisa F. Vladimirova : *Akademik V. A. Fock: Teoreticheskaya fizika v chistom vide* (L'Académicien V. A. Fock : la physique théorique dans sa forme la plus pure) [Vlad 2012]. Cette biographie suit une piste différente de celle de nos investigations, et les deux travaux s'avèrent en réalité très complémentaires. Si Vladimirova ne questionne que très peu les questions d'interprétation, elle est en revanche exhaustive sur la jeunesse du physicien et la période de ses principales contributions à la physique quantique. C'est pourquoi elle est une source importante pour le présent chapitre. Un autre document à caractère biographique est un petit volume édité en 1956 par l'Académie des sciences de l'URSS et préparé par V. I. Smirnov et T. O. Vreden-Kovetskoj : *Vladimir Aleksandrovich Fock* [SmVr 1956]. Celui-ci resense de façon plus systématique les contributions scientifiques de Fock.

Ces dernières constituant la grande majorité des développements de ce chapitre, nos principales sources restent bien entendu les publications dans les revues scientifiques des articles ici discutés, mais aussi de façon assez variée toutes sources secondaires dont elles sont l'objet. Soulignons alors le rôle particulier joué par le volume 6 de *The Historical Development of Quantum Theory* de Jagdish Mehra et Helmut Rechenberg, « The Completion of Quantum Mechanics. 1926-1941 » [MeRe 2000a ; 2000b]. Cette œuvre encyclopédique sur l'histoire de la physique quantique donne une très complète vue d'ensemble dans laquelle s'insèrent nos développements. Pour ce qui est des articles scientifiques de Fock il est important de mentionner la publication en 2004 de ses *Selected Works* qui regroupent une version anglaise de ses travaux majeurs en théorie quantique [Fock 2004]. Si par souci historique nous ferons systématiquement référence à la version originale des articles de Fock, le lecteur trouvera en bibliographie une mention explicite lorsque l'article a été traduit dans les *Selected Works*.

Autres sources primaires, les archives jouent ici un rôle secondaire, avant tout car il n'est pas dans notre but d'entrer dans les détails. Notons toutefois que la correspondance scientifique joue un rôle utile de contextualisation des travaux de Fock – notamment dans le cas de collaborations internationales –, et que le rapport du physicien sur son séjour en Europe

de l'Ouest à la fin des années 1920 – présent dans son fond d'archives à Saint-Pétersbourg –, est pour nous riche d'enseignements.

1. Parfaire sa formation à l'étranger

Suite à la révolution d'Octobre 1917, la Russie connaît des temps troublés qui ne laissent dans un premier temps qu'une marge de manœuvre très limitée aux sciences, et ce malgré le soutien des bolcheviks. Comme évoqué en introduction générale, le monde de la physique doit suivre un difficile processus de reconstruction, ne pouvant se reposer que sur de rares figures possédant les ressources nécessaires et une certaine reconnaissance internationale. C'est le cas de Ioffé et Rozhdestvenskiy que Fock a le privilège de côtoyer. Alors, dans la seconde moitié des années 1920, certains facteurs, associés à son talent naturel, vont lui permettre de bénéficier d'une nouvelle dynamique qui se révélera être exceptionnelle pour la physique théorique soviétique. En particulier, dans de nombreux cas, la possibilité donnée à de jeunes physiciens de se rendre à l'étranger à la fin des années 1920 pour compléter leur formation est vue comme l'un des actes fondateurs des succès à venir de la physique théorique en URSS au début des années 1930 et au cours des décennies à venir¹. Landau est le personnage qui incarne le mieux cette dynamique en raison de ses contacts étroits avec Bohr, qu'il considère comme son unique professeur, mais aussi du fait de l'établissement de sa très renommée « école » de physique théorique². Fock, de son côté, n'échappe pas à cette règle, et cette section a pour objectif de retracer son parcours européen.

¹ Voir, parmi d'autres, El'iashevich [El'y 1977, p. 666], Kojevnikov [Koj 1993, p. 95], Hall [Hall 2008, p. 233] ou encore Josephson sur Frenkel [Jose 1991, p. 116 ; 1988, pp. 58-59] et Dorozynski sur Landau [Doro 1966, p. 21].

² Au cours de son séjour européen d'octobre 1929 à mars 1931, Landau côtoie Born à Göttingen, Heisenberg à Leipzig, Bohr à Copenhague, Pauli et Peierls à Zurich ainsi que Dirac et Rutherford à Cambridge. De retour en URSS, il s'installe en 1932 à Kharkov et y dirige le département théorique de l'Institut physico-théorique d'Ukraine. Là, il s'investit largement dans la formation des physiciens théoriciens et organise une école informelle qui se base notamment sur l'assimilation d'un « minimum théorique » et devient rapidement reconnue internationalement. De grands noms de la physique théorique soviétique, tel Lifshitz, Khalatnikov ou encore Abrikosov, en sont issus. Sur la trajectoire suivie par Landau dans la fondation de son école et notamment le rôle joué par son séjour à l'étranger, on peut consulter Dorozynski [Doro 1966], Hall [Hall 2008] ou Martinez [Mart 2011].

1.1. L'équation de Klein-Gordon comme détonateur

En 1925-1926, avec la publication de plusieurs articles fondamentaux, notamment par Werner Heisenberg [Heis 1925] et Erwin Schrödinger [Schr 1926a ; 1926b ; 1926c ; 1926d], s'ouvre une riche période de développements de la mécanique quantique. En URSS, en particulier à Léninegrad, l'enthousiaste jeune génération de physiciens théoriciens qui s'établit alors, incarnée par Fock, Landau, Frenkel ou encore Gamow, concentre rapidement toute son attention sur le sujet. Elle s'appuie notamment sur un séminaire de mécanique quantique, organisé par Viktor Robertovich Bursian, où sont discutées les récentes publications des *Zeitschrift für Physik*, des *Proceedings of the Royal Society* et d'autres journaux, qu'elle consulte aussi avec intérêt dans les bibliothèques de Léninegrad¹.

Au cœur de cette dynamique Fock se fait rapidement remarquer par des publications de qualité. Son premier article concernant la mécanique quantique propose non seulement une généralisation au cas d'un champ magnétique de l'équation de Schrödinger mais se double aussi d'une approche relativiste [Fock 1926a]². Aujourd'hui connue sous le nom d'équation de Klein-Gordon, l'équation qui découle de cette approche caractérise une particule relativiste de spin nul. Elle est en réalité découverte de façon indépendante par plusieurs physiciens : Fock bien entendu, Schrödinger lui-même mais qui n'en fait pas publication immédiatement, Oskar Klein, Walter Gordon ou encore Wolfgang Pauli, Théophile de Donder, Frans-H. van den Dugen et Louis de Broglie³. La première publication véritable de l'équation est le fait de Klein, dans le volume 37 des *Zeitschrift für Physik* [Klein 1926]. Fock publie son article dans le volume 38 de la même revue, mais le soumet avant de prendre connaissance de celui de Klein⁴.

¹ Sur le séminaire de Bursian et les premiers temps de la réception de la mécanique quantique en URSS voir Josephson [Jose 1991, pp. 219-225]. Sur le second point on peut aussi consulter Kojevnikov [Koje 2004, pp. 77-78], qui souligne notamment le caractère particulier de la communauté des théoriciens soviétiques, similaire à celle des Etats-Unis : « young, emergent, and particularly receptive to the new trends coming from abroad » [p. 77].

² Dans ce cas Fock se montre particulièrement réactif si l'on considère qu'il soumet son article une semaine seulement après avoir pris connaissance des travaux de Schrödinger [Novo 1999a, 1150].

³ Pour un aperçu complet de l'ensemble des travaux à l'origine de l'équation de Klein-Gordon voir l'article de Kragh, « Equation with the many fathers. The Klein-Gordon equation in 1926 » [Krag 1984].

⁴ C'est même en « Anmerkung bei der Korrektur » (Note ajoutée en correction) de son second article en mécanique quantique que Fock mentionne n'avoir pu consulter avant soumission de ses travaux l'article de Klein [Fock 1926b, p. 226].

L'article de Gordon qui concerne pour sa part une particule libre paraît dans le volume 40 [Gord 1926]. En dépit de cette chronologie, la dénomination usuelle de l'équation ne retient que les noms de Klein et Gordon, bien qu'une appellation « équation de Klein-Fock-Gordon » soit parfois usitée.

Le second article publié par Fock en 1926 sur la mécanique quantique est une poursuite des travaux précités. Fock discute son équation relativiste dans le cas d'une particule dans un champ électromagnétique et introduit une généralisation de l'équation de Schrödinger dans le cadre de la relativité générale, soit pour un espace courbe [Fock 1926b]. Il s'illustre alors en faisant appel dans son raisonnement à une approche à cinq dimensions de l'unification de la gravitation et de l'électromagnétisme. Il identifie ainsi les équations du mouvement d'une particule chargée aux équations d'une géodésique dans un espace-temps à cinq dimensions possédant une métrique de Riemann d'un type particulier. C'est alors en s'appuyant sur l'invariance des équations sous des transformations particulières qu'il dérive une équation d'onde pour une particule de spin nul, qui ramenée à un espace à quatre dimensions s'identifie à celle de Klein-Gordon. Ces transformations particulières, qui permettent une représentation des équations de Schrödinger et de la mécanique sous une forme invariante en théorie quantique, sont introduites pour la première fois par Fock à cette occasion et seront appelées *transformations de gradient* par le physicien russe en 1929 [Fock 1929c]. Elles correspondent à ce que l'on appelle aujourd'hui l'invariance de jauge de l'électrodynamique quantique¹.

L'idée de travailler en cinq dimensions est en réalité suggérée à Fock par Frederiks qui attire son attention sur un manuscrit de Mandel, ce dernier travaillant sur la synthèse de la relativité et de l'électromagnétisme [Mand 1926]². Cette volonté d'unification n'est pas nouvelle, et Klein lui-même travaille en cinq dimensions lorsqu'il établit l'équation de Klein-

¹ Pour un large aperçu historique de la notion d'invariance de jauge voir Jackson et Okun [JaOk 2001] qui développent tout particulièrement la contribution de Fock. On peut aussi consulter Okun [Okun 2010] pour un bref aperçu de la question centré sur le rôle de Fock. Dans ses deux références on trouve une discussion de l'origine du terme « invariance de jauge ».

² Fock mentionne en introduction de son article le rôle joué par Frederiks et Mandel [Fock 1926b, p. 226]. Pour plus d'informations sur le rôle de Frederiks, et sur la question des théories unifiées en URSS, voir Vizgin et Frenkel [ViFr 2002, pp. 162-163]. On peut aussi consulter Goenner [Goen 2004, pp. 65-66].

Gordon¹. Avant lui, en 1921, c'est aussi le cas du mathématicien allemand Theodor Kaluza en vue d'une théorie unifiée des phénomènes gravitationnels et électromagnétiques², un idéal poursuivi par son compatriote Hermann Weyl dès 1918 [Weyl 1918]. Notons que c'est ce même Weyl qui en 1928 popularise l'invariance de jauge en l'établissant comme un principe fondamental de la physique moderne dans son ouvrage *Gruppentheorie und Quantenmechanik* (Théorie des groupes et mécanique quantique) [Weyl 1928]³.

Fock fait preuve d'une grande intuition physique en saisissant rapidement que la formulation en cinq dimensions est adéquate pour le problème physique de la généralisation relativiste de l'équation de Schrödinger, mais aussi toute l'importance des transformations de gradient⁴. En raison de leur qualité, ses travaux de l'année 1926 vont donner au physicien soviétique un coup de pouce inestimable à sa carrière : ils ont suffisamment d'écho pour qu'il se fasse remarquer à l'étranger⁵, et que s'ouvrent à lui les portes de l'Europe de l'Ouest sous la forme d'une bourse de la Fondation Rockefeller.

1.2. Les bourses de la Fondation Rockefeller : une inestimable opportunité

Le rôle joué par la Fondation Rockefeller dans le développement de la science soviétique, et en particulier dans la reprise de ses contacts avec l'étranger suite à la Révolution, a déjà été évaluée par divers auteurs [Rose 1989 ; Koje 1993], notamment pour le cas particulier de la physique théorique [FrJo 1990 ; Koje 2004 ; Vlad 2012, pp. 72-75]⁶. Fondée en 1913 pour remplir des missions sociales et répondant à des problèmes de santé publique, cette Fondation cherche aussi à promouvoir l'avancement des sciences, en favorisant par exemple la mobilité des jeunes chercheurs⁷. Au sein d'un programme d'aide à la science européenne

¹ La motivation première du travail de Klein est d'ailleurs d'élaborer une théorie stable à cinq dimensions, et l'équation d'onde relativiste n'a pour lui qu'une importance mineure. Sur les travaux de Klein, mais aussi sur les différentes tentatives d'aborder une généralisation de la mécanique quantique en cinq dimensions voir Kragh [Krag 1984].

² Notons que ni Mandel, ni Klein, n'avaient connaissance des travaux de Kaluza. *Ibid* [p. 1027].

³ Sur ce point voir Jackson et Okun [JaOk 2001] et Okun [Okun 2010].

⁴ Voir [Novo 1999a, p. 1151].

⁵ *Ibid* mais aussi [Fock 2004, p. viii].

⁶ Sur la question plus vaste des relations entretenues par les physiciens soviétiques avec leurs homologues étrangers dans les années 1920 et 1930 on peut consulter Josephson [Jose 1988 ; 1991, pp. 105-119].

⁷ En 1928 cela devient même son but principal. Pour plus d'informations sur le sujet on peut notamment consulter Kohler [Kohl 1978].

sont alors distribuées à de jeunes scientifiques des bourses postdoctorales pour visiter des institutions internationales. Des citoyens soviétiques en bénéficient dès 1924.

Fock fait partie des récipiendaires d'une bourse de ce programme, et en août 1927 il se rend auprès de Max Born à Göttingen pour un séjour d'un an. Viktor Yakovlevich Frenkel¹ et Paul Josephson [FrJo 1990, pp. 945-947], mais aussi Alexei Kojevnikov [Koje 2004, pp. 83-84], nous permettent sur la base des archives de la Fondation Rockefeller de détailler le processus de sélection qui conduit Fock à Göttingen. Les différents candidats à une bourse ne postulent pas directement, la Fondation préférant se reposer sur l'opinion de divers scientifiques avec lesquels elle a établi des liens en Europe de l'ouest et en Amérique. Paul Ehrenfest, alors à Leyde, est celui qui joue l'intermédiaire pour la plupart des scientifiques soviétiques. Fort de son expérience russe entre 1907 et 1912 et de ses connexions avec Ioffé et Rozhdestvenskiy, il manifeste une réelle volonté d'établir des liens scientifiques avec l'URSS². Lorsque la Fondation Rockefeller lui en donne l'opportunité il nomme ainsi de jeunes scientifiques soviétiques pour des bourses postdoctorales : Yuri Krutkov et Yakov Frenkel en 1925 mais aussi Igor Tamm et Vladimir Fock en 1926.

Néanmoins, de ces deux derniers, seul Fock obtient une bourse³. Malgré le soutien indéfectible d'Ehrenfest aux deux candidatures⁴, il semble que la décision de la Fondation soit tributaire d'une demande faite à Max Born de classer les deux candidats. Sur la base de leurs publications, le choix de Born se tourne en effet vers Fock, comme confirmé par August Towbridge – directeur de la division scientifique de la Fondation Rockefeller en Europe – dans une lettre à Ehrenfest : « He [Fock] has published nine articles in various journals, and Professor Born, who has examined these publications, confirms that he would be very happy to see him in his laboratory and that, in his opinion, Fok's [sic] papers demonstrate his

¹ Cet historien des sciences qui a largement contribué à l'histoire de la physique soviétique n'est autre que le fils de Yakov Il'ich Frenkel.

² Sur les liens entretenus par Ehrenfest avec la Russie voir la correspondance entre Ehrenfest et Ioffé [Ehlo 1973].

³ Tamm aura tout de même la possibilité de séjourner en Europe à l'aide d'une bourse de la Fondation Lorentz, arrangée ici encore par Ehrenfest [Koje 2004, p. 84].

⁴ Voir la lettre de Ehrenfest à August Trowbridge, directeur de la division scientifique de la Fondation Rockefeller en Europe, du 10 octobre 1926, mentionnée par Frenkel et Josephson [FrJo 1990, p. 946].

outstanding abilities »¹. Ainsi, nul ne doute que les deux récentes publications de Fock en mécanique quantique et sa dérivation de l'équation de Klein-Gordon jouent ici un rôle essentiel, non seulement dans sa nomination par Ehrenfest, mais plus encore dans le choix fait par Born.

Cette bourse obtenue par Fock doit alors être considérée comme un privilège. Kojevnikov [Koje 1993 ; 2004] met en avant le caractère particulier de la coopération entre la Fondation Rockefeller et l'Union soviétique, la première n'ayant que très peu d'affinité pour le régime communiste et la seconde refusant en principe toute philanthropie. Bien que compte-tenu de la situation difficile de l'URSS après la guerre civile des contacts soient établis et des bourses accordées à des soviétiques dès 1924, la fondation Rockefeller décline la plupart des requêtes venues d'URSS. De plus, l'Union soviétique devient de moins en moins prompte à envoyer ses scientifiques à l'étranger avec la victoire des Nazis en Allemagne, et de fait, la coopération sur le programme de bourses postdoctorales se termine en 1932. En dernière analyse ce ne sont qu'une cinquantaine de financements qui sont attribués², et l'investissement de la Fondation Rockefeller reste marginal en URSS en comparaison de son action dans d'autres États, ou plus simplement du budget accordé à la science par le gouvernement soviétique.

Malgré tout, comme mentionné en introduction de cette section, l'impact de la Fondation est inestimable pour la physique théorique. En effet, des facteurs exceptionnels se combinent, notamment d'un point de vue historique. Avec l'explosion de la mécanique quantique en Europe de l'ouest, l'opportunité donnée aux jeunes théoriciens soviétiques bénéficiant d'une bourse de la Fondation Rockefeller à la fin des années 1920 est en réalité celle d'être inclus dans une dynamique internationale d'une ampleur sans commune pareille. Grâce à leurs succès, ils sont alors les artisans de la reconnaissance à une échelle internationale de la qualité de la pratique de la physique fondamentale en URSS³. Fock en est un exemple illustre.

¹ Lettre de Trowbridge à Ehrenfest, mentionnée *sine dato* par Frenkel et Josephson [FrJo 1990, p. 946].

² Ce chiffre, avancé par Kojevnikov [Koje 1993 ; 2004] concerne majoritairement quatre disciplines : mathématique, physique, biologie et médecine.

³ Parmi les récipiendaires d'une bourse Rockefeller se trouvent en effet de grands noms de la physique théorique soviétique parmi lesquels Krutkov, Frenkel, Landau, Gamow et bien entendu Fock. Tamm, qui reçoit une bourse de la Fondation Lorentz suit pour sa part une trajectoire tout à fait similaire.

1.3. Göttingen et principe adiabatique¹

Nous avons la chance de connaître le séjour de Fock au travers d'un rapport préparé en janvier 1929 à destination des responsables de la Fondation Rockefeller². L'un des premiers enseignements à en tirer est l'environnement favorable dans lequel évolue le physicien de Leningrad, notamment en comparaison de l'isolement relatif que doivent subir ses collègues en URSS à cette époque. Fock souligne très nettement ce point : « The life in Göttingen allowed me to devote my whole time exclusively to scientific work – which would be impossible in Russia, where I have much other work besides purely scientific ». Il ajoute : « At different occasions (at Physical congresses etc.) I made acquaintance with physicists working on related subjects (theory of quanta) and have had some interesting discussions with them »³.

Fock fait ainsi la rencontre de plusieurs physiciens de premier plan : Ehrenfest qui visite Göttingen en mars 1928, Langevin et de Broglie lors d'un séjour d'un mois à Paris en mai, ou encore Schrödinger et Dirac durant un Congrès en juin à Leipzig. Mais Born est la figure majeure que Fock va réellement côtoyer, une personnalité dont il avait fait la demande explicite auprès de la Fondation Rockefeller de travailler⁴. Ce choix n'est en réalité pas anodin, et marque une tendance forte dans le monde de la physique quantique. Born est une véritable figure d'autorité pour la discipline, à laquelle il a largement contribué par ses travaux en mécanique matricielle⁵. Cette position est renforcée par le développement dans le courant de

¹ Notre présentation n'entre pas dans les détails du quotidien de Fock à Göttingen. Le lecteur intéressé peut alors se tourner vers le très complet compte-rendu fait par Vladimirova dans sa biographie de Fock [Vlad 2012, pp. 75-91]

² « Report on the fellowship of V. Fock for 1927-1928 » - ARAN SPb, 1034-2-6.

³ *Ibid.*

⁴ Voir la lettre de Trowbridge à Ehrenfest, mentionnée *sine dato* par Frenkel et Josephson [FrJo 1990, p. 947]. Trowbridge mentionne aussi dans cette lettre que Fock est désireux de travailler dans « le même domaine que le Professeur Born ». On peut mentionner pour l'anecdote que c'est Krutkov qui conseille à Fock de répondre « mécanique quantique et micromécanique de Schrödinger » à la question de ses intérêts scientifiques dans le formulaire de requête de la Fondation Rockefeller. Voir Vladimirova sur l'aide apportée par Krutkov à Fock [Vlad 2012, p. 74].

⁵ Pour plus d'informations sur la carrière scientifique de Max Born on peut consulter ce qui doit être son unique biographie, *The End of the Certain World: The Life and Science of Max Born*, de Greenspan [Gree 2005].

l'année 1926 de son interprétation probabiliste de l'équation d'onde de Schrödinger¹, qui face à l'interprétation continue quasi-classique faite par Schrödinger, est largement acceptée par la plupart des physiciens quantiques². Le phénomène contribue largement à ce que la jeune génération de physiciens théoriciens considère l'Institut de Physique théorique qu'il dirige à Göttingen comme un lieu idéal où apprendre la mécanique quantique, au même titre que Copenhague (Bohr) et Munich (Sommerfeld). De grands noms en devenir se rendent alors à Göttingen, comme J. Robert Oppenheimer et Paul Dirac



Figure 4. Max Born (1882-1970) [Domaine public].

dès 1926, mais aussi Walter Heitler, Léon Rosenfeld, Edward Teller ou encore Viktor Weisskopf. Outre Vladimir Fock, d'autres Russes, tels Igor Tamm et Yuri Rumer³.

Dès 1926, la question de l'invariance adiabatique est utilisée par Born afin de donner du poids à son interprétation de la mécanique quantique⁴. En effet, Born estime : « A theorem analogous to Ehrenfest's adiabatic principle can be formulated and proved on the basis of the statistical interpretation of quantum mechanics, developed recently in connection with

¹ Born développe ses idées sur l'interprétation probabiliste de la mécanique quantique dans le courant de l'année 1926. Elles sont notamment formulées en réaction au rejet par Schrödinger de la formulation matricielle de la mécanique quantique, à laquelle l'Autrichien oppose une conception continue de la théorie. Sur le développement des idées de Born voir Mehra et Rechenberg [MeRe 2000a, pp. 36-55] mais aussi Jammer [Jamm 1974, pp. 38-44].

² Voir Mehra et Rechenberg [MeRe 2000a, p. 53]. C'est moins le cas pour les physiciens de la génération la plus âgée. En effet, parmi eux, des personnages aussi illustres que Albert Einstein, Max Planck ou Max von Laue se montrent sceptiques, et c'est notamment l'abandon de la causalité dans son sens classique qu'ils remettent en cause.

³ *Ibid* [pp. 52-55], sur l'intérêt suscité par l'institut dirigé par Born.

⁴ Cette motivation est mise en avant par Born en personne lors de son discours de réception du prix Nobel en 1954 [Born 1954].

collision phenomena » [Born 1927, p. 167]¹. C'est que le physicien allemand considère que la meilleure méthode pour confirmer son interprétation est l'étude de l'action d'une force externe avec une dépendance en temps donnée sur un système atomique [Born 1978 ,p. 233], et qu'un tel processus possède comme caractéristique l'hypothèse adiabatique. Initialement formulée par Paul Ehrenfest au début des années 1910², elle statue dans la « vieille théorie quantique de Bohr » que des variations lentes et continues – adiabatiques – d'un système atomique le conservent dans un état stationnaire, et qu'elles répondent aux lois de la mécanique classique³.

Cependant l'approche initiale de Born en 1926 ne parvient pas à prendre en compte des systèmes avec des états d'énergie dégénérés. Il est alors probable que la venue de Fock à Göttingen le motive à reprendre le problème. Au-delà de la qualité des deux premières contributions de Fock à la mécanique quantique [Fock 1926a ; 1926b], il n'a pas pu échapper à Born lors de son examen des articles du jeune physicien russe en amont de l'attribution de sa bourse postdoctorale, que celui-ci avait déjà travaillé sur l'hypothèse adiabatique dans le cadre de la « vieille théorie quantique » : tout d'abord avec Krutkov dans le cas du pendule de Rayleigh [KuFo 1923], mais aussi pour un système dégénéré conditionnellement périodique [Fock 1923]. Ce point est de plus renforcé par la présence en 1926 de Krutkov à Göttingen⁴ qui évoque très certainement le sujet avec Born et vante les mérites de Fock.

Born et Fock parviennent en 1928 à généraliser les travaux du premier sur le principe adiabatique en mécanique quantique [BoFo 1928]. Leur article contribue à redéfinir l'hypothèse de Ehrenfest comme un théorème, compris en mécanique quantique comme la possibilité de maintenir un système physique dans son état propre instantané si une

¹ Reçu par les *Zeitschrift für Physik* le 16 octobre 1926, le premier article de Born sur le principe adiabatique est publié dans le volume de mars 1927. La traduction anglaise est ici celle de Mehra et Rechenberg [MeRe 2000a, p. 51].

² Sur la genèse du principe adiabatique par Paul Ehrenfest entre 1911 et 1914 voir Navarro et Pérez [NaPe 2006].

³ Sur la reformulation des idées de Ehrenfest par Bohr dans le cadre de sa « vieille théorie quantique » voir Pérez [Pere 2009]. C'est sur cette formulation de l'hypothèse adiabatique que s'appuie Born dans ses recherches [Born 1978 ,p. 233].

⁴ Voir Frenkel et Josephson sur le séjour allemand de Krutkov en 1925-1926 [FrJo 1990 ,pp. 944-945] mais aussi Frenkel [Fren 1971, pp. 819-820]. Il faut de plus noter que Krutkov, proche de Ehrenfest, était impliqué dès 1918 dans des travaux sur les invariants adiabatiques. Sur ce sujet voir Pérez [Pere 2009, pp. 100-102].

perturbation donnée agit sur lui suffisamment lentement, et s'il y a un intervalle significatif entre la valeur propre associée à l'état et le reste du spectre de l'hamiltonien. Initialement confirmé pour un système possédant un spectre ponctuel, c.-à-d. des états d'énergie discrets, ils postulent de plus le théorème adiabatique pour des systèmes avec un spectre continu.

1.4. Compléter sa formation en mécanique quantique

Au-delà de l'article sur le principe adiabatique écrit en collaboration avec Born, le rapport de Fock à la fondation Rockefeller fait mention de cinq différents travaux développés durant cette période ¹, dont quatre font l'objet d'une publication. Procédons à leur brève énumération. Fock envoie tout d'abord le 12 janvier 1928 à *Zeitschrift für Physik* une note concernant l'application de la théorie de Schrödinger à la question de la quantification d'un oscillateur harmonique dans un champ magnétique. Simple application de la théorie des perturbations à un système dégénéré, le jeune physicien en propose ici une solution exacte [Fock 1928a]. Cette première publication se place dans la même perspective que ses précédant travaux en mécanique quantique², à savoir un développement de la mécanique ondulatoire de Schrödinger. C'est aussi le cas de l'investigation suivante conduite par Fock, où il est question de la résolution de l'équation d'onde en connexion avec le problème de la diffusion de particules α par un noyau atomique. Cependant, Gordon ayant déjà donné une solution au problème [Gord 1928], et bien qu'estimant que celle-ci soit « sous une forme beaucoup plus compliquée »³, le Russe ne publie pas sur le sujet.

¹ « Report on the fellowship of V. Fock for 1927-1928 » - ARAN SPb, 1034-2-6.

² Hormis ses deux articles de 1926 sur la généralisation relativiste de l'équation de Schrödinger [Fock 1926a ; 1926b], Fock publie aussi en 1927 un article qui synthétise des questions relatives au formalisme mathématique de la théorie de Schrödinger [Fock 1927a]. Il est publié dans un ouvrage intitulé *Osnovaniya novoy kvantovoy mekhaniki* (Principes de la nouvelle mécanique quantique) qui se trouve être le premier ouvrage de référence sur la théorie quantique en URSS. Préparé sous la direction de Ioffé il réunit diverses études préparées pour le séminaire de mécanique quantique de Bursian. Sur le sujet voir Josephson [Jose 1991, pp. 220-221].

³ « Report on the fellowship of V. Fock for 1927-1928 » - ARAN SPb, 1034-2-6. Même si Fock exprime dans son rapport son intention de publier ses résultats dans le *Zhurnal Russkogo fiziko-khimicheskogo obshchestva* (Journal de la Société russe de physique-chimie), cette publication n'aura jamais lieu.



Figure 5. Paul Dirac (1908-1984) [Domaine Public].

Le personnage de Paul Adrien Maurice Dirac, autre « père » de la mécanique quantique, doit être associé à la suite du parcours allemand de Fock. Les trois autres articles¹ qu'il publie dénotent une attention toute particulière pour le travail du Britannique². Le premier mentionné par Fock dans son rapport est davantage un travail mathématique. Il concerne les fonctions δ^3 , introduites par Dirac en 1927 [Dirac 1927a] et fait l'objet d'une publication en URSS au début de l'année 1929 [Fock 1929a]. Fock s'attache alors dans cet article à redéfinir les fondements de ces fonctions dont il juge que jusqu'alors « l'application [...] ne respecte pas les exigences

minimales de rigueur mathématique » [Fock 1929a, p. 1]⁴.

Les deux autres articles sont reçus le 1^{er} mai 1928 par le journal *Zeitschrift für Physik* qui les publie dans leur volume 49 [Fock 1928b ; 1928c], et traitent de ce que Fock appelle l'« équation statistique de Dirac ». Par ce biais Fock fait référence à la fonction d'onde à plusieurs corps employée initialement par Dirac pour traiter du problème de la statistique

¹ En lien avec ces articles, on peut aussi mentionner deux présentations faites à Göttingen et à Kiel. « Report on the fellowship of V. Fock for 1927-1928 » - ARAN SPb, 1034-2-6.

² Fock fait notamment référence dans ses travaux à trois publications de Dirac qui sont « On the Theory of Quantum Mechanics » publié en 1926 [Dirac 1926], « The Physical Interpretation of Quantum Dynamics » publié en 1927 [Dirac 1927a] tout comme « The Quantum Theory of the Emission and Absorption of Radiation » [Dirac 1927b]. Sur ces articles voir les développements de Kragh dans sa biographie scientifique de Dirac [Kragh 1990, pp. 33-47 et pp. 118-129].

³ Les fonctions δ sont introduites par Dirac pour les besoins du formalisme quantique et servent à décrire des éléments ponctuels. Elles ne sont à proprement parler pas des fonctions, mais une distribution. Pour plus de détails sur leur comportement voir « The Heaviside $u(x - a)$ and Dirac $\delta(x - a)$ functions » dans Oldham, Myland et Spanier [OIMS 2009, pp. 75-81].

⁴ Fock mentionne de plus dans son rapport à la Fondation Rockefeller que son étudiant Kravtsov est alors occupé à Leningrad par le développement de cette même question. « Report on the fellowship of V. Fock for 1927-1928 » - ARAN SPb, 1034-2-6.

quantique, et dont le physicien anglais pose les bases en 1926 dans son article « On the Theory of Quantum Mechanics » [Dira 1926]¹. Dans le premier des deux articles de Fock ici mentionnés, le physicien russe explicite notamment qu'il est possible de déterminer à partir de l'équation de Schrödinger les fonctions propres de l' « équation statistique de Dirac » [Fock 1928b]. En 1927, dans « The Quantum Theory of the Emission and Absorption of Radiation » [Dira 1927b], Dirac considère la statistique de Bose-Einstein d'un ensemble de systèmes mécaniques par une nouvelle méthode. Il considère le nombre N_s de systèmes de niveau d'énergie s comme une variable canonique, et établit sa fonction d'onde dans l'espace de ces variables : ses solutions sont fonctions de N_s et du temps. Fock généralise alors le problème en ayant recours à un espace de Hilbert plus approprié en mécanique quantique et introduit les équations canoniques de transformation qui connectent les deux espaces [Fock 1928c]. Plus tard, en 1958, dans la quatrième édition de *The Principles of Quantum Mechanics*, Dirac baptise l'approche du physicien soviétique « la représentation de Fock » [Dira 1958, p. 139]².

Ces deux travaux de Fock se caractérisent, tout comme ceux de Dirac qu'ils complètent, par une utilisation simultanée non seulement du formalisme de la mécanique ondulatoire mais aussi du formalisme de la mécanique matricielle. Ils nous invitent alors à des commentaires sur ce point. Lorsque Fock se rend à Göttingen en 1927, sa formation initiale fait de lui bien plus qu'un physicien théoricien, il est aussi un mathématicien de talent. Il a notamment déjà publié deux articles en mathématiques pures sur la résolution d'équations intégrales [Fock 1922 ; 1924], et un en géométrie appliquée « sur la cartographie

¹ Si les travaux de Dirac présentent un aperçu général de la question de la statistique quantique, il faut noter que le physicien britannique a tout de même des précurseurs notables avec Heisenberg et Fermi. Voir la discussion sur le sujet par Kragh [Kragh 1990, pp. 35-36].

² Dirac introduit en réalité la représentation de Fock dès la troisième édition. En effet, en préface, il mentionne : « A new presentation of the theory of Systems with similar particles, based on Fock's treatment of the theory of radiation adapted to the present notation. This treatment is simpler and more powerful than the one given in earlier editions of the book. » [Dira 1947, p. iii]. Ce n'est alors que dans la quatrième édition que la dénomination « Fock's representation » est usitée. Comme le mentionnent Yu. V. Novozhilov et V. Yu. Novozhilov [Novo 1999a, p. 1152], bien qu'aujourd'hui largement répandues, les équations canoniques de transformation développées par Fock sont rarement enseignées et utilisées avec référence à leur auteur. Comme semble l'indiquer leur tardive reconnaissance par Dirac, il est probable que ce travail n'ait pas été apprécié à sa juste valeur par les contemporains de Fock.

conformationnelle d'un quadrilatère avec des angles nuls sur le demi-plan » [Fock 1927b]¹. Le soviétique est particulièrement familier de l'analyse, domaine qui le passionne et dans lequel il excelle². En Allemagne on s'exclame à son sujet : « Fock kann einen Stiefel ausrechnen! »³. Difficile de trouver un équivalent français – littéralement : « Fock peut calculer une chaussure ! » – mais notons que cette expression vise à souligner toute l'aisance mathématique du physicien de Léninegrad. Il n'est ainsi pas surprenant qu'il se soit rapidement et avec succès saisi des travaux de Schrödinger qui reposent sur des équations différentielles. En 1927 toujours, sa première publication russe en mécanique quantique est par ailleurs une synthèse des questions relatives au formalisme mathématique de la théorie de Schrödinger [Fock 1927a]⁴. En revanche, il apparaît nettement moins évident qu'à son arrivée à Göttingen Fock ait une véritable maîtrise du formalisme de la mécanique matricielle. Interrogé en 1967 par Thomas Kuhn sur la question de la réception respective, d'une part, des travaux en mécanique matricielle de Heisenberg, Born et Jordan, et d'autre part, de la mécanique ondulatoire de Schrödinger, Fock valorise avant tout ce dernier point : « You know the Schrödinger paper made the Heisenberg paper easily understandable. The matrix itself was felt as something perhaps artificial » [Kuhn 1967]. Ainsi, même si aux premières heures du développement de la mécanique matricielle l'avisé Krutkov, alors à Göttingen, attire l'attention de Fock pour le sujet⁵, et que ce dernier « a accepté entièrement [...] depuis

¹ Pour plus d'informations sur les principaux travaux de Fock dans le domaine des mathématiques voir le paragraphe qui leur est consacré par Smirnova et Vreden-Kovetskoj [SmVr 1956, pp. 33-34].

² Lorsque Fock arrive à Göttingen en août 1928 débute la trêve universitaire estivale. Il se retrouve quelque peu isolé et passe son temps à la bibliothèque où il étudie la littérature scientifique à sa disposition, notamment en mécanique quantique et hydrodynamique (« Report on the fellowship of V. Fock for 1927-1928 » - ARAN SPb, 1034-2-6). Mais les mathématiques sont aussi à son programme. Dans une lettre en date du 22 août 1927 à destination de A. V. Lermontov il explique : « Trois heures par jours je m'installe dans la salle de lecture dédiée aux mathématiques [...] J'y ai lu ces derniers temps des ouvrages sur la géométrie différentielle. Un livre très intéressant, bien écrit et relativement facile à lire ». Lettre citée par Vladimirova [Vlad 2012, p. 78].

³ Il semble que la paternité de cette expression doive être attribuée à Ehrenfest [VeKL 1975, p. 840]. Voir aussi Vladimirova qui l'évoque de façon légèrement modifiée dans le contexte plus vaste de Göttingen [Vlad 2012, p. 88]. On peut aussi consulter Kayas qui lui évoque à Göttingen le surnom de « mitrailleuse mathématique » [Kaya s. d.].

⁴ Voir la note 2 page 51.

⁵ Voir la lettre de Krutkov à Fock en date du 24 janvier 1926 citée par Vladimirova [Vlad 2012, p. 73].

l'avènement des articles de Schrödinger » l'équivalence des points de vue entre les deux mécaniques, il n'essaie pas avant de se rendre en Allemagne de faire usage de la mécanique matricielle, et comme la grande majorité de ses collègues il privilégie le formalisme de la mécanique ondulatoire [Kuhn 1967].

Cependant, à Göttingen, la tendance est inverse et on fait largement usage de méthodes matricielles. Walter Heitler qui rejoint à son tour la Basse-Saxe peu de temps après Fock – en septembre 1927 –, discute dans une lettre à Fritz London du cours de mécanique quantique de Max Born et souligne que tout y est présenté dans le formalisme matriciel à partir duquel on dérive « Dieu sait comment, l'équation de Schrödinger »¹. Ainsi, il nous semble que sur le point précis d'une complète acquisition du formalisme de la mécanique matricielle, c'est le contexte de Göttingen, grâce aux échanges directs avec certains de ses fondateurs et en particulier l'enseignement de Born, qui joue dans la carrière de Fock un rôle primordial². Et très rapidement, ce dernier est en mesure d'appliquer avec succès la mécanique matricielle, que ce soit avec son mentor allemand dans le cas du théorème adiabatique, ou dans ses investigations concernant les travaux de Dirac.

Notons, avec un peu de recul sur la carrière de Fock, qu'il partage en réalité avec Born une approche similaire de la mécanique quantique. L'Allemand est avant tout un mathématicien de formation, étudiant à Göttingen de personnages aussi renommés que Félix Klein, David Hilbert et Hermann Minkowski³. Sa carrière en physique en est indéniablement marquée et se manifeste par une attention toute particulière pour les structures mathématiques formelles. Une caractéristique qu'il partage avec Fock, et qui font d'eux des physiciens-mathématiciens d'exception. Pour l'anecdote, mentionnons que George Gamow, lui aussi titulaire d'une bourse de la fondation Rockefeller, côtoie pendant un temps son camarade de Léninegrad à Göttingen en 1928⁴. Gamow y est notamment occupé par des travaux sur la radioactivité α et dans un article qu'il publie l'année suivante avec Fritz Houtermans, on trouve

¹ Lettre de Heitler à London, non datée, mentionnée par Gavroglu et Simões [GaSi 2012, p. 22].

² A son arrivée à Göttingen, Born et Ehrenfest (par correspondance) orientent Fock vers la littérature adéquate en mécanique quantique. Et alors que le semestre d'hiver débute le 1^{er} novembre, Fock assiste aux enseignements de Born et voit toute son attention « absorbée par la théorie des quanta ». « Report on the fellowship of V. Fock for 1927-1928 » - ARAN SPb, 1034-2-6.

³ Voir Greespan [Gree 2005, pp. 22-49].

⁴ Voir l'autobiographie de Gamow qui mentionne son séjour à Göttingen [Gamo 1970, pp. 55-62].

en note de bas de page des remerciements adressés à Fock pour la résolution d'une équation différentielle relativement complexe [GaHo 1929, p. 501]. Compte-tenu des trajectoires suivies par les acteurs¹, il fait sens que ce calcul ait été effectué avant que Fock ne quitte la cité allemande. Il est alors intéressant de noter que pour résoudre ce problème Gamow et Houtermans ne se tourne ni vers Born – le maître qu'il serait peut-être malvenu de déranger –, ni vers le mathématicien russe Nikolai Kochin – aussi présent à Göttingen et que le premier membre du duo a déjà consulté pour un problème bien plus trivial² –, mais bien vers Fock dont ils connaissent bien les grands talents de mathématicien.

Le 24 juin 1928, ce dernier formule une requête pour voir sa bourse prolongée³. Celle-ci ne sera pas acceptée, mais le physicien de Leningrad peut malgré tout se satisfaire d'avoir totalement profité de l'opportunité qui lui a été donnée « d'étudier de façon approfondie la théorie moderne des quanta »⁴.

2. De retour en URSS : succès scientifiques et académiques

C'est donc fort d'une formation complète en mécanique quantique, mais aussi de nombreuses contributions à ses premiers développements, que Fock rentre à Leningrad à l'été 1928. Contrairement à Landau, qui exprimera plus tard le regret d'avoir manqué la révolution quantique⁵, Fock est parmi les physiciens théoriciens soviétiques de renom celui qui bénéficie sans doute à cette époque de la position la plus favorable, et ses premières contributions sont des réponses directes à des articles fondamentaux de la théorie. En URSS, sa production scientifique s'inscrit initialement dans cette dynamique, et c'est durant les premières années qui suivent sa visite à Göttingen qu'il est à l'origine des travaux en physique quantique qui auront le plus d'écho au cours de sa carrière. La présente section souhaite ainsi faire un bref

¹ *Ibid* [p. 62]. Gamow est à Copenhague et Houtermans à Berlin lorsque l'article est publié, mais ce dernier se trouvait aussi à Göttingen durant l'été.

² *Ibid* [p. 60-61]. Gamow reconnaît sans aucune gêne dans son autobiographie son manque d'intérêt pour le calcul différentiel [p. 58], et son incapacité à résoudre des problèmes mathématiques à la portée de tous.

³ Voir la lettre de W. E. Tisdale, à Fock du 26 juin 1928 – ARAN SPb, 1034-2-6.

⁴ « Report on the fellowship of V. Fock for 1927-1928 » - ARAN SPb, 1034-2-6.

⁵ Né en 1908, Landau n'a que 17 ans lorsque sont publiés les premiers articles fondateurs de la mécanique quantique. Voir Kojevnikov [Koj 2004, p. 85].

bilan de ces contributions et montrer comment Fock s'est installé durablement comme un physicien théoricien de premier plan mondial.

Nous énumérerons dans un premier temps un certain nombre des travaux de Fock et observerons comment ils s'inscrivent dans la continuité de son séjour allemand de 1927-1928. Dans le cas de la seconde quantification nous mettrons aussi en avant un exemple de collaboration internationale. Tout au long de ces développements, le personnage de Dirac jouera le rôle de fil rouge en raison de l'importance de ses contributions à la physique quantique et leur incidence sur le travail de Fock¹. Dans un second temps nous nous pencherons sur les succès académiques qui accompagnent la carrière de Fock en URSS, et viennent récompenser sa brillante carrière scientifique. Par ce biais nous évaluerons sa place dans la physique mondiale.

2.1. Des contributions majeures aux développements de la physique quantique

2.1.1. Investigations sur l'équation de Dirac

Au cours du dernier mois de son séjour à Göttingen Fock se consacre à l'étude de la théorie de l'électron de Dirac². Au début de l'année 1928 le britannique détaille dans une série de deux articles publiés dans les *Proceedings of the Royal Society of London* une « Quantum Theory of Electron » [Dirac 1928a ; 1928b]. En particulier, il propose une équation relativiste décrivant le comportement des électrons. Si l'équation de Klein-Fock-Gordon est une équation d'onde relativiste du second ordre pour le temps, elle ne parvient à décrire correctement que les particules de spin nul, qui sont donc forcément des bosons. Dirac parvient lui à établir une fonction d'onde relativiste du premier ordre – et donc sur ce dernier point similaire à l'équation de Schrödinger – qui décrit les fermions, des particules de spin demi-entier, comme l'électron. Invariante sous l'action du groupe de Lorentz, elle est

¹ Signalons d'ores et déjà deux biographies de Dirac qui viennent compléter nos propos de la présente section. Tout d'abord la biographie scientifique de Dirac écrite par Helge S. Kragh permet d'avoir un aperçu très complet et détaillé de la production scientifique du britannique [Kragh 1990]. L'ouvrage de Graham Farmelo, *The Strangest Man. The Hidden Life of Paul Dirac, Quantum Genius*, nous donne pour sa part une description plus intime de la carrière de Dirac, mais reste un récit passionnant de l'atmosphère scientifique au cours de la période que nous discutons ici [Farmelo 2009].

² « Report on the fellowship of V. Fock for 1927-1928 » - ARAN SPb, 1034-2-6. Sur la théorie de l'électron de Dirac voir les développements de Kragh dans la biographie du Britannique [Kragh 1990, pp. 48-66].

compatible avec les principes de la relativité restreinte. Cette équation est alors aujourd'hui connue sous le nom d'équation de Dirac.

A son retour de Göttingen, Fock va être majoritairement occupé par des investigations concernant les résultats de Dirac. Pas moins de huit publications sur le sujet paraissent en 1929 [Folv 1929a ; 1929b ; 1929c ; 1929d, Fock 1929b ; 1929c ; 1929d ; 1929e]. L'ensemble de ces travaux, à l'exception peut-être de la clarification apportée par Fock à la notion de vitesse dans la théorie de Dirac [Fock 1929b], se placent dans une même perspective, à savoir une généralisation de l'équation de Dirac dans le cas d'un champ gravitationnel externe, soit dans un espace de Riemann. Dans un premier temps Fock travaille avec son jeune collègue de Leningrad, Dmitri Ivanenko¹, avant de poursuivre seul les développements de ce qu'ils définissent comme un processus de « géométrisation » de la théorie de Dirac. Sur la base de son comportement sous déplacement parallèle, Fock et Ivanenko définissent notamment le spineur comme un objet géométrique, et par conséquent obtiennent sa dérivée covariante. C'est ce point qui leur permet alors de donner une interprétation géométrique à l'inclusion d'un potentiel gravitationnel dans le cas de l'équation de Dirac. Ce résultat jouera plus tard un rôle important pour divers développements concernant les effets quantiques gravitationnels², un souhait déjà exprimé par Fock en 1929 : « Il nous semble cependant que notre théorie est indépendante de cette difficulté³ et qu'elle peut servir de base pour une théorie future, comprenant peut-être la quantification de la gravitation, qui saura résoudre et unifier la théorie d'électricité avec celle de la matière » [Fock 1929e, p. 405].

2.1.2. Electrodynamique quantique et espace de Fock

De façon plus concrète à la fin des années 1920, sur la base de la théorie de l'électron de Dirac, se poursuivent les développements d'une nouvelle physique ayant pour but de concilier l'électromagnétisme avec la mécanique quantique en utilisant un formalisme lagrangien

¹ Sur Ivanenko, voir sa biographie par Sardanashvili qui mentionne notamment sa collaboration avec Fock [Sard 2014, pp. 69-71].

² Pour plus de développements sur les résultats obtenus par Fock et Ivanenko voir Yu. V. Novozhilov et V. Yu. Novozhilov [Novo 1999a, pp. 1155-1156] mais aussi Ogievestskii et Polubarinov pour description historique complète du rôle des spineurs en théorie de la gravitation [OgPo 1965]. Citons aussi Goenner et sa très complète étude « On the History of Unified Field Theories » [Goen 2004].

³ Fock mentionne ici ce qu'il appelle la « difficulté de Dirac » [Fock 1929e, p. 405] à savoir l'apparition des résultats d'énergie négative qui poussent Dirac à postuler l'existence de l'antimatière.

relativiste, et visant à décrire l'interaction électromagnétique des particules chargées : l'électrodynamique quantique. Cette dernière est alors un exemple de théorie des champs quantiques relativistes : « quantique » car elles sont un développement de la mécanique quantique, « des champs » car se reposant sur les équations de champ électromagnétique de Maxwell, et enfin « relativistes » car en accord avec les principes de la relativité restreinte. De nos jours, ces théories jouent naturellement un rôle majeur dans les théories d'unification¹. Les premiers développements d'une théorie des champs quantiques relativistes – en particulier l'électrodynamique quantique – dans les années 1920 et 1930, sont un sujet déjà largement discuté dans la littérature [Darr 1984 ; 1986 ; MeSh 1987 ; Krag 1990 ; MeRe 2000a ; 2000b, Koje 2002a ; Schw 1994], une attention toute particulière ayant parfois été donnée aux contributions de Fock [Koje 1988 ; Novo 1999a]. Dans le chapitre inaugural, consacré à la naissance de la théorie des champs quantiques, de son ouvrage majeur sur l'histoire de l'électrodynamique quantique, *QED and the Men who made it*, Silvan S. Schweber met l'accent sur l'opposition de style qui caractérise les travaux des deux principaux fondateurs de la théorie, Jordan et Dirac : « Jordan and Dirac are representative of two alternative points of view: Jordan assumed that fields were the fundamental entities, Dirac took particles as fundamental » [Schw 1994, p. 1]². Cette différence est fondamentale et oriente bien évidemment leurs travaux. Nous tenons de plus à la souligner car elle est pertinente pour définir le cadre de nos développements dans la présente sous-section et la suivante, où, bien que nous ne souhaitons pas rentrer dans le détail des contributions de Fock à l'électrodynamique quantique et seulement donner leur descriptif général et les principaux résultats, il reste indispensable de les contextualiser avec précision.

L'histoire débute dès 1925, peu après l'élaboration de la mécanique quantique, lorsque Pascual Jordan est l'un des premiers à essayer de quantifier le champ électromagnétique [BoJo 1925, BoHJ 1926]³. Mais sa théorie s'avère incomplète, en particulier car elle traite

¹ Pour un compte-rendu du rôle joué par la théorie quantique des champs dans les théories modernes d'unification voir 't Hooft [Hoof 2015].

² Voir aussi Darrigol qui détaille de façon très complète l'opposition entre Jordan et Dirac [Darr 1986], mais aussi le chapitre « Quanta and fields » de la biographie de Dirac par Kragh [Krag 1990, chapitre 6].

³ Bien que les articles publiés par Jordan soient des collaborations, il rédige lui-même le manuscrit du premier [BoJo 1925] alors que Born est en vacances, et est le seul responsable de la partie sur la théorie des

uniquement d'un champ libre – sans charge ou courant électrique. C'est alors Dirac qui en 1927 propose la première théorie quantique des champs concluante [Dirac 1927b]. En utilisant le formalisme hamiltonien il parvient à quantifier la fonction d'onde d'une particule selon une méthode aujourd'hui connue sous le nom de *seconde quantification* : un ensemble statistique de systèmes décrits par une fonction d'onde est remplacé par un ensemble d'opérateurs de la mécanique quantique – d'une façon similaire aux quantités physiques (position, vitesse...) qui sont conçues comme des opérateurs dans la première quantification. Par ce processus, Dirac retombe sur la statistique de Bose, décrivant notamment le comportement des photons. Mais il démontre surtout que l'Hamiltonien de son système – une assemblée de photons interagissant avec un atome – est de la même forme que celui décrivant l'interaction d'un champ électromagnétique avec un atome. Ainsi, dans le cadre de la dualité onde-corpuscule, il explicite que les ondes et les quanta de lumière constituent des descriptions complémentaires du champ électromagnétique. L'énergie du champ est quantifiée, chaque quantum représentant une particule.

Si Dirac part d'une conception corpusculaire, pour Jordan, c'est bien le champ classique qui doit être directement quantifié. Stimulé par les résultats de Dirac il reprend ses travaux initiaux et dans un premier article publié en 1927 [Jordan 1927b] il défend son point de vue :

The results that have been obtained leave little doubt that one can formulate a quantum field theory of matter wherein electrons are represented by quantized waves in the usual three dimensional space – even though electrons satisfy the statistics of Pauli rather than those of Bose – and that the natural formulation of the quantum theory of electrons is obtained by simultaneously conceiving radiation and matter as waves in interaction in three dimensional space¹.

Peu de temps après, Pascual Jordan généralise avec Oskar Klein le traitement de bosons fait par Paul Dirac afin de prendre en considération l'interaction des particules les unes avec les autres [JoKl 1927]. Travaillant alors dans une perspective qui valorise le champ, leur point de départ est une équation d'onde pour l'opérateur champ possédant un terme non-linéaire symbolisant l'interaction du champ avec lui-même. L'équivalence de cette description avec

rayonnements du second [BoHJ 1926]. Sur ce sujet voir Todorov [Todorov 2012, p. 141-142] et Schweber [Schweber 1994, pp. 5-11].

¹ Cité et traduit de l'allemand par Schweber [Schweber 1994, p. 35].

l'usage d'une fonction d'onde symétrique dans l'espace des configurations est alors montrée, et par conséquent la statistique de Bose est respectée. Heisenberg et Pauli, qui collaborent alors à une théorie généralisée des champs quantiques relativistes, sont séduits par ces résultats et adoptent le point de vue initial de Jordan¹.

Si l'ensemble des travaux jusqu'ici évoqués, de Jordan ou de Dirac, manifestent une volonté de se placer dans un cadre relativiste, ce sont bien Heisenberg et Pauli qui proposent les premiers en 1929 une véritable électrodynamique quantique [HePa 1929]. Selon l'approche initiale de Jordan et Klein, ils présentent une méthode générale de quantification des champs en prenant pour point de départ une formulation lagrangienne des équations de champ. Ils s'appuient notamment sur les travaux de Dirac et sa théorie de l'électron relativiste [Dira 1928a ; 1928b], l'équation de Dirac satisfaisant non seulement aux règles de la mécanique quantique mais aussi à celles de la relativité restreinte via l'invariance de Lorentz². Si la théorie d'Heisenberg et de Pauli est une remarquable synthèse des travaux précédents, elle reste néanmoins sujette à de nombreuses critiques, faisant usage d'astuces mathématiques aux fondements théoriques douteux, et présentant des problèmes d'énergie de l'électron divergeant à l'infini³. Dirac n'est pas satisfait de l'approche employée par le duo austro-allemand⁴, mais il ne revient sur le sujet qu'en 1932 et reçoit alors l'aide de Fock. Nous discuterons ce point dans la sous-section suivante, dans laquelle nous souhaitons développer l'idée de collaboration internationale dans le travail du physicien soviétique. D'autres contributions de Fock à l'électrodynamique quantique, indépendantes pour leur part, doivent initialement être évoquées.

Le physicien russe est largement occupé par l'équation relativiste de Dirac en 1929. Et il va consacrer la majeure partie de son temps au début des années 1930 à l'électrodynamique quantique. Nous l'avons vu, dès 1927, Fock est particulièrement au fait de la production scientifique de Dirac, dont il en développe les aspects majeurs. Il n'est ainsi pas étonnant de

¹ Sur l'acceptation des idées de Jordan par Heisenberg et Pauli voir Darrigol [Darr 1986, pp. 235-244] et Schweber [Schw 1994, pp. 36-38].

² Sur ce point voir Kragh [Krag 1990, pp. 131-132].

³ Sur la réception des travaux de Heisenberg et Pauli, ainsi que les difficultés qui leurs sont relatives voir Darrigol [Darr 1986, pp. 245-247], Kragh [Krag 1990, pp. 131-135], Kojevnikov [Koj 1990, pp. 237-239], mais aussi Schweber [Schw 1994, pp. 41-45].

⁴ *Ibid.*

voir que ses articles en électrodynamique quantique vont se placer assez naturellement dans la perspective corpusculaire valorisée par le physicien britannique¹. Alexei Kojevnikov, dans son article « V. A. Fock i metod vtorichnogo kvantovaniya » (V. A. Fock et la méthode de la seconde quantification) [Koj 1988], retrace le parcours de Fock jusqu'en 1932 et l'une de ses plus importantes, et plus connues, contributions à la physique théorique : l'espace de Fock. L'historien y mentionne entre autres les travaux du physicien soviétique sur la mécanique des photons [Fock 1930d] ou encore sur la question de la mesure des champs. Notre souhait étant ici de présenter de façon assez succincte les principales contributions scientifiques de Fock à la théorie quantique, nous passons directement à ses résultats de 1932. Néanmoins, nous tenons à indiquer au lecteur que certains des thèmes qui occupent l'article de Kojevnikov seront discutés par le présent auteur dans le chapitre 2 (II.3.2.1), dans le cadre d'une discussion de l'épistémologie de Fock.

L'espace de Fock est un espace de Hilbert obtenu par la somme directe des produits tensoriels des espaces de Hilbert pour une particule. C'est une construction algébrique qui en mécanique quantique permet de construire l'espace des états quantiques pour un nombre variable ou inconnu de particules identiques. Il est donc introduit en 1932 par Fock dans un article publié dans les *Zeitschrift für Physik* : « Konfigurationsraum und zweite Quantelung » (Espace de configuration et seconde quantification) [Fock 1932c]². Fock y propose de représenter la fonction d'onde d'un système avec un nombre indéfini de particules comme une séquence de fonctions, chacune correspondant à un état avec un nombre fixé de particules. La première correspond au vide, la seconde un état avec une particule, la troisième un état avec deux particules, et ainsi de suite :

¹ En 1986, Darrigol mentionne les travaux de Fock relatifs à la seconde quantification. Selon l'historien, le physicien en « aimait les mathématiques », mais surtout il indique que le soviétique ne mentionne jamais une véritable préférence entre l'approche corpusculaire ou ondulatoire de la théorie des champs [Darr 1986, p. 242]. Il apparaît cependant évident que Fock est particulièrement séduit par le travail et l'approche de Dirac qu'il connaît bien, et ne cesse de reprendre et compléter. De plus, des travaux indépendants du physicien russe, comme sa tentative d'élaborer une mécanique des photons [Fock 1930d] manifestent une préférence pour l'approche corpusculaire.

² Pour un compte-rendu complet des idées et développements à la base de cet article on peut donc consulter Kojevnikov [Koj 1988], et pour une approche plus technique Yu. V. Novozhilov et V. Yu. Novozhilov [Novo 1999a, pp. 1157-1158]

$$\begin{pmatrix} const \\ \psi(x_1) \\ \psi(x_1x_2) \\ \psi(x_1x_2x_3) \\ \dots \end{pmatrix}$$

Sous l'action d'opérateurs de création et d'annihilation correctement définis par Fock, une fonction de N variables se transforme respectivement en une fonction de $N+1$ ou $N-1$ variables. Si $\Psi(x)$ est l'opérateur de création on a alors :

$$\Psi(x) \begin{pmatrix} const \\ \psi(x_1) \\ \psi(x_1x_2) \\ \psi(x_1x_2x_3) \\ \dots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \psi(x) \\ \sqrt{2}\psi(xx_1) \\ \sqrt{3}\psi(xx_1x_2) \\ \dots \\ \dots \end{pmatrix}$$

L'espace des états ici construit est appelé espace de Fock, et permet la description de la dynamique d'un système où le nombre de particules varie, notamment en raison d'interactions.

L'introduction de l'espace de Fock poursuit initialement l'objectif de donner à la méthode de la seconde quantification de Dirac des fondations théoriques plus solides en la connectant à la méthode de la fonction d'onde usuelle dans l'espace de configuration¹. Mais au-delà de son utilisation en électrodynamique quantique, il devient aussi un objet mathématique indépendant utile à de nombreuses études : « stochastic processes, various problems of functional analysis, as well as [...] the representation theory of infinite dimensional algebras and groups » [Fock 2004, p. ix]. Avec ces résultats, Fock se montre particulièrement apte à trouver le formalisme mathématique le plus adéquat à un problème physique. C'est à nouveau le cas lorsqu'il développe la méthode des fonctionnelles de Fock à l'occasion de deux articles publiés en 1934 et 1937 [Fock 1934b ; 1937b]². Il reprend ici les travaux entrepris à Göttingen sur la théorie de l'émission et de l'absorption des rayonnements de Dirac [Fock 1928c] et les étend à l'électrodynamique quantique en redéfinissant l'appareillage mathématique de façon adéquate.

¹ C'est l'objectif affiché par Fock en introduction [Fock 1932c, p. 622].

² Voir Yu. V. Novozhilov et V. Yu. Novozhilov [Novo 1999a, pp. 1154-1155]. Les auteurs mentionnent notamment que le premier des deux articles de Fock sur le sujet est prêt à la fin de l'année 1932 mais que sa publication se voit repoussée.

2.1.3. Collaborations internationales – Le cas de la seconde quantification

Comme évoqué précédemment, la formulation de l'électrodynamique quantique par Heisenberg et Pauli en 1929 [HePa 1929] ne donne pas pleine satisfaction, et de nombreux problèmes restent à résoudre. Remarquons en particulier qu'elle n'explique pas l'origine des interactions de Coulomb entre les charges. Cependant, en 1932, Dirac élabore une nouvelle représentation du potentiel de Coulomb. Alors qu'il travaille initialement dans un cas non-relativiste et en une dimension, il modélise ce potentiel comme un échange de quanta sous forme scalaire entre les différentes particules [Dira 1932]¹. Vladimir Fock et Boris Podolsky reprennent alors rapidement à leur compte cette idée dans le but de définir une théorie plus réaliste de l'électrodynamique quantique : en trois-dimensions, avec des ondes électromagnétiques en lieu et place du potentiel scalaire, et des particules décrites par l'équation relativiste de Dirac.

Bien que né russe, Boris Podolsky (1896-1966) est un citoyen américain qui travaille en ce temps à Kharkov aux côtés de Landau à l'Institut physico-technique d'Ukraine. Il rencontre Fock alors que celui-ci est très probablement en visite à l'Institut peu de temps après la publication de l'article de Dirac, le 2 mai². Les deux hommes décident alors de collaborer et envoient rapidement aux *Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion* deux articles que la revue reçoit le 2 juillet. Le premier, « Zur Diracschen Quantenelektrodynamik » (Sur l'électrodynamique quantique de Dirac) [FoPo 1932a], étend le travail de Dirac au cas à trois dimensions mais parvient aussi à dériver le potentiel de Coulomb avec le bon signe. En effet, alors que pour Dirac deux charges électriques de même signe s'attirent, Fock et Podolsky retrouvent la répulsion physiquement adéquate dans ce cas.

Dans le second article, « On quantization of Electro-magnetic Waves and Interaction of Charges in Dirac Theory » [FoPo 1932b], les deux auteurs tentent de systématiser leur approche, mais doivent cependant faire face à certaines difficultés. La première est déjà bien connue, notamment de Heisenberg et Pauli [HePa 1929], mais aussi de Fermi [Ferm 1929 ; 1930] : le champ décrit par les équations de Maxwell ne peut être quantifié par la méthode

¹ Dirac n'est en réalité pas le premier à faire cette découverte. Fermi l'avait précédé en 1930, mais dans un article écrit en italien et relativement peu diffusé [Ferm 1930]. Voir Kojevnikov [Koj 2002a ,p. 245].

² Pour la chronologie des événements qui nous occupent ici on peut notamment se référer à Kojevnikov [Koj 2002a ,p. 245-247] et Kragh [Krag 1990, pp. 135-138].

canonique usuelle, le moment conjugué du potentiel scalaire s'annulant. Fock et Podolsky choisissent alors de résoudre ce problème en ayant recours à un espace des états plus large que l'espace physique, puis en lui imposant une contrainte additionnelle pour satisfaire les équations de Maxwell. Malgré tout, ces travaux manquent de consistance, et nécessitent des investigations complémentaires de la part du duo. Notons que des erreurs ont été commises dans leurs calculs sur l'énergie d'interaction entre deux électrons. Podolsky en reprend la dérivation¹ et parvient à une solution qui conduit à la formule de Møller – obtenue en 1931 par le physicien danois Christian Møller – qui traite de la collision entre deux électrons relativistes [Møll 1931]². La correction donne lieu à un nouvel article conjoint par Podolsky et Fock en fin d'année 1932 [PoFo 1932]. Cependant c'est l'ensemble de la théorie qui nécessite d'être reprise et reformulée de façon plus élégante. Dans cette entreprise Dirac va se joindre à eux.

Dirac est un personnage relativement singulier dans le paysage de la science soviétique. Entre 1928 et 1937 on ne lui recense pas moins de huit voyages dans la République socialiste. Il développe ainsi d'étroits contacts avec ses homologues soviétiques, se lie d'amitié avec Frenkel, Fock mais aussi Tamm³. Que ce soit suite à une suggestion de ce dernier lors du passage à Moscou de Dirac à l'automne 1929⁴, à la demande d'Ivanenko⁵, de Fock en personne ou encore le fruit d'une initiative personnelle, une seule chose est sûre, le manuscrit de « A theory of electrons and protons » [Dira 1930a] parvient entre les mains de Fock à Leningrad

¹ Voir les lettres de Podolsky à Fock en date du 26 septembre et 1^{er} octobre 1932 publiées par Kojevnikov [Koj 1990, pp. 186-188].

² Pour un compte-rendu complet des travaux de Møller sur le sujet le lecteur peut consulter Roqué [Roqu 1992].

³ Pour les relations étroites entretenues par Dirac avec ses collègues soviétiques voir Frenkel [Fren 1987] et la correspondance entre Dirac et Tamm commentée par Kojevnikov [DiTa 1993]. On peut aussi consulter la biographie de Dirac par Farmelo qui fait de très nombreuses références à l'URSS [Farm 2009].

⁴ Présent aux États-Unis de mars à juillet 1929, Dirac décide de se rendre au Japon avec Heisenberg avant de rentrer seul à Cambridge via Moscou. Voir les différentes lettres échangées entre le 3 janvier et le 12 septembre 1929 par Dirac et Tamm publiées par Kojevnikov [DiTa 1993, pp. 18-29].

⁵ Un échange épistolaire a lieu au début de l'année 1930 entre Dirac et Ivanenko (alors à Leningrad) comme en témoigne deux lettres d'Ivanenko conservées dans les archives de Paul Dirac et datées du 21 janvier et 18 février 1930 – Churchill College, Dirac papers, DRAC 3/2.

au début de l'année 1930¹. Il y est alors question de la « hole theory » de Dirac², et la réaction de Fock à cet article³ va débiter une correspondance relativement soutenue entre les deux hommes qui partagent des intérêts communs pour le problème à plusieurs corps – méthode de Hartree-Fock – et l'électrodynamique quantique⁴. Ainsi, lorsque Dirac envoie à Fock son manuscrit de 1932, « Relativistic Quantum Mechanics » [Dirac 1932], Fock n'hésite pas dans une lettre datée du 7 juillet à discuter directement avec le Britannique de ses récents travaux avec Podolsky⁵. Dirac y répond le 19 juillet⁶, mais c'est surtout sa présence en URSS en septembre et octobre de la même année qui va formellement établir sa collaboration avec le duo.

En effet, le physicien de Cambridge se rend en URSS pour participer à une conférence concernant la physique de l'état solide organisée par l'Institut physico-technique de Léninegrad. En réalité, il y fait très probablement une présentation sur ses récents développements en électrodynamique quantique, et en discute très certainement divers aspects avec Fock et Podolsky eux aussi présents à la conférence⁷. Comme en témoignent différentes lettres de l'Américain au Russe⁸, les deux hommes sont alors toujours actifs sur la

¹ Lettre de Fock à Dirac datée du 12 février 1930 dans laquelle il remercie Dirac pour l'envoi de son article – Churchill College, Dirac papers, DRAC 3/2. Helge Kragh rapporte de plus que les idées de Dirac dans cet article sont diffusées en Russie à cette période par Gamow qui en a discuté avec le britannique à Cambridge, mais aussi Ehrenfest qui arrive le 10 décembre 1929 à Léninegrad en possession de la copie d'une lettre de Dirac à Bohr, datée du 26 novembre, qui en expose les principales idées [Kragh 1990, p. 94]. Il est certain que Fock a consulté cette lettre puisqu'on en trouve trace dans le dossier de correspondance à Dirac de son fond d'archives – ARAN SPb, 1034-3-57.

² Sur la « hole theory » voir Kragh [Kragh 1990, pp. 91-96] et Kojevnikov [Koje 1990, pp. 239-240].

³ Fock se montre critique vis-à-vis des travaux de Dirac : « I cannot say that I was quite convinced by your new theory ». Lettre de Fock à Dirac datée du 12 février 1930 – Churchill College, Dirac papers, DRAC 3/2.

⁴ Pour la correspondance de Fock à Dirac : Churchill College, Dirac papers (DRAC 3/2 – DRAC 3/3 – DRAC 3/4) et ARAN SPb, 1034-3-57. Pour celle de Dirac à Fock : ARAN SPb, 1034-3-371. Voir aussi les lettres publiées en russe par Kojevnikov [Koje 1990].

⁵ Lettre de Fock à Dirac datée du 7 juillet 1932 – Churchill College, Dirac papers, DRAC 3/4.

⁶ Lettre de Dirac à Fock datée du 19 juillet 1932 – ARAN SPb, 1034-3-371.

⁷ Voir les annotations de Kojevnikov à la lettre du 19 août 1932 envoyée par Tamm à Dirac [Koje 1993, pp. 61-62].

⁸ Lettres de Podolsky à Fock en dates du 7 septembre, 26 septembre et 1^{er} octobre 1932 [Koje 1990, pp. 184-188].

question car non seulement insatisfaits de certains aspects de leurs développements précédents, mais aussi de la démonstration apportée par Rosenfeld [Rose 1932] que la théorie de Dirac [Dira 1932] est équivalente à celle de Pauli et Heisenberg [HePa 1929]. Mais c'est uniquement à l'occasion du passage par Kharkov de Dirac au début du mois d'octobre que l'idée d'une collaboration à trois prend forme. Dirac avait de plus promis à Ivanenko de publier dans les *Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion* un article concernant le sujet de sa présentation à Léninegrad le mois précédent¹. Conscients de tous travailler dans la même direction, Podolsky et Dirac décident de préparer un article conjoint en association avec Fock. L'Américain en informe immédiatement ce dernier dans une lettre datée du 9 octobre². Leur travail se fait par correspondance : alors que Podolsky est en charge de la rédaction à Kharkov, Dirac et Fock font régulièrement des suggestions à celui-ci³. De cet effort commun résulte en date du 25 octobre la théorie de Dirac-Fock-Podolsky [DiFP 1932].

Si leur article démontre de façon plus convaincante que celui de Rosenfeld l'équivalence de la formulation de la théorie des champs quantiques relativistes de Heisenberg et Pauli avec l'approche de Dirac – et plus spécifiquement avec la seconde quantification de Dirac-Fock-Podolsky nouvellement établie –, il donne aussi des évidences que cette dernière se présente toutefois comme meilleure. En cause, l'introduction d'un formalisme multi-temporel et l'usage de la représentation d'interaction. Alors que cette seconde facilite la plupart des calculs, le premier, en introduisant une séparation des variables temporelles pour chaque particule, rend explicite l'invariance relativiste de la théorie. Ainsi, les équations fondamentales de l'électrodynamique quantique y sont dérivées de manière covariante

¹ Lettre de Podolsky à Fock datée du 9 octobre 1932. *Ibid* [p. 188].

² *Ibid*.

³ Lettres de Podolsky à Fock des 9 octobre et 24 novembre, de Fock à Dirac du 16 octobre, de Dirac à Fock du 11 novembre, de Dirac à Podolsky du 2 novembre et de Podolsky à Dirac du 16 novembre. *Ibid* [pp. 186-197] (toutes traduites en russes). ARAN SPb, 1034-3-371 pour la version originale de la lettre de Dirac à Fock. Une copie de l'original de la lettre de Fock à Dirac se trouve à Cambridge (Churchill College, Dirac papers DRAC 3/4) ainsi que les échanges entre Podolsky et Dirac (DRAC 3/11) qui incluent de plus une lettre de Podolsky à Dirac du 26 octobre. Dans une lettre à Fock du 10 novembre 1932, Podolsky mentionne des lettres de Fock en dates du 21 et 23 octobre ainsi que du 2 et 3 novembre. Nous n'avons malheureusement pas pu consulter en archives les échanges entre Fock et Podolsky. Par conséquent, nous tenons à remercier ici Alexei Kojevnikov pour nous avoir permis de consulter cette lettre non publiée de Podolsky.

relativiste, d'une façon beaucoup plus explicite qu'avec Heisenberg et Pauli¹. Ce dernier accueille les travaux de Dirac, Fock et Podolsky très favorablement, en particulier pour leur élégance mathématique². Plus tard, cette formulation de l'électrodynamique est déterminante dans les travaux de Tomonaga [Tomo 1946] et Schwinger [Schw 1948] à la base des techniques modernes de renormalisation en théorie quantique des champs³.

Avec l'espace de Fock et la seconde quantification en collaboration avec Dirac et Podolsky, Fock confirme être un acteur majeur des premiers développements de l'électrodynamique quantique. Ces travaux contribuent à donner au physicien russe une place particulière dans l'histoire de sa discipline. Ils témoignent à notre sens non seulement de la grande qualité scientifique de ses contributions et de son apport majeur à la physique contemporaine, mais aussi de la reconnaissance de ses recherches par la communauté scientifique et de sa pleine intégration au sein de celle-ci.

2.2. Une carrière académique accomplie

2.2.1. Un personnage clé de la physique soviétique

L'ensemble des travaux jusqu'ici énumérés, auxquels nous pouvons ajouter la méthode de Hartree-Fock qui sera détaillée dans la section suivante, donne à Fock toute la légitimité scientifique nécessaire à une riche carrière académique. En introduction générale nous l'avons quitté étudiant, mais au cours des années 1930 il va graduellement monter les échelons qui feront de lui un personnage influent de la physique soviétique⁴. Initialement Fock suit un parcours assez traditionnel : doctorant (*aspirant*) jusqu'en 1924, il devient assistant (*assistent*), puis Maître de conférences (*dotsent*) de l'Université d'État de Léningrad, statut qu'il conserve jusqu'en 1932. Pour l'année 1924-1925 il est engagé comme collaborateur scientifique (*nautchnyy sotrudnik*) à l'Observatoire principal de géophysique, un statut qu'on lui accorde aussi entre 1924 et 1936 à l'Institut physico-technique, toujours à Léningrad.

¹ Pour plus de détails sur la formulation de la théorie de Dirac-Fock-Podolsky, voir Kragh [Krag 1990, pp. 136-137].

² *Ibid* [pp. 137-138].

³ Sur l'influence des travaux de Dirac, Fock et Podolsky, voir Kragh [Krag 1990, pp. 136-137] et Yu. V. Novozhilov et V. Yu. Novozhilov [Novo 1999a, p. 1155].

⁴ Voir les chronologies données par Smirnova et Vreden-Kovetskoj [SmVr 1956, pp. 3-4] et Vladimirova [Vlad 2012, pp. 209-212].

À son retour de Göttingen en 1928, on remarque cependant que la carrière académique de Fock prend une nouvelle dimension, notamment en raison de la multiplication de ses collaborations avec plusieurs instituts. Déjà présent à l'Institut physico-technique, il est aussi associé comme collaborateur scientifique de 1928 à 1939 à l'Institut d'optique d'État, de 1929 à 1931 à l'Institut d'exploration géologique et géophysique et de 1931 à 1934 à l'Institut physico-mathématique de l'Académie des sciences d'URSS, toujours dans l'ancienne capitale tsariste¹. De plus, il occupe un poste de Professeur au Département de physique théorique de la Faculté physico-mathématique de l'Institut Polytechnique et son poste de Maître de conférences à l'Université d'État est converti en poste de Professeur en 1932. Rien de plus normal pour celui qui y était depuis toujours destiné². À cette occasion il est en charge des chaires de mécanique quantique et de physique théorique, et ce jusqu'en 1961, date à laquelle il devient directeur du Département théorique de l'Institut de physique de l'Université.

Fock est clairement un personnage incontournable de la physique théorique à Leningrad, ville qu'il ne quitte que lors de son évacuation pendant le siège nazi de la seconde Guerre mondiale. Mais son succès se retranscrit aussi à l'échelle nationale par sa nomination comme membre correspondant de l'Académie des sciences d'URSS en 1932, et comme Académicien en 1939. Cette consécration par le système scientifique soviétique lui ouvre l'accès à d'importantes collaborations avec Moscou. Tout d'abord avec l'Institut de physique de l'Académie des sciences dès 1934 mais aussi avec l'Institut des problèmes physiques entre 1954 et 1961.

¹ Les associations de Fock avec les différents instituts ici évoqués nous sont principalement connues grâce aux chronologies établies par Smirnova et Vreden-Kovetskoj [SmVr 1956, pp. 3-4] et Vladimirova [Vlad 2012, pp. 209-212]. Nous ne connaissons pas le détail des activités de Fock à l'occasion de chaque collaboration, mais celles-ci sont assurément d'ordre scientifique, y compris avec l'Institut d'exploration géologique et géophysique. En effet, la période d'association de Fock avec cette institution coïncide avec la publication par Fock de recherches sur « la détermination de la résistance des roches par le procédé de diagraphie » [Fock 1933a].

² Faddeev L. D., Khalfin L. A. et Komarov I. V. mentionnent en effet en préface des *Selected Works* de Fock que : « Fock's talent was noticed by the teachers and he was kept to the University to prepare for professorship » [Fock 2004, p. vii].

Plus encore, la reconnaissance du travail de Fock s'exprime au travers de différentes récompenses qu'il obtient tout au long de sa carrière. En 1936 il reçoit le prix Mendeleïev¹ pour ses travaux en mécanique quantique sur la théorie des atomes complexes. En 1937 il obtient le prix Lobatchevski² pour des travaux en physique théorique développant les idées du mathématicien et devient ainsi membre honorifique de la Société physico-mathématique de Kazan. Mais ce sont aussi les plus hautes sphères de l'État qui expriment leur gratitude envers Fock en lui décernant plusieurs décorations, dont le prix Staline en 1946 pour ses travaux sur la propagation des ondes, le prix Lénine en 1960 pour ses travaux en théorie quantique des champs (notamment l'espace de Fock), le titre de héros du travail socialiste en 1968 et pas moins de quatre ordres de Lénine, l'une des plus hautes distinctions de l'Union soviétique, en 1945, 1953, 1958 et 1968. Il faut cependant noter que le revers de la médaille à cette énumération des succès de Fock peut se trouver dans le caractère totalitaire du régime soviétique. Plus précisément, il est question d'une certaine forme de pression politique qui tout au long de sa carrière tend à certains moments à limiter sa marge de manœuvre d'un point de vue tant scientifique qu'institutionnel. Nous développerons ces aspects dans les chapitres six à huit de la présente recherche, mais il est important de souligner que les récompenses obtenues par Fock sont avant tout la consécration d'un parcours semé d'embûches.

Tout le poids de Fock dans la société scientifique soviétique ne s'exprime pas seulement au travers de ses travaux ou de ses positions académiques, mais aussi par une volonté affirmée de diffuser son savoir. Comme en témoigne son rapport à la fondation Rockefeller, celle-ci s'exprime dès son retour de Göttingen : « After having returned back to Russia I began a course of lectures on the Wave Mechanics at the Polytechnical Institute at Leningrad, and I intend to write a book on the Quantum Theory »³. En 1939, dans un article au quotidien *Krasnaya gazeta* (Le journal rouge) intitulé « Za tesnyy kontakt s molodezh'yu » (Pour des contacts étroits avec la jeunesse) et publié suite à sa nomination comme Académicien, il réaffirme sur une note positive son intérêt pour l'enseignement : « En formant le jeune

¹ Institué en 1936 par l'Académie des sciences d'URSS il récompense des réalisations exceptionnelles dans le domaine de la chimie.

² Instituée en 1886 et décernée par l'université de Kazan cette distinction mathématique a notamment été décernée à David Hilbert en 1903, Hermann Weyl en 1927 ou encore Elie Cartan la même année que Fock.

³ « Report on the fellowship of V. Fock for 1927-1928 » – ARAN SPb, 1034-2-6.

personnel de physique et en aidant les jeunes scientifiques dans leur travail, j'apprends d'eux, autant qu'ils apprennent de moi » [Fock 1939b].

Ainsi, alors que Yakov Frenkel fait office de pionnier en URSS avec son cours de mécanique quantique à l'automne 1926 suite à son séjour allemand, Fock est lui le premier à systématiser cet enseignement dès 1928¹. Ce cours, qui présente les idées fondamentales de la mécanique quantique, est alors aussi suivi par des scientifiques accomplis :

Providing an example to all [scientists] and students, Ioffe himself went to the entire first semester of lectures, and was accompanied by an entire retinue of [institute scientists]. Therefore, in opposition to the norm, Fock began the lecture only after the arrival of the "highest listeners"².

Plus d'un millier d'étudiants, futurs diplômés de l'Université de Leningrad, bénéficieront de cet enseignement de Fock tout au long de sa carrière³. Plus tard, vraisemblablement à partir de l'année 1938-1939, Fock est aussi responsable d'un cours sur la relativité générale⁴.

La contribution de Fock à l'enseignement et à la diffusion des sciences s'exprime aussi par la publication de divers manuels scientifiques. Son intention affichée de préparer un ouvrage sur la théorie quantique se concrétise en 1932 avec la publication de *Nachala kvantovoy mekhaniki* (Fondamentaux de la mécanique quantique) [Fock 1932a]. Celui-ci prend une place toute particulière dans l'histoire de la mécanique quantique en URSS car il est tout simplement le premier manuel sur le sujet. Fock en prépare aussi l'édition anglaise à la fin de sa vie, et il n'est publié qu'à titre posthume en 1976 [Fock 1932An]. De nos jours il est régulièrement réédité, sa dernière et cinquième édition étant parue en 2008 [Fock 1932a'']. Dans le même temps⁵, Fock fait aussi publier en 1932 *Mekhanika sploshnykh sredin* (Mécanique des milieux

¹ Sur les premières heures de l'enseignement de la physique quantique à Leningrad voir Josephson [Jose 1991, pp. 221-222].

² Todes O. M., *Vospominaniia o Frenkele*, cité et traduit vers l'anglais par Josephson [Jose 1991, p. 222].

³ Ce chiffre est avancé par Smirnova et Vreden-Kovetskoj [SmVr 1956, p. 6].

⁴ La date est incertaine, mais on ne trouve pas trace de ce cours dans les archives de Fock plus tôt. Voir notamment le cahier de prise de notes de Zavelevich daté de 1938-1939. « Po teorii otноситel'nosti. Konspekt lektsiy » (Sur la théorie de la relativité. Notes de cours) – ARAN SPb, 1034-1-196.

⁵ Les deux livres de Fock sont très certainement terminés à l'été 1931, comme en témoignent les contrats signés par Fock avec la maison d'édition Kubuch, respectivement les 7 et 9 août, et où Fock s'engage à

continus)¹. En 1937 c'est son cours de mécanique quantique qui est directement édité par l'Université de Leningrad [Fock 1937a]. Lorsque Fock se tourne vers la théorie de la relativité générale il est l'auteur en 1955 d'une monographie très remarquée, *Teoriya prostranstva, vremeni i tyagoteniya* (La théorie de l'espace, du temps et de la gravitation) [Fock 1955a]. Son succès en permet la publication non seulement en anglais [Fock 1955An] mais aussi en allemand [Fock 1955All] et en roumain [Fock 1955Ro].

Cependant, de nos jours, Fock n'est pas particulièrement reconnu pour ses contributions à l'enseignement de la physique en Union soviétique. C'est à notre sens partiellement du fait de Landau dont le rôle flamboyant dans ce domaine éclipse quelque peu celui de tous ses collègues. En effet, que ce soit avec son célèbre *Cours de physique théorique* écrit avec E. Lifshitz – magistrale œuvre en dix volumes, traduite en totalité en six langues, et partiellement en vingt –, avec son exigent « minimum théorique » à la base de son enseignement ou encore avec son dynamique séminaire de l'Institut pour les problèmes physiques, Landau laisse une trace indélébile dans le paysage de l'enseignement de la physique théorique soviétique, qui de plus s'exporte mondialement². Mais ce fait ne doit pas occulter le rôle joué par d'autres physiciens théoriciens et notamment celui de Fock qui est le véritable pilier de la discipline à Leningrad. Il est vrai qu'en raison de sa surdité qui lui rend la communication difficile et le pousse à privilégier les supports écrits, il est un personnage assez isolé. Mais quand bien même il ne cultive pas comme Landau une très forte relation de proximité avec ses étudiants³, il ne fait aucun doute qu'il contribue tout au long de sa carrière d'enseignant à la formation de scientifiques qui joueront par la suite un rôle important pour la physique soviétique. Parmi eux, Aleksandr D. Aleksandrov, Yuri N. Demkov, Gregory F. Drukarev, Ludvig D. Faddeev, Maria I. Petrashen, Mikhail G. Veselov, ou encore Yuri A. Yappa⁴.

transmettre les manuscrits en dates du 14 et du 19 août. « Perepiska s Gosurdarstvennym izdatel'stvom tekhniko-teoreticheskoy literatury redaktsiyami, gazet i zhurnalov » – ARAN SPb, 1034-3-586.

¹ Cet ouvrage est vraisemblablement rédigé sur la base de conférences prodiguées par Krutkov alors que Fock est encore jeune étudiant. Voir le témoignage du fils de Fock, Mikhail Vladimirovich [Fock 1993, p. 133].

² Sur l'école de physique théorique de Landau voir Dorozynski [Doro 1966], Hall [Hall 2005 ; 2008] ou encore Martinez [Mart 2011].

³ Sur la proximité de Landau avec ses étudiants voir Dorozynski [Doro 1966, pp. 69-71].

⁴ Pour un descriptif plus détaillé de Fock le « Professeur d'université », voir Vladimirova [Vlad 2012, pp. 107-115].

2.2.2. Une influence internationale assujettie au contexte national

L'aura de Fock à Léninegrad, et plus globalement sur la physique théorique en Union soviétique, associée à ses contributions majeures au développement de la mécanique quantique, pourrait laisser supposer que le physicien soviétique jouerait dès les années 1930 un rôle majeur dans la structuration de la physique théorique à une échelle internationale. C'est malheureusement sans compter sur certaines spécificités du contexte local dans lequel il évolue.

Ces dernières sont développées en filigrane de plusieurs ouvrages sur la science soviétique [Krem 1997] et plus particulièrement sur la physique [Jose 1991 ; Koje 2004]. Elles sont aussi étudiées de façon isolée par Josephson dans son article « Physics and Soviet-Western Relations in the 1920s and 1930s » [Jose 1988]. Pour l'historien : « This article examines how Soviet physicists reestablished scientific relations with the West during the 1920s after almost eight years of isolation, and how in the 1930s, under Stalin, Soviet scholars once again lost those vital scientific ties they had worked so hard to resurrect » [Jose 1988, p. 54]. Il mentionne donc dans un premier temps la progressive normalisation des relations internationales suite à la révolution d'Octobre et la guerre civile russe, en particulier dans le sillage de Ioffé qui se déplace régulièrement en Europe de l'Ouest et favorise à sa suite la mobilité de ses collègues¹. Mais après avoir mis en avant quelques indicateurs de la bonne santé des relations internationales pour la physique à la fin des années 1920 – mobilité des acteurs, publications dans des journaux étrangers, congrès internationaux en URSS – Josephson rappelle surtout que les politiques staliniennes signifient pour l'Union soviétique un progressif retour à l'autarcie qui n'épargne pas la science. Au milieu des années 1930 « les physiciens ont dû abandonner leurs contacts internationaux » [Jose 1988, p. 61].

Notre souhait n'est pas ici de décrire le contexte spécifique de l'Union soviétique dans les années 1930, des développements plus complets seront proposés au cours du chapitre 6 (VI.1). Nous souhaitons seulement insister sur le fait que Fock, qui n'échappe pas au phénomène d'isolement progressif des physiciens en URSS durant cette période, profite en revanche pleinement du caractère normalisé des contacts à la fin des années 1920. Beaucoup

¹ Ioffé est notamment à l'étranger de février à août 1921, puis d'avril à septembre 1922. Il y rencontre ses collègues étrangers, collecte du matériel, des ouvrages et souscrit des abonnements pour divers journaux [Jose 1988, pp. 56-58].

d'éléments en ce sens ont déjà été partiellement ou pleinement évoqués, comme la mobilité internationale, les collaborations et la correspondance scientifique, et c'est pourquoi nous nous contenterons d'ajouter brièvement quelques points qui témoignent de l'activité internationale de Fock.

En particulier nous ne reviendrons pas sur les détails du séjour de Fock à Göttingen, mais il est évident que l'une de ses principales conséquences est l'établissement par Fock de contacts de premier plan. Un rapide coup d'œil sur la liste de ses correspondants¹ dans les années 1920 et le début des années 1930 laisse peu de doute quant à la qualité de ses interlocuteurs. On y trouve bien entendu Ehrenfest, Born, Dirac, de Broglie, mais aussi Schrödinger, Jordan, Wigner ou encore Bohr. Le cas de la seconde quantification évoqué précédemment nous a montré comment ce réseau a pu conduire Fock à d'importantes collaborations scientifiques². Il est aussi intéressant d'observer que Fock s'appuie directement sur ses contacts pour la diffusion de ses propres travaux. Louis de Broglie est par exemple son relais à Paris lorsqu'il s'agit pour lui de publier ses premiers articles de mécanique quantique en français [Fock 1929c ; 1929d ; 1929e ; 1930d]³. Dirac joue ce rôle à Londres en 1933 pour un article publié dans les *Proceedings of the Royal Society of London* [Fock 1933d]⁴.

Fock a par ailleurs toute conscience de la nécessité pour les scientifiques de diffuser leur recherche au plus grand nombre, et il n'est ainsi pas étonnant de voir qu'il publie abondamment en langue étrangère. En considérant les articles diffusés en plusieurs langues comme une même et unique œuvre, sur les 103 que Fock publie de 1922 à 1940, 62,1% le sont en russe et 59,2% en langue étrangère. La proportion atteint même 41,7% si l'on ne considère que l'allemand qui est à l'époque la langue scientifique par excellence pour les physiciens. Plus marquant, avant 1933, qui avec l'arrivée au pouvoir des nazis en Allemagne marque une étape importante dans le repli sur soi soviétique⁵, ces proportions sont de seulement 38,8% pour les articles en russe, et atteignent d'impressionnants 81,6% pour les

¹ ARAN SPb, 1034 – *Opis* 3.

² Un autre exemple de collaboration, similaire à celle pour l'article de Dirac, Fock et Podolsky, impliquant Landau, Peierls et Jordan sera développé au chapitre 3 (III.3.2.1).

³ Voir la correspondance entre Fock et de Broglie – ARAN SPb, 1034-3-27 et 1034-3-279.

⁴ Lettre de Fock à Dirac datée du 5 mai 1933 – Churchill College. Dirac papers, DRAC 3/4. Voir aussi les lettres du 23 mars et du 28 avril 1933 de Dirac à Fock – ARAN SPb, 1034-3-371.

⁵ Voir Josephson [Jose 1988 ,pp. 60-61].

articles en langue étrangère. L'allemand seul représente lui 63,3%. Car ces chiffres nous aident aussi à souligner que les politiques éditoriales illustrent parfaitement l'autarcie qui s'installe en URSS dans le courant des années 1930. 1932 est une année charnière qui voit la création de revues soviétiques en langue étrangère destinées à s'exporter, comme *Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion*. Le principal signal envoyé aux scientifiques est qu'il faut maintenant publier « soviétique », et de 1932 à 1940, 20 des 28 articles de Fock dans une langue autre que le russe paraissent dans une revue de ce type. Mais surtout, malgré cet outil toujours ouvert vers l'extérieur, le bilan général de Fock indique l'ampleur de l'isolement qui s'instaure. Après 1935 les chiffres pour les articles en langue étrangère s'effondrent à 22,5% et l'allemand qui devient une langue indésirable en URSS chute à 12.9%. Dans le même temps, la correspondance du physicien soviétique vers l'étranger se raréfie.

Malgré cette nouvelle tendance, et c'est l'ensemble de nos développements jusqu'ici qui en attestent, Fock a eu tout le temps de laisser une empreinte indélébile dans la communauté des physiciens théoriciens. Pour illustrer ce fait, notons que Bohr en personne souhaite qu'il se joigne avec d'autres noms prestigieux de la physique soviétique – Landau, Tamm et Frenkel – au gratin de la discipline lors d'une conférence à Copenhague en juin 1936. Mais c'est déjà trop tard, la « membrane semi-perméable »¹ entre l'URSS et l'Europe de l'Ouest s'est déjà refermée².

3. Etude de cas : l'élaboration de la méthode de Hartree-Fock

Nous venons de mettre en lumière la façon dont Fock s'est affirmé comme un physicien de premier plan mondial, mais sans pour autant nous pencher sérieusement sur les

¹ L'expression est de Léon Rosenfeld dans une carte postale envoyée à Fock en date du 28 novembre 1935 – ARAN SPb, 1034-3-644.

² L'invitation est adressée à Fock le 13 mars 1936. Bohr prévoit d'organiser une conférence sur la physique atomique qui réunirait entre autres Kramers, Heisenberg, Pauli, Dirac et Klein, mais donc aussi Landau, Frenkel, Tamm et Fock pour l'Union soviétique. Dans sa réponse du 4 avril, Fock annonce avoir immédiatement demandé l'autorisation à l'Académie des sciences d'URSS de se rendre à Copenhague, mais il exprime des doutes quant à cette possibilité. De son côté, dans sa réponse du 22 mars à l'invitation de Bohr, Frenkel partage lui aussi cette inquiétude. En définitive, aucun Soviétique ne pourra se rendre à Copenhague. Voir aussi les lettres de Frenkel à Bohr du 13 mai et du 3 juillet et de Bohr à Frenkel du 2 mai 1936 – Niels Bohr Archives, Microfilm B. S. C. 1930-1945, N°19.

spécificités de sa pratique scientifique. C'est pourquoi, afin de mieux les saisir d'un point de vue technique, nous nous proposons d'étudier de façon détaillée une des contributions de Fock à la physique quantique, à savoir ses travaux sur la méthode de Hartree-Fock. Cette dernière est de nos jours reconnue comme une puissante méthode d'approximation pour la résolution de l'équation de Schrödinger dans un problème à plusieurs corps. Largement utilisée en chimie quantique, en physique moléculaire, nucléaire et de l'état solide, elle fut développée en deux étapes par le physicien britannique Douglas Rayner Hartree (1897-1958) et Vladimir Fock.

Notre choix de la méthode de Hartree-Fock s'explique selon différents critères. Notons tout d'abord des lacunes historiographiques, en particulier concernant la contribution de Fock, mais aussi la réception et les développements ultérieurs de la méthode¹. Pour cette raison nous avons décidé de traiter la méthode de Hartree-Fock comme un objet d'étude quasiment à part entière, Fock en étant un acteur parmi d'autres, et certains résultats plus généraux sont aussi délivrés. Mais surtout, dans le cadre plus précis de notre argumentation, il faut souligner que certaines caractéristiques de la pratique scientifique de Fock peuvent se voir à la lumière de l'opposition de style entre lui, Hartree, et un troisième acteur, Slater. La présente section va se focaliser sur les aspects techniques des différents développements de la méthode de Hartree-Fock et nous reviendrons en début de second chapitre sur des questions plus conceptuelles. Elles nous permettront à leur tour non seulement d'apporter un regard nouveau sur les travaux ici détaillés, mais aussi d'introduire des problématiques plus spécifiques aux questions d'interprétation chez Fock.

¹ La méthode est discutée dans la biographie de Hartree par son étudiante, Charlotte Froese Fischer [Froe 2003] et dans l'autobiographie scientifique de Slater [Slat 1975], mais Fock y est notablement sous représenté. Simões et Gavroglu [SiGa 2000], Park [Park 2009] et Zangwill [Zang 2013] se concentrent aussi sur le travail de Hartree, et l'ensemble des références se révèlent être d'excellentes contributions pour comprendre la genèse du travail du Britannique. En vue de combler les lacunes ici évoquées les considérations que nous développons ici sur la méthode de Hartree-Fock ont fait l'objet de deux publications récentes [Mart 2017a ; 2017b]. Je remercie aussi Alexei Kojevnikov de m'avoir fait remarquer qu'il existe une référence russe qui reprend avec précision l'historique de l'élaboration de la méthode [Roma 1986, pp. 67-86].

3.1. Hartree : entre « vieille théorie de Bohr » et nouvelle mécanique quantique

Au cours de la Première Guerre mondiale, alors tout jeune étudiant, Douglas Rayner Hartree est recruté pour se joindre à Cambridge à un groupe de scientifiques confirmés¹ en charge d'une section expérimentale dévolue à la défense anti-aérienne et créée par le Ministère britannique de l'armement². C'est alors qu'il développe un véritable intérêt et une grande habileté concernant la résolution numérique de problèmes scientifiques. Plus tard, influencé par une série de cours sur la théorie quantique donnée par Bohr à Cambridge, Hartree va dédier ses recherches de doctorat au laboratoire Cavendish à la « vieille théorie quantique ». Sa technicité mathématique lui sert alors pour l'application de méthodes numériques à l'étude de structures atomiques. En 1926, avec la publication des articles fondamentaux de Schrödinger sur la mécanique ondulatoire [Schr 1926a ; 1926b ; 1926c ; 1926d], Hartree se saisit directement des nouveaux défis de la physique moderne et décide d'appliquer la nouvelle mécanique quantique à ses travaux précédents.



Figure 6. Douglas Rayner Hartree (1897-1958)
[Niels Bohr Archive]

Ainsi, les articles inauguraux de la méthode de Hartree-Fock, au nombre de quatre, sont publiés dès 1928 dans les *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* [Hart 1928a, 1928b, 1928c, 1929]. Hartree pose alors les fondations d'une nouvelle méthode d'approximation pour la résolution de l'équation de Schrödinger d'un système quantique à plusieurs corps. Les travaux du Britannique conservent certaines caractéristiques de la « vieille théorie de Bohr », et en particulier l'hypothèse que chaque orbitale atomique – un concept

¹ On y trouve notamment le physiologiste Archibald Vivian Hill, prix Nobel de physiologie ou médecine en 1922, Ralph Howard Fowler qui deviendra plus tard directeur de thèse de Hartree, mais aussi le mathématicien Arthur Milne ou encore William Hartree, le père de Douglas, alors ingénieur. Pour plus d'informations sur ce groupe de recherche voir Van der Kloot [VdKl 2011].

² Pour suivre la carrière scientifique de Hartree, voir la très complète biographie écrite par Charlotte Froese Fischer : *Douglas Rayner Hartree. His Life in Science and Computing* [Froe 2003].

remplacé par celui d'état quantique dans la nouvelle mécanique – peut être décrit comme une fonction d'onde individuelle ψ qui obéit à une équation de Schrödinger. À cette hypothèse est associée une autre idée de la « vieille théorie » : les électrons sont considérés « comme des charges ponctuelles en rotation en orbite autour du noyau » [Hart 1928a, p. 89]. Par conséquent, les effets des électrons les uns sur les autres sont représentés en supposant chacun d'entre eux en mouvement dans un champ de force central non-coulombien. Pour synthétiser, Hartree considère simplement pour chaque électron une fonction d'onde individuelle du type de Schrödinger dont l'énergie potentielle est due non seulement au champ du noyau mais aussi au champ généré par les électrons de cœur.

Pour déterminer l'énergie potentielle de chaque électron, Hartree s'inspire du travail de l'Américain Robert Bruce Lindsay (1900-1985) qui au cours d'un séjour avec Bohr à Copenhague durant l'année 1922-1923 introduit le concept d'auto-cohérence pour déterminer le champ de force d'un atome¹. Les électrons de cœur étant considérés comme un nuage en rotation sur une orbite autour du noyau, bien avant la mécanique quantique, les physiciens avaient modélisé pour eux une distribution de charge. Cette dernière est alors connectée à la distribution de charge des autres électrons, à travers l'énergie potentielle². Ainsi, d'un champ de force initial considéré comme approximativement correct, il est possible de calculer la distribution de charge pour chaque électron, et par conséquent, un nouveau champ de force. Après itération, l'auto-cohérence est atteinte lorsque le champ final obtenu est identique au champ initial. Dans sa transition vers la mécanique quantique, Hartree s'appuie sur la suggestion faite par Schrödinger et développée par Klein, que $|\psi|^2$ représente la densité volumique de charge dans l'état décrit par ce même ψ . La procédure développée par Hartree se base sur le schème suivant :

Champ initial → *Champ initial corrigé pour chaque électron de cœur*³ → *Solutions de l'équation d'onde pour les électrons de cœur* → *Distribution de charge* → *Champ final*

Hartree insiste sur le fait que le champ auto-cohérent ainsi obtenu est caractéristique de l'atome en question, qu'il n'implique aucune fonction arbitraire ou constante. Il affirme : « the

¹ *Ibid* [Froe 2003, pp. 31-32]. Hartree dans son second article de 1928 [Hart 1928b, p. 111] fait directement référence à un article de Lindsay publié en 1924 [Lind 1924].

² Pour plus de détails voir Slater [Slat 1975, pp. 52-53].

³ Correction basée sur le fait qu'un électron n'agit pas sur lui-même.

distribution of charge in the self-consistent field is probably the best approximation to the actual distribution of charge in the atom » [Hart 1928a, p. 114]. Les premiers résultats obtenus pour l'atome d'hélium et les ions Rb^+ , Na^+ et Cl^- , appuient cette considération. En effet, différentes valeurs démontrent toute l'efficacité de la méthode, qu'elles soient issues de la comparaison entre les distributions de charge obtenues par différentes méthodes, mais aussi entre le potentiel d'ionisation calculé et les spectres de rayons X observés, ou encore entre le « défaut quantique »¹ et les termes optiques observés. Par conséquent, naturellement baptisée « méthode du champ auto-cohérent », elle s'impose rapidement comme l'une des meilleures approximations de l'équation de Schrödinger dans le problème à plusieurs corps. L'application de raisonnements similaires en physique moléculaire par Hund [Hund 1927a], Mulliken [Mull 1928a ; 1928b] et Lennard-Jones [Lenn 1929], ou en cristallographie par Bloch [Bloc 1928] accentue de plus les promesses du travail de Hartree.

3.2. *Ansatz* et principe d'exclusion de Pauli

D'un point de vue moderne, les physiciens pourraient cependant être surpris de voir le problème quantique à plusieurs corps approché avec si peu de considérations pour la statistique quantique et par conséquent la symétrie de la fonction d'onde totale. Afin de clarifier notre point, il est nécessaire d'explicitier comment ce problème pourrait être compris de nos jours. Pour un système de particules en interaction, la résolution de l'équation de Schrödinger s'avère trop complexe et par conséquent une approximation est nécessaire. Le modèle de Thomas-Fermi, dans lequel le système est considéré en termes de densité électronique², est une approche possible. Le recours à des fonctions d'onde individuelles, comme dans la méthode de Hartree-Fock, est une autre possibilité. Dans ce cas-ci, la fonction d'onde du système est factorisée en un produit de fonctions d'onde individuelles correspondant chacune à un électron du système. Ce processus peut prendre différentes formes mathématiques, les *ansätze*, qui représentent différents points de départ pour la résolution du problème quantique à plusieurs corps. Les physiciens modernes sont conscients

¹ Voir Slater [Slat 1975, p. 52].

² Zangwill [Zang 2013] fait un parallèle historique entre les travaux de Hartree et de Thomas. Il montre notamment comment les principales caractéristiques de leurs approches respectives ont été combinées et généralisées au milieu des années 1960 par une approche de la structure électronique des systèmes à plusieurs électrons appelée théorie de la fonctionnelle de la densité, qui est de nos jours l'une des méthodes les plus populaires parmi les physiciens et chimistes.

de la nécessité de choisir le bon *ansatz* pour satisfaire les différentes exigences de la mécanique quantique. Ce choix doit être considéré comme le *premier problème* dans notre tentative d'approximer l'équation de Schrödinger à plusieurs corps. Mais il existe aussi un *second problème*. En raison de sa nature, la forme factorisée de la fonction d'onde totale ne représente pas correctement les interactions entre particules. De ce fait, l'expression des équations d'ondes individuelles doit être modifiée afin de « compenser » cette perte.

Dans la méthode de Hartree-Fock, ces deux « problèmes » sont considérés de façons différentes par les acteurs que sont Hartree et Fock. Hartree se concentre sur la nature des fonctions d'ondes individuelles (*second problème*), alors que la contribution de Fock concerne la question de l'*ansatz* (*premier problème*). Il est alors essentiel de rappeler que Hartree, dans sa démarche, n'avait nullement besoin de considérer l'équation de Schrödinger exacte du problème à plusieurs corps. Si nous considérons le *second problème*, le potentiel généralisé introduit par Hartree est capable de « compenser » l'information perdue par l'usage de fonctions individuelles. Mais Hartree n'en a pas réellement conscience, et il procède intuitivement¹. Simplement intéressé par les propriétés des électrons, il se contente de postuler dans le cadre de la nouvelle mécanique quantique l'équation de Schrödinger suivante pour le mouvement d'un électron ponctuel avec une énergie totale E , dans un champ statique dont l'énergie potentielle est V :

$$\nabla^2\psi + 2(E - V)\psi = 0$$

Etant donné que Hartree ne se préoccupe jamais de déterminer quel *ansatz* doit être utilisé dans le problème quantique à plusieurs corps, son travail, bien qu'efficace, fait l'objet de critiques, beaucoup de physiciens considérant qu'il possède une bien trop faible base théorique. La méthode du champ auto-cohérent est considérée au mieux semi-empirique, si ce n'est arbitraire². Par conséquent, peu de temps après les premières publications de Hartree, le Britannique John Arthur Gaunt (1904-1944) et l'Américain John Clarke Slater (1900-1976) publient des articles [Gaun 1928 ; Slat 1928] qui posent les fondations théoriques de la méthode et étudient sa précision. Le premier fait usage de la théorie des perturbations au premier ordre pour la fonction d'onde et au second ordre pour les énergies, et montre que

¹ Voir Slater [Slat 1963, p. 485]

² Pour plus de détails sur les premières critiques du travail de Hartree on peut consulter Park [Park 2009, pp. 54-55].

la méthode de Hartree est parmi toutes les méthodes d'approximation la plus efficace dans la réduction des erreurs. Le second souhaite formuler de façon plus rigoureuse mathématiquement le processus mis en jeu par la méthode, et comme déjà saisi par Gaunt qui cependant ne le formalise pas, il met clairement en évidence que l'*ansatz* utilisé implicitement par Hartree est un simple produit de N fonctions d'ondes individuelles :

$$\Psi = \prod_{i=1}^N \psi(\vec{q}_i)$$

Cependant, tout physicien capable à la fin des années vingt d'élargir ses vues sur les développements de la mécanique quantique est alors en mesure de remarquer que cet *ansatz* est formellement incorrect pour un usage dans le problème à plusieurs corps. Dès 1926, Heisenberg [Heis 1926] et Dirac [Dirac 1926] posent graduellement les fondations de la mécanique ondulatoire de ce sujet¹. Pour simplifier leurs propos, on peut considérer un système quantique simple de deux électrons. Ce système peut être associé à deux fonctions d'ondes, $\Psi(x_1, x_2)$ et $\Psi(x_2, x_1)$, qui diffèrent par un simple échange des électrons. Chaque fonction d'onde est valide pour représenter le système, étant donné que les deux électrons sont identiques. Les effets de l'échange sont alors étudiés. Il est montré que pour être solutions de l'équation de Schrödinger, toutes les fonctions d'ondes doivent être soit symétriques, $\Psi(x_1, x_2) = \Psi(x_2, x_1)$, soit antisymétriques, $\Psi(x_1, x_2) = -\Psi(x_2, x_1)$. De plus, étant donnés les termes de l'énergie, il est montré que si les électrons sont dans le même état quantique, les fonctions d'onde antisymétriques se dissipent. Ce résultat est immédiatement lié au principe d'exclusion de Pauli, postulé en 1925, qui statue que deux électrons ne peuvent occuper simultanément le même état quantique. Seules les fonctions d'onde antisymétriques respectent ce principe fondamental, et à la fin de l'année 1926 il est alors admis qu'elles doivent être utilisées dans le problème quantique à plusieurs corps². L'*ansatz* révélé par Slater dans le cas de Hartree n'est manifestement pas antisymétrique, et par conséquent la méthode du champ auto-cohérent ne respecte pas le principe de Pauli³.

¹ Sur Heisenberg, Dirac et la statistique quantique du problème à plusieurs corps voir Jeremiah James et Christian Joas [JaJo 2015, pp. 670-679].

² Voir la lettre de Pauli à Wentzel, datée du 5 décembre 1926 [Paul 1979, pp. 360-364]

³ Gaunt réalise en 1928 qu'il y a un problème de symétrie dans l'approche de Hartree [Gaun 1928]. Mais en ne posant pas directement l'*ansatz* du système étudié il commet l'erreur de penser qu'une simple inclusion des coordonnées de spin directement dans les équations de Hartree peut résoudre le problème.

Cependant, la construction d'une fonction d'onde généralisée à plusieurs corps respectant toutes les exigences physiques et mathématiques de la mécanique quantique n'est pas une tâche aisée. Avec la récente inclusion du spin, et son rôle dans le principe de Pauli, il est nécessaire de manipuler quatre nombres quantiques différents pour définir l'état quantique d'un électron. De nombreux physiciens, dont Wigner [Wign 1927], Hund [Hund 1927b] et Heitler [Heit 1927], décident de chercher une solution à ce problème à l'aide de la théorie des groupes. De leurs efforts il est établi que le produit de deux déterminants construits par des fonctions d'ondes individuelles $\psi_i(r_k)$, ou une somme de tels produits, possède la bonne symétrie. Ainsi nous avons :

$$\Psi = \Psi_1 \Psi_2$$

$$\text{avec } \Psi_1 = \begin{vmatrix} \psi_1(r_1) & \psi_2(r_1) & \dots & \psi_q(r_1) \\ \psi_1(r_2) & \psi_2(r_2) & \dots & \psi_q(r_2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \psi_1(r_q) & \psi_2(r_q) & \dots & \psi_q(r_q) \end{vmatrix} \text{ et } \Psi_2 = \begin{vmatrix} \psi_1(r_{q+1}) & \psi_2(r_{q+1}) & \dots & \psi_q(r_{q+1}) \\ \psi_1(r_{q+2}) & \psi_2(r_{q+2}) & \dots & \psi_q(r_{q+2}) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \psi_1(r_{q+p}) & \psi_2(r_{q+p}) & \dots & \psi_q(r_{q+p}) \end{vmatrix}$$

Il convient de noter que chaque fonction individuelle ne dépend que des coordonnées de position, $r_k(x_k, y_k, z_k)$. Cependant, les déterminants ont été construits de sorte à prendre en compte l'équation aux valeurs propres pour le moment angulaire de spin. Bien que l'équation de Schrödinger ne dépende pas des variables de spin, ses propriétés dépendent de la valeur du spin total, étant donné que ce dernier affecte la symétrie de la fonction d'onde.

3.3. Poser les fondations théoriques de la méthode : la contribution de Fock

Lorsqu'à la fin de l'année 1929 Fock s'intéresse à la méthode du champ auto-cohérent, il a conscience que le travail de Hartree ne respecte pas le principe de Pauli car reposant sur un *ansatz* incorrect. Ainsi, il publie en 1930 dans les *Zeitschrift für Physik* un article qui complète les considérations du Britannique [Fock 1930a]. Fock commence par assurer à la méthode une solide base théorique. Il estime en effet qu'elle peut être liée au principe variationnel, duquel l'équation exacte de Schrödinger peut être dérivée¹. Le Russe est alors familier de l'approche

¹ De nos jours le principe variationnel statue qu'une fonction d'onde approximée qui donne la plus basse valeur de l'énergie est la plus proche de la fonction d'onde réelle. Fock ne définit pas explicitement ce qu'il entend par principe variationnel en 1930, mais au début de cette décennie son contemporain Slater en parle ainsi : « principe [which] states that, if one has an approximate wave function containing arbitrary parameters of arbitrary functions, one will have the best approximation to a solution of Schrödinger's equation if one chooses

variationnelle, qu'il a déjà utilisée dans ses articles de 1926 sur la généralisation relativiste de l'équation de Schrödinger [Fock 1926a, 1926b]¹. Fock l'applique donc dans un premier temps à l'*ansatz* mis en évidence par Slater dans le travail de Hartree, un simple produit de fonctions individuelles. Il parvient alors à dériver les équations utilisées en 1928 dans la méthode du champ auto-cohérent, et que nous appellerons maintenant « équations de Hartree ». Dans la formulation mathématique de Fock ces dernières prennent l'allure suivante :

$$H\psi_q(x) + [V(x) - G_{qq}(x)]\psi_q(x) = \lambda_q\psi_q(x) \quad (q=1,\dots,N)$$

où $G_{qq}(x)$ est un terme qui sert de compensation au fait qu'un électron n'agit pas sur lui-même.

Mais Fock est aussi conscient des développements dans l'approche du problème à plusieurs corps à l'aide de la théorie des groupes, et il maîtrise cette dernière. Par conséquent, il dérive le principe variationnel avec un *ansatz* possédant la bonne symétrie, le produit de deux déterminants mentionné précédemment. Il obtient les équations dites de Fock :

$$2[H + V(x)]\psi_i(x) - \sum_{k=1}^q \epsilon_k G_{ki}(x)\psi_k(x) = \sum_{k=1}^q \lambda_{ki}\psi_k(x) \quad (i = 1, \dots, p)$$

$$[H + V(x)]\psi_i(x) - \sum_{k=1}^q G_{ki}(x)\psi_k(x) = \sum_{k=1}^q \lambda_{ki}\psi_k(x) \quad (i = p + 1, \dots, q)$$

Dans le produit initial de déterminants utilisé par Fock, nous prenons $q > p$, et une dépendance uniquement envers les coordonnées spatiales. Cependant, rappelons que le spin joue un rôle dans l'élaboration de ce produit, et cela explique pourquoi Fock obtient deux équations différentes. En effet, en adoptant une séparation des variables, il est possible de construire des ondes de spin et des ondes d'espace selon : $\varphi(\sigma; r) = \alpha(\sigma)\psi(r)$. Le principe de Pauli pris en considération, deux électrons peuvent avoir la même onde d'espace (état) tant qu'ils ont des ondes de spins différentes (des spins opposés). Ainsi, la première équation de Fock représente un état occupé par deux électrons de spins différents, alors que la seconde équation représente un état occupé par seulement un électron.

Mais la principale particularité de ces équations sont leurs termes corrélés. Si tous les éléments pour lesquels $i \neq k$ sont omis, on obtient les équations de Hartree. Les parties avec

the parameters or functions so that the energy is stationary with respect to slight variations of them. » [Slat 1930, p. 210].

¹ Sur ce sujet voir Kragh [Kragh 1984, p. 1030].

des indices différents sont petites en comparaison des termes en $i = k$, mais restent non négligeables et participent alors à l'amélioration de la précision de la méthode. Pour Fock ils représentent ce qui est habituellement appelé l'échange quantique¹. Cette notion sera discutée en détail dans le chapitre suivant (II.1.2), mais nous pouvons d'ores et déjà commenter qu'elle hérite son nom du principe de Pauli et de l'identité des électrons. Ainsi, dans un système quantique, deux électrons indiscernables pourraient échanger leurs positions. Les termes corrélés dans les équations de Fock résultent du choix d'un *ansatz* qui respecte le principe d'exclusion de Pauli. Par conséquent, ils sont associés au phénomène d'échange quantique, et la méthode de Hartree devient naturellement la « méthode du champ auto-cohérent avec échange », aujourd'hui connue sous le nom de méthode de Hartree-Fock².

3.4. Slater, à la recherche d'un formalisme alternatif

De nombreux physiciens³ accueillent avec enthousiasme l'inclusion de l'échange dans la méthode du champ auto-cohérent, ce qui permet non seulement d'améliorer sa précision mais aussi d'asseoir sa base théorique. Mais ils regrettent aussi que cela engendre de nouvelles difficultés mathématiques⁴. Les équations de Fock se trouvent être si complexes que leur « utilisation pratique sembl[e] fort difficile » [Bril 1934b, p. 413]. Ainsi, dans un premier temps, les équations de Hartree restent les plus utilisées, et les invitations à faire usage des équations avec échange se font timides⁵. Par conséquent, Zener [Zene 1930], Lennard-Jones [Lenn 1931] ou encore Brown [Brow 1933], appellent à la réécriture des équations de Fock, en particulier à l'aide de travaux publiés par Slater en 1929 [Slat 1929].

¹ Il est toutefois plus commun de considérer l'ensemble du second terme ($i = k$ inclus), dans les équations de Fock, pour faire référence à l'échange quantique.

² Durant plusieurs années les noms « champ auto-cohérent » et « champ auto-cohérent avec échange » coexistent pour désigner d'une part le travail de Hartree et d'autre part sa version complétée par Fock. Bien qu'une première mention de la méthode de « Hartree-Fock » apparaît en 1932 (« Hartree-Focksche Verfahren ») [TaBl 1932], cette dénomination n'est popularisée que dans les années 1950.

³ Zener [Zene 1930], Dirac [Dira 1930b], mais aussi Lennard-Jones [Lenn 1931] et Brillouin [Bril 1932a ; 1932b ; 1934a ; 1934b].

⁴ À l'exception de Dirac [Dira 1930b].

⁵ Voir par exemple Lenz [Lenz 1932] pour les cristaux et Brillouin pour les métaux [Bril 1932a, 1932b].

Dans le courant des années 1920 Slater est l'un des rares physiciens formés aux Etats-Unis qui contribue de façon significative à la mécanique quantique¹. Selon Park [Park 2000, p. 453], au cours de sa carrière, il poursuit une quête vers un formalisme général de la théorie qui puisse traiter des atomes et molécules. Dès 1928, alors qu'il réalise que la méthode de Hartree ne respecte pas le principe de Pauli, il décide de chercher la meilleure façon d'intégrer ce dernier dans le traitement des atomes multiélectroniques². Comme mentionné auparavant, ce problème est alors principalement traité à l'aide de la théorie des groupes. Mais Slater a pour habitude de qualifier toute tentative de formuler la fonction d'onde dans le problème à plusieurs corps à l'aide de la théorie des groupes comme la *Gruppenpest*, « the plague of the group theory »³. En effet, il ne maîtrise pas cette branche des mathématiques et décide donc de travailler sur une formulation alternative. Il inclut le spin comme une nouvelle coordonnée dans une spin-orbitale individuelle prenant la forme $u_i(j) = u_{n,l,m_l}(x,y,z)u_{m_s}(m_s)$. L'Américain est alors en mesure de construire un déterminant antisymétrique unique, le déterminant de Slater, qui est présenté en 1929 dans *Physical Review* [Slat 1929] :

$$\psi = \frac{1}{\sqrt{N!}} \begin{vmatrix} u_1(1) & u_1(2) & \dots & u_1(N) \\ u_2(1) & u_2(2) & \dots & u_2(N) \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ u_N(1) & u_N(2) & \dots & u_N(N) \end{vmatrix}$$

où $\frac{1}{\sqrt{N!}}$ est la constante de normalisation pour un système de N électrons représentés par les spin-orbitales u_i .

Alors à Leipzig pour travailler avec Heisenberg et Hund à la fin de l'année 1929, Slater réalise que la méthode du champ auto-cohérent de Hartree n'est pas vraiment bien reçue parmi les physiciens théoriciens de la mécanique quantique⁴. Ainsi, le 19 décembre 1929, il

¹ Pour plus d'informations biographiques sur Slater voir Schweber [Schw 1990] et Morse [Mors 1982].

² Un développement plus complet des travaux de Slater sur le sujet, leur réception comprise, peut être trouvé chez Schweber [Schw 1990, pp. 376-379], Park [Park 2000, pp. 452-459 ; 2009, pp. 54-58] mais aussi Gavroglu et Simões [GaSi 2012, pp. 87-93].

³ Sur ce sujet voir l'autobiographie scientifique de Slater [Slat 1975, p. 60].

⁴ Ce fait est rapporté par Park [Park 2009, pp. 56-57] qui mentionne qu'en dépit des travaux de Gaunt [GauN 1928] et Slater [Slat 1928], nombreux sont ceux qui considèrent que la méthode « se situe à part du courant principal de la théorie quantique » et « contient des éléments arbitraires et empiriques ».

envoie une note pour sa défense à *Physical Review* [Slat 1930] dans laquelle il mentionne qu'une justification théorique de la méthode du champ auto-cohérent est possible grâce au principe variationnel. Mais il ajoute aussi que la fonction d'onde devrait être considérée comme une combinaison linéaire de produits avec la symétrie requise, soit son déterminant. Publié en janvier 1930, cette note indique que Slater est en réalité très proche des résultats de Fock, mais la dérivation des équations est, elle, bien la prouesse du Soviétique. Il faut alors noter que ce dernier ne fait jamais mention des différents travaux de Slater dans son article fondateur de la méthode de Hartree-Fock, alors que Gaunt par exemple est lui explicitement cité. De toute évidence il n'est pas un lecteur de *Physical Review*, et il développe sa procédure en toute indépendance des idées de l'Américain¹.

Dans le même temps la formulation de Slater de la fonction d'onde à plusieurs corps attire l'attention de la communauté des physiciens. En effet, l'article de 1929 est particulièrement bien accueilli par ceux qui ne maîtrisent pas la théorie des groupes. Le succès est tel que pour certains « Slater avait tué le 'Gruppenpest' ». De son propre jugement, « aucun des autres travaux qu'[il] avait conduits n'était si universellement connus » [Slat 1975, p. 62]. C'est pourquoi en réponse aux critiques faites envers la formulation de Fock de l'approximation du champ auto-cohérent, les scientifiques appellent à sa réécriture sur la base des travaux de Slater. Une formulation plus brève et élégante apparaît comme possible [Lenn 1931, p. 470]. Cependant ce souhait n'est réalisé qu'en 1935 par Douglas Hartree, avec son père William [HaHa 1935b]. Ces derniers participent ainsi à la popularisation de la formulation – faisant appel au déterminant de Slater – qui est de nos jours la plus commune. Bien que le nom de Slater ne soit pas directement associé à la méthode de Hartree-Fock, il ne fait aucun doute que son déterminant, et l'approche qui l'accompagne, jouent un rôle fondamental. C'est pourquoi il est essentiel, afin de clarifier certaines considérations à venir, de garder à l'esprit qu'il existe deux formulations, de Fock et de Slater, pour la méthode du champ auto-cohérent avec échange.

¹ L'article de Fock est reçu par les *Zeitschrift für Physik* le 21 février 1930. Même si une querelle de priorité aurait pu avoir lieu entre les deux scientifiques, ils reconnaîtront par la suite la simultanéité de leurs idées, développées à l'automne 1929, Fock ayant présenté ses résultats durant une session de la Société russe de physique-chimie le 17 décembre 1929. Dans leurs échanges, notamment en avril et mai 1930, il est explicitement question d'un envoi à Fock de divers articles par Slater, des articles dont le Russe n'a de toute évidence pas eu connaissance jusque-là. Voir leur correspondance – ARAN SPb, 1034-3-192 et 1034-3-775.

3.5. Un « physicien du calcul et de la classification » en opposition à un pur théoricien

En complément, la présente sous-partie se propose de mettre l'accent sur le contraste entre l'approche qu'ont les deux fondateurs de la méthode de Hartree-Fock au cours des premières années de son application. Nous souhaitons ainsi promouvoir le rapport étroit entre les mathématiques, les questions de formalisme, et la pratique de la physique chez Fock. Pour étudier cette période il faut alors prendre en compte que la question de l'application de la méthode est particulièrement liée à celle de la complexité des calculs qu'elle engendre. D'une période où le physicien est alors constamment confronté aux limitations de ses capacités de calcul, l'émergence des ordinateurs dans les années 1950 se présente comme le point de départ d'une nouvelle ère, bien plus faste. Cette trajectoire trouve aussi un écho particulier dans le développement d'une discipline comme la chimie quantique où la méthode de Hartree-Fock est largement employée. Ces questions, dont le développement n'est pas indispensable à la présente section, seront approfondies au cours du chapitre suivant (II.3). Néanmoins, comme elles définissent le contexte dans lequel évoluent Hartree et Fock nous tenons ici à ce que le lecteur les garde en tête.

C'est d'ailleurs au cours de leur étude concernant la chimie quantique en Grande-Bretagne que Simões et Gavroglu mettent en évidence le rôle spécifique des « chimistes théoriciens britanniques qui ont surmonté la difficile relation entre la chimie et les mathématiques » [SiGa 2000, p. 542]. Avec Lennard-Jones et Coulson, Hartree est alors l'un des trois acteurs sur lesquels ils se concentrent. Ce dernier peut toutefois difficilement être considéré comme un pur chimiste théoricien. Fowler, son directeur de recherche à Cambridge, dit plutôt de lui qu'il est « un physicien du calcul et de la classification »¹ [Swir 1987, p. 190]. Cependant, le champ auto-cohérent de Hartree, et l'habileté de son auteur à s'impliquer dans le développement des mathématiques appliquées pour des problèmes à plusieurs corps de plus en plus complexes, s'avèrent extrêmement importants pour la chimie quantique². Nous mentionnerons dans le chapitre suivant (II.1.1) l'intérêt de Hartree pour le développement de

¹ « A computing and classifying physicist ».

² Slater dans son autobiographie scientifique souligne le rôle majeur joué par Hartree au-delà de la simple physique atomique : « While he limited himself to atoms, his demonstration of the power of the self-consistent field for atoms is what led to the development of that method for molecules and solids as well » [Slat 1975, p. 54].

machines pour faciliter les calculs numériques. Plus tard, il contribuera aussi à l'élaboration des ordinateurs. Mais nous voulons ici mettre en évidence son constant intérêt pour la recherche d'approximations reproduisant le plus fidèlement possible les résultats de l'expérience. Dans les années 1930, il développe en réalité un programme de recherche pour lequel chacun peut observer une claire tendance à l'amélioration du champ auto-cohérent, afin de le faire coïncider autant que possible avec la solution exacte du problème à plusieurs corps. Ce programme est clairement détaillé dans une lettre envoyée le 20 octobre 1935 à Robert Bruce Lindsay, où Hartree indique « les principales lignes de travail qui [l'] intéressent à cet instant »¹. On y trouve trois thèmes de recherche. Le dernier concerne le développement d'un analyseur différentiel qu'Hartree entend utiliser plus tard pour le champ auto-cohérent. Mais ce sont ici les deux autres points qui nous intéressent, car directement dédiés à des améliorations de la méthode.

Le premier est formulé ainsi : « [the] extension of the 'self-consistent field' treatment of many electrons to include (a) exchange (b) relativity effects (c) both »². La nécessité d'inclure le point (a), l'échange, a déjà été rendue évidente par Fock. Que Hartree le rappelle ici peut faire référence aux discussions concernant le formalisme de Slater, ou plus simplement aux difficultés concernant les calculs numériques. Le point (b), les « effets relativistes » n'est pas directement couvert par Hartree. À l'automne 1934 il demande à Bertha Swirles, alors sa collègue à Manchester, de s'en charger³. En novembre 1935 elle publie alors un article intitulé « The Relativistic Self-Consistent Field » [Swir 1935]. Le raisonnement suivi dans cet article est similaire à celui de Fock en 1930. Swirles montre que l'équation relativiste de Dirac peut être obtenue à partir du principe variationnel, et en utilisant un déterminant de Slater composé de fonctions individuelles de Dirac elle est alors en mesure de construire des équations relativistes du champ auto-cohérent qui incluent aussi une intégrale d'échange.

¹ Lettre de Hartree à Lindsay, datée du 20 octobre 1935 – Christ's College, Papers of D. R. Hartree, 157 vi (9).

² *Ibid.*

³ Note explicative de Bertha Swirles, mariée Jeffreys, datée de janvier 1978 – Cambridge, St John's College Archives, Papers of Bertha Jeffreys, C19. Pour l'anecdote, Bertha Swirles mentionne aussi dans un autre document que Hartree lui suggère de travailler sur les effets relativistes sur un quai de la gare d'Euston à Londres [Swir 1987, p. 193].

Swirles est aussi concernée par le dernier thème de recherche de Hartree, « l'interaction de configuration »¹. Un premier article fondamental concernant son application au champ auto-cohérent est publié en 1937 par Hartree et Swirles [HaSw 1937]. William Hartree se joint à eux pour une seconde publication en 1939 [HaHS 1939]. Dans ces travaux, l'interaction de configuration est clairement approchée dans le cadre de notre *premier problème* du problème quantique à plusieurs corps : « the way in which the wave function for the whole atom is taken as built up out of them [the one-electron wave functions] »². La question de l'*ansatz* est alors à nouveau posée et « configuration » réfère en réalité à une combinaison linéaire de déterminants de Slater utilisés pour la fonction d'onde. Le terme « interaction » doit lui être compris comme un mélange de différentes configurations électroniques pour un même atome, en termes d'occupations orbitales. La configuration électronique pour un atome est la répartition de ses électrons en fonction de leur énergie et de leur spin. Elle est définie par les nombres quantiques n, l, m_l, m_s et chaque atome peut ainsi avoir différentes configurations électroniques. Par conséquent, l'interaction de configuration correspond à l'usage d'une fonction d'onde construite comme étant la superposition de différentes configurations électroniques possibles. Des combinaisons linéaires du type suivant sont utilisées :

$$\Psi = \sum_{I=0} c_I \Phi_I^{SO} = c_0 \Phi_0^{SO} + c_1 \Phi_1^{SO} + \dots,$$

où les c_I sont des constantes de renormalisation, et les Φ_I^{SO} sont les fonctions de configuration d'état qui correspondent au I différentes configurations électroniques. Les fonctions de configuration d'état sont elles des déterminants de Slater construits à partir de spin-orbitales individuelles (SO).

La nécessité de travailler dans cette direction s'inspire de résultats obtenus en 1933 par Hartree et Black qui avaient observé des écarts dans les valeurs de l'énergie pour les ions O^{+++} ,

¹ Lettre de Hartree à Lindsay, datée du 20 octobre 1935 – Christ's College, Papers of D. R. Hartree, 157 vi (9). Hartree mentionne à Lindsay une préférence pour le terme « interference of configuration », interférence étant utilisé dans son sens optique, en lieu et place de « configuration interaction ». En 1939 il utilise plutôt « superposition of configuration » [HaHS 1939]. Voir Swirles [Swir 1987] pour plus d'informations sur l'implication de l'auteure dans ces travaux. Sur les premiers développements de l'interaction de configuration voir Park [Park 2009, pp. 35-37].

² Les auteurs mentionnent en effet qu'elle pourrait aussi faire partie de « la façon selon laquelle les fonctions d'onde individuelles sont déterminées », soit notre *second problème*, mais avec moins de succès [HaHS 1939, p. 230].

O^{++} , O^+ et l'atome neutre O [HaBl 1933]. Il avait auparavant été établi qu'en utilisant la théorie de Slater du spectre complexe [Slat 1929], les éléments de matrice de l'hamiltonien impliquant deux configurations différentes pouvaient être négligés, et que chaque état pouvait alors être décrit par une unique configuration. Cependant, en ce qui concerne les résultats obtenus avec l'oxygène par Hartree et Black, les écarts constatés sont rapidement associés non seulement au fait que les auteurs utilisent les fonctions de Hartree (pas d'échange quantique) mais aussi qu'ils emploient la théorie de Slater et ses déterminants (négligence des différentes configurations électroniques). Suite à la discussion faite par Condon et Shortley des effets de l'interaction de configuration [CoSh 1935], Hartree décide alors de l'appliquer au champ auto-cohérent¹.

De façon générale, le programme de Hartree dans les années 1930 exprime une claire volonté d'éliminer tout écart possible avec les résultats de l'expérience et d'atteindre ainsi la description la plus exacte possible du problème à plusieurs corps. Dans l'introduction de son article donnant les résultats avec échange pour l'atome de béryllium [HaHa 1935b], Hartree rappelle que la méthode du champ auto-cohérent implique trois approximations principales : (a) négligence des effets relativistes et de spin, (b) négligence des effets d'échange, (c) traitement de la fonction d'onde de l'atome comme construite à partir de fonctions individuelles. Le britannique justifie de travailler dans le cadre du point (c) en raison de la « pratique usuelle » alors que le point (a) est lui négligé car jugé important seulement pour les atomes lourds [HaHa 1935b ,p. 9]. Une mise en contexte initiale de ce genre, qui place la méthode du champ auto-cohérent au cœur d'un problème plus large, est alors très courante dans les écrits de Hartree.

Sur la chimie quantique, Park fait l'explicite constat suivant : « a compromise had to be reached between defining a manageable problem and solving it accurately » [Park 2009, pp. 34]. Hartree travaille en réalité dans cette perspective. Il essaie non seulement d'améliorer l'applicabilité de la méthode *mais aussi* sa précision. En cela, il développe un programme relativement utilitariste, et il va de soi que ses efforts participent à la large acceptation de la méthode.

¹ Hartree et Swirles font explicitement référence aux développements faits par Condon et Shortley de la question de l'interaction de configuration dans leur introduction [HaSw 1937].

Fock, de son côté, n'est pas vraiment intéressé par ce programme. Bien que lui aussi soit engagé dans la réalisation de calculs numériques à Léninegrad, il continue de s'affirmer comme un « pur » physicien théoricien et reste particulièrement intéressé par les questions de formalisme mathématique. La plupart de ses articles expriment la volonté de consolider les fondations théoriques de la méthode de Hartree-Fock dans sa version originale, celle de 1930. Ce besoin se manifeste partiellement au travers de certaines critiques formulées envers Fock, notamment pour un manque de clarté. C'est en particulier le cas de Brillouin qui considère que l'article du soviétique est « très concis et pass[e] un peu trop rapidement sur une série de difficultés relatives aux définitions initiales sur lesquelles s'appuie tout le raisonnement » [Bril 1934a ,p. 3]. En effet, même si Fock développe quelque peu l'exemple du lithium, le produit de déterminants à utiliser dans le cas général est directement posé. De plus, les règles de symétrie de cet *ansatz* ne sont pas commentées et les considérations sur le spin limitées à une simple remarque : « Dans notre théorie, le spin est seulement considéré dans la mesure où il satisfait le principe de Pauli ; ainsi le spin est seulement pris en compte implicitement, par son rôle dans la détermination de la symétrie de la fonction d'onde » [Fock 1930a , p. 127]. Lorsque la question de l'*ansatz* est de nouveau posée par l'usage du déterminant de Slater, mais aussi par les développements concernant l'interaction de configuration, Fock doit alors très certainement ressentir la nécessité de sécuriser et expliquer ses propres choix. C'est l'objet d'un article publié en Union soviétique en 1940 [Fock 1940].

Fock s'y propose de remplir l'objectif suivant : « Here we shall give the explicit expression of the total wave function of the N -electron system through a single Schrödinger wave function and point out, also in an explicit manner, the sufficient and necessary symmetry conditions for the latter »¹. Et c'est en réalité de cette « unique » équation de Schrödinger que l'on peut construire l'*ansatz* utilisé par Fock en 1930 : un produit de déterminants construits à partir d'équations d'onde individuelles dépendantes seulement des coordonnées spatiales. Comme mentionné auparavant, Fock base initialement son travail sur des résultats obtenus à l'aide de la théorie des groupes. En 1940, il reconnaît toutefois les limites de cette approche : « this usual method [the one used in 1930] to represent total wave function applied, in

¹ Traduction anglaise par Trifonov E. D. issue des *Selected Works* de Fock [Fock 2004, p. 468].

particular, by Wigner is in practice hardly suitable »¹. Il propose alors un nouveau traitement de la question qui ne fasse pas appel à la théorie des groupes.

Ainsi, le physicien de Léninegrad prend pour point de départ l'équation de Schrödinger suivante :

$$\psi = \psi(r_1 r_2 \dots r_q | r_{q+1} r_{q+2} \dots r_n)$$

où chaque « r_i » dénote un ensemble de trois coordonnées spatiales x_i, y_i, z_i pour un i -ème électron. Fock formule alors les propriétés de symétrie de base d'une telle équation de Schrödinger afin qu'elle respecte le principe de Pauli. ψ doit tout d'abord être antisymétrique en respect de chaque groupe d'arguments :

$$\psi(r_1 r_2 \dots r_q | r_{q+1} r_{q+2} \dots r_n) = -\psi(r_2 r_1 \dots r_q | r_{q+1} r_{q+2} \dots r_n)$$

$$\psi(r_1 r_2 \dots r_q | r_{q+1} r_{q+2} \dots r_n) = -\psi(r_1 r_2 \dots r_q | r_{q+2} r_{q+1} \dots r_n)$$

Par conséquent, en considérant une complète séparation des variables – soit lorsque ψ peut être exprimée sous forme de fonctions individuelles – Fock fait la démonstration que pour satisfaire ces conditions de symétrie, le système peut être écrit sous la forme du produit de déterminants qu'il a choisi en 1930 : $\Psi_1 \Psi_2$.

Mais en 1940 Fock introduit aussi une nouvelle condition de symétrie qui n'était pas soupçonnée en 1930, la symétrie cyclique :

$$\begin{aligned} & \psi(r_1 \dots r_{q-1} r_q | r_{q+1} r_{q+2} \dots r_n) \\ &= \psi(r_1 \dots r_{q-1} r_{q+1} | r_q r_{q+2} \dots r_n) \\ &+ \dots \psi(r_1 \dots r_{q-1} r_{q+l} | r_{q+1} \dots r_{q+l-1} r_q r_{q+l+1} \dots r_n) \\ &+ \dots \psi(r_1 \dots r_{q-1} r_n | r_{q+1} \dots r_{n-1} r_q) \end{aligned}$$

À l'aide de cette symétrie cyclique, le physicien établit que le problème peut être traité comme si chaque déterminant était constitué de fonctions d'onde individuelles d'électrons de même spin. En d'autres termes : $\Psi_1 = \Psi_+$ et $\Psi_2 = \Psi_-$. Fock détaille ensuite la démonstration que la fonction d'onde de Schrödinger initialement posée est une fonction propre du carré de l'opérateur de spin total, S^2 . Par conséquent il en conclut qu'elle respecte le principe de Pauli et peut être considérée comme une expression explicite de la fonction d'onde totale d'un système à N -électrons.

¹ *Ibid*, p. 474.

Fock, en se focalisant ici sur des aspects purement liés au formalisme, témoigne du décalage qu'il existe entre son approche de la physique et celle de Hartree. Il s'affirme clairement comme un physicien-mathématicien tourné avant tout vers les problèmes théoriques. Malheureusement, publié en russe durant la Seconde Guerre mondiale, cet article de 1940 reste relativement inconnu. Notons que s'il reflète très clairement les tentatives de Fock d'asseoir la validité de son travail initial, il apparaît de plus que le physicien semble considérer tout au long de sa vie qu'il utilise le formalisme le plus adéquat pour le problème du champ auto-cohérent. En effet, la version anglaise complétée de son manuel de mécanique quantique de 1932, préparée à la fin de sa carrière et publiée de façon posthume en 1976, ne fait aucune mention d'une formulation alternative par Slater [Fock 1932An].

3.6. Conclusion intermédiaire

Dans un récent article publié en 2015, Jeremiah James et Christian Joas mettent l'accent sur le rôle des applications dans l'établissement de la mécanique quantique et argumentent à l'encontre de la tendance commune de ne mettre en avant que les travaux purement théoriques [JaJo 2015]. En particulier, ils insistent sur la période 1926-1928 où un certain nombre d'applications contribuent à l'unité, la généralité, et la signification physique de la mécanique quantique. La méthode de Hartree-Fock est, selon nous, un autre cas d'étude remarquable qui permet d'appuyer sur une période plus large l'argumentation de James et Joas. Nous reviendrons dans le chapitre suivant sur des questions conceptuelles, mais nous avons déjà pu observer que les développements sur le champ auto-cohérent sont très rapidement une motivation pour les scientifiques de travailler sur le formalisme de la mécanique quantique.

Fock et Slater en sont deux illustrations flagrantes, en raison de leur volonté de reformuler les travaux de Hartree de façon adéquate. Leurs formulations de la méthode de Hartree-Fock sont deux oppositions de style, non seulement en ce qui concerne l'usage de la théorie des groupes, mais aussi sur la question plus spécifique de l'inclusion du spin dans les équations¹. Ici encore, en ce qui concerne le sujet principal de nos recherches, le travail de Fock témoigne d'une grande maîtrise des outils mathématiques, d'une véritable aisance dans la manipulation des équations différentielles. Dans la lignée de ses investigations en cinq dimensions sur l'équation de Schrödinger, sur la représentation et l'espace de Fock, ou encore de la méthode

¹ Dirac [Dirac 1930b] et Brillouin [Brillouin 1934b] traitent eux aussi de la question dans leurs travaux.

des fonctionnelles, la méthode de Hartree-Fock atteste à nouveau de l'immense faculté du physicien de Léninegrad à clarifier tout type de problèmes physiques à l'aide de ses aptitudes mathématiques.

Le contraste entre la pratique scientifique de Fock et celle de Hartree, bien plus utilitariste et proche de l'expérimentation, dessine les contours de la perception d'un scientifique résolument tourné vers des problématiques purement théoriques, et pour lequel le formalisme mathématique joue un rôle majeur. Fock n'en est néanmoins pas totalement coupé des réalités, mais lorsqu'il doit entreprendre concrètement des calculs pour divers atomes avec la méthode du champ auto-cohérent avec échange, il sait aussi profiter de sa position influente à Léninegrad pour s'appuyer sur l'aide de Maria Ivanovna Petrashen [FoPe 1934 ; 1935a ; 1935b ; 1935c]. Cette dernière travaille alors au sein de l'Institut d'Etat d'optique, dans un groupe de recherche dirigé par Fock.

4. Conclusion

Nous avons pu observer tout au long de ce chapitre que la trajectoire scientifique suivie par Fock à la fin des années 1920 et au début des années 1930 est caractéristique des mutations en cours de la physique théorique en Union soviétique. Alors qu'une courte fenêtre, d'environ une décennie, ouvre totalement celle-ci à la formidable agitation ouest-européenne des développements de la mécanique quantique, Fock est de ceux qui saisissent l'occasion d'en être des acteurs à part entière. Grâce à sa bourse de la fondation Rockefeller il obtient l'incalculable opportunité de parfaire sa formation à Göttingen, l'une des plaques tournantes de la physique théorique mondiale à la fin des années 1920. Le séjour de Fock en Allemagne n'est qu'une étape dans le processus qui conduit celui-ci au rang de physicien de premier plan mondial. Mais c'est probablement l'une des plus importantes, car elle lui permet non seulement de compléter sa formation, mais aussi de côtoyer les plus grands de son temps, et de s'insérer ainsi au sein d'une dynamique internationale indispensable à la bonne marche d'une discipline alors en pleine révolution. Correspondances, collaborations et publications à l'étranger inscrivent définitivement Fock dans le paysage mondial de la physique théorique. Naturellement, l'immense activité du physicien de Léninegrad au tournant des années 1930 en fait aussi un personnage majeur en Union soviétique. Il y joue spontanément le rôle qui lui est

dû, à savoir de coordonner, diffuser, et enseigner la physique théorique. En retour, il obtient tous les honneurs possibles.

Cependant, si être inclus dans une dynamique est une chose, en être un acteur de premier plan en est une autre. Et nos investigations ont pu montrer que d'un point de vue scientifique Fock n'est pas un simple spectateur des développements de la physique quantique. Au contraire, il ne cesse de s'illustrer, et on lui reconnaît aujourd'hui de nombreuses contributions d'importance : équation de Klein-Fock-Gordon, transformations de gradient, représentation de Fock, espace de Fock, formalisme de Dirac-Fock-Podolsky ou encore méthode de Hartree-Fock. Ainsi, il faut souligner que la reconnaissance institutionnelle dont bénéficie Fock, y compris en URSS, est avant tout le résultat de la qualité de sa production scientifique. Si ce processus semble naturel, il reste nécessaire de le rappeler, en particulier en vue de nos développements sur le contexte soviétique où les aspects politiques joueront un rôle important. Ce chapitre a donc permis d'établir que l'autorité de Fock dans la communauté des physiciens repose avant tout sur de très solides bases scientifiques.

Le présent chapitre nous a aussi appris à mieux saisir ce que sont les principales caractéristiques du travail scientifique de Fock. Le physicien de Leningrad s'illustre à cette période sur les questions relatives à la manipulation du formalisme mathématique. Fock prouve constamment sa capacité à utiliser ou à développer le formalisme le plus adéquat pour la résolution d'un problème physique. Décelée dès ses travaux sur la généralisation relativiste de l'équation de Schrödinger, cette aptitude trouve son expression la plus emblématique avec l'espace de Fock. Notre étude poussée sur la méthode de Hartree-Fock a mis en relief cet aspect de sa pratique scientifique, en la contrastant avec celle de Hartree. Alors que le second est préoccupé par des problématiques d'ordre utilitariste, le Soviétique se positionne avant tout comme un pur théoricien. Se dessine alors pour la suite de nos considérations, et il est ici question de nos investigations sur l'épistémologie de Fock, que le physicien russe entretient un rapport tout particulier avec les mathématiques. Leur rôle est si important dans son approche des problèmes physiques, qu'elles doivent *a priori* avoir une place à part entière dans ses conceptions épistémologiques.

Enfin, s'il fallait encore douter de notre légitimité à propulser Fock au rang des leaders de la physique théorique soviétique, nous souhaitons ici laisser le mot de la fin à Landau, qui nous a parfois accompagné au cours de ce chapitre. En effet, de tous les physiciens théoriciens soviétiques il est sans doute le plus emblématique. Landau aime classer : les femmes, leurs

vêtements, les instituts, les sciences, les discours...¹ Les physiciens théoriciens n'échappent pas à cette règle. Il classe ces derniers selon une échelle logarithmique de 1 à 5. Les physiciens de la catégorie 1 sont considérés par Landau comme 10 fois plus influents que ceux de la catégorie 2, et ainsi de suite, ceux de la cinquième catégorie étant qualifiés de « pathologistes ». Landau classe ses contemporains, et Einstein a le privilège d'occuper seul la classe 0,5. En classe 1, on trouve Bohr, Pauli, Schrödinger, Heisenberg, Dirac, Planck, ou encore de Broglie. Landau lui-même se considère longtemps comme un 2,5 puis un 2. C'est la classification qu'il se donne lorsqu'à la fin des années 1950 il établit un classement spécifique aux soviétiques. Lev Landau est alors le premier, et deux noms seulement apparaissent derrière lui en classe 2,5 : Yakov Zeldovitch, et bien entendu, Vladimir Fock².

¹ Voir Gorobets qui recense diverses anecdotes sur les différentes classifications faites par Landau [Goro 2012, pp. 79-88].

² *Ibid* [p. 80].

Chapitre deuxième – Antiréductionnisme

Le chapitre précédent nous a permis d’asseoir la légitimité de Fock comme scientifique de premier plan tant en URSS qu’à l’international. La richesse de ses travaux en physique quantique est indiscutable et son nom reste associé à plusieurs développements majeurs. Nombre d’entre eux, y compris la méthode de Hartree-Fock, témoignent de ses aptitudes pour les mathématiques, et de l’influence que ces dernières ont sur sa pratique scientifique. Fock se présente comme un pur physicien théoricien, principalement occupé par les développements de la théorie quantique et les questions de formalisme mathématique. Or dans ce cadre, l’intérêt que nous lui connaissons pour les questions d’interprétation ne se manifeste pas concrètement. Ainsi, il convient pour donner sens à nos travaux d’établir des passerelles entre la pratique de la physique chez Fock et les conceptions philosophiques qu’il développe sur les sciences. Pour ce faire, nous souhaitons définir son approche épistémologique.

Le présent chapitre souhaite mettre en évidence l’une des principales caractéristiques de l’épistémologie de Fock, à savoir, son antiréductionnisme. L’une de nos hypothèses de travail est que l’expression chez Fock d’une approche antiréductionniste des théories physiques est fortement liée au contexte scientifique du début des années 1930 et aux interrogations qui accompagnent les développements de la physique quantique. C’est pourquoi notre approche se veut proche de l’activité scientifique de Fock, mais aussi de celle de ses collègues : cela nous permettra de discuter du contexte d’apparition et d’application de cette question philosophique. Nous verrons ensuite que l’antiréductionnisme de Fock prend une forme qui lui est propre, en réponse aux exigences de sa discipline. Par la suite, à l’appui des considérations du chapitre suivant sur le réalisme, nous pourrons ainsi reconstruire une description globale de l’épistémologie de Fock et définir les outils que nous pourrons appliquer à notre analyse de son interprétation des théories modernes de la physique (chapitre quatre).

Nous avons suggéré dans le chapitre précédent que des considérations complémentaires sur la méthode de Hartree-Fock seraient à présent développées. Alors que l’accent a jusqu’à présent été mis sur les questions de formalisme mathématique, il est ici question de la

nécessité d'une analyse conceptuelle du phénomène d'échange quantique en vue de la pleine compréhension de la méthode du champ auto-cohérent. Cette investigation posera les jalons d'une réflexion plus spécifique sur le réductionnisme. Non seulement elle participe d'une contextualisation générale de notre problématique sur ce point, en particulier d'un point de vue institutionnel avec l'émancipation de la chimie quantique au début des années 1950, mais elle permet surtout en détaillant les considérations de Fock sur l'échange quantique d'obtenir un premier aperçu des fondements de l'épistémologie du physicien russe. Toutefois, avant de se pencher concrètement sur ce point, il conviendra, dans la deuxième partie du présent chapitre, de définir avec rigueur ce qu'est le réductionnisme. Comme nous le verrons, la diversité des significations de ce concept philosophique nous oblige en réalité à en donner différentes déclinaisons et à en discuter les principales conséquences en ce qui concerne plus particulièrement la physique. Nous montrerons en quoi la question du réductionnisme est importante et participe concrètement à des problématiques partagées par une frange importante de physiciens théoriciens influents dans l'entourage de Fock. Des considérations sur trois des fondateurs de la mécanique quantique, Bohr, Dirac et Heisenberg, viendront ainsi appuyer nos propos. Car il faut souligner que c'est dans le contexte de la physique quantique que Fock développe initialement sa philosophie antiréductionniste. Cette question sera traitée dans un troisième temps du présent chapitre. Nous détaillerons la position tenue par Fock, et nous observerons comment l'expression de sa pensée est en partie dépendante de récents développements en électrodynamique quantique. Nous tenons à rappeler que la question plus spécifique de l'interprétation de la mécanique quantique et de la relativité générale sera développée au chapitre quatre. Par conséquent, c'est avant tout du réductionnisme comme un principe philosophique général à la base d'une méthodologie de travail dont il est question ici, et non pas de son impact direct sur la compréhension des théories par Fock.

Sources :

Le présent chapitre, comme le précédent, s'appuie avant tout sur les publications dans les revues scientifiques de Fock et de ses contemporains, mais aussi de façon assez variée sur toute source secondaire dont elles sont l'objet. En effet, l'antiréductionnisme de Fock s'exprime avant tout au travers de sa production scientifique, et résulte de la nécessité de répondre à certaines problématiques soulevées par les développements de la théorie

quantique. Soulignons d’ores et déjà que c’est précisément un article de Fock publié en 1936, et jusque-là inexploité dans la littérature seconde sur le physicien soviétique, qui nous a mis sur la voie de la présente investigation : « Printsipial’noye znacheniyе priblizhennykh metodov v teoreticheskoy fizike » (La signification fondamentale des méthodes d’approximations dans la physique théorique) [Fock 1936d].

Pour définir le cadre de nos développements sur l’antiréductionnisme de Fock, et donc mieux saisir les contours de la question philosophique ici en jeu, nous aurons principalement recours à des sources encyclopédiques. Sur le terrain spécifique qui nous intéresse, à savoir la question du rôle joué par la philosophie réductionniste dans la pratique scientifique des théoriciens de la mécanique quantique, la littérature est peu abondante. Soulignons alors l’intérêt tout particulier de l’ouvrage d’Alisa Bokulich, *Reexamining the Quantum-Classical Relation. Beyond Reductionism and Pluralism* [Boku 2008], qui en s’attardant sur les conceptions de Heisenberg, Dirac et Bohr, nous permet de donner du relief à nos considérations sur Fock.

À nouveau, les archives jouent ici un rôle secondaire. Comme dans le chapitre précédent la correspondance scientifique est utile pour contextualiser les travaux de Fock, mais malheureusement, on ne trouve pas de document véritablement pertinent où le physicien développerait sa position antiréductionniste. Celle-ci n’est en réalité jamais abordée frontalement par Fock – à l’exception peut-être de son article de 1936 – et se trouve principalement diluée dans son discours scientifique.

1. La méthode de Hartree-Fock : complications¹

La méthode de Hartree-Fock est de nos jours bien connue pour la généralisation de son emploi à partir du milieu des années 1950 dans le domaine de la chimie quantique. Ce fait est alors souvent connecté au développement des ordinateurs² qui facilitent grandement les calculs. Par conséquent, étant donné que la méthode du champ auto-cohérent est aussi connue pour conduire à de fastidieux calculs, il existe une tendance à voir les deux décennies

¹ Les idées développées dans la présente partie ont fait l’objet d’une publication par le présent auteur [Mart 2017b].

² Sur l’émergence des ordinateurs à partir de 1945 avec l’ENIAC, et leur transformation durant les années 1950 et 1960 vers un produit commercial plus largement accessible, voir Ceruzzi [Ceru 1998].

qui séparent sa mise au point de son application exhaustive – 1930-1950 – comme une période de stagnation. Cependant, nos développements initiaux dans le chapitre précédent (I.3) ont déjà pu mettre en lumière que dès les années 1930 la méthode est l’objet de différentes considérations concernant sa formulation mais aussi de possibles extensions. Aussi, nous avons pu mettre en évidence que la méthode de Hartree-Fock, particulièrement en raison des investigations qu’elle suscite sur son formalisme mathématique, est une bonne illustration des travaux de James et Joas sur le rôle des applications dans l’établissement de la mécanique quantique [Jajo 2015]¹.

La présente partie renforce notre argumentation sur ces deux points en replaçant la méthode dans le délicat contexte de son application concrète et en montrant qu’elle fait l’objet de considérations conceptuelles dont l’élucidation participe aussi de sa bonne réception. En particulier, la notion d’échange quantique est au cœur de nos discussions et comme nous le verrons c’est elle qui nous permet d’introduire une réflexion sur l’épistémologie de Fock. Alors, dans les parties suivantes, nous identifierons clairement au sein de cette dernière le caractère antiréductionniste de l’approche des sciences par Fock.

1.1. Difficultés numériques

En dépit du rôle important joué par Slater tout au long de l’élaboration de la méthode de Hartree-Fock nous n’avons pas porté grande attention à ses activités au cours des années 1930. Cette lacune peut toutefois être rapidement corrigée grâce à l’enquête biographique menée à son sujet par Schweber qui observe au début des années 1930 que le physicien américain glisse du statut de « pur » physicien théoricien à celui de théoricien « appliqué » [Schw 1990, pp. 340-341]. Son centre d’intérêt change : de l’élaboration d’un formalisme quantique général pour le traitement des atomes et molécules il se tourne vers l’application de celui-ci pour expliquer la structure des substances réelles. Durant cette période, « Slater prit au sérieux son engagement pour la construction de ponts entre la physique et la chimie » [Schw 1990, p. 402].

¹ Rappelons que James et Joas mettent l’accent sur le rôle des applications dans l’établissement de la mécanique quantique et argumentent à l’encontre la tendance commune de ne mettre en avant que les travaux purement théoriques. En particulier, ils insistent sur la période 1926-1928 où un certain nombre d’applications contribuent à l’unité, la généralité, et la signification physique de la mécanique quantique.

Ce changement fait écho à nos propos du chapitre précédent sur Hartree et l'élargissement progressif du champ d'action de la méthode de Hartree-Fock (I.3.5). En tant que méthode d'approximation pour la résolution de l'équation de Schrödinger d'un système à plusieurs corps elle a le potentiel d'être appliquée à des structures bien plus complexes que les atomes, et ainsi vocation à jouer un rôle concret pour la chimie quantique et la physique de l'état solide. Et ce sont précisément ces deux disciplines qui comme nous allons le développer jouent un rôle en ce qui concerne la clarification conceptuelle de la méthode de Hartree-Fock.

Les études historiques¹ sur celles-ci nous aident à mieux définir le contexte dans lequel se situe notre étude de cas. Elles montrent qu'il est essentiel de prendre en considération un élément qui influence grandement la pratique de la physique atomique, moléculaire et de l'état solide : les calculs². En effet, la période qui nous intéresse va de l'élaboration de la méthode de Hartree-Fock à l'apparition des premiers ordinateurs. Durant cette période, la méthode est remarquable par sa capacité à offrir aux scientifiques un outil relativement facile à appliquer aux investigations théoriques sur les atomes lourds et les systèmes multiélectroniques. La simplification mathématique proposée par la formulation de Slater contribue alors à la large acceptation de la méthode dans la communauté. Cependant, en ce qui concerne de façon spécifique les calculs et l'application des travaux de Hartree et de Fock, les résultats – en particulier pour les atomes lourds – ne sont obtenus de façon extensive qu'à la fin des années 1950 grâce à l'aide des ordinateurs.

Hartree est une figure clé pour les calculs numériques. En 1931 il écrit à Slater :

The solution of SCF equations is probably going to be work for babes [*sic*] compared with the solution of the Fock equations [...] I am extremely interested to hear of Professor Bush's latest machine, and the possibility of using it on atomic calculations; it alters the technical computing problem considerably, more than I realized...If you can do in 10 minutes what takes me 2-3

¹ Voir Hoddeson et al. pour la physique de l'état solide [Hodd 1992] ainsi que Gavroglu et Simões pour la chimie quantique [GaSi 2012].

² Cette question est aussi spécifiquement développée dans le cas de la chimie quantique par Park [Park 2003 ; 2009].

hours, and with adequate accuracy, it seems to bring the solution of Fock equations within the range of possibility¹.

La machine mentionnée par Hartree est l'analyseur différentiel développé par Vannevar Bush au MIT. Hartree lui rend visite à deux reprises, en 1932 et 1933, pour se familiariser avec l'appareil. De retour à Manchester² il développe alors son propre analyseur différentiel avec pour ambition de résoudre tout type d'équations différentielles. Un prototype, en faisant usage de pièces de Meccano, est construit en 1934, avant une machine plus élaborée inaugurée en mars 1935³. Cependant, l'optimisme de Hartree en 1931 n'est pas totalement justifié, car même pour cette nouvelle machine particulièrement puissante pour l'époque, les équations de Fock – mais aussi de Hartree dans une moindre mesure – restent trop compliquées pour les atomes lourds.

La problématique posée par les calculs numériques est aussi mise en avant par l'obtention seulement en 1934 de résultats avec la méthode de Hartree-Fock. Ils sont le fruit de la collaboration entre Fock et Petrashen qui effectuent des calculs avec échange pour le sodium [FoPe 1934]. En 1935, ils publient aussi des résultats pour le lithium [FoPe 1935c]. À cette occasion Fock essaie aussi de proposer de nouveaux outils pour simplifier les calculs, comme les fonctions de Green⁴. On pourrait estimer que Hartree, compte-tenu de ses compétences dans le domaine des calculs numériques, aurait pu réaliser ce travail dans un temps plus court. Mais Froese Fischer le décrit comme une personne relativement timide, qui pense que Fock a la priorité sur les équations avec échange [Froe 2003, p. 71]. De plus, au début des années

¹ Lettre de Hartree à Slater, datée du 21 décembre 1931. Citée par Froese Fischer [Froe 2003, pp. 53 et 85].

² En 1929, Hartree est nommé à la chaire Beyer de mathématiques appliquées de l'Université de Manchester.

³ Sur Hartree et l'analyseur différentiel voir le chapitre huit de la biographie du Britannique par Froese Fischer [Froe 2003].

⁴ En raison de la présence d'équations différentielles inhomogènes, Fock décide de faire usage des fonctions de Green pour les calculs numériques de la méthode de Hartree-Fock [FoPe 1934]. L'aisance mathématique de Fock vis-à-vis des équations différentielles, et sa grande connaissance des différentes méthodes à sa disposition pour leur résolution le guident très certainement dans cette direction. Cependant, William Hartree reproduit plus tard les calculs pour le sodium et remarque différentes erreurs [Froe 2003, pp. 115-116]. Une approche par les fonctions de Green, bien que formellement correcte, se révèle en effet peu avantageuse pour les calculs d'un point de vue pratique [Froe 2003, p. 165].

1930, il ressent le besoin de changer de domaine d'étude¹. Toutefois, le talent de Hartree pour les calculs numériques est alors bien connu, et de nombreux physiciens lui demandent régulièrement des résultats pour divers atomes². Le Britannique ne peut complètement arrêter son travail dans le domaine de la physique atomique et continue de procéder à divers calculs, tout d'abord sans échange. Ce choix est initialement justifié par les difficultés numériques des calculs avec échanges [HaBl 1933, p. 315]. Mais il est tout à fait possible que le « mauvais »³ exemple donné par Fock et Petrashen en 1934, tout comme l'intention manifestée, autant par Léninegrad que Manchester, de collaborer et d'échanger des résultats⁴, l'encouragent à changer sa position. Il publie donc en 1935 avec son père un premier article donnant les résultats de calculs avec échange pour l'atome de béryllium [HaHa 1935b].

La difficulté des calculs se fait particulièrement ressentir lorsqu'il s'agit d'approches *ab initio*⁵, qui à l'image de la méthode de Hartree-Fock ne font appel à aucune donnée empirique à l'exception des constantes fondamentales et de la charge électronique. Comme mentionné par Park [Park 2003, p. 220-223], c'est l'une des raisons pour lesquelles la chimie quantique connaît une sorte de traversée du désert après les importantes avancées de la révolution quantique. De nombreux pionniers quittent la discipline, et les ressources humaines manquent. Bien qu'ayant un champ d'application plus large que la chimie quantique, l'approche du champ auto-cohérent aurait pu connaître une situation similaire. Mais ni Hartree ni Fock n'abandonnent leur intérêt pour le sujet, et la plupart des calculs atomiques dans les années 1930 sont exécutés sous leur patronage.

1.2. Un insaisissable nouveau phénomène : l'échange quantique

Les difficultés numériques de la méthode de Hartree-Fock, doublées des complications mathématiques évoquées au chapitre précédent avec la question du formalisme de Fock et

¹ Voir la lettre de Hartree à Slater, datée du 21 décembre 1931. Citée par Froese Fischer [Froe 2003, p. 71].

² *Ibid.* Mentionné par Froese Fischer en page 53.

³ Voir la note 4 sur les fonctions de Green en page 98. Hartree n'est alors pas conscient des erreurs concernant les calculs dans le cas de l'atome de sodium, mais il délivre explicitement un nouveau protocole de détermination des résultats dans son premier article prenant en compte l'échange [HaHa 1935b].

⁴ Ce point est souligné par Fock en 1960 dans sa préface à l'édition russe de *Calculation of atomic structures* de Hartree [Hart 1960]. Leur correspondance rend aussi cette collaboration évidente, Petrashen jouant notamment le rôle d'intermédiaire à Léninegrad – ARAN SPb, 1034-3-176 et 1034-3-738.

⁵ La dénomination « *ab initio* » est introduite par Parr, Craig et Ross en 1950 [PaCR 1950].

de Slater (I.3.4), s'accompagnent aussi de préoccupations plus conceptuelles, comme chez Brillouin :

Suivant Hartree, on écrit pour chaque électron une équation de Schrödinger ordinaire où l'on introduit un potentiel auxiliaire P [...] ; cette définition de Hartree a un sens physique clair [...]. Fock au contraire, prend pour l'ensemble des électrons, un système d'équations simultanées qui ne sont pas du type de Schrödinger ; il n'est plus possible dans ces conditions d'attribuer un sens physique simple aux divers termes d'interaction, mais l'approximation est meilleure que par la méthode de Hartree et les éléments de matrice de perturbation sont très notablement réduits [Bril 1932b, p. 566].

Lorsque Brillouin ne sait comment attribuer un « sens physique simple aux divers termes d'interaction » il fait en réalité référence à l'énergie d'échange quantique qui introduit la principale différence entre les équations de Hartree et de Fock. En 1996, Cathryn Carson consacre deux articles à cette « peculiar notion of exchange forces » [Cars 1996a ; 1996b]. L'un des points les plus remarquables de ses développements est que la notion d'échange, de son introduction initiale dans la physique atomique à son application en chimie quantique, ferromagnétisme, théorie des collisions, physique nucléaire et électrodynamique quantique, « glissait de contexte en contexte et prenait un nouveau sens à chaque étape » [Cars 1996a, p. 24]. Carson décrit l'origine du concept au cours des années 1926-1928 [Cars 1996a], avant de s'intéresser plus spécifiquement à sa trajectoire dans la physique nucléaire et en électrodynamique [Cars 1996b]. Ici, nous nous proposons de compléter ses travaux en nous concentrant sur la méthode de Hartree-Fock. Dans un premier temps, nous procédons à une étude de la compréhension du phénomène d'échange quantique par Hartree et Fock, avant, dans la prochaine section, de détailler le rôle des physiciens spécialistes de l'état solide dans sa clarification, mais aussi la façon dont cette dernière contribue à de nouvelles approches.

Comme mentionné au chapitre précédent, la notion d'échange quantique doit son nom à l'idée selon laquelle deux électrons indiscernables peuvent échanger leurs positions. Ceci est lié à la description quantique de systèmes de particules identiques, et donc au problème à plusieurs corps. Heisenberg, dans ses considérations sur ce dernier, est parmi les premiers à explorer les conséquences de l'indiscernabilité ainsi que de la résonance (échange) [Heis

1926]¹. Peu de temps après, Heitler et London appliquent les idées de Heisenberg à la molécule de dihydrogène et publient en 1927 « Wechselwirkung neutraler Atome und homöopolare Bindung nach der Quantenmechanik » (Interaction des atomes neutres et liaison homopolaire selon la mécanique quantique) [HeLo 1927]². Cet article est fondamental dans l'histoire de la chimie quantique, et influence grandement toutes considérations ultérieures sur l'échange quantique. En effet, il est couronné de succès, non seulement en raison de résultats obtenus par Heitler et London en accord avec l'expérience, mais surtout car les auteurs suggèrent une explication de la liaison chimique (non ionique). L'intégrale d'échange qui apparaît dans leurs équations a la particularité de diminuer l'énergie totale du système. Ainsi, elle peut expliquer la structure de l'énergie d'une molécule. Cette interprétation audacieuse place le phénomène d'échange au rang d'une notion fondamentale de la physique. En 1946, dans *Elementary wave mechanics*, Heitler continue de souligner le rôle joué par l'échange en chimie :

The very occurrence of the exchange charge and exchange energy is a typical result of quantum mechanics [...] The 'exchange energy' is of great importance indeed for the understanding of atomic spectra, and more still for the understanding of chemistry. The homopolar chemical bond between two atoms rests on such an exchange energy [...] the reason for the formation of a molecule is the quantum mechanical exchange phenomena [Heit 1946, pp. 80 et 106].

Dirac est parmi les physiciens qui acceptent rapidement les idées de Heitler et London sur la liaison chimique, et voient l'échange quantique comme un concept fondamental de la mécanique quantique. En 1929 il appelle à son inclusion dans la méthode de Hartree, pour sécuriser ses fondements théoriques [Dira 1929]. En 1930, encouragé par les résultats de Fock, il procède même à son inclusion dans la méthode de Thomas-Fermi [Dira 1930b]. Au cours d'une conférence qu'il donne à Manchester en novembre 1931 il déclare : « the exchange phenomena between electrons, [...] arise owing to the fact that two electrons can change their

¹ Le terme échange, « austausch », est en réalité introduit par Jordan [Jord 1927a]. Pour plus de considérations sur la notion d'échange dans le cadre du débat opposant mécanique matricielle et ondulatoire voir Carson [Cars 1996a, pp. 27-36].

² Pour des développements plus complets sur Heitler et London voir Carson [Cars 1996a], Gavroglu et Simões [GaSi 2012, pp. 12-22] et Park [Park 2009, pp. 38-42]

places without our noticing it »¹. En cela, il conçoit la situation en termes d'un véritable échange et donne du crédit à l'image utilisée par Heitler et London en 1927.

En effet, le duo participe largement à la popularisation d'une image simplifiée de l'échange, avec des électrons alternant leurs positions entre les deux noyaux d'hydrogène [Cars 1996a, p. 39]. Pour Carson : « [t]his picture of [physical] exchange was taken over by physicists and chemists who perhaps did not worry so much about the interpretation problem, but who were nonetheless pleased to have something visualizable, something intuitive, with which they could make sense of chemical bonding » [Cars 1996a, p. 42]. De plus, comme elle le souligne : « the essential features of Heitler and London's initial, interpretation-oriented depiction were preserved not only after the interpretation debate was closed, but also after their understanding, in the process, had been largely rejected » [Cars 1996a, p. 24].

En ce qui concerne plus directement la méthode de Hartree-Fock, cette image de l'échange aurait bien pu être rejetée dès 1933 grâce aux travaux de Wigner et Seitz [WiSe 1933]. Nous reviendrons plus tard sur leurs développements, mais nous pouvons déjà affirmer qu'ils rendent évident que le terme d'énergie d'échange dans les équations de Fock ne résulte en rien d'un échange physique des électrons. Cependant, dans le cas de Fock par exemple, la description imagée initiale de Heitler et London reste longtemps présente. Dans un exposé présenté à la Session de Mars de l'Académie des sciences d'URSS en 1936, Fock explique que l'énergie d'échange est une énergie purement quantique qui est la conséquence dans la méthode de Hartree-Fock du principe de Pauli, ce dernier statuant que deux électrons indiscernables peuvent échanger leurs positions [Fock 1936b]. Ce n'est qu'en 1947 qu'il se montre critique sur cette interprétation : « [...] il est difficile de concevoir pour l'opérateur A_s [l'énergie d'échange quantique] une interprétation visuelle et une dénomination. Le nom choisi 'échange quantique' est lié à une représentation des électrons soumis à une interaction proche² comme s'ils échangeaient leurs places » [Fock 1947b, p. 272]. Le travail de Wigner et Seitz est probablement la raison de ce changement d'un pur « échange » à une « interaction proche comme s'ils échangeaient leurs places », mais de façon évidente Fock semble considérer la possibilité de recourir à une interprétation « visuelle » comme utile.

¹ « Electron exchange », conférence donnée par Paul Dirac à Manchester le 11 novembre 1930 – Churchill College, Dirac papers, DRAC 2/7.

² « Proche » doit être entendu dans le sens opposé de « diffus ».

Il apparaît surtout que Fock ne cesse de valoriser l'importance de l'énergie d'échange quantique. En 1933, il lui dédie un article, où il essaie de démontrer qu'il est aussi possible d'en donner un analogue classique¹ et une généralisation relativiste [Fock 1933c]. Aussi, les résultats expérimentaux sont une façon pour le physicien soviétique de mettre l'accent sur le rôle de l'échange quantique. Pour le lithium, Fock et Petrashen [FoPe 1935c] montrent que l'inclusion de l'échange non seulement diminue l'erreur pour l'énergie calculée de 10% (avec la méthode de Hartree) à 1%, mais aussi que l'on obtient des résultats satisfaisants pour les probabilités de transitions. Plus encore, relativement à ces derniers calculs, Fock estime : « we shall consider as a theoretical determination of a given physical property of an atom its calculation by means of the mathematical methods of quantum mechanics » [FoPe 1935c, p. 553]. Par ce biais, il affirme que l'énergie d'échange quantique est une composante essentielle de la structure mathématique de la méthode de Hartree-Fock en vue d'une définition correcte des propriétés physiques d'un atome.

Il est alors intéressant de considérer certaines vues générales de Fock sur la physique pour clarifier son interprétation de l'échange quantique. En 1936, il discute dans un article « la signification fondamentale des méthodes d'approximation en physique théorique » [Fock 1936d]. Pour Fock, « les équations de la physique théorique ne peuvent jamais être absolument exactes » [p. 1070]. Par conséquent, il considère dans cet article toute théorie physique comme une « approximation ». Son but est alors de discuter la formation des notions physiques. Fock rappelle alors que durant la transition d'une théorie dite particulière vers une plus générale – la théorie particulière est incluse dans la plus générale comme un cas particulier – il y a une introduction de nouvelles notions physiques. Mais il met aussi l'accent sur le rejet de vieilles notions physiques qui a lieu au cours de ce processus. Ainsi, il introduit un nouveau point de vue, illustré par la notion de simultanéité : dans la transition de la mécanique de Newton à la relativité d'Einstein, « la simultanéité devient une notion approximative » [p. 1071]. La simultanéité a un sens clair et bien défini en mécanique newtonienne ; elle peut seulement être approximée dans le cadre physique posé par Einstein.

¹ Même si basé initialement par Heisenberg sur une analogie classique, l'échange quantique se trouve être un phénomène purement quantique. La question de savoir s'il a un analogue classique influence beaucoup les débats sur sa compréhension. Voir Carson pour Heisenberg [Cars 1996a] et Park pour le rôle joué par cette question chez Heitler et London [Park 2009, p. 41].

Fock propose alors de suivre le processus de formation des notions dans le sens opposé des développements historiques d'une théorie, afin de montrer que pour chaque simplification, pour chaque approximation, de nouvelles notions physiques apparaissent. C'est exactement le cas lorsque l'on approxime le problème à plusieurs corps dans la théorie de Schrödinger à l'aide de la méthode de Hartree-Fock. Alors, deux nouvelles notions physiques apparaissent : que les électrons dans un atome possèdent aussi des états individuels – ce qui est à la base du modèle orbital de l'atome – et l'énergie d'échange quantique. Ainsi, pour Fock, l'apparition de la seconde n'a rien de curieux étant donné qu'elle est le résultat d'un processus régulier de création des notions physiques. Par conséquent, la validité et la formulation de l'échange quantique ne sont pour lui en rien sujettes à discussion dans le cadre du problème quantique à plusieurs corps. Ce phénomène peut être considéré dans ce contexte comme une notion fondamentale.

Ce raisonnement souligne aussi une particularité de l'échange quantique : c'est une notion indéfinissable à la fois dans la mécanique classique et dans la théorie – non approximée – de Schrödinger. Autrement dit, elle apparaît *tout autant* si l'on considère la transition de la mécanique classique, comme théorie particulière, vers une théorie plus générale (la mécanique quantique), *que lors* de l'approximation de cette dernière. Un commentaire historique de Slater en 1975 donne plus de poids à ce problème : « for some time the binding was considered as a mysterious thing, coming from a nonclassical quantity, the exchange integral, which could not be given any ordinary physical meaning » [Slat 1975, p. 93]. De ce point de vue, pour certains, le phénomène peut être considéré comme une notion sujette à débats.

Hartree est justement l'un des scientifiques qui est réticent vis-à-vis de l'échange quantique. Nous n'avons connaissance de son scepticisme sur la question qu'à partir de manuscrits non publiés et non datés. Le premier est un projet de livre intitulé « Mechanics » et préparé avec Swirles. Dans un chapitre dédié aux systèmes à plusieurs particules dans la mécanique quantique, il écrit au sujet des intégrales d'échange :

[...] but it must be remembered that to think of the system in terms of such one-electron wave functions at all is an approximation only, and the appearance of this integrals [sic] is a property of this approximation, not an essentially quantum-mechanical phenomenon¹.

Pour Hartree, l'équation exacte de Schrödinger est la seule capable de représenter les véritables phénomènes quantiques. Il ne considère les effets de l'échange que comme des artefacts du processus d'approximation. Un autre manuscrit non daté intitulé « Quantum mechanics of many-electron systems » répète cette idée². Il y cite Heitler, les mêmes citations de *Elementary Wave Mechanics* publié en 1946 susmentionnées par nous dans cette partie [Heit 1946]. Cela indique qu'Hartree conserve dans le temps sa position critique concernant l'échange quantique. En effet, il commente : « This is all wrong, and is elevating into a fundamental principle what is really an accidental result of the particular approximation which with our limited facilities we find it convenient to make. In an accurate treatment it would find no place »³. Ainsi, contrairement à Fock qui voit en toutes théories une approximation, qui ne les hiérarchise pas selon un critère de validité et qui ne les subordonne pas à une théorie exacte – la seule hiérarchisation introduite par le soviétique est celle de la généralité d'une théorie –, Hartree oppose très clairement le caractère approximatif de la méthode de Hartree-Fock, à celui exact de la théorie de Schrödinger.

Dès 1933, dans son article concernant l'application à l'atome d'oxygène de la méthode du champ auto-cohérent sans échange, Hartree considère :

So a better result [...] would hardly be expected even if [...] the one-electron wave functions were calculated by the solution of Fock equations instead of by those of the self-consistent field [...], and it seems satisfactory that the differences between the calculation and the observation are not larger [HaBl 1933, pp. 332-333].

Plus tard, ses premiers travaux avec échange le convainquent d'inclure le phénomène dans son programme en raison de l'amélioration des résultats calculés en comparaison avec l'expérience [HaHa 1935b]. Toutefois, Hartree reste critique, notamment car les valeurs

¹ « Introduction to wave mechanics », partie de *Mechanics*, un manuscrit non daté et non publié de Hartree et Swirls. Christ's College, Papers of Hartree, Box 157iii (11).

² « Quantum mechanics of many-electron systems », manuscrit non daté de Hartree. Christ's College, Papers of Hartree, Box 157v (21).

³ *Ibid.*

obtenues dans les calculs de l'énergie d'ionisation ne sont pas satisfaisantes. Il commente alors :

So that, as far as one can judge from the present results, it seems that the inclusion of exchange terms improves the wave function considerably though not in a way which has much effect on the energy: this is rather surprising in view of the use of the energy as the criterion for the 'best' wave function of the kind assumed [HaHa 1935b, p. 32].

Hartree considère comme sa mission de trouver la « meilleure » fonction d'onde dans le problème à plusieurs corps. « Meilleure » doit ici être compris dans le sens du compromis entre « faisabilité et précision » qu'il cherche à atteindre et qui est mis en avant par Park dans ses considérations sur les impératifs computationnels en chimie quantique [Park 2009]. Si Hartree décide d'inclure l'échange à ses calculs avec le champ auto-cohérent, c'est uniquement car il considère que l'amélioration obtenue en termes de précision est aussi acceptable du point de vue de la complexification calculatoire.

Les pères fondateurs de la méthode de Hartree-Fock ont des idées très différentes sur l'échange quantique. Néanmoins, on peut toujours observer un point commun : l'idée qu'aucune investigation théorique supplémentaire n'est nécessaire à son sujet dans le cadre de la méthode. Pour Hartree, cela est rendu évident par le fait qu'il le considère comme un artefact en physique. De plus, comme mentionné par Simões et Gavroglu, Hartree fait partie d'une tradition britannique qui reformule les problèmes de la chimie quantique comme des problèmes de mathématiques appliquées. Ainsi, il participe à la progressive « dé-conceptualisation » de la chimie quantique [SiGa 2000, p. 543]. En ce qui concerne Fock, du peu d'intérêt que suscite chez lui le programme de travail de Hartree dans les années 1930, mais aussi de sa volonté – développée dans le premier chapitre (I.3.5) – de réaffirmer les bases théoriques de ses travaux de 1930, on peut estimer qu'il considère simplement la méthode de Hartree-Fock comme complète et consistante dès son origine. De plus, il n'y a aucune nécessité pour lui de discuter l'apparition d'un concept qui a toute sa place dans son cadre de pensée général sur les sciences [Fock 1936d]. Par conséquent, ni Hartree ni Fock ne sont des participants actifs du processus qui permet d'apporter au phénomène d'échange, dans le cadre de la méthode du champ auto-cohérent, une clarification conceptuelle.

1.3. 1951 : bilan et nouvelles perspectives

Cette clarification conceptuelle de la notion d'échange a lieu durant les années 1930 et provient de physiciens travaillant sur des problèmes de physique de l'état solide. Cependant, nous souhaitons la présenter dans un contexte différent, et plus particulièrement l'année 1951. En effet, celle-ci permet de mettre en avant la situation de la méthode de Hartree-Fock à l'aube de l'ère des ordinateurs. Alors que la Seconde Guerre mondiale détourne les physiciens des travaux sur l'étude de la structure de la matière, l'une des plus significatives avancées de cette période est le développement des ordinateurs. Ces derniers changent profondément la façon dont les scientifiques abordent leurs différentes disciplines. De plus, dans les années qui suivent la guerre, la physique de l'état solide et la chimie quantique connaissent une importante croissance institutionnelle ainsi qu'une complète réorganisation¹. La conférence de Shelter Island de 1951 est notamment un événement fondateur de la chimie quantique². En cette même année, Slater publie aussi un article qui résume l'état de la connaissance sur la méthode de Hartree-Fock, et qui devient également un point de départ pour de futurs développements [Slat 1951a]. C'est donc sur ces différents points que nous nous appuyons dans la présente partie.

Au début des années 1950, Slater joue un rôle majeur d'un point de vue scientifique mais aussi institutionnel. Au Massachusetts Institute of Technology il organise et dirige un groupe de recherche appelé le « Solid State and Molecular Group »³. L'ambition de Slater est alors la suivante « Our purpose is to take the quantum take the quantum theory of atoms, molecules and solids out of the semi-empirical form which it has largely followed since the development

¹ Sur l'impact de la seconde Guerre Mondiale, les aspects institutionnels et le rôle des ordinateurs en physique de l'état solide voir Hoddeson et al. [Hodd 1992]. Pour la chimie quantique voir Gavroglu et Simões [GaSi 2012]. Plus d'informations sur l'informatique et la chimie quantique avec Park [Park 2003].

² Cette conférence ne doit pas être confondue avec la première Conférence de Shelter Island sur les fondements de la mécanique quantique, tenue pour sa part en juin 1947, qui joue un rôle majeur dans les développements d'après-guerre en théorie des champs quantiques. Voir Schweber [Schw 1994, pp. 156-205].

³ Pour plus d'informations concernant le « Solid State and Molecular Theory Group », mais aussi sur le rôle de Slater dans la restructuration de la physique aux Etats-Unis voir Schweber [Schw 1986 ; 1990]. On peut aussi consulter Morse [Mors 1982].

of wave mechanics and to proceed as rapidly as possible to put it on a quantitative basis »¹. Il prépare pour les étudiants deux articles qui soulignent ce qu'il considère comme les principaux problèmes alors en jeu [Slat 1951a ; 1951b]. Le premier concerne le problème de l'échange quantique qu'il décide de traiter dans le cadre de la méthode de Hartree-Fock. Ce travail est partiellement motivé par le problème persistant des difficultés numériques :



Figure 7. John Clarke Slater (1900-1976)
[Niels Bohr Archive].

I realized this shortcoming [the incapacity to deal with heavy atoms or molecules] of the standard methods which they [chemists] are using when I decided, way back in the 1930s, that it was absolutely necessary to get a different type of approach going, an approach which would handle heavy atoms as easily as light ones [Slater 1975, p. 328].

Dans son article de 1951, Slater fait la proposition suivante : « to examine their [the Hartree-Fock equations] meaning sufficiently closely so that we can see physically how to set up a simplification, which still preserves their main features » [Slat 1951a, p. 385]. Une simplification qui pourrait être facilement applicable aux atomes lourds, mais aussi aux

molécules et solides. Les développements de l'Américain ont pour origine une analyse précise des équations et une meilleure compréhension du phénomène d'échange quantique. Ils nous aident à mettre en avant l'ensemble des étapes conceptuelles et mathématiques suivies par la méthode de Hartree-Fock à partir de son exposition par Fock en 1930.

La simplification à laquelle procède Slater est fortement inspirée par de précédents travaux, en particulier par Wigner et Seitz, qui avaient appliqué la méthode du champ auto-cohérent aux cristaux [WiSe 1933 ; 1934]. La façon dont Wigner et Seitz traitent du potentiel dans leurs recherches est particulièrement intéressante. Considérons un électron de spin

¹ Koster G., *Remarks at the Slater Memorial Session* le 7 février 1977, American Physical Society, Chicago. Cité par Morse [Mors 1982 ,p. 307].

positif dans un ensemble de N électrons. Dans ce système on considère qu'il y a une répartition de $\frac{N}{2}$ électrons de spin négatif, et $\frac{N}{2} - 1$ autres électrons de spin positif. La densité électronique des électrons de spin négatif est juste la moitié de la densité électronique des électrons dans le cristal. Mais pour les électrons de spin positif l'intégrale de densité est seulement pour $\frac{N}{2} - 1$ électrons. Par conséquent, si on considère qu'à distance de l'origine – l'électron étudié – la densité des deux groupes est égale, près de l'origine il y a un défaut de charge de spin positif. Les auteurs baptisent cela un trou de Fermi, car il implique la statistique de Fermi [WiSe 1934, p. 510]. Il est considéré comme sphérique et délimitant une zone où aucun autre électron de spin positif ne peut être trouvé. Avec le trou de Fermi, une interprétation plus précise de l'échange quantique dans le problème à plusieurs corps est possible. Bien que généralement appelé effet d' « échange » il garde en réalité séparés deux électrons de même spin. Tout se passe comme si l'électron qui nous intéresse générait une force répulsive, dont le terme d'échange est le potentiel.

Wigner et Seitz redéfinissent ainsi la signification physique de la notion d'échange pour la méthode de Hartree-Fock, et leurs travaux s'imposent rapidement en physique de l'état solide. Cependant, ce genre de considérations n'est pas présent du tout dans les travaux de Fock et de Hartree. De son côté, Slater est actif en physique de l'état solide dans les années 1930. Dès 1934 il reprend les idées de Wigner et Seitz dans ses travaux en théorie des bandes pour les métaux [Slat 1934]. À nouveau concerné par l'étude des structures atomiques et moléculaires au début des années 1950 il est naturel qu'il en fasse de même dans ce cas de figure.

Dans son article de 1951 Slater suggère alors une version généralisée des équations de Hartree-Fock :

$$H_1 u_i(x_1) + \left[\sum_{k=1}^N \int u_k^*(x_2) u_k(x_2) \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_{12}} \right) dx_2 \right] u_i(x_1) - \sum_{k=1}^N \left[\int u_k^*(x_2) u_i(x_2) \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_{12}} \right) dx_2 \right] u_k(x_1) = E_i u_i(x_1)$$

La structure de cette équation est équivalente aux équations de Fock, à l'exception du spin qui est intégré comme une coordonnée. Le premier terme est l'énergie cinétique de l'électron étudié plus son énergie potentielle dans le champ des noyaux. Le second terme représente l'énergie potentielle de Coulomb de toutes les charges électroniques agissant sur l'électron

étudié, ce dernier étant aussi inclus. Slater commente alors le troisième terme, le terme d'échange, expliquant que « it must somehow correct for the fact that the electron does not act on itself, which it would be doing if this term were omitted » [Slat 1951a, p. 386]. Hartree avait lui-même inclus une correction pour prendre en compte le fait qu'un électron n'agit pas sur lui-même [Hart 1928b, p. 113], et Fock avait eu un commentaire similaire à celui de Slater sur l'échange quantique [Fock 1930a, p. 145]. Cependant, ils ne pouvaient aller plus loin, et c'est notamment à partir de l'inclusion du spin comme coordonnée que Slater obtient un important résultat : « The integrations over dx_2 include summation over spin, so that the exchange terms, the last ones on the left side [...], automatically vanish unless the functions u_i and u_k correspond to spins in the same direction » [Slat 1951a, p. 386]. Par conséquent, le terme d'échange ne concerne que des électrons de même spin, et Slater peut facilement l'assimiler à un trou de Fermi, comme l'ont fait Wigner et de Seitz avant lui. Le physicien américain l'appelle pour sa part un « exchange hole » [Slat 1951a, p. 386]. Dans la formulation de Fock, la séparation des variables, qui écarte le spin des équations, ne permet pas de suivre un raisonnement aussi évident.

Slater mentionne que le trou de Fermi obtenu dépend de l'électron étudié, et c'est la raison principale des complications générées par les équations de Fock. Pour résoudre ce problème, l'Américain propose de construire une densité de charge d'échange moyenne (« average exchange charge density ») à utiliser pour tous les électrons :

$$-\frac{\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N u_j^*(x_1) u_k^*(x_2) u_k(x_1) u_j(x_2)}{\sum_{j=1}^N u_j^*(x_1) u_j(x_1)}$$

Nous avons alors les équations de Hartree-Fock suivantes :

$$H_1 u_i(x_1) + \left[\sum_{k=1}^N \int u_k^*(x_2) u_k(x_2) \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_{12}} \right) dx_2 - \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \int u_j^*(x_1) u_k^*(x_2) u_k(x_1) u_j(x_2) \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_{12}} \right) dx_2}{\sum_{j=1}^N u_j^*(x_1) u_j(x_1)} \right] u_i(x_1) = E_i u_i(x_1)$$

La nouvelle charge d'échange moyenne reste dans la forme suggérée par les équations de Fock. Cependant, cette approximation statistique, avec un unique terme d'échange pour tous les électrons, est particulièrement intéressante pour la manipulation des équations. C'est

notamment sur cette base que Herman et Skillman publient en 1963 un premier jeu complet de solutions pour le champ auto-cohérent avec échange, concernant l'ensemble des atomes neutres jusqu'au Lawrencium de numéro atomique 103 [HeSk 1963]. L'article de Slater est aussi suivi de différents travaux théoriques et remarquons en particulier que ce raisonnement est à la base d'une nouvelle méthode, appelée méthode $X\alpha$, qui à partir des années 1960 donne lieu à de nombreuses applications¹.

En 1951, Slater prend aussi part à la Conférence de Shelter Island qui réunit 25 physiciens et chimistes pour discuter de l'état actuel des méthodes de la mécanique quantique concernant la théorie de la valence². La conférence participe à la consécration de la chimie quantique comme discipline à part entière. Les scientifiques joignent leurs efforts en vue de l'amélioration des méthodes d'approximation et de la clarification de certains concepts de la chimie, mais se penchent aussi sur la question des techniques numériques et décident d'échanger des informations entre eux. La méthode de Hartree-Fock est parmi les sujets les plus discutés durant la conférence, tout comme la question de la configuration d'interaction³. Nous avons mentionné que l'échange quantique est un effet produit par des électrons de même spin. Cependant, durant les années 1930, l'existence d'un effet similaire pour des électrons de spins différents est aussi établie. Il est appelé « effet de corrélation » ou « corrélation électronique ». H. M. James et A. S. Coolidge, dans leurs travaux sur l'hydrogène, montrent que la probabilité de trouver un électron de spin négatif près d'un électron de spin positif est plus faible que la probabilité moyenne à grande distance de l'électron, mais non nulle [JaCo 1933]. Cela est alors confirmé par Wigner et Seitz qui mènent des investigations sur l'effet de corrélation dans le cas des cristaux [WiSe 1934]. Dans le même temps, il est rendu évident que c'est l'interaction de configuration qui est la plus apte à donner une description de l'effet de corrélation.

Dès les années 1930 il est donc évident que les scientifiques ont déjà conscience du fait que la méthode de Hartree-Fock est d'une précision limitée, particulièrement car elle n'est

¹ Sur la méthode $X\alpha$ voir Slater [Slat 1974 ; 1975] et Connolly [Conn 1977]. Chaque source place l'article de 1951 à la base de réflexions conduisant à la méthode $X\alpha$ qui reprend l'idée d'une approximation statistique.

² Sur la conférence de Shelter Island voir Park [Park 2003, pp. 225-229], ainsi que Gavroglu et Simões [GaSi 2012, pp. 202-208].

³ Reprendre nos considérations du chapitre précédent (I.3.5).

pas capable de reproduire la corrélation entre les électrons¹. En effet, comme mentionné auparavant, le terme d'échange dans les équations de Fock disparaît dans le cas d'électrons de spins différents. C'est à partir du témoignage de Slater qu'on apprend que c'est seulement à la suite du physicien suédois Per-Olov Löwdin, et notamment des discussions engagées à Shelter Island, qu'il devient coutumier de faire référence à l'énergie de corrélation comme la différence d'énergie entre la solution exacte de l'équation de Schrödinger et la solution de Hartree-Fock². L'intention affichée par Hartree dans les années 1930 d'inclure l'interaction de configuration à la méthode originale de Hartree-Fock se révèle alors fondée. Et de nos jours, les différentes méthodes qui poursuivent cet objectif sont regroupées sous l'étiquette de méthodes « post-Hartree-Fock ».

1.4. Conclusion intermédiaire

Au début des années 1950, la révolution informatique à venir, mais aussi la montée de la chimie quantique comme une discipline indépendante, favorisent grandement la renaissance des approches dites *ab initio*³. La méthode de Hartree-Fock, connue dès le début des années 1930 comme un outil efficace dans le traitement théorique des structures atomiques, se voit alors appliquée de façon extensive. Le rôle majeur joué par les ordinateurs a longtemps laissé l'impression que durant deux décennies, d'une méthode théoriquement bien établie à son application effective, l'activité des scientifiques sur le sujet était minimale. Cependant, comme nous le voyons maintenant, la méthode de Hartree-Fock est un domaine de recherche particulièrement vivant durant cette période.

Notre étude, initialement conçue comme une investigation de considérations conceptuelles concernant la méthode du champ auto-cohérent, met aussi en avant le rôle du formalisme mathématique dont les différentes variantes – Fock et Slater – offrent des interprétations physiques variées. Nous avons porté notre attention sur les acteurs, leurs motivations et leurs approches conceptuelles. Fock et Hartree, acteurs complémentaires de l'élaboration de la méthode, s'opposent sur ces derniers points. L'approche utilitariste du

¹ Wigner et Seitz le mentionnent clairement : « [...] such correlations [between antiparallel spin] [...] lie beyond the scope of Fock's equations » [WiSe 1934, p. 510]. Voir aussi Seitz [Seit 1940, pp. 227-253] et Slater [Slat 1963].

² Voir Slater [Slat 1963 ; Slat 1975, pp. 249-251]. Le lecteur peut aussi consulter Löwdin sur la corrélation électronique [Löwd 1995].

³ Voir Park [Park 2003, p. 229].

problème par Hartree le conduit à constamment affiner les méthodes de calcul mais aussi à chercher à atteindre le meilleur accord possible avec les résultats de l'expérience. Fock reste lui concentré sur la nécessité d'assurer les fondements théoriques et mathématiques de la méthode. Ces points de vue respectifs les ont, semble-t-il, mis à l'écart de la nécessité de clarifier le rôle du phénomène d'échange quantique dans la méthode de Hartree-Fock. De son côté, Slater, des années plus tard, est alors en mesure de faire usage de ces clarifications en vue d'une simplification de la méthode.

Jeremiah James et Christian Joas, avec une attention toute particulière aux années 1926-1928, mettent en évidence la relation étroite entre les applications de la mécanique quantique et sa compréhension théorique [JaJo 2015]. Notre étude de cas illustre et prolonge leurs propos. En plus des considérations de Slater et de Fock sur le formalisme mathématique, la clarification de notions comme l'échange et la corrélation électronique sont aussi des conséquences de l'application de la méthode de Hartree-Fock. Ainsi, le rôle de cette dernière par sa contribution directe au formalisme et à la compréhension conceptuelle de la mécanique quantique explique en partie sa bonne réception, sa diffusion, et durant l'ère informatique, ses succès.

Après ces considérations spécifiques à notre étude de la méthode de Hartree-Fock, il convient de tirer les conséquences de cette enquête sur le sujet de notre thèse, Fock en personne. Nous avons pu noter que le scientifique russe, au-delà d'une pratique de la physique résolument portée vers l'investigation du formalisme mathématique, prend aussi du recul sur sa discipline et est en mesure de développer un discours plus général, épistémologique, sur la formation des concepts, le rôle des approximations, le passage d'une théorie à une autre. C'est vers une clarification de ce discours jusqu'à présent seulement effleuré, que nous souhaitons nous diriger maintenant. Les questions qui se posent dorénavant à nous sur la base des propos de Fock sur l'échange quantique concernent pour l'essentiel la position philosophique à adopter sur les connexions entre théories, leur hiérarchie. Nos commentaires sur l'émergence de la chimie quantique comme une discipline indépendante, bien que fortement liée à la physique théorique, nous invitent aussi à nous poser la question à une autre échelle, celle des disciplines. Il existe un concept philosophique qui pose au mieux ces questions : le réductionnisme.

2. Réductionnisme et physique moderne

The general theory of quantum mechanics is now almost complete, the imperfections that still remain being in connection with the exact fitting in of the theory with relativity ideas. These give rise to difficulties only when high-speed particles are involved, and are therefore of no importance in the consideration of atomic and molecular structure and ordinary chemical reactions, in which it is, indeed, usually sufficiently accurate if one neglects relativity variation of mass with velocity and assumes only Coulomb forces between the various electrons and atomic nuclei. The underlying physical laws necessary for the mathematical theory of a large part of physics and the whole of chemistry are thus completely known, and the difficulty is only that the exact application of these laws leads to equations much too complicated to be soluble. It therefore becomes desirable that approximate practical methods of applying quantum mechanics should be developed, which can lead to an explanation of the main features of complex atomic systems without too much computation [Dirac 1929, p. 714]

Jamais, probablement, historiens et philosophes de la chimie n'ont autant fait référence à une citation. Extraite de l'introduction par Dirac de « Quantum Mechanics of Many-electron Systems » publié en 1929, elle est utilisée comme une sorte de pied de nez historique, pour signifier qu'à contrecourant des attentes prêtées au grand physicien qu'est Dirac, la chimie a su se développer en une discipline autonome et indépendante de la physique¹. Et c'est notamment le constat qui a été le nôtre en observant après la Seconde Guerre mondiale la nouvelle dynamique connue par la communauté des chimistes quantiques.

La question fondamentale qui sous-tend les propos de Dirac est celle de la réduction de la chimie à la physique². En effet, au sens le plus large, le réductionnisme doit être compris comme la position selon laquelle une théorie, un concept ou un domaine de discours, peut être absorbé ou subsumé par un autre. C'est donc une position philosophique qui joue un rôle fondamental dans l'étude des relations interthéoriques, problématique que nous avons déjà identifiée dans le discours de Fock relatif à la notion d'échange quantique. Par conséquent,

¹ De façon non exhaustive, parmi les références croisées au cours de nos recherches, on peut mentionner Gavroglu et Simões [SiGa 2000, p. 541 ; GaSi 2002, p. 192 ; 2012, p. 9] et Park [2009, p. 33], mais le lecteur peut surtout consulter Simões [Simõ 2002] qui étudie de façon spécifique l'emploi de cette citation par les chimistes et les raisons de sa popularité chez les historiens et philosophes de nos jours.

² Pour une discussion technique de la question du réductionnisme de la chimie à la physique, voir les développements de Hans Primas dans *Chemistry, Quantum Mechanics and Reductionism* [Prim 1981].

avant d'en discuter la place dans la pensée de Fock, il nous semble essentiel d'explicitier et de contextualiser les enjeux relatifs à la question du réductionnisme. Nous nous proposons donc ici de poser quelques considérations générales sur cette position philosophique, mais aussi d'introduire les débats qui lui sont relatifs et les concepts à la base de son courant opposé, l'antiréductionnisme. Enfin, nous discuterons le rôle que cette question joue dans la physique théorique en général, mais aussi dans le domaine de la mécanique quantique chez les contemporains de Fock.

2.1. Réductionnisme – Définitions

Un rapide aperçu de différentes ressources à notre disposition nous montre, en raison de leur inhomogénéité, toute la difficulté à pouvoir clarifier et classer les différentes manières possibles de concevoir la nature des relations de réduction [Mala 2011 ; Ney s. d. ; Pach 2006 ; RiGu 2014 ; Sart s. d. ; Thom s. d.]. Cette difficulté, soulignée par Ernest Nagel dès 1935, mais aussi Ernst Mayr en 1988 ou Sahotra Sarkar en 1992, a connu différentes tentatives de clarification par ces mêmes auteurs [Nage 1935 ; Mayr 1988 ; Sark 1992]. Les variantes, notamment terminologiques, étant nombreuses, nous faisons ici le choix de nous baser sur une distinction notamment mise en avant par Ayala en 1974 [Ayal 1974] et reprise par Malaterre et Sartenaer [Mala 2011 ; Sart s. d.]. Cette dernière, qui distingue réductionnisme épistémologique, ontologique et méthodologique, a l'avantage de s'écarter suffisamment d'un discours purement philosophique, technique et argumentatif sur les modalités du processus de réduction des théories, pour permettre une classification plus proche des pratiques scientifiques elles-mêmes.

Pour illustrer cela, considérons les limites de la notion de réductionnisme méthodologique. Cette forme de réductionnisme questionne la stratégie de recherche, la méthode d'acquisition du savoir. Sa thèse est que les procédures ou méthodes appliquées à un domaine de recherche sont réductibles aux procédures ou méthodes d'un autre domaine de recherche. De plus, les réductionnistes soutiennent que la méthode la plus adéquate dans le travail scientifique, quel que soit le sujet, est de décomposer un objet d'étude complexe en ses parties constitutives – théoriquement jusqu'au stade de l'atome – pour ensuite reconstruire sur la base de l'étude de ces différentes parties une compréhension générale de l'objet¹.

¹ Sur cette procédure comme une stratégie scientifique généralisée voir Betchel et Richardson [BeRi 2010].

Cette décomposition méthodologique peut notamment servir les intérêts du réductionnisme ontologique qui de façon générale considère les entités qui composent le monde nous entourant. Celles-ci – objets, propriétés, processus, événements ou lois de la nature –, appartenant à un certain niveau d'organisation, seraient systématiquement réductibles à des entités d'un niveau d'organisation inférieur. Oppenheim et Putnam donnent en 1958 une classification de ces niveaux d'organisation – du plus au moins complexe – qui est couramment reprise dans la littérature : groupes sociaux, organismes multicellulaires, cellules, molécules, atomes, et enfin particules élémentaires [OpPu 1958, p. 9]. On peut aussi distinguer deux courants du réductionnisme ontologique en fonction de la nature des entités qu'elle étudie. Le premier se concentre directement sur celles-ci, c'est le réductionnisme des substances, alors que le second est un réductionnisme de leurs propriétés.

Pour sa part, le réductionnisme épistémologique s'intéresse plus spécifiquement à l'état de la connaissance, à nos modalités de représentation du monde. Ce sont les concepts, modèles ou théories qui sont alors considérées comme réductibles d'un niveau d'organisation à un autre. Au sein même du réductionnisme épistémologique il convient cependant d'introduire une distinction supplémentaire, avec d'une part le réductionnisme diachronique – aussi appelé homogène – et d'autre part le réductionnisme synchronique – hétérogène [Ande 2001, p. 154 ; Pach 2006 ; Sart s. d.]. Le premier renvoie aux relations entre théories concernant un même objet d'étude. Il prend alors une dimension historique, comme dans le cas du passage de la mécanique newtonienne à la théorie de la relativité d'Einstein, mais aussi de la mécanique classique à la mécanique quantique dans le sens où elles traitent de la question du mouvement. Dans le second, les théories portent sur des objets différents, appartenant à divers niveaux d'organisation. C'est par exemple le cas de la réduction de la chimie quantique à la mécanique quantique, la première traitant des molécules, la seconde des atomes. Le réductionnisme épistémologique, et en particulier sa version synchronique, pose alors la question de l'unité des sciences et de l'existence d'une théorie unique et fondamentale apte à décrire l'ensemble des connaissances du monde¹.

¹ Voir notamment Oppenheim et Putnam [OpPu 1958] ou encore Carnap [Carn 1955] sur la question de l'unité de sciences. Dans leur ouvrage dédié à la question du réductionnisme en sciences naturelles, Chibbaro, Rondoni et Vulpiani soulignent le caractère évidemment lié de l'idée d'unification avec le développement de celle de réductionnisme, notamment d'un point de vue historique [ChRV 2014, pp. 21-27].

Pour certains, comme Thomas Nagel¹, ce que sous-tend le réductionnisme, c'est que « la physique est la théorie du tout » [Nage 1998, abstract]. En effet, de façon générale, on peut constater que la hiérarchie évoquée par les différentes formes de réductionnismes ouvre la voie à la considération que toutes les connaissances sont réductibles aux énoncés de la physique. Dans sa forme la plus radicale cette thèse a pour nom le physicalisme. Le langage de la physique est considéré comme le langage universel de la science, toute connaissance pouvant être exprimée dans un rapport aux énoncés sur les objets physiques². Il convient aussi de rappeler que non seulement dans le cas du physicalisme, mais bien souvent pour l'ensemble des thèses réductionnistes, le cadre strict des sciences naturelles est dépassé pour englober aussi à leur tour les sciences humaines et sociales³.

2.2. Emergence, incommensurabilité : concepts de l'antiréductionnisme

Alors que le physicalisme se fait une place particulière dans les discussions philosophiques du Cercle de Vienne, sous l'impulsion notamment d'Otto Neurath qui le défend dès 1931 [Neur 1931], les débats modernes⁴ sur le réductionnisme trouvent généralement leur origine dans l'analyse des conditions formelles de réduction par un autre positiviste logique, Ernest Nagel. Ses écrits de référence sur le sujet sont un essai en 1949, « The meaning of Reduction in the Natural Sciences » [Nage 1949], et un livre en 1961, *The Structure of Science* [Nage 1961]. Nagel y développe une approche déductive de la réduction qui lui confère une dimension explicative. En effet, elle est : « the explanation of a theory or set of experimental laws established in one area of inquiry, by a theory usually though not invariably fomulated for some other domain » [Nage 1961, p. 338]⁵. Ainsi, c'est ici principalement le cas du

¹ Ne pas confondre avec Ernest Nagel dont nous développons davantage les idées par la suite.

² Sur le physicalisme, ses variantes, et notamment des considérations sur ses origines dans le Cercle de Vienne, voir la définition donnée par Sebestik dans le *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences* [Sebe 2006].

³ Pour une discussion des thèses du réductionnisme dans le cadre des sciences humaines et sociales voir notamment les développements de Putnam concernant la psychologie [Putn 1973] ou encore de Kim en philosophie de l'esprit [Kim 1993].

⁴ Pour plus de développements sur ces débats voir Andersen [Ande 2001], Pacherie [Pach 2006], Kistler [Kist 2007] ou encore Chibbaro, Rondoni et Vulpiani [ChRV 2014, pp. 21-44].

⁵ *Ibid*, pour plus de considérations sur le « modèle » de réduction de Nagel.

réductionnisme épistémologique qui est discuté, et c'est celui qui est généralement au cœur des débats.

Au-delà de la mise au point de modèles alternatifs à la position tenue par Nagel, ce qui nous intéresse ici est de présenter les principaux arguments mis en avant par ceux qui contestent ses thèses. Le courant traditionnellement opposé au réductionnisme est le holisme¹. De façon synthétique, cette position philosophique estime qu'un « tout » (phénomène, système, théorie, société...) est un ensemble indivisible et qu'en opposition au réductionnisme, la somme de ses parties ne permet pas de le définir. Il nous semble cependant que le holisme n'autorise pas une réflexion sur les liens entre différents niveaux d'organisation et c'est pourquoi dans nos développements nous préférons l'idée d'antiréductionnisme, qui apporte une réponse directe et en miroir aux problématiques du réductionnisme.

Nous souhaitons mettre en avant deux concepts essentiels à l'antiréductionnisme que sont l'émergence et l'incommensurabilité. L'émergence est un concept philosophique qui exprime la possibilité d'apparitions de propriétés, de concepts, d'objets, etc., dont la connaissance intégrale est irréductible, et ne se déduit par conséquent pas de ses composants fondamentaux. À l'image du réductionnisme, l'émergence se décline sous différentes formes. Elle est ontologique ou épistémologique, mais aussi diachronique ou synchronique². Il faut aussi distinguer l'émergence faible et l'émergence forte³. L'émergence faible s'applique à un phénomène dont l'apparition dans un niveau d'organisation plus complexe est *inattendue* compte tenu des principes du niveau inférieur. Dans l'émergence forte, cette apparition n'est pas *déductible*. Ce second cas de figure est bien évidemment plus restrictif.

L'émergence est une notion largement antérieure aux débats modernes sur le réductionnisme, et le terme fait explicitement son apparition dans un sens philosophique à la fin du XIX^e siècle en Grande-Bretagne⁴. Mais il est particulièrement réinvesti après la Seconde

¹ Sur l'opposition entre les deux courants de pensée voir Largeault [Larg s. d.].

² Pour une discussion du concept d'émergence voir Kim [Kim 2006], Kistler [Kist 2007] ou Chibbaro, Rondoni et Vulpiani [ChRV 2014, pp. 34-37] mais aussi l'entrée « Emergent Properties » de la *Stanford Encyclopedia of Philosophy* [O'Co 2015].

³ Cette distinction est notamment discutée avec beaucoup de clarté par Chalmers [Chal 2006].

⁴ Sur le contexte historique le lecteur peut consulter O'Connor [O'Co 2015] mais aussi Goldstein [Gold 1999], Hodgson [Hodg 2000] ou Chibbaro, Rondoni et Vulpiani [ChRV 2014, p. 34].

Guerre mondiale lorsque la condition de déductibilité de Nagel est longuement discutée par les philosophes. Ces derniers s'appuient aussi sur un autre concept, l'incommensurabilité. Celle-ci statue que deux théories qui considèrent un même objet d'étude et sont historiquement élaborées de façon successive se caractérisent par des différences fondamentales dans leurs structures et schèmes de pensée, et ne sont par conséquent pas comparables¹.

L'incommensurabilité est aujourd'hui une notion particulièrement associée aux travaux de Thomas Kuhn, et à son ouvrage incontournable de l'histoire des sciences publié en 1962, *The Structure of Scientific Revolutions* [Kuhn 1962]. Cependant, elle est aussi utilisée de façon simultanée par Feyerband qui en fait usage pour appuyer sa critique des thèses de Nagel dans « Explanation, Reduction, and Empiricism » [Feyer 1962]. En dépit de différences dans la définition et l'emploi du concept par les deux philosophes², la principale conclusion commune à tirer de leurs développements est qu'entre deux théories qui se suivent dans l'histoire il existe une disparité conceptuelle. Ainsi, deux théories considérées comme incommensurables ne peuvent être reliées de façon déductive entre elles, et donc selon un rapport de réduction. Comme développé par Kuhn, les théories successives s'érigent en paradigmes qui ne portent pas la même vision du monde, selon une dynamique discontinue, de remplacement, et par conséquent non cumulative.

2.3. La physique, championne du réductionnisme ?

De nos différentes considérations sur le réductionnisme il apparaît évident que la physique y joue un rôle fondamental, en particulier la théorie quantique qui en ouvrant la voie à un traitement des particules élémentaires – le niveau d'organisation le plus simple – devient l'étape ultime de la logique réductionniste. Néanmoins, cette relation est plus complexe qu'il n'y paraît et peut-être résumée de la façon suivante par les mots de Silvan S. Schweber : « The reductionist approach that has been the hallmark of theoretical physics in the 20th century is being superseded by the study of emergent phenomena » [Schw 1993, p. 34]. Dans l'article dont est issue cette citation, Schweber se penche sur la crise dont est victime la physique théorique au début des années 1990. Cette crise, principalement institutionnelle, se caractérise par une massive réorganisation de la discipline qui se « stratifie en niveau

¹ Sur la notion d'incommensurabilité voir Leduc [Ledu 2007] et Oberheim [ObHo 2013].

² *Ibid.*

indépendants avec des principes de base stable » [p. 34]. Schweber revient alors sur les causes de cette crise et les met notamment en perspective à la lumière des relations entre physique et réductionnisme suite à la révolution quantique.

Avec cette dernière, en rendant possible une étude systématique du niveau d'organisation supposé le plus simple de la nature – les atomes – on appréhende enfin concrètement ces lois de la physique auxquelles toute science pourrait se réduire. La mécanique quantique confirme de plus cet aspect hiérarchique du monde en validant une forme d'« atomisme » soutenue par une constante fondamentale, la constante de Planck. Schweber appuie cette dimension en rappelant que d'une part la physique nucléaire, et d'autre part l'élaboration du modèle standard, soutiennent un processus pyramidal de construction de l'univers qui a de plus le mérite de nous rapprocher graduellement d'une description unifiée des forces de la nature. Dans ce cadre : « unification and reduction are the two tenets that have dominated fundamental theoretical physics » [p. 34].

Malgré tout, il s'avère que la réalité de la pratique scientifique se montre graduellement en décalage avec l'idéal réductionniste jusqu'alors valorisé par la révolution quantique. Schweber s'appuie sur l'un des premiers physiciens à clairement se positionner à l'encontre de ces thèses réductionnistes, Philip Anderson, dont l'article dans *Science* en 1972, « More is different. Broken symmetry and the nature of the hierarchical structure of science », est aujourd'hui bien connu [Ande 1972]. Le physicien se positionne très clairement en défenseur de la thèse émergentiste :

[...] the reductionist hypothesis does not by any means imply a “constructionist” one: The ability to reduce everything to simple fundamental laws does not imply the ability to start from those laws and reconstruct the universe. [...] at each level of complexity entirely new properties appear, and the understanding of the new behaviors requires research which I think is as fundamental in its nature as any other [p. 393].

Nous avons ici affaire à une émergence forte, les « nouvelles propriétés [qui] apparaissent » n'étant pas *déductibles* du niveau de complexité inférieur. Pour Anderson, quand bien même les lois de ce dernier s'appliquent aux nouvelles entités étudiées, elles ne peuvent en rien en donner une description complète. Dans cette perspective on peut par exemple considérer que la chimie quantique n'est pas une physique quantique appliquée au problème à plusieurs

corps. Ainsi, la prise d'indépendance de la première à l'aube des années 1950, évoquée dans nos développements sur la méthode de Hartree-Fock, est compréhensible.

Pour valider son propos, Anderson s'appuie sur sa propre expérience, et soulève les problématiques posées par les brisures de symétries en physique de la matière condensée. Schweber estime alors de son côté que les récents développements en théorie quantique des champs, et concernant les méthodes des groupes de renormalisation, n'ont fait qu'accentuer la validité des propos antiréductionnistes tenus par Anderson :

In fact, renormalization-group methods have changed Anderson's remark "the more the elementary-particle physicists tell us about the nature of the fundamental laws, the less relevance they seem to have to the very real problems of the rest of science", from a folk theorem into an almost rigorously proved assertion [Schw 1993, p. 36].

Ainsi, au-delà des aspects techniques qui occupent ici Anderson et Schweber¹, il est essentiel pour nous de montrer que la hiérarchisation de la physique amorcée par la révolution quantique peut finalement se retourner contre l'idéal de réduction qu'elle alimentait jusqu'alors. En effet, le physicien semble être confronté à des propriétés émergentes pour chaque nouveau niveau de complexité de sa discipline – c'est à dire, dans une perspective diachronique².

Le possible abandon du réductionnisme en physique réserve-t-il pour autant le même sort à l'autre « principe » de la physique du 20^e siècle avancé par Schweber, l'unification ? En un sens, oui. Mais c'est uniquement celui défendu par Laughlin et Pines, qui voient en la mise en évidence de phénomènes émergents en physique, l'abandon de la possibilité d'une quête vers une théorie capable de donner « un ensemble d'équations capables de décrire tous les phénomènes qui ont été observés ou qui pourraient être observés » [LaPi 2000, p. 28]. Les deux physiciens américains parlent ici d'une « théorie du tout ». Néanmoins, il nous semble

¹ Voir Schweber donc [Schw 1993], mais aussi Castellani [Cast 2002] pour différentes considérations sur le rôle des groupes de renormalisation et des théories effectives dans une conception émergentiste de la physique théorique.

² Pour Schweber c'est alors cette stratification, doublée de la récente prise de conscience d'une certaine indépendance de chaque branche de la discipline, qui pousse la physique à connaître une grande vague de réorganisation à l'aube des années 1990. Il y ajoute aussi le succès des descriptions théoriques, qui détourne le scientifique de la recherche fondamentale vers « the creation of novelty » [Schw 1993, p. 39].

qu'une ambiguïté doit être levée, cette qualification étant parfois employée en ce qui concerne la recherche d'une théorie physique unifiée qui tend à décrire l'ensemble des interactions fondamentales que sont la gravitation, l'électromagnétisme, l'interaction forte et l'interaction faible. Pour autant, cette théorie ne prétend pas dans tous les esprits à pouvoir répondre de tous les phénomènes de l'univers et en particulier ceux associés à différents niveaux de complexité. Ainsi, afin d'éviter toute ambiguïté nous appellerons cette dernière « théorie de l'unification » dans nos développements.

2.4. Diversité du point de vue des fondateurs de la mécanique quantique

Le bref aperçu que nous venons de dresser sur la question du réductionnisme en physique moderne se positionne avant tout au cœur du débat philosophique qui trouve ses racines dans l'ouvrage de Nagel, *The Structure of Science*, publié en 1961 [Nage 1961]. Par conséquent, même s'il nous aide à saisir les problématiques générales ici en jeu, il nous en apprend peu sur le contexte qui nous intéresse réellement, celui dont Fock est le contemporain. Or, la problématique du réductionnisme, même si elle n'est alors pas directement débattue en tant que telle, fait déjà partie du quotidien des physiciens. Et si la tendance générale est au réductionnisme, dans la pratique individuelle on observe différents courants. Ainsi, pour mettre ces faits en évidence, nous allons nous pencher sur les positions tenues par trois des fondateurs de la mécanique quantique : Bohr, Heisenberg et Dirac. Ces trois personnages ont déjà fait l'objet d'une étude approfondie par Alisa Bokulich de leurs considérations relatives au réductionnisme dans le cadre des relations entre mécanique classique et quantique. Elle a notamment publié en 2008, *Reexamining the Quantum-Classical Relation. Beyond Reductionism and Pluralism* [Boku 2008]. Pour ce qui est de Heisenberg et de Dirac nous allons ici suivre ses considérations qui approchent le volet diachronique de la question. Mais afin d'élargir notre point de vue sur la question du réductionnisme chez les physiciens théoriciens au début du XIX^e siècle, nous souhaitons aussi pour Bohr nous placer dans une perspective synchronique.

2.4.1. Bohr : considérations synchroniques

Le nom de Bohr est probablement, parmi ceux des physiciens théoriciens de la mécanique quantique, celui qui vient directement à l'esprit du lecteur lorsqu'il s'agit d'évoquer le réductionnisme. En effet, le physicien danois est bien connu pour l'intérêt qu'il manifeste tout

au long de sa carrière pour la biologie¹, et en particulier pour sa conférence intitulée « Light and Life » [Bohr 1933] dont l'impact sur le jeune Max Delbrück, alors physicien, et bientôt biophysicien, fait date. Inspiré par Bohr, Delbrück se tourne vers la biologie et publie en 1935 avec Timoféeff-Ressovsky et Zimmer un article qui ouvre la voie dans la biologie moléculaire à une étude des gènes à l'aide des outils de la physique [TiZD 1935]².

« Light and Life » de Bohr fait initialement l'objet le 15 août 1932 à Copenhague du discours d'ouverture d'un Congrès international sur la thérapie lumineuse. Le Danois s'y demande initialement si les processus vivants peuvent être compris en termes de physique pure, mais y discute aussi la possibilité d'une application à la biologie de la complémentarité. Nous reviendrons plus en détail au chapitre suivant (III.1.3) sur ce principe qui peut être sommairement résumé de la façon suivante : on a besoin pour décrire un système quantique d'avoir recours à des observables complémentaires empruntées à la mécanique classique mais qui ne peuvent être mesurées ou observées simultanément. Cela entraîne la nécessité d'une nouvelle « construction »³ de l'objet physique. Mais Bohr voit en la complémentarité un principe épistémologique général et il soutient alors qu'il peut exister entre la description du monde physique – inanimé – et le monde biologique – animé – une même relation de complémentarité. Par conséquent, tout comme en physique, on doit recourir en biologie à des descriptions complémentaires pour épuiser toute la richesse des phénomènes. C'est en partie le programme de Delbrück en 1932.

Ces aspects du vivant complémentaires à une description physique conditionnent chez Bohr une vision résolument antiréductionniste des liens entre la biologie et la physique. Hoyningen-Huene propose en 1994 une analyse complète de l'antiréductionnisme de Bohr sur la base de ses développements dans « Light and Life » [Hoyn 1994]. Il s'appuie notamment sur la distinction que nous avons introduite précédemment entre réductionnisme

¹ Pour plus de considérations sur Bohr, la biologie et le réductionnisme, voir Hoyningen-Huene [Hoyn 1994] ou Roll-Hansen [Roll 2000].

² Il est à noter que cet article, d'abord confidentiel, est en réalité popularisé par un autre fondateur de la mécanique quantique, Schrödinger, dans son ouvrage *What is life?* publié en 1944 [Schr 1944]. Sur l'influence de Bohr sur Delbrück et le « Three man Paper » de Delbrück, Timoféeff et Zimmer, voir Sloan et Fogel [SIFo 2011]. Voir aussi Joaquim, Freire Jr. et El-Hani sur les liens entre mécanique quantique et biologie moléculaire dans les années 1930 [JoFE 2015].

³ Au sens philosophique du terme.

épistémologique, ontologique et méthodologique. Il est ainsi pour lui évident que l'application de la complémentarité aux relations entre physique et biologie témoigne à la fois d'un antiréductionnisme épistémologique et méthodologique. Les approches disciplinaires doivent être différentes, mais surtout les concepts et lois de la physique ne peuvent permettre une déduction directe de ceux de la biologie, de la même façon que l'expression de ceux de la physique quantique sont limitées dans le langage de la physique classique. Car c'est bien l'un des enseignements de cet article de Bohr : si la complémentarité conditionne un antiréductionnisme épistémologique synchronique dans le cas de la biologie, il est aussi nécessairement diachronique en ce qui concerne les relations entre mécanique classique et quantique. D'autant plus que comme le souligne Bokulich : « [o]n his [Bohr's] view, quantum theory, without classical mechanics, is an inadequate – perhaps even meaningless – theory » [Boku 2008, pp. 99-101].

Pour autant Bohr souscrit dans le même temps à un réductionnisme ontologique clairement exprimé :

Car nous pensons tous, d'accord avec Newton, que la science est fondée sur la certitude que la nature obéit toujours dans les mêmes conditions aux mêmes lois. Si donc nous étions capables de pousser l'analyse du mécanisme des organismes vivants aussi loin que celle des phénomènes atomiques nous ne pourrions guère nous attendre à trouver un comportement différent en quelque manière de celui des corps inorganiques [Bohr 1933', p. 19]

Par conséquent, comme le conclut Hoyningen-Huene, la question de la réductibilité de la biologie reste pour Bohr une question ouverte [Hoyn 1994, p. 253]. En recourant aux catégories précédemment établies, il semble alors convenable de considérer Bohr comme un antiréductionniste épistémologique et un réductionniste ontologique. Toutefois, Bokulich souligne que dans les rapports entre mécanique classique et quantique Bohr a malgré tout tendance à accorder à la mécanique quantique un caractère universel, empêchant ainsi de le voir comme un pur antiréductionniste [Boku 2008, p. 100]. Or, le questionnement sur le statut des théories est de l'ordre du réductionnisme épistémologique. Par conséquent, Bohr navigue entre différentes positions et il n'est pas possible de trancher clairement sur son cas. Ainsi, en observant le physicien danois il apparaît que la question des relations interthéoriques peut être pensée de sorte à transgresser les catégories jusque là exposées¹.

¹ C'est la conclusion des considérations de Bokulich sur Bohr [Boku 2008, p. 102].

2.4.2. Heisenberg et Dirac : considérations diachroniques

L'idée que les catégories usuellement discutées dans la philosophie sont régulièrement transgressées dans la pratique scientifique est mise en avant par Bokulich dans son analyse des relations entre mécanique quantique et classique. Dans son ouvrage de 2008, elle entend ainsi montrer que dans les relations interthéoriques, les notions de réductionnisme et d'antiréductionnisme – dans leurs formes les plus caricaturales – doivent être dépassées [Boku 2008]¹. En particulier, elle reprend dans cet ouvrage des développements d'un article de 2004 sur la pensée de deux des principaux fondateurs de la mécanique quantique, Dirac et Heisenberg. Dans cette analyse, intitulée « Open or closed? Dirac, Heisenberg, and the relation between classical and quantum mechanics » [Boku 2004], la question de la relation entre la mécanique classique et quantique n'est pas déplacée vers une approche interdisciplinaire et le débat réductionniste devient diachronique. Comme avec Bohr, c'est toujours le lien complexe et indispensable entre les deux mécaniques, symbolisé par le principe de correspondance, qui alimente le débat et suggère aux physiciens théoriciens un inévitable questionnement sur les relations interthéoriques.

« Ouverte ou close » fait référence à la notion développée par Heisenberg tout au long de sa carrière de théorie close². Dans *Physics and Philosophy* en 1958 il distingue quatre théories closes : la mécanique de Newton, la théorie de la chaleur – thermodynamique – développée au XIX^e siècle, un groupe formé de l'électrodynamique, la relativité restreinte, l'optique et le magnétisme, et enfin la théorie quantique [Heis 1958, pp. 93-100]. Ce qui les caractérise, pour Heisenberg, c'est leur grande précision et persistance au cours du temps dans leurs domaines respectifs mais aussi leur grande cohérence interne. Il évoque dans ces mots la mécanique de Newton : « the connection between the different concepts in the system is so close that one could generally not change any one of the concepts without destroying the whole system » [Heis 1958, p. 94]. Nous avons ici affaire à une forme de holisme. Il faut alors insister sur le fait que les théories closes doivent être comprises comme des théories avec un domaine d'application limité, et qui ne prétendent pas à l'universalité. Axiomes, définitions et lois de

¹ Bokulich parle plutôt de « réductionnisme » et de « pluralisme théorique » qu'elle associe respectivement à des formes d' « impérialisme » et d' « isolationnisme ».

² Chevalley [Chev 1998] et Bokulich [Boku 2006 ; 2008] font remonter de façon claire les racines de l'idée de théorie fermée aux premières années de l'élaboration de la mécanique quantique.

chaque théorie close fournissent une description parfaitement précise et complète d'une branche donnée de la physique.

Pour Bokulich, la position épistémologique alors adoptée par Heisenberg peut être définie ainsi : « *theoretical pluralism*: contemporary science is characterized by a handful of distinct closed theories, each with its own circumscribed domain, within which the theory is perfectly accurate and unalterable. » [Boku 2004, p. 381]. Chez Heisenberg la transition de la mécanique classique vers la physique quantique n'a pu se faire qu'au travers de changements radicaux, et de l'établissement d'une nouvelle théorie close. Cette approche des relations interthéoriques nous invite bien évidemment à faire un rapprochement avec la vision paradigmatique de la science par Kuhn [Kuhn 1962]¹. En effet, les deux hommes partagent une vision holiste des théories, un modèle révolutionnaire du passage d'une théorie à une autre, et même une notion d'incommensurabilité. Mais là où Heisenberg est adepte d'un « pluralisme théorique », Kuhn est un « monogame en série » [Boku 2004, p. 384]. Les théories closes sont permanentes chez le premier, alors que pour le second une nouvelle théorie en remplace une autre. Pour Heisenberg, la mécanique quantique n'est ni une falsification, ni une amélioration de la mécanique classique : les deux théories cohabitent avec un domaine d'application qui leur est propre. Et au final, la vision non réductionniste – pluraliste – des sciences par le physicien allemand est en somme si forte que la question des liens entre théories semble perdre tout son sens².

Dirac prend lui le contrepied de Heisenberg, et Bokulich lui adjoint naturellement l'idée de « théories ouvertes »³ : « only approximate, able to be modified piecemeal, and having no parts immune to future revision » [Boku 2004, p. 386]. Pour le Britannique, les théories sont sujettes à des changements graduels, et c'est le cas tout aussi bien pour la mécanique quantique que pour la mécanique classique qui n'ont pas atteint leur forme finale. Même leurs composantes les mieux établies sont dans l'esprit de Dirac sujettes à de futures révisions, car il n'y a dans la physique aucun achèvement permanent. De plus, il existe chez le physicien de Cambridge une véritable continuité structurelle entre les deux théories, la mécanique

¹ Ce rapprochement est bien évidemment fait par Bokulich [Boku 2004 ; 2008, p. 30 et pp. 34-38] mais aussi Beller [Bell 1999a]

² Voir la sous partie « The disunity of science » de Bokulich [Boku 2008, pp. 45-47].

³ Pour cette dénomination voir Bokulich [Boku 2004, p. 378 ; Boku 2008, pp. 49-51].

quantique étant une extension de la mécanique classique, voire même une simple généralisation de cette dernière à une algèbre non-commutative¹.

En 2004, dans son investigation sur la façon dont Dirac traite les relations entre ces deux théories, Bokulich caractérise en trois points la pensée du Britannique : on retrouve bien évidemment la « thèse de la continuité structurelle », mais aussi la « méthodologie de l’extension d’analogie » et enfin la « thèse de la transférabilité ». Pour le premier point, il faut ajouter que selon la pensée de Dirac l’importante similarité structurelle entre les deux théories peut être exploitée dans leurs développements respectifs, notamment au travers d’analogies. Méthodologiquement, ces analogies peuvent alors être étendues de façon productive dans de nouvelles directions – c’est le second point – y compris en utilisant la physique quantique comme guide à la physique classique. Car en fin de compte, selon la thèse de la transférabilité, tout développement construit au sein de la mécanique classique doit être transféré à la théorie quantique, et vice-versa.

Selon Bokulich, en appuyant sur les liens entre les deux théories Dirac valide sa propre vision d’une forme d’unité de la physique, dont les différentes branches peuvent se souder autour de similarités structurelles majeures². Ce serait alors la satisfaction d’avoir atteint ce but qui accompagne l’enthousiasme de ses propos de 1929 qui incluent la chimie à ce processus, et qui sont érigés comme un symbole de ses vues réductionnistes. Mais pour Bokulich, c’est d’une part l’importance continue donnée à la mécanique classique par Dirac dans ses travaux, et d’autre part le fait qu’il considère les théories comme ouvertes et donc perpétuellement perfectibles de façon corrélées, qui empêchent de conclure à une simple vision réductionniste de la physique [Boku 2004, p. 394]. En effet, l’interdépendance est considérée comme trop forte. Ainsi, Dirac témoigne avec Heisenberg d’une forme de multiplicité d’options épistémologiques à disposition des physiciens sur les questions de réduction des théories.

¹ Sur ce point, et notamment le rôle joué par le lien établi dans le formalisme entre les commutateurs de la mécanique quantique et les crochets de Poisson de la mécanique classique, voir Schweber [Schw 1994, pp. 17-18].

² Bokulich met en avant la nécessité avancée par Dirac en 1970 d’avoir des équations du mouvement associées à chaque domaine de la physique [Boku 2004, pp. 392-393].

3. Fock, un pluraliste en série

Le réductionnisme, et son courant opposé, se présentent comme de vastes principes philosophiques, aux multiples catégories, qui nécessitent une analyse minutieuse afin de saisir la subtilité de toutes leurs déclinaisons. Mais il est surtout intéressant pour nous de constater que les questionnements qu'ils soulèvent n'ont rien d'abstrait, et qu'ils sont en réalité au cœur des préoccupations des scientifiques. La physique, et plus encore la mécanique quantique par ses rapports complexes avec la mécanique classique, cristallise ces problématiques, et influence la pratique scientifique des différents acteurs. Bien avant que le débat sur le réductionnisme ne prenne un tournant politique comme Schweber le met en lumière [Schw 1993], on le retrouve chez les fondateurs de la mécanique quantique comme un élément constitutif et essentiel de leurs épistémologies respectives. Nous souhaitons maintenant nous pencher sur le cas de Fock et dégager dans un premier temps les principes généraux de son approche des rapports interthéoriques. Dans un second temps, nous verrons au travers de considérations sur l'électrodynamique quantique, comment les débats sur cette dernière ont pu guider Fock dans l'établissement de ses conceptions épistémologiques, et comment celles-ci s'expriment dans son discours sur cette théorie.

3.1. La signification fondamentale des méthodes d'approximation en physique théorique

Afin de prendre du recul sur les conceptions de Fock, et développer nos considérations sur sa réception du phénomène d'échange quantique, nous avons mentionné en première partie de ce chapitre un article de 1936 traitant de « la signification fondamentale des méthodes d'approximation en physique théorique » [Fock 1936d]. Cet article est en réalité celui qui exprime le plus clairement certaines considérations épistémologiques de Fock relatives à la question du réductionnisme. En cela, il est pour nous une source unique. À la lumière de l'état des lieux que nous venons de dresser sur le réductionnisme, il convient alors de revenir plus longuement sur les développements du physicien soviétique. Notons tout d'abord que cet article fait initialement l'objet d'une présentation le 21 mai 1936 lors d'une session du groupe de mathématiques de l'Académie des Sciences d'URSS. Certes Fock y rappelle les principales équations de la mécanique quantique, s'appuie aussi sur ces dernières, mais la dimension mathématique de ses développements est loin d'être la principale. En effet, il signe ici un

véritable article d'épistémologie de la physique, qui se concentre sur les relations interthéoriques.

L'approche de Fock est clairement à mettre en relation avec la question du réductionnisme épistémologique diachronique. En effet, il s'intéresse aux théories, et non aux entités, et celles-ci appartiennent bien au même domaine de recherche. Successivement on retrouve des considérations sur l'électrodynamique quantique, la mécanique quantique, la méthode de Hartree-Fock, la méthode des perturbations, la vieille théorie de Bohr et enfin la mécanique classique. Il faut alors expliciter que Fock conçoit avant tout les théories comme s'appliquant à divers ensembles de phénomènes. Lorsqu'il est question de mécanique quantique le physicien russe ne fait pas référence à une théorie des principes de quantification, mais plus spécifiquement à ce que nous pourrions appeler la théorie de Schrödinger et qui s'apparente à une théorie de la dynamique des phénomènes pour lesquels la constante de Planck ne peut être négligée. De la même façon, lorsque Fock évoque dans l'article ici discuté la relativité restreinte, elle doit être comprise dans le cadre de la théorie de l'électron de Dirac, qui est le penchant relativiste de la théorie de Schrödinger.

Fock introduit dans son raisonnement une forme de hiérarchisation entre les théories qui ne peut être comprise que par l'énoncé de ce postulat initial : « Equations of theoretical physics can never be absolutely accurate: one always has to ignore this or that secondary factor while deriving them »¹. Il en conclut que, « toute théorie physique [...] est, en réalité, une approximation »². La hiérarchie induite par Fock entre les théories dépend donc du caractère approximatif de l'une par rapport à l'autre, en somme de la possibilité d'ignorer certains facteurs à partir d'une théorie de départ. Elle est déterminée par une échelle de complexification, les théories particulières étant simplifiées à partir de théories plus générales qui les incluent comme cas particuliers :

The transition to a simplified theory means, as a matter of fact, the usage of one or another approximate method based on the possibility to ignore one or another secondary factor, one or another small quantity in the problem³.

¹ Traduit du russe par V. V. Fock [Fock 2004, p. 389].

² *Ibid* [p. 402]. La traduction vers le français de courtes citations est nôtre.

³ *Ibid* [p. 390].

La hiérarchie ici invoquée ne doit en rien être mise en relation avec celle traditionnellement employée dans le réductionnisme ontologique et qui fait aussi sens dans la perspective synchronique du réductionnisme épistémologique : les groupes sociaux sont l'affaire des sciences humaines, les organismes multicellulaires et les cellules de la biologie, les molécules de la chimie, et enfin les atomes et particules élémentaires de la physique. Elles poursuivent des logiques différentes : dans l'idéal réductionniste synchronique, les niveaux de complexifications sont structurels et participent d'une reconstruction pyramidale du monde où l'on cherche à savoir si la théorie correspondant au niveau de complexification le plus élevé se réduit au niveau inférieur ; chez Fock la perspective est elle diachronique, les entités et disciplines associées ne sont pas directement concernées, et la complexification est purement théorique. Par conséquent c'est bien la théorie la plus simple – particulière – qui devrait pouvoir logiquement se réduire à la plus complexe – générale. Notons toutefois que la hiérarchie imposée par Fock se place tout de même dans une perspective d'universalité au sein de la physique, même si pour lui celle-ci n'est pas atteignable en l'état actuel du savoir : « As we have already mentioned, the equations of theoretical physics are never absolutely correct. Even the most general theory at the present period of the development of physics cannot aspire to be universal because it contains a number of physical neglects in itself »¹. Fock énumère ces différents « manquements physiques » et processus d'approximation, qui définissent le passage d'une théorie à une autre, et par conséquent leur hiérarchie (*Figure 8*).

Nous reviendrons plus en détail sur cette hiérarchie et le découpage effectué par Fock au cours de cette sous-partie. Mais il convient tout d'abord pour l'expliquer d'observer la finalité que lui prête le physicien soviétique. Car ce discours sert avant tout à soutenir l'argumentation de ce qui fait la véritable originalité de cet article : une discussion relative à la formation des notions physiques elles-mêmes². En effet, Fock commence par rappeler que durant la transition d'une théorie dite particulière vers une plus générale il y a une introduction de nouvelles notions physiques. Mais il tient avant tout à mettre l'accent sur le rejet de notions physiques qui a aussi lieu au cours de ce processus : « Thus generalization of physical theories

¹ *Ibid* [p. 391].

² *Ibid* [p. 389].

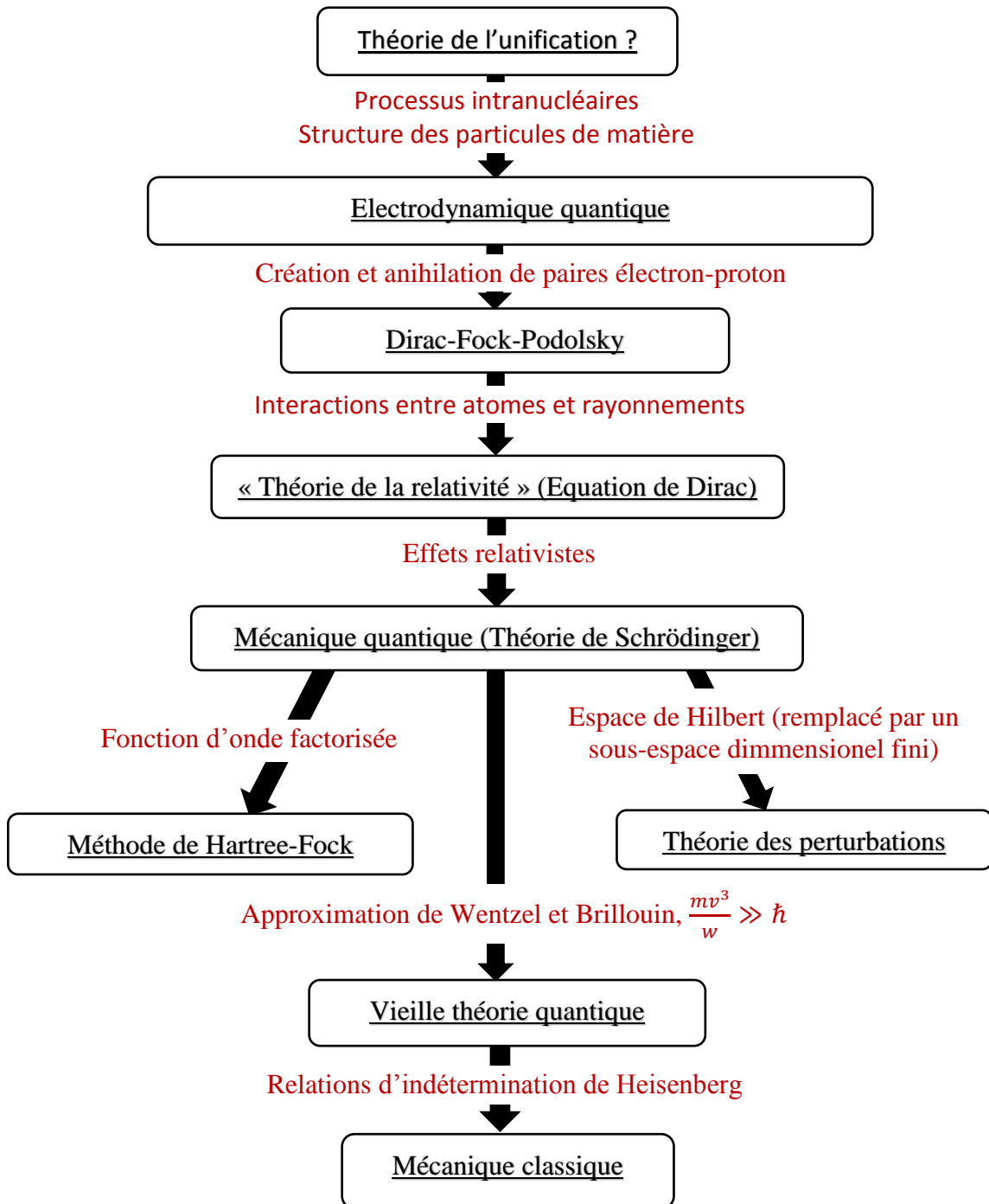


Figure 8. Schéma des relations interthéoriques développées par Fock en 1936 [Fock 1936c]. En rouge, les différents facteurs ignorés (ou processus d'approximation) qui permettent le passage d'une théorie à une autre.

is related not only to new notions, but also to the denial of old ones »¹. C'est afin de mettre en avant ce phénomène que Fock propose de suivre le processus de développement des théories dans le sens contraire au sens historique. Ainsi, il souhaite montrer que « à chaque

¹ *Ibid* [p. 390].

simplification, à chaque transition vers une théorie plus particulière, des notions physiques toujours plus nouvelles font leur apparition »¹. Fock peut alors statuer sur la signification fondamentale des méthodes d'approximations en physique théorique : « any physical theory, any physical notion, is, as a matter of fact, an approximation »².

La *Figure 9* nous donne ces notions pour chaque théorie, telles qu'énoncées par Fock. Si nous nous plaçons dans une perspective réductionniste, qui voudrait donc que les théories les plus spécifiques puissent se réduire aux plus générales, indubitablement la question qui se pose à nous est de savoir si pour Fock l'apparition de ces concepts est à proprement parler un phénomène d'émergence. Bien que le physicien russe ne tienne pas un discours rigoureux sur la question du réductionnisme, et sur la nature de ces nouvelles notions pour lesquelles aucune systématique n'est discutée, il faut toutefois noter qu'il est énoncé clairement à plusieurs reprises³ qu'elles n'ont aucun sens dans le cadre de théories plus générales. Afin d'éclaircir ce point, nous pouvons aussi reconsidérer la connexion induite entre les différentes théories par le physicien soviétique. Étant donné qu'il s'agit de relations d'approximation, la question qui se pose est en réalité de savoir si ce processus implique seulement une restriction des théories les plus générales, ou bien une altération de celles-ci. Dans le premier cas, il est évident que les lois de la physique resteraient les mêmes. Or, bien que Fock considère certaines lois de la physique comme incontestables, tel le principe de conservation de l'énergie ou comme nous le verrons plus tard le principe de causalité, il n'y a pas de problème pour le physicien russe à énoncer d'une part que « les lois de la mécanique quantique rendent impossible une description objective du comportement détaillé des processus physiques »⁴ alors qu'entre en jeu pour la mécanique classique « la nouvelle (bien qu'historiquement ancienne) notion physique de comportement de processus objectifs »⁵. L'opposition claire énoncée sur ce sujet favorise une idée d'altération des théories par les processus d'approximation et par conséquent une émergence des nouvelles notions.

¹ *Ibid.*

² *Ibid* [p. 402].

³ *Ibid.* Pour la notion de simultanéité en relativité restreinte [p. 390], pour la notion de masse en physique nucléaire [p. 391] ou encore pour la notion d'état d'un électron [p. 399].

⁴ *Ibid* [p. 396].

⁵ *Ibid* [p. 402].

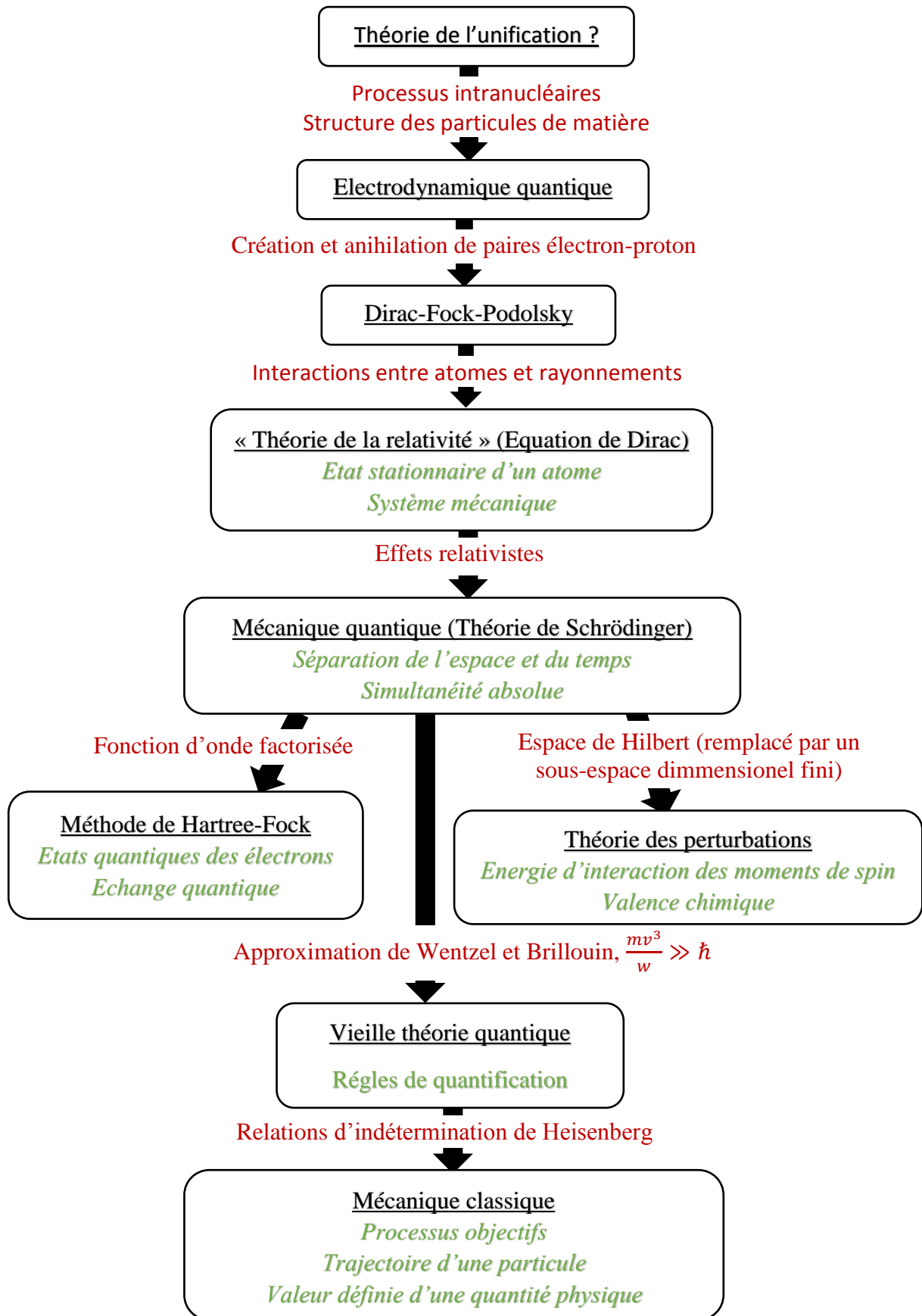


Figure 9. Schéma des relations interthéoriques développées par Fock en 1936 [Fock 1936d] (voir Figure 8). En vert, les nouvelles notions faisant leur apparition à chaque approximation d'une théorie plus générale.

La hiérarchisation des théories induite par Fock sous couvert d'universalité n'implique cependant pas de façon nécessaire une échelle qualitative. Les concepts émergents dans les théories les moins générales possèdent une valeur fondamentale pour la physique ; par exemple le concept d'état pour les électrons individuels dans un atome explique la structure du tableau périodique de Mendeleïev, ou encore l'énergie d'échange quantique joue un rôle décisif dans la chimie quantique¹. Les différentes théories abordées par Fock coexistent et se révèlent toutes utiles à la pratique scientifique. C'est cette coexistence qui justifie l'attitude de Fock vis-à-vis de la méthode de Hartree-Fock et du phénomène d'échange. Nous le voyons dans la *Figure 9*, la méthode du champ auto-cohérent avec échange est issue de l'approximation d'une théorie plus générale qui est la mécanique quantique – entendre théorie de Schrödinger –, et voit apparaître les deux concepts émergents que nous venons de mentionner : la notion d'état quantique pour un électron et bien évidemment l'échange quantique. Ainsi, elle est l'expression d'une nouvelle théorie du problème à plusieurs corps qui n'est pas réductible à la mécanique quantique dans son sens strict. Cette nouvelle théorie se suffit à elle-même comme théorie des atomes et molécules et c'est ce qui explique le détachement de Fock à l'encontre des tentatives, notamment de Slater, de les ramener dans le giron de la mécanique quantique. En effet, l'Américain est davantage dans une perspective réductionniste² où, comme en témoigne son ambition dans le « Solid State and Molecular Group », la mécanique quantique est considérée comme une théorie en mesure d'expliquer des phénomènes à différentes échelles : « Our purpose is to take the quantum theory of atoms, molecules and solids out of the semi-empirical form which it has largely followed since the development of wave mechanics and to proceed as rapidly as possible to put it on a quantitative basis »³.

Selon l'approche qui est celle de Fock, avec différents niveaux d'approximations correspondants à différentes théories toutes aussi valides les unes que les autres, la question qui se pose au physicien est de déterminer quelles sont leurs conditions d'application, ainsi que celles de leurs différentes notions. À l'image des théories closes de Heisenberg, Fock

¹ *Ibid* [p. 400]. Voir en page 399 pour le tableau périodique de Mendeleïev.

² Sur le réductionnisme de Slater voir Schweber [Schw 1990, pp. 390-398].

³ Koster G., *Remarks at the Slater Memorial Session* le 7 février 1977, American Physical Society, Chicago. Cité par Morse [Mors 1982 ,p. 307].

considère comme une composante essentielle des théories physiques leur domaine d'applicabilité. Mais sur ce point le physicien allemand se contente de valoriser la capacité des lois d'une théorie à décrire de façon précise les phénomènes, et en somme, de dire que le domaine d'application de ses théories closes est le domaine où elles peuvent être appliquées¹ ! Fock nous délivre pour sa part une argumentation plus convaincante. C'est en prenant pour base le caractère approximatif de toutes théories que le physicien soviétique peut définir leurs domaines d'applicabilité – ou plus spécifiquement celui des notions physiques qui les composent – selon le schéma de pensée suivant :

The transition to a simplified theory means, as a matter of fact, the usage of one or another approximate method based on the possibility to ignore one or another secondary factor, one or another small quantity in the problem. The validity of given approximate methods – then physical rigor – can be estimated by means of usual mathematical inequalities, which characterize the negligibility of the quantities omitted in the situation. However, this "error evaluation" in common sense gives at the same time the applicability criteria for physical notions connected with this approximate method. Thus, a more difficult logical, or perhaps philosophical question concerning the applicability of some physical notions acquires here a concrete mathematical expression².

L'exemple le plus flagrant d'inégalités mathématiques définissant le domaine d'application d'une théorie est bien évidemment celui des relations d'indétermination de Heisenberg : $\Delta p \Delta x \geq \hbar$. Ces dernières établissent la limite d'applicabilité de la mécanique classique, et Fock, même s'il ne le réalisera jamais de façon effective, manifeste ici un intérêt pour la généralisation de ce modèle à différentes théories. La principale conclusion à en tirer d'un point de vue méthodologique est que la formulation d'une théorie physique doit être accompagnée d'une stricte évaluation de son domaine d'application, ainsi que de celui des différents concepts employés : « That is why to start to formulate such a theory³, first of all, it

¹ Voir Bokulich pour plus de détails sur Heisenberg et le domaine d'application de ses théories closes [Boku 2004, p. 380-381 ; 2008, p. 34].

² Traduit du russe par V. V. Fock [Fock 2004, p. 390].

³ Fock parle ici de l'électrodynamique quantique, qui est la première théorie qu'il considère dans son processus de simplification séquentielle des théories dans le sens opposé de leurs développements historiques. Mais bien évidemment ce constat s'applique à toutes théories.

is necessary to establish what are these neglects and what are the applicability limitations of basic physical notions operated by this theory »¹.

Pour résumer le système développé par Fock au sein de l'article que nous venons d'étudier, nous pouvons considérer que le physicien russe conçoit la physique comme un emboîtement de théories connectées les unes aux autres par des processus d'approximation. Mais ces derniers n'engagent en rien une hiérarchisation des théories du point de vue de la pratique physique. En effet, le caractère émergent de certaines notions qui leur sont associées, mais aussi leur capacité à pouvoir traiter d'un domaine phénoménologique qui leur est propre, fait de chaque théorie un outil indispensable à une description complète de la nature. En effet, la théorie considérée comme la plus générale n'est pas en mesure de rendre compte de tous types de phénomènes, à moins que lui soit appliqué un processus d'approximation conduisant à une nouvelle théorie. L'une des tâches du physicien est alors de clarifier le domaine d'application de chaque théorie – approximation – et des notions qui lui sont associées. Par conséquent, lorsqu'il s'agit de considérer chez Fock la question de la pratique scientifique, nous avons clairement affaire à un antiréductionniste épistémologique diachronique. Certes, comme chez Dirac, et comme le souligne la très forte stratification induite par Fock, les théories évoluent et l'on tend vers une forme d'universalité. Mais chaque étape possède une valeur intrinsèque fondamentale et utile au scientifique pour la représentation du monde. En ce sens on peut estimer que pour le physicien soviétique, la physique est une science ouverte composée d'une succession de théories closes. Fock n'est ni un pur *pluraliste théorique* comme Heisenberg, ni un *monogame en série* comme Kuhn, il est davantage un *pluraliste en série*. Si la finalité de la recherche scientifique est bien son unité, Fock est conscient que la pratique scientifique donne lieu à des formes d'incommensurabilité entre les théories. Sur ce sujet, Fock ne va pas généraliser sa pensée, mais on retrouve dans son article de 1936 certains germes d'une vision dirons-nous « kuhnienne » du développement des sciences à travers l'histoire :

It is important now to draw attention to the following psychological factor: the rejection of old, usual physical notions is much more difficult than the assimilation of new notions, which

¹ Traduit du russe par V. V. Fock [Fock 2004, p. 391].

are not related to such kind of rejection. [...] And if it is proven that some of the old notions are inapplicable to a newly discovered one, then it is necessary to give them up without regret¹.

3.2. Électrodynamique quantique

Dans l'article que nous venons d'étudier, l'électrodynamique quantique joue un rôle particulier car elle est considérée comme l'une des théories les plus générales alors existantes². Son importance en ce qui concerne la question de l'unité de la physique est indéniable. Mais c'est surtout la théorie la plus discutée du début des années 1930, et qui suscite certaines interrogations fondamentales. La question qui nous occupe ici est en réalité celle de la mesure des champs quantiques, épisode bien connu de l'histoire de la physique moderne en raison de la vive opposition entre Bohr et Landau dont elle est à l'origine. Dans un article publié en 1991, « Cohérence et complétude de la mécanique quantique : l'exemple de Bohr-Rosenfeld », Darrigol dresse un historique complet de la question de la mesure en théorie quantique et s'attache longuement à discuter la controverse suscitée [Darr 1991]. Les premières heures de l'électrodynamique quantique sont ponctuées de l'apparition de difficultés majeures, comme le problème des divergences ou encore l'apparition d'énergies négatives dans l'équation de Dirac³. Darrigol souligne qu'au cours du Congrès Solvay de 1930, Bohr alimente le débat sur la question en affirmant que « l'ampleur des problèmes et la nature de leur solution devraient être révélées par une critique des concepts de base des théories menacées, par une évaluation de leurs possibilités de définition et d'observation » [Darr 1991, p. 154]. La proposition de Bohr fait écho à nos développements précédents sur l'importance pour Fock de définir le domaine d'application des différentes théories et concepts de la physique. Il nous semble en effet que les débats sur l'électrodynamique quantique du début des années 1930 contribuent directement au développement de la pensée épistémologique de Fock.

3.2.1. Inégalités mathématiques : la mesure des champs

Dans une optique similaire à celle de la mesure en mécanique quantique, Heisenberg est le premier à réfléchir à la problématique de la mesure des champs. Il souhaite en effet

¹ *Ibid* [p. 390 et p. 402].

² *Ibid* [p. 391].

³ Pour la question des divergences voir Darrigol [Darr 1984 ; 1986]. Pour les énergies négatives on peut citer Kragh [Kragh 1990, pp. 48-86]. Schweber [Schw 1994, pp. 11-69] est aussi une source importante.

examiner les conséquences de la dualité onde-corpuscule à l'origine de ses relations d'indéterminations dans le cadre d'un champ quantique : le domaine d'application du concept de champ électromagnétique doit être limité par l'existence des aspects corpusculaires. Il formule dans ce but une nouvelle relation d'indétermination montrant que pour une mesure conjointe, seul le champ électrique (E_x), ou le champ magnétique (H_y), moyenné sur un même domaine d'extension spatiale δl , peut être mesuré avec précision : $\Delta E_x \Delta H_y \geq \frac{\hbar c}{(\delta l)^4}$ [Heis 1930]. Or, Heisenberg est plutôt succinct, et ne base son analyse que sur les principes de la dualité onde-corpuscule, et non sur un véritable processus de mesure. Bien que ses résultats ne soient pas concluants, ils marquent le début d'une longue réflexion visant à définir le domaine d'applicabilité de la notion de champ quantique.

Jordan et Fock sont les premiers à proposer une version alternative des relations d'indétermination pour les champs quantiques en considérant le processus de mesure à l'aide d'électrons et de protons comme corps d'épreuve. Les deux hommes rédigent un article conjoint à Kharkov au début du mois d'octobre 1930 [JoFo 1930]¹. Leur démonstration les conduit à proposer des relations d'indétermination pour des mesures simples de chaque composante du champ électromagnétique – alors que Heisenberg considère uniquement des mesures doubles – qui montrent l'impossibilité d'une mesure individuelle précise : l'inexactitude sur le champ moyenné (E ou H) augmente avec une diminution du volume étudié :

$$\begin{array}{ll} \Delta E_x \Delta x \Delta t \geq \hbar/e & \Delta H_x \Delta y \Delta z \geq \hbar c/e \\ \Delta E_y \Delta y \Delta t \geq \hbar/e & \Delta H_y \Delta z \Delta x \geq \hbar c/e \\ \Delta E_z \Delta z \Delta t \geq \hbar/e & \Delta H_z \Delta x \Delta y \geq \hbar c/e \end{array}$$

Ce résultat implique par conséquent la négation du concept classique de « champ en un point » dans le cadre de la théorie quantique². Mais rapidement Bohr se montre critique vis-à-vis de ces résultats : alors que la charge élémentaire e apparaît dans les équations, il estime que tout comme pour les relations d'indétermination, les limitations dans la détermination

¹ Comme souligné par Kojevnikov, la raison pour laquelle les deux hommes se trouvent à Kharkov n'est pas connu. Il ajoute de plus, sur la base du manuscrit de l'article conservé dans les archives de l'Académie à Saint-Petersbourg, que la paternité des idées revient très probablement à Jordan, à qui Fock vient en aide [Koj 1988, pp. 122-123].

² En complément, voir aussi les considérations de Kojevnikov sur cet article. *Ibid.*

du champ ne devraient être qu'une conséquence de l'introduction du quantum d'action h , et en aucun cas dépendantes des caractéristiques de particules élémentaires¹. Le Danois estime alors qu'il est possible d'éliminer le rôle joué par la charge dans le raisonnement de Jordan et Fock en considérant un corps d'épreuve suffisamment grand. Dans ce cadre, c'est le freinage du corps d'épreuve par rayonnement qui serait à l'origine des inégalités relatives à la mesure du champ. Il discute rapidement de ce problème avec Landau lors d'une visite de ce dernier à Copenhague au mois de novembre 1930². De retour à Zurich où il bénéficie de sa bourse de la fondation Rockefeller, Landau développe avec Peierls l'argument de Bohr et c'est au prix de nouveaux débats avec le Danois au mois de février 1931 qu'ils aboutissent à de nouvelles relations d'indétermination pour la mesure des champs quantique, publiées dans leur célèbre article « Erweiterung des Unbestimmtheitsprinzips für die relativistische Quantentheorie » (Extension du principe d'incertitude à la théorie quantique relativiste) [LaPe 1931].

Si un troisième physicien avait dû se joindre à Landau et Peierls pour cet article, cela aurait été très certainement Fock. En effet, la dynamique de recherche suivie par ces acteurs en 1930 les conduit tout prêt d'une collaboration à trois et nous rejoignons ici certains de nos développements du premier chapitre sur les travaux de Fock en électrodynamique quantique (I.2.1). Rappelons que le parcours qu'il suit durant cette période est particulièrement bien détaillé par Kojevnikov [Koj 1988]. Ce dernier met en évidence que l'intérêt de Fock pour la question de la mesure des champs quantique a pour source divers développements concernant une « mécanique des photons », sur laquelle il publie dans les *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* en 1930 [Fock 1930d]. Celle-ci se positionne très clairement dans la perspective d'une approche corpusculaire de la théorie quantique des champs. L'une de ses motivations est de pouvoir répondre aux difficultés soulevées par la nouvelle électrodynamique développée par Heisenberg et Pauli et qui met

¹ Lettre de Bohr à Heisenberg du 8 décembre 1930 – Niels Bohr Archives, Microfilm B. S. C. 1930-1945, N°20. Voir aussi Darrigol [Darr 1991, p. 157].

² Voir la lettre de Bohr à Heisenberg du 8 décembre 1930 pour les critiques envers Jordan et Fock – Niels Bohr Archives, Microfilm B. S. C. 1930-1945, N°20. Voir aussi Darrigol, notamment sur les discussions avec Landau [Darr 1991, pp. 155-158].

en avant le caractère ondulatoire de la matière [HePa 1929]¹. Fock n'est pas seul dans cette démarche, elle est entre autres suivie par Oppenheimer [Oppe 1931], mais aussi Landau et Peierls [LaPe 1930].

Ce dernier est présent à Odessa lors du 7^e Congrès des physiciens russes qui se tient du 19 au 24 août 1930². Fock y expose ses idées sur la mécanique des photons et les deux hommes, au vu des similarités de leur travaux, décident d'entamer une collaboration incluant aussi Landau³. Plusieurs lettres sont partagées dans cette direction et un manuscrit est préparé, intitulé « Über den Ort des Lichtquants » (Sur la position des photons)⁴. Mais Peierls et Landau écrivent le 9 décembre 1930 à Fock pour lui annoncer leur décision de travailler séparément. Ce choix est motivé par la difficulté de collaborer par correspondance mais aussi par le développement indépendant de nouvelles idées à Zurich. Toutefois, l'article de Landau et Peierls de 1931 reprendra un certain nombre de questionnements du manuscrit initial préparé avec Fock⁵ : il prouve la possibilité d'un traitement du problème de la mesure dans le cadre de pensée développé par les trois hommes. On peut toutefois estimer que la publication de l'article de Jordan et Fock et surtout la visite de Landau à Copenhague en novembre 1930 jouent un rôle dans la rupture de la collaboration. On retrouve en effet dans la lettre de Peierls et Landau à Fock du 9 décembre des remarques sur l'article de ce dernier avec Jordan qui font

¹ Nous renvoyons le lecteur aux considérations du chapitre précédents sur les deux courants développés au sein de la théorie des champs quantiques relativistes par Jordan et Dirac, opposants une approche ondulatoire et une approche corpusculaire (1.2.1.2).

² Sur Peierls, son séjour à Odessa, et plus globalement ses affinités avec l'URSS, voir la publication de sa correspondance commentée et annotée par Lee [Lee 2007, pp. 99-349]

³ Voir le brouillon de lettre de Fock à Dirac daté du 27 septembre 1930 - Churchill College, Dirac papers, DRAC 3/3.

⁴ Pour la correspondance nous avons à notre disposition différentes sources. Pour les archives des échanges entre Fock et Peierls : ARAN SPb, 1034-3-132 et 1034-3-602. Voir aussi les lettres publiées en version originale par Lee entre Fock et Peierls [Lee 2007, lettres n°65, 76, 86, 95]. Enfin, les principales lettres entre Fock et Peierls ont été publiées en russe par Kojevnikov [Koj 1988]. Ce dernier développe aussi de nombreuses considérations sur le manuscrit commun entre les trois hommes [pp. 121-122] qui est disponible aux Archives de l'Académie des sciences de Russie : ARAN SPb, 1034-1-106.

⁵ Voir Kojevnikov [Koj 1988, pp. 123-124]

directement écho aux commentaires de Bohr concernant la nécessité de travailler avec un corps d'épreuve suffisamment grand¹.

Sur ce principe de base, Landau et Peierls obtiennent alors indépendamment de nouvelles inégalités mathématiques pour la mesure des champs :

$$\Delta E \geq \frac{\sqrt{hc}}{(c\delta t)^2}$$

$$\Delta H \geq \frac{\sqrt{hc}}{(c\delta t)^2}$$

$$\Delta E \Delta H \geq \frac{hc}{(c\delta t)^2 (\delta l)^2}$$

Pour un temps de mesure négligeable face au temps caractéristique d'évolution du champ on a $\delta l \gg c\delta t$, le second membre de la troisième inégalité est négligeable par rapport à celui des deux premières. Par conséquent, les fluctuations des mesures individuelles de champ masquent l'effet quantique de perturbation réciproque des mesure doubles. La conclusion de Landau et Peierls est sans équivoque, les champs ne sont pas mesurables dans le domaine quantique, pour lequel il y a perturbation des mesures doubles².

Mais Bohr ne peut accepter ce résultat qui exclue la notion de champ quantique du domaine d'application de la mécanique quantique. Il décide alors dès septembre 1932 de collaborer à Copenhague avec Rosenfeld³ sur la question de la mesure des champs, et le résultat en est un long article d'une soixantaine de pages paru en 1933 intitulé « Zur Frage der Messbarkeit der elektromagnetischen Feldgrößen » (Sur la question de la mesurabilité des champs électromagnétiques) [BoRo 1933]. L'un des postulats de départ suivi par les deux hommes est que « le problème de la mesure du champ électromagnétique [doit] être *a priori* indépendant de la structure atomistique de la matière, puisque celle-ci n'apparaît pas dans la notion de champ électromagnétique libre obtenue par simple quantification du champ de Maxwell » [Darr 1991, p. 164]. Pour ce faire, le problème est traité en considérant un corps chargé étendu, réparti sur un volume $V = L^3$, initialement attaché à un corps neutralisant par

¹ Lettre de Peierls et Landau à Fock du 9 décembre 1930. *Ibid* [p. 133].

² Voir Darrigol [Darr 1991, pp. 159-160].

³ Sur Rosenfeld, voir sa très complète biographie par Skaar Jacobsen [Skaa 2012]. En particulier, en ce qui concerne la question discutée ici, le second chapitre intitulé « Rosenfeld in Copenhagen » s'avère très informatif [pp.49-94].

des liens dissolubles. T symbolise alors le temps écoulé entre deux mesures successives de l’impulsion du corps chargé, une fois celui-ci libéré du corps neutralisant. Nous épargnons ici au lecteur les détails très techniques de l’article de Bohr et Rosenfeld, et nous nous contentons d’en donner le principal résultat¹. Les deux physiciens parviennent effectivement à donner sens à l’applicabilité de la notion de champ dans le domaine quantique mais pour un cas précis uniquement, à nouveau symbolisé par une inégalité, celui où le corps d’épreuve est suffisamment gros : $L > cT$.

3.2.2. Réflexions sur une théorie de l’unification

Dans le sillage de la claire distinction tracée par les relations d’indétermination de Heisenberg entre le domaine classique et le domaine quantique, c’est au travers de longs développements sur la question de l’applicabilité de la notion de champs quantiques que les acteurs suscités cherchent à donner une légitimité à l’électrodynamique quantique en tant que théorie assise sur des fondements conceptuels solides. Ainsi, aux vues des considérations évoquées précédemment on peut mieux saisir le rôle donné par Fock aux inégalités mathématiques dans la définition du domaine d’application de notions physiques ou de théories, et par conséquent dans ses considérations épistémologiques sur sa discipline. L’article de 1936 sur les approximations [Fock 1936d] apparaît comme une tentative de rationalisation des problématiques posées concrètement en électrodynamique quantique. Afin d’illustrer plus concrètement encore cette idée et de l’élargir, nous avons à notre disposition une seconde source importante avec une publication intitulée « Problema mnogikh tel v kvantovoy mekhanike » (Problème à plusieurs corps dans la mécanique quantique) [Fock 1936b].

Cet article est issu d’une présentation faite par Fock durant la session de Mars de l’Académie des sciences à Moscou, organisée du 14 au 20 mars 1936². La perspective antiréductionniste épistémologique que nous avons mise en avant est évoquée dès l’introduction par Fock : « De ce qui a été dit ici [les présentations de Vavilov, Rozhdestvenskiy

¹ Pour le lecteur intéressé Darrigol en détaille les développements, résultats et différents problèmes ainsi que sa réception [Darr 1991, pp. 163-179].

² Pour plus d’informations sur cette session dédiée à la physique théorique où participent six physiciens de renom (Ioffé, Vavilov, Rozhdestvenskiy, Tamm, Fock et Frenkel) voir l’introduction du volume spécial de *Uspekhi fizicheskikh nauk* qui lui est dédié [Anon 1936].

et Tamm], il est déjà tout à fait clair que chacune des théories de la physique moderne, et peut-être même toute théorie, a un domaine d'applicabilité limité » [Fock 1936b, p. 943]. Lorsqu'il s'agit d'aborder de façon concrète l'électrodynamique quantique – que Fock définit simplement comme la théorie de l'interaction des particules chargées avec le champ électromagnétique environnant – le physicien soviétique est catégorique sur le fait qu'elle « ne prétend pas à l'universalité » [Fock 1936b, p. 943]. Comme toutes les autres théories, elle est évidemment issue d'un processus d'approximation, bien que celui-ci n'ait qu'un caractère hypothétique : la théorie dont elle est l'approximation n'est à cet instant pas connue, l'électrodynamique quantique étant en l'état actuel de recherche la théorie la plus générale à la disposition de Fock.

Si Fock choisit de discuter le problème quantique à plusieurs corps en prenant pour point de départ l'électrodynamique quantique c'est parce qu'elle inclut la mécanique quantique (théorie de Schrödinger), les lois d'interaction des électrons et noyaux dans les atomes et molécules, mais aussi les lois du rayonnement. De plus, dans son souci permanent de délimitation du domaine d'applicabilité d'une théorie il est en mesure de nous expliquer en quoi elle est une approximation, et quels sont les phénomènes qu'elle ne peut pas traiter. La *Figure 9* en fait déjà mention, ce sont les processus intranucléaires et la structure de la matière. C'est ce dernier point qui nous intéresse particulièrement car il nous semble inspiré des débats sur les champs quantiques. Fock est en effet radical, si les considérations sur la structure de la matière ne doivent pas influencer la question de la mesurabilité des champs, alors l'électrodynamique quantique ne peut réciproquement en rien rendre compte de cette première : « Le domaine d'application de cette théorie peut être principalement caractérisé par le fait que, dans son cadre, nous ne pouvons pas prêter attention à la structure des particules élémentaires » [Fock 1936b, p. 943]. Le concept de champ électromagnétique est subordonné au renoncement de considérations sur l'atomicité de la matière, qui est considérée comme un fait expérimental. On voit ici que Fock – qui n'a pas pris en compte ce précepte en 1930 avec Jordan – a su écouter la critique de Bohr et les résultats de ce dernier avec Rosenfeld. Bien qu'il se soit tourné vers d'autres travaux suite à l'échec de sa

collaboration avec Landau et Peierls¹, Fock a toujours été attentif à l'ensemble des débats² comme le montre sa mention explicite des travaux des duos dano-belge et russo-allemand :

Ces lacunes [difficultés dans la recherche de solutions exactes] ont été mises en évidence avec clarté dans le travail du physicien de Kharkov, Landau (avec Peierls), qui a analysé leurs causes physiques. Landau pense même que l'électrodynamique quantique n'apporte rien de fondamentalement nouveau par rapport à son équivalent classique. Ce point de vue extrême a ensuite été réfuté par Bohr et Rosenfeld, qui ont exploré les limites de l'applicabilité de l'électrodynamique quantique. Dans leur étude approfondie, Bohr et Rosenfeld ont montré que l'application de l'électrodynamique quantique se termine là où la structure atomique devient importante par rapport aux instruments de mesure [Fock 1936b, p. 951].

Cependant la principale nouveauté que nous pouvons introduire sur la base de l'exposé de Fock au cours de la session de Mars concerne des considérations sur la possibilité d'une généralisation de l'électrodynamique quantique à un niveau de complexification supérieur. Pour appuyer son propos Fock fait ici mention explicite des développements de Matvei Bronstein en gravitation quantique³, et rappelle que ce dernier a étendu avec succès les travaux sur la seconde quantification de Dirac, Fock et Podolsky à la gravitation [Bron 1936]⁴.

¹ Fock est d'ailleurs plutôt déçu de l'abandon de cette collaboration comme il le manifeste dans une courte lettre à Peierls et Landau du 20 décembre 1930. Dans une lettre à sa femme Genia du 12 janvier 1931, Peierls se montre même très surpris par cette lettre « Now he [Fock] answered very angrily and acted as if we had stolen one of his ideas ». Mais Fock s'explique dans une nouvelle lettre du 15 janvier 1931 : sa colère est avant tout due à la déception d'abandonner un article conjoint qu'il juge alors presque terminé, et en rien à l'idée que Peierls et Landau aient pu lui voler des idées. Lettres publiées par Lee [Lee 2007, pp. 112, 209 et 212-213].

² Dans une lettre du 1^{er} juin 1931, Fock attire l'attention de Dirac sur l'article de Landau et Peierls qu'il juge « très intéressant » - Churchill College, Dirac papers, DRAC 3/2. Mais surtout, il est très probablement présent lors l'exposé sur le sujet fait par Bohr et Rosenfeld en mai 1934 à Leningrad, et auquel assiste Landau. On peut sur ce sujet consulter Skaar Jacobsen [Skaa 2012, pp. 87-88]. Elle discute notamment dans son ouvrage la question de la réception des travaux opposant Landau-Peierls et Bohr-Rosenfeld [pp. 85-90] tout comme Darrigol [Darr 1991, pp. 177-179]. Tous deux signalent qu'après l'article de Bohr et Rosenfeld, la question reste largement ouverte, mais on peut voir qu'ici Fock prend clairement parti en faveur de ceux-ci.

³ Sur Bronstein et le contenu de ses travaux, voir sa biographie par Gorelik et V. Ya. Frenkel [GoFr 1994]

⁴ Notons ici l'un des résultats principaux de Bronstein : il a montré qu'en introduisant des quanta gravitationnels dans le cadre théorique de l'électrodynamique quantique il est possible de dériver l'interaction newtonienne entre les corps, avec le bon signe, de sorte que deux masses sont toujours attirées.

Les travaux de Bronstein sont de plus une véritable investigation du problème de la mesure des champs gravitationnels développée dans la lignée des travaux de Landau-Peierls et Bohr-Rosenfeld¹. Bronstein démontre que la méthode de Bohr et Rosenfeld pour légitimer le concept de « champ en un point » en électrodynamique quantique n'est pas réalisable en gravité quantique. Selon le constat dressé par Vladimir Vizgin et Gennady Gorelik, la conséquence conceptuelle est majeure :

But its main result is the principal irreconcilability of GTR and quantum theory without fundamental reconstruction of the conceptual apparatus, without the substitution of the usual concepts of space and time “by terms which are far more fundamental and devoid of obviousness” [ViGo 1987, p. 299].

En 1936, Fock ne se prononce pas sur les développements de Bronstein relatifs à la mesure des champs, probablement car comme nous le verrons au chapitre quatre (IV.2.1.3), il n'est pas en accord avec l'ensemble des résultats obtenus par le jeune physicien². Mais dans la perspective antiréductionniste que nous avons jusqu'ici mise en évidence, son discours fait écho aux conclusions de Bronstein, et souligne l'incommensurabilité de l'hypothétique nouvelle théorie généralisée par rapport, en particulier, à la mécanique classique :

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, p. 951].

Indéniablement, pour le physicien de Leningrad, poursuivre la généralisation des théories physiques implique différentes révolutions conceptuelles et l'apparition de concepts émergents.

¹ Voir Gorelik et V. Ya. Frenkel [GoFr 1994, pp. 99-112], mais aussi Vizgin et Gorelik [ViGo 1987, pp. 299-300].

² Il faut souligner que Fock connaît particulièrement bien les résultats de Bronstein. En effet, ils sont l'objet de la thèse de ce dernier, soutenue en 1935, dont il est membre du jury.

4. Conclusion

You know, at that time I was still in contact with Professor Krutkov, who was my teacher in quantum mechanics and with Fredericks, and they accepted this [the Compton effect] without any doubt. At the time they were themselves very young, and young men accept more easily such discoveries. You know? (laughs) [Kuhn 1967]

L'interlocuteur de Fock, lorsqu'il prononce ces mots le 11 octobre 1967, n'est autre que Kuhn. Ce dernier se contente alors d'un simple acquiescement en guise de réponse, mais il connaît toute la valeur d'une telle affirmation dans le cadre de ses propres travaux en histoire des sciences. À ce moment-là, Fock n'a pas lu *The Structure of Scientific Revolutions* [Kuhn 1962], il ne sait d'ailleurs pas vraiment à qui il a accordé une interview qui malheureusement s'écourte rapidement¹. De fait, sur la base de nos développements du présent chapitre, il nous semble évident que les deux hommes auraient eu beaucoup à échanger, car les articles de Fock sur lesquels nous avons porté notre attention témoignent de la faculté du physicien soviétique à aborder des thèmes similaires à ceux développés par Kuhn.

C'est le cas lorsqu'il est question de relations interthéoriques, et nous avons ici souhaité mettre en avant la première caractéristique essentielle de la pensée épistémologique de Fock : il se positionne très clairement comme un antiréductionniste épistémologique synchronique. Le physicien russe conçoit bel et bien sa discipline comme opérant à l'aide de multiples théories qui couvrent chacune un domaine phénoménologique qui lui est propre, mais surtout, qui font appel à des concepts émergents qui leur sont spécifiquement associés. Ceux-ci ne peuvent avoir de sens dans une autre théorie et empêchent par conséquent tout approche réductionniste : une théorie particulière n'est pas réductible à une théorie plus générale car elle contient des concepts émergents qui ne peuvent avoir de signification dans la théorie la plus générale. Dans ce cadre, nous avons constaté que la pensée de Fock se base initialement sur l'idée que chaque théorie est obtenue à partir d'une théorie plus générale par le biais d'un processus d'approximation. C'est pourquoi Fock est pour nous plus qu'un simple pluraliste, il est un *pluraliste en série* : la hiérarchisation des théories en termes de « généralité » est conservée, bien que celle-ci n'implique aucunement une hiérarchie

¹ Les derniers mots de Fock qui doit quitter Kuhn pour se rendre à New-York sont « I would also like to remember you name » [Kuhn 1967].

qualitative. En effet, le caractère émergent des notions qui sont associées à chaque théorie implique que le domaine phénoménologique et donc d'application d'une théorie particulière ne soit pas strictement inclus dans celui de la théorie plus générale dont elle est l'approximation. C'est pourquoi chaque théorie est un outil indispensable à une description complète de la nature.

Du principe épistémologique d'antiréductionnisme qui structure la pensée de Fock nous pouvons tirer une première conclusion méthodologique quant à sa pratique scientifique : le physicien doit nécessairement définir avec précision le domaine d'applicabilité des théories et concepts auxquels il recourt. Sur ce point, l'originalité de Fock se situe dans sa volonté de lui donner une expression quantitative au travers d'inégalités mathématiques. Nous avons à ce sujet mis en évidence que Fock est très certainement inspiré dans cette direction non seulement par le rôle fondamental des relations d'incertitude de Heisenberg en mécanique quantique, mais aussi par le vaste débat du début des années 1930 sur la question de la mesurabilité des champs quantiques. Malheureusement, le physicien russe ne délivrera jamais de résultats systématisant cet aspect de sa pensée.

Le rôle joué par les débats sur la mesure des champs quantiques souligne à quel point le développement par Fock d'une pensée antiréductionniste s'inscrit dans un contexte scientifique global qui soulève de façon manifeste la nécessité d'une réflexion sur les relations interthéoriques. Il n'est ainsi pas surprenant de voir que Fock est accompagné dans cette direction par des personnages comme Bohr, Heisenberg ou Dirac. En effet, la révolution quantique et ses importantes conséquences conceptuelles oblige les physiciens à prendre du recul sur leur discipline, et on a pu noter des similarités dans la pensée de Fock, Heisenberg et Kuhn. Les trois hommes manifestent essentiellement la volonté, d'une part, de rationaliser le processus qui a vu une théorie aussi bonne que celle de la mécanique classique être soudainement remise en question par l'apparition de deux nouvelles théories révolutionnaires, et d'autre part, d'étendre cette rationalisation à d'autres exemples, tel l'électrodynamique quantique et la théorie à plusieurs corps chez Fock.

Pour cette dernière, comme nous l'avons vu avec l'exemple de la méthode de Hartree-Fock, l'apparition d'un concept aussi singulier que celui d'échange quantique peut être traité différemment en fonction des acteurs. Hartree ne lui accorde que peu de crédit, alors que Slater ressent le besoin de l'explicitier dans le cadre même de la mécanique quantique. Il faut alors souligner que dans ce cas précis comme de façon plus générale pour répondre aux

spécificités de chaque nouvelle étape des développements de la théorie quantique, y compris futurs, on observe que Fock trouve dans l'antiréductionnisme une réponse à ses yeux satisfaisante aux défis contemporains de la physique : l'échange quantique et de nombreuses autres notions ont un caractère émergent au cœur de théories qui ont un domaine d'application qui leur est propre et qui ne se réduisent pas les unes aux autres. Ainsi, les articles de Fock de 1936 que nous avons ici discutés sont parmi les premiers à présenter un caractère épistémologique. Ils marquent une nouvelle dynamique dans la carrière du physicien russe, que nous nous attellerons à mieux expliciter et compléter dans le chapitre suivant.

Chapitre troisième – Réalisme scientifique

Les débats scientifiques ou philosophiques sur le réductionnisme se font régulièrement en connexion avec une question plus emblématique encore de la philosophie des sciences, celle du réalisme. Par exemple, chez Chibbaro, Rondoni et Vulpiani, même si on ne trouve aucune approche formelle de la question du réalisme, il est en permanence présent dans leur enquête sur le réductionnisme en physique comme en témoigne leur souhait d'intituler leur ouvrage *Reductionism, Emergence and levels of Reality* [ChRV 2014]. Chez Bokulich, la question des relations interthéoriques est connecté à celle du réalisme structurel [Boku 2008, pp. 164-171]. Mais plus spécifiquement encore, une rapide recherche en ligne indique qu'il n'est pas rare de voir réalisme et réductionnisme – ou antiréductionnisme – se partager le titre d'articles scientifiques¹. Cependant, alors que nous nous apprêtons à discuter de réalisme chez Fock, nous souhaitons simplement mettre en garde le lecteur contre la tentation de vouloir chercher des relations de cause à effet entre son antiréductionnisme et son réalisme.

Comme le souligne Alexander Miller dans l'article « Realism » de la *Stanford Encyclopedia of Philosophy* : « the reductionist/non-reductionist issue is really orthogonal to the various debates about realism ». Par conséquent, « il n'y a pas de connexion directe entre la question du réductionnisme et celle du réalisme » [Mill 2014]. Et plus spécifiquement pour Fock, rien ne nous laisse penser que la question de savoir s'il est antiréductionniste parce que réaliste, ou bien l'inverse, fasse sens. Certes, nous observerons au cours du chapitre cinq, lorsque nous nous pencherons plus précisément sur les influences philosophiques de Fock, que son réalisme est probablement antérieur à son antiréductionnisme, mais nous avons montré au chapitre précédent que ce dernier a pour vocation première de répondre concrètement à des problématiques liées à la pratique scientifique. On observe clairement chez le physicien russe une volonté d'avoir recours à des principes épistémologiques qui puissent donner sens à la physique moderne, mais établir une systématique à caractère philosophique entre ces

¹ Notons simplement à destination du lecteur curieux quelques exemples nous paraissant pertinents : « Causation: Reductionism versus Realism » par Tooley [Tool 1990], « Realism Despite Cognitive Antireductionism » par Rohrlich [Rohr 2004], ou encore le chapitre intitulé « Realism and Reductionism » de l'ouvrage de Mackinnon, *Interpreting physics* [Mack 2011, chapitre 8].

différents principes ne semble pas l'intéresser. En effet, comme nous le verrons, l'épistémologie de Fock – sa philosophie – se manifeste de façon très pragmatique en vue de la résolution de problèmes scientifiques perçus avant tout comme techniques. Une fois le problème à son sens résolu, il n'y a pas vraiment lieu de débattre sur de potentielles implications philosophiques profondes même si celles-ci continuent d'alimenter le débat.

L'objectif que nous poursuivons est bien évidemment une reconstruction des principes épistémologiques à la base de la pensée de Fock sur les théories modernes de la physique. C'est pourquoi au cours du présent chapitre consacré à la question du réalisme, l'antiréductionnisme joue un rôle non négligeable. En effet, nous faisons méthodologiquement le choix d'articuler notre argumentation sur un cas d'étude précis qui ne peut être compris qu'en prenant en considération tous les facteurs de son approche. Si la question du réalisme ne reçoit pas un traitement similaire à celle du réductionnisme, insistons sur le fait que notre procédure possède l'avantage de nous permettre en fin de chapitre d'établir une grille de lecture complète nécessaire à la compréhension au cours du chapitre suivant de l'interprétation des théories modernes par Fock. C'est en observant que Fock est non seulement un antiréductionniste mais aussi un véritable réaliste scientifique qui met l'accent sur le rôle joué par le formalisme mathématique, que nous pourrons chez lui reconstruire un concept de rigueur physique qu'il applique concrètement dans son approche des différentes théories.

Le cas d'étude qui est le nôtre au cours de ce chapitre est relatif au domaine qui nous a jusqu'à présent accompagné, la physique quantique. Comme nous l'avons vu, cette dernière occupe largement Fock au début de sa carrière, mais surtout c'est relativement à celle-ci qu'il développe initialement ses vues antiréductionnistes et prend du recul sur sa discipline. Or, comme nous le constaterons, lorsqu'il est question d'en donner une interprétation, la mécanique quantique implique de nombreuses réflexions vis-à-vis de la question du réalisme. Un second commentaire méthodologique sur la structure du présent chapitre est alors nécessaire. Afin de valoriser l'importance des débats sur le réalisme en mécanique quantique, mais aussi pour pouvoir appuyer notre argumentation, il est essentiel de se fixer un point de référence initial. C'est alors l'interprétation dite de Copenhague qui fait office d'orthodoxie

en mécanique quantique. Elle joue un rôle central dans la littérature¹, mais surtout, dans le cas qui nous intéresse, c'est en rapport à celle-ci que Fock développe sa propre interprétation de la théorie.

Bien que cette notion d'orthodoxie puisse être contestée, notamment en raison d'un manque de cohérence interne au sein de la communauté qui se reconnaît comme l'école de Copenhague², sa prédominance, du moins dans les premières décennies suivant l'élaboration de la théorie quantique, en font un outil indispensable à nos développements. C'est pourquoi dans un premier temps du présent chapitre nous établirons les contours de cette interprétation. Nous constaterons que la nécessité de son élaboration repose en grande partie sur une spécificité de la théorie quantique relative à la question de l'observation en physique. C'est alors que nous pourrions introduire dans un second temps le cas d'étude qui nous intéresse, à savoir les débats Bohr-Einstein en théorie quantique, connue plus spécifiquement au travers du paradoxe dit « EPR ». En effet, la réponse apportée par Bohr à la question de l'observation, et qui compose le cœur de l'interprétation de Copenhague, ravive en physique un débat historique sur la question du réalisme qui se matérialise directement par son opposition à Einstein. C'est l'importance historique de cette opposition, mais aussi le fait que Fock prenne directement position dans le débat qui nous permet alors dans un troisième temps de compléter notre enquête sur les vues épistémologiques du physicien russe en y incluant des considérations sur le réalisme. Dans ce but nous ne discuterons pas de la pertinence de l'approche par Fock du paradoxe EPR, mais nous insisterons sur son contenu d'un point de vue épistémologique afin d'établir précisément le cadre d'étude nécessaire à la compréhension de son interprétation des théories modernes de la physique.

Sources :

Nos commentaires sur les sources recourent grandement ceux des chapitres précédents. En effet, ici encore nous nous appuyerons avant tout sur les publications dans les revues

¹ Pour exemple, dans son remarquable exposé de *The Philosophy of Quantum Mechanics*, Jammer fait tout d'abord une présentation des principales caractéristiques de l'interprétation de Copenhague avant de présenter des versions alternatives [Jamm 1974]. Lorsque Freire Junior s'intéresse à un certain nombre de ces alternatives à partir des années 1950 dans *The Quantum Dissidents*, il ne peut que constater qu'il est avant tout question de « défier la monocratie de l'interprétation de Copenhague » [Frei 2015, chapitre 2, p. 17].

² Sur ce sujet, voir Camilleri [Cami 2009].

scientifiques de Fock et de ses contemporains, ainsi que les sources secondaires dont elles sont l'objet. Comme son antiréductionnisme, le réalisme de Fock s'exprime avant tout au travers de sa production scientifique. Notons simplement que l'article autour duquel nous structurons notre pensée est l'introduction en 1936 par Fock à la publication en russe des articles de Einstein, Podolsky et Rosen, et de Bohr sur le paradoxe EPR : « *Mozhno li schitat', chto kvantovo-mekhanicheskoye opisaniye fizicheskoy real'nosti yavlyayetsya polnym? (Vstupitel'naya stat'ya k odnoimennym stat'yam Eynshteyna i Bora)* » (Peut-on considérer la description mécanique quantique de la réalité physique comme complète ? (Introduction aux articles d'Einstein *et al.* et Bohr du même titre)) [Fock 1936c]. Notons toutefois, comme nous le soulignons en début de la troisième partie (III.3.1), que les articles sur la mécanique quantique publiés par Fock en 1935-1936 représentent un ensemble cohérent utile à la compréhension générale de sa pensée [Fock 1935c ; 1936a ; 1936c ; 1936d ; 1936e ; 1936f ; 1936g].

Pour ce qui est de l'interprétation de Copenhague et du débat Bohr-Einstein, comme jusqu'à présent lorsqu'il est question de physique quantique, nous suivons principalement les développements de Jammer dans *The Philosophy of Quantum Mechanics* [Jamm 1974] et de Mehra et Rechenberg dans *The Historical Development of Quantum Mechanics* [MeRe 2000a ; 2000b]. Notons toutefois qu'à chaque instant où il s'est avéré nécessaire d'affiner nos considérations sur la pensée de Bohr, l'ouvrage de Dugald Murdoch, *Niels Bohr's Philosophy of Physics*, nous a été extrêmement utile [Murd 1987].

Ici encore les archives jouent un rôle secondaire, nos travaux cherchant principalement à extraire de la production scientifique de Fock son contenu épistémologique. Notons toutefois que sans avoir consulté à Saint-Pétersbourg le manuscrit d'un exposé de Fock sur les travaux de von Neumann, nous n'aurions probablement jamais saisi l'importance majeure de la distinction faite par le physicien russe entre « rigueur mathématique » et « rigueur physique ». Explicitée en toute fin de ce chapitre, elle nous permet d'établir la grille de lecture nécessaire à notre analyse à venir de l'interprétation des théories modernes de la physique par Fock.

1. Mécanique quantique et observabilité : l'interprétation de Copenhague

La question de la définition de l'interprétation de Copenhague est rendue difficile par la diversité des personnalités et courants pouvant prétendre à son rattachement¹. Le terme est d'autant plus ambigu qu'il n'est pas véritablement employé par ceux qui en sont les fondateurs et se présente davantage comme un label usité par ses opposants². C'est pourquoi nous faisons le choix de sa définition en nous appuyant sur l'une de ses plus fondamentales régularités, la doctrine de Niels Bohr. En effet ce dernier se présente comme une indéniable figure d'autorité³ mais aussi l'un des acteurs les plus actifs sur les questions d'interprétation. Comme le souligne le philosophe de la physique Dugald Murdoch : « Bohr's construal of quantum mechanics established itself as the basis of the orthodox interpretation – the "Copenhagen interpretation" » [Murd 1987, p. 179]. Toujours par souci de clarté, nous réduirons notre description de la compréhension de Bohr de la mécanique quantique – de l'interprétation de Copenhague – à un noyau commun partagé de tous. Notre attention se tournera donc vers deux éléments concrets et fondateurs, que sont la complémentarité et les relations d'indétermination de Heisenberg. Ainsi malgré les variantes constatées au sein de la communauté se réclamant de cette interprétation, lorsque nous emploierons la dénomination « interprétation de Copenhague », c'est bien à cet ensemble de deux éléments que nous ferons appel. Nous souhaitons de plus donner une description de ce courant d'interprétation dans sa dimension historique, afin de mieux suivre les débats dont Fock est un contemporain. C'est pourquoi nos références principales pour cette sous-section et la suivante sont *The Philosophy of Quantum Mechanics* de Jammer [Jamm 1974] et *The Historical Development of Quantum Mechanics* de Mehra et Rechenberg [MeRe 2000a ; 2000b].

¹ Sur ce point voir Stapp [Stap 1972], Chevalley [Chev 1985 ; 1997], Beller [Bell 1996], ou encore Camilleri [Cami 2009].

² Voir Camilleri [Cami 2009] qui retrace sa construction comme un « mythe » à partir des années 1950 dans le cadre d'une critique marxiste de l'interprétation de Copenhague. On peut aussi consulter la discussion qui en est faite par Freire Jr. [Frei 2015, pp. 79-83].

³ Sur Bohr comme figure d'autorité, on peut notamment consulter Beller [Bell 1999b], qui souligne que sa forte personnalité pouvait donner lieu à un « suivi sans critique de la philosophie de Copenhague » [p. 254]. Voir aussi Chevalley [Chev 1997].

1.1. Les relations d'indétermination de Heisenberg

Au travers de nos discussions du chapitre précédent nous avons insisté sur l'importance chez Fock des inégalités mathématiques dans la définition du domaine d'applicabilité d'une théorie. Si Fock ne les introduit pas de façon systématique car leur détermination n'est pas l'objet de ses développements, il ne peut cependant s'affranchir de mentionner l'un des résultats majeurs de la mécanique quantique et qui s'exprime sous la forme d'une inégalité mathématique : les relations d'indétermination de Heisenberg. Les manuels de mécanique quantique l'érigent tous au rang de théorème fondamental de la théorie, et l'utilisent comme marqueur de la rupture avec la physique classique¹. Pour reprendre un énoncé qui fait autorité dans la physique, voici ce qu'en dit Feynman dans son cours : « vous faites des mesures d'un objet et si vous pouvez déterminer la composante en x de son impulsion avec une incertitude Δp , vous ne pouvez pas en même temps connaître sa position en x avec une incertitude moindre que $\Delta x \approx h/\Delta p$ » [FeLS 2014, p. 15]. h est ici la constante de Planck et le principe est généralement formalisé sous la forme suivante :

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

Il est cependant essentiel de replacer le théorème d'indétermination de Heisenberg dans son contexte historique afin de mieux saisir les problématiques en jeu et leurs implications d'un point de vue épistémologique. L'article fondamental qui introduit les relations de Heisenberg est publié en 1927 dans les *Zeitschrift für Physik* sous le titre « Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik » (Le contenu physique des cinématiques et mécaniques quantiques)² [Heis 1927]. Dans son ouvrage autobiographique, *Der Teil und das Ganze* (La Partie et le Tout) [Heis 1969], Heisenberg fait remonter la genèse de cet article à la difficulté de rendre compte de la dualité onde-corpuscule dans la nouvelle mécanique mais aussi à une longue discussion qu'il a avec Einstein

¹ Dans le cours de Feynman il est évoqué dès la page 15 [FeLS 2014], en page 27 chez Cohen-Tannoudji, Diu et Laloë [CoDL 1973], et sert même d'ouverture au chapitre premier chez Landau et Lifshitz [LaLi 1974].

² Il est difficile de traduire le terme « anschaulichen » et d'en conserver toutes les subtilités de sens. Nous basons donc notre traduction française sur le titre d'une version anglaise publiée en 1983 par Wheeler et Zurek : « The Physical Content of Quantum Kinematics and Mechanics » [Heis 1927']. Voir la discussion de ce problème linguistique dans l'article « The Uncertainty Principle » de la *Stanford Encyclopedia of Philosophy* [HiUf 2016].

au printemps 1926¹. Les deux hommes échangent alors particulièrement sur des questions épistémologiques et philosophiques qui concernent divers thèmes majeurs des problèmes d'interprétation de la théorie. Ces derniers vont nous accompagner au cours du présent chapitre : la question de l'observation en physique, le langage à utiliser pour décrire cette dernière ou encore le réalisme. Heisenberg place une réplique d'Einstein au cœur de son raisonnement sur les relations d'indétermination : « Seule la théorie décide de ce que l'on peut observer »². C'est que la question de l'observation est au cœur de tous les débats, notamment depuis que le formalisme de la nouvelle mécanique quantique n'est pas en mesure de pouvoir représenter la notion de trajectoire d'un électron alors que celle-ci est « observée » dans une chambre de Wilson³. Heisenberg réalise alors que si la théorie rend impossible la stricte observation de la trajectoire d'une particule, il ne faut pas oublier que dans la chambre de Wilson il est question d'une séquence discrète de positions par des gouttelettes d'eau condensées. Le problème est alors redéfini en ces termes :

La question correcte devait donc être posée ainsi : Peut-on représenter, dans le cadre de la mécanique quantique, une situation où un électron se trouve à peu près – c'est-à-dire à une certaine imprécision près – en une position donnée, et possède à peu près – c'est-à-dire à nouveau à une certaine imprécision près – une vitesse donnée ? Et peut-on rendre ces imprécisions suffisamment faibles pour qu'il n'y ait pas de contradiction avec l'expérience ? [Heis 1969', p. 113]

¹ Dans la version française voir les chapitres « La mécanique quantique et une discussion avec Einstein (1925-1926) » et « Départ vers une terre nouvelle (1926-1927) » [Heis 1969', pp. 87-117]. Cette présentation des événements est bien évidemment quelque peu romancée, mais pour une approche plus technique on peut consulter Jammer [Jamm 1974, pp. 56-58], Mehra et Rechenberg [MeRe 2000a, pp. 130-135] ainsi que Hilgevoord et Uffink [HiUf 2016].

² Heisenberg raconte une balade nocturne au Fælledpark de Copenhague pour réfléchir aux implications de cette phrase d'Einstein qui le conduit vers les relations d'indétermination [Heis 1969', pp. 113-114]. Pour approfondir les échanges entre Heisenberg et Einstein, et distinguer ce qui est uniquement de l'ordre du récit dans les souvenirs de Heisenberg, le lecteur peut se pencher sur les commentaires apportés dans les trois sources complémentaires de la précédente note.

³ La chambre de Wilson, aussi appelée chambre à brouillard, permet la détection de particules sous la forme de traînées de condensation. Pour plus de détails sur son fonctionnement et ses applications voir Das Gupta et Ghosh [GuGh 1946].

Par conséquent, l'article de Heisenberg en 1927 a tout d'une investigation sur les possibilités d'observation en mécanique quantique. Il s'appuie sur des situations voulues comme concrètes d'expérimentation, et notamment l'observation d'un électron à travers un microscope¹. En effet, le physicien allemand se place dans une perspective operationaliste² de la science qui veut que les concepts soient définis par l'ensemble des opérations qui lui sont associées et qui régissent son application effective :

When one wants to be clear about what is to be understood by the words "position of the objects," for example of the electron (relative to a given frame of reference), then one must specify definite experiments with whose help one plans to measure the "position of the electron"; otherwise this word has no meaning [Heis 1927', p. 62].

Dans le cas du microscope, la mesure de la coordonnée de position x d'un électron est limitée par la longueur d'onde de la lumière incidente. Ainsi la précision de la mesure, Δx , est fonction de λ : $\Delta x \sim \lambda$. Il est donc possible pour une très faible longueur d'onde (rayons gamma) d'obtenir une grande précision sur la mesure de la position d'un électron. Mais comme le montre Heisenberg, l'effet Compton, soit la diffusion inélastique d'un photon sur un électron, entre aussi en jeu dans le processus de mesure, ce qui induit une variation de l'impulsion de l'électron selon une valeur $\Delta p_x = h/\lambda$. Par conséquent $\Delta x \Delta p_x \sim h$. À l'aide d'un raisonnement similaire concernant l'analyse d'une expérience d'effet Doppler, Heisenberg montre aussi que l'impulsion peut être mesurée avec précision mais au prix d'une perte d'information sur la position. Ainsi, la formule $\Delta x \Delta p_x \sim h$ reste valable et inévitablement il en conclut : « the more precisely the position is determined, the less precisely the momentum is known, and conversely » [Heis 1927', p. 64]. Toujours dans la même perspective, Heisenberg s'appuie aussi sur l'analyse d'une expérience de Stern-Gerlach³ et montre : « a precise determination

¹ Sur l'expérience de pensée menée par Heisenberg concernant l'observation d'un électron par un microscope, voir Jammer [Jamm 1974, p. 63], Mehra et Rechenberg [MeRe 2000a, pp. 157-163], mais aussi Darrigol [Darr 1991, pp. 138-140].

² L'élaboration explicite du point de vue operationaliste est contemporaine de Heisenberg et attribuée au britannique Percy W. Bridgman. Sur le sujet, voir Leroux [Lero 2006].

³ L'expérience de Stern-Gerlach, mise au point en 1922, permet de déterminer le moment magnétique d'un atome en le faisant passer au travers d'un champ magnétique non uniforme de direction verticale. Pour une approche historique de l'expérimentation voir le passionnant récit de Bretislav et Dudley [BrDu 2003]. Sur la

of energy can only be obtained at the cost of a corresponding uncertainty in time » [Heis 1927', p. 68].

1.2. Heisenberg face à Bohr

Il est alors essentiel de noter que si Bohr accepte les résultats de Heisenberg, et la validité des relations d'indétermination, il est en désaccord avec l'approche intellectuelle de l'allemand et l'interprétation qu'il fait à ce moment de ses résultats¹. En réalité, depuis quelques temps déjà, les deux hommes suivaient dans leurs raisonnements des directions quelques peu différentes². Leurs divergences se situent en particulier dans la volonté ferme de Bohr de maintenir sur un même plan les représentations ondulatoires et corpusculaires, celles-ci, bien que s'excluant mutuellement étant nécessaires pour fournir une description complète des phénomènes atomiques. Heisenberg de son côté estime en 1927 qu'il n'y a pas nécessité de mettre au premier plan la dualité onde-corpuscule et qu'il est possible sur la base du formalisme, d'un point de vue corpusculaire et discontinuiste, d'obtenir une interprétation physique univoque des grandeurs³.

Par conséquent, alors que Heisenberg conçoit ses relations comme une limitation de l'applicabilité de notions classiques, comme la position ou l'impulsion, aux phénomènes quantiques, Bohr insiste sur le fait que ce n'est pas l'applicabilité de la description ondulatoire *ou* corpusculaire qui est en jeu mais bien leur utilisation simultanée, étant donné que seule cette dernière peut rendre compte d'une description complète des phénomènes. Bohr trouve alors comme argument en sa faveur le recours par Heisenberg aux relations de Einstein-de Broglie dans la dérivation des relations d'indétermination : $\lambda = h/p$ ou $\nu = E/h$. Ainsi, les

déduction des relations d'indétermination pour l'énergie et le temps sur la base des principes de cette expérience voir Jammer [Jamm 1974, p. 63-64] mais aussi Mehra et Rechenberg [MeRe 2000a, pp. 158-161].

¹ Sur les désaccords entre Heisenberg et Bohr suite à la découverte des relations d'indétermination voir Jammer [Jamm 1974, pp. 64-71], Mehra et Rechenberg [MeRe 2000a, pp. 181-186] ou Murdoch [Murd 1987, pp. 46-54].

² Heisenberg lui-même dans *La Partie et le Tout* met en avant les divergences de son point de vue avec celui de Bohr avant la découverte des relations d'indétermination [Heis 1969', pp. 111-112].

³ Comme nous ne reviendrons pas sur le personnage de Heisenberg suite à cette sous-partie, notons ici que ce n'est pas le point de vue qu'il tient tout au long de sa carrière. Très tôt, comme en témoigne notamment son ouvrage *The Physical Principles of the Quantum Theory* en 1930, il place lui aussi la dualité onde-corpuscule au centre de son interprétation de la théorie [Heis 1930].

inégalités de Heisenberg connectent les attributs corpusculaires avec les attributs ondulatoires et expriment directement la dualité onde-corpuscule. En réalité, sans recours aux relations de Einstein-de Broglie tout raisonnement sur des expériences de pensée reste dans le domaine classique et ne peut permettre la dérivation des relations d'indétermination¹.

Jusqu'ici Heisenberg mettait uniquement l'accent sur la discontinuité de la mécanique quantique comme origine de l'indétermination. Suite à ses discussions avec Bohr, dans un *addendum* à son article de 1927, il combine les deux points de vue :

Above all, the uncertainty in our observation does not arise exclusively from the occurrence of discontinuities, but is tied directly to the demand that we ascribe equal validity to the quite different experiments which show up in the corpuscular theory on one hand, and in the wave theory on the other hand. [...] I owe great thanks to Professor Bohr for sharing with me at an early stage the results of these more recent investigations of his – to appear soon in a paper on the conceptual structure of quantum theory – and for discussing them with me [Heis 1927', p. 83].

Alors, Heisenberg annonce ici les développements à venir de Bohr sur la complémentarité.

1.3. Bohr et la complémentarité

La première présentation publique des idées de Bohr sur la complémentarité a lieu le 16 septembre 1927 à Côme, lors du Congrès international de physique célébrant le centenaire de la mort d'Alessandro Volta. Dans une intervention intitulée « The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory » [Bohr 1927], Bohr introduit l'idée de complémentarité :

D'une part, pour définir selon les conceptions ordinaires l'état d'un système quantique, il faut faire abstraction de toute action extérieure ; mais alors, d'après le postulat quantique, on exclut du même coup toute possibilité d'observation ; et en premier lieu, les concepts d'espace et de temps perdent leur sens immédiat. Si d'autre part, pour rendre l'observation possible, nous admettons l'éventualité d'interactions avec des instruments de mesure appropriés, qui n'appartiennent pas au système, il devient impossible, par la nature même des choses, de donner une définition univoque de l'état du système, et il ne peut plus être question de causalité au sens ordinaire du mot. Il faut donc envisager une modification radicale du rapport entre la description spatio-temporelle et le principe de causalité qui symbolisent

¹ Voir Jammer [Jamm 1974, pp. 66-68].

respectivement les possibilités idéales d'observation et de définition, et dont l'union est caractéristique des théories classiques : d'après l'essence même de la théorie quantique, nous devons en effet nous contenter de les concevoir comme des aspects complémentaires, mais mutuellement exclusif de notre représentation des résultats expérimentaux [Bohr 1927', pp. 51-52].

Comme nous le voyons, Bohr oppose clairement deux descriptions des phénomènes quantiques. On retrouve d'une part une « description spatio-temporelle », et de l'autre « le principe de causalité ». Ces deux termes renvoient respectivement aux composantes exclusives des inégalités de Heisenberg. La « description spatio-temporelle » fait référence à la position et au temps, soit une description corpusculaire des objets quantiques, alors que « le principe de causalité » fait appel à l'impulsion et l'énergie, et une description ondulatoire. Ces deux types de représentations, fondamentalement classiques dans leurs modalités d'expression, sont donc en vertu de la dualité onde-corpuscule et des inégalités de Heisenberg mutuellement exclusives. Mais elles sont également indispensables – complémentaires – pour rendre compte du système de façon complète¹.

Dans *The Philosophy of Quantum Mechanics*, Jammer déduit de son analyse de la complémentarité qu'elle peut être schématiquement résumée par la chaîne de déduction logique suivante [Jamm 1974, p. 101] :

- (a) Indivisibilité du quantum d'action (postulat quantique).
- (b) Discontinuité (ou individualité) des processus élémentaires.
- (c) Non contrôlabilité de l'interaction entre l'objet et l'instrument.
- (d) Impossibilité d'une (stricte) description spatio-temporelle et, dans le même temps, causale.
- (e) Renoncement aux modes classiques de description.

¹ Pour une analyse plus complète de la complémentarité le lecteur peut se tourner vers la définition donnée par Bitbol dans le *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences* [Bitb 2006], Jammer pour une approche historique de la complémentarité dans sa version initiale [Jamm 1974, pp. 85-107], ainsi que Mehra et Rechenberg [MeRe 2000a, pp. 163-199]. Murdoch donne une approche plus complète des implications philosophiques et de l'évolution de la pensée de Bohr [Murd 1987, pp. 57-108]. Faye permet pour sa part une mise en perspective au cœur de l'interprétation de Copenhague comprise comme un ensemble plus large [Faye 2014]. Les articles fondateurs de la pensée de Bohr concernant la complémentarité ont été publiés en 1932 en français sous le titre *La théorie atomique et la description des phénomènes* [Bohr 1932].

Bohr considère comme le fondement même de la théorie quantique ce qu'il appelle le « postulat quantique », symbolisé par la non nullité du quantum d'action de Planck. C'est donc naturellement le point de départ de son raisonnement. C'est celui-ci qui implique une discontinuité (individualité) des processus atomiques qui n'était jusqu'alors pas connue des théories classiques. Cette discontinuité, par un processus d'échange d'énergie fini, implique une interaction non négligeable entre l'objet étudié et l'instrument de mesure. C'est ce que nous avons constaté dans l'expérience de pensée conduite par Heisenberg en vue de la découverte des relations d'indétermination. De cette interaction, Bohr déduit qu'« on ne peut par conséquent attribuer ni aux phénomènes ni à l'instrument d'observation une réalité physique autonome au sens ordinaire du mot » [Bohr 1927', p. 51]. De cette nécessité de considérer le système, objet mesuré et appareil de mesure, comme un ensemble, il affirme – selon l'argumentation de l'extrait de 1927 susmentionné – l'impossibilité d'une description spatio-temporelle et causale simultanée, et par conséquent la nécessité de la complémentarité.

Bohr a très rapidement conscience que la complémentarité est basée de manière essentielle sur l'utilisation du langage classique, les expériences ne pouvant être décrites autrement que par celui-ci, et le physicien ne pouvant renoncer aux formes usuelles de la perception¹. On pourrait voir ici une contradiction avec le dernier point de la chaîne de déduction de Bohr sur la complémentarité, la nécessité de renoncer aux modes classiques de description. Cependant, la complémentarité s'accommode d'un usage du langage classique en le mettant en jeu dans des considérations mutuellement exclusives. L'usage simultané de ces caractères exclusifs entraîne une indétermination, illustrée par les relations de Heisenberg, et par conséquent la description qui en découle n'a rien de *complet* au sens classique.

2. Le paradoxe EPR et l'inévitable question du réalisme

Suite à la formulation des relations d'indétermination et au développement de la complémentarité par Bohr, l'interprétation dite de Copenhague va trouver en la personne d'Albert Einstein un opposant de premier plan. La question du débat entre Bohr et Einstein

¹ Voir notamment l'introduction de *La théorie quantique et la description des phénomènes* [Bohr 1932, pp. 1-21]. Pour plus de développements sur ce point voir von Weizsäcker [Weiz 1971].

sur la mécanique quantique, qui culmine en 1935 avec l'exposition du fameux paradoxe EPR, a déjà été largement discutée dans la littérature¹. Comme mis en avant par Jammer en 1974 déjà [Jamm 1974, pp. 156-158], les différentes études historiques sur le sujet ont fait émerger différentes dimensions du débat : il peut symboliser le caractère irréconciliable du matérialisme et de l'idéalisme [Naum 1959], la difficulté d'atteindre une synthèse consistante des concepts de la relativité et de la mécanique quantique [Kuzn 1965], un défaut de communication [BoSc s. d.], ou encore la question du réalisme en physique [Hübner 1973]. C'est de fait cette dernière dimension qui nous intéresse le plus ici, et autour de laquelle nous souhaitons donner un bref compte-rendu du débat EPR. En effet, ce dernier illustre en grande partie les enjeux interprétatifs auxquels la théorie quantique doit faire face dès son élaboration, et soulève le vaste problème du positionnement des physiciens théoriciens par rapport à la question du réalisme. Ainsi, il apparaît qu'une analyse minutieuse de l'interprétation par Fock de la mécanique quantique ne peut se passer de considérations sur le sujet. D'autant plus que, comme nous le détaillerons, Fock est en Union soviétique un participant actif au débat.

2.1. Présentation du paradoxe

Comme bien connu, EPR est une abréviation de Einstein-Podolsky-Rosen, du nom des trois auteurs qui proposent en 1935 une expérience de pensée qui poursuit l'objectif déclaré de réfuter la complétude de la mécanique quantique, soit l'idée que tout élément de la réalité physique doit avoir une contrepartie dans la théorie physique. Einstein, assisté de Podolsky et Rosen à l'Institute for Advanced Study de Princeton publie « Can Quantum Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete » dans *Physical Review* [EiPR 1935]. Dès 1927 il avait exprimé son scepticisme vis-à-vis des relations d'indétermination et de la complémentarité, mais c'est avec cet article de 1935 que sa critique trouve sa forme la plus emblématique².

¹ On peut citer, pour le lecteur à la recherche d'un point de vue complet sur la question, les approches de Hooker [Hook 1972], Jammer [Jamm 1974, pp. 108-251], Murdoch [Murd 1987, pp. 155-199 ; 1994], Mehra et Rechenberg [MeRe 2000b, pp. 713-759], Whitaker [Whit 2004] et bien entendu l'article de Fine dans la *Stanford Encyclopedia of Philosophy* [Fine 2013]

² *Ibid.* Ces différentes sources, auxquelles on peut ajouter Howard [Howa 1990], mentionnent les origines du débat du paradoxe EPR et retracent notamment les différentes étapes de l'opposition entre Einstein et Bohr qui débute en réalité de façon formelle en 1927, lorsqu'au cours du 5^e Congrès Solvay Einstein prend

Pour expliciter le raisonnement suivi dans cet article¹, il convient tout d’abord de définir ce qui est entendu par « réalité physique ». Notons alors que le trio de Princeton spécifie une condition suffisante de réalité physique, que l’on peut appeler *critère de réalité* :

If, without in any way disturbing a system, we can predict with certainty (i. e., with probability equal to unity) the value of a physical quantity, then there exists an element of physical reality corresponding to this physical quantity [EiPR 1935, p. 777].

Appliquée à la mécanique quantique, cette définition de la réalité physique implique en vertu du théorème d’indétermination de Heisenberg que « quand l’impulsion d’une particule est connue, sa position n’a pas de réalité physique » [p. 778]. Le constat est bien évidemment généralisé à deux opérateurs non commutatifs de la théorie, soit deux quantités physiques incompatibles – qui nécessitent des descriptions complémentaires au sens de Bohr – et les trois hommes posent alors les deux propositions suivantes qui peuvent en découler :

- (a) « Either the quantum-mechanical description of reality given by the wave-function is not complete ».
- (b) « Or when the operators corresponding to two physical quantities do not commute the two quantities cannot have simultaneous reality » [p. 778].

Les deux propositions étant mutuellement exclusives, en accord avec l’interprétation de Copenhague (a) est fausse alors que (b) est vrai, et la théorie est donc considérée comme complète. Cependant le trio de Princeton entend démontrer que (b) est fausse, et par conséquent que la théorie quantique est incomplète.

Considérant initialement que la fonction d’onde permet une description complète de la réalité physique d’un système, Einstein, Podolsky, et Rosen, ont alors recours dans leur article à une expérience de pensée conduisant à la détermination de deux quantités complémentaires. Le système est composé de deux particules (1 et 2) initialement en interaction et qui sont par conséquent sujettes aux lois de conservation de la position relative

connaissance de la complémentarité. Howard pousse même son enquête en amont de cette date, jusqu’au premières traces de scepticisme du physicien allemand vis-vis de la théorie quantique.

¹ Sur le contenu de l’article de Einstein-Podolsky et Rosen voir Jammer [Jamm 1974, pp. 181-189], Murdoch [Murd 1987, pp. 163-168 ; 1994, pp. 308-312], Mehra et Rechenberg [MeRe 2000b, pp. 717-725], Whitaker [Whit 2004, pp. 1315-1325] et Fine [Fine 2013].

et du moment linéaire total. Théoriquement, lorsque la position ou la quantité de mouvement d'une particule est connue, celle de l'autre l'est aussi. C'est à ce stade que les auteurs introduisent tacitement deux affirmations :

- (c) La séparabilité : au moment d'une mesure sur la première des deux particules il existe une réalité propre à la seconde. Bien que corrélés les systèmes possèdent une identité propre.
- (d) La localité : « since at the time of measurement the two systems no longer interact, no real change can take place in the second system in consequence of anything that may be done to the first system » [EiPR 1935, p. 779].

Par conséquent, lors de la mesure de la position de la particule 1, la particule 2 n'est en rien perturbée et en vertu des lois de conservation nous connaissons aussi sa position. Une mesure conduite sur le moment linéaire de la particule 1 est soumise aux mêmes conclusions : selon le même principe nous connaissons nécessairement celui de la particule 2. En somme, des mesures conduites sur la particule 1 permettent d'obtenir pour la particule 2 des valeurs de la position et du moment linéaire. Il est alors possible de leur attribuer une réalité physique simultanée. Pour les trois auteurs, une contradiction – le paradoxe¹ – est ainsi révélé : bien que partant du postulat que la fonction d'onde est une description complète du système, il est démontré que la proposition (b) sur la non existence simultanée de la réalité de deux quantités physiques complémentaire est fausse, et que par conséquent la proposition (a) sur l'incomplétude d'une description de la réalité par la fonction d'onde en mécanique quantique est vraie.

2.2. La réponse de Bohr

Bien évidemment, Bohr réagit rapidement à l'article d'Einstein, Podolsky et Rosen². Alors que celui-ci est publié le 15 mai, le danois envoie dès le 29 juin une courte lettre à l'éditeur de *Nature* dans laquelle il rejette le critère de réalité physique employé par le trio. Il estime que celui-ci contient une ambiguïté essentielle lorsqu'il s'applique aux phénomènes quantiques. Pour lui : « the procedure of measurement has an essential influence on the conditions on

¹ Einstein, Podolsky et Rosen n'emploient pas le terme de paradoxe dans leur article.

² Sur la réponse de Bohr voir Jammer [Jamm 1974, pp. 194-197], Murdoch [Murd 1987, pp. 168-172 ; 1994, pp. 311-315], Beller et Fine [BeFi 1994], Mehra et Rechenberg [MeRe 2000b, pp. 725-738], Whitaker [Whit 2004, pp. 1325-1329] ainsi que Fine [Fine 2007, 2013].

which the very definition of the physical quantities in question rests. Since these conditions must be considered as an inherent element of any phenomenon to which the term “physical reality” can be unambiguously applied, the conclusion of the above-mentioned authors [Einstein, Podolsky, Rosen] would not appear to be justified » [Bohr 1935a].

Bohr développe cette idée dans un article du même titre que celui de Einstein, Podolsky et Rosen, publié lui aussi dans *Physical Review* [Bohr 1935b]. Dans un premier temps il essaie tout d’abord de montrer que la situation physique décrite par le trio de Princeton dans leur article n’est en rien une exception et qu’elle reflète en réalité une situation générale de la mécanique quantique qui demande pour toute identification de la propriété d’un système la considération d’un appareillage expérimental concret. Pour illustrer ce propos il envisage la mesure de l’impulsion et de la position d’une particule à l’aide d’un diaphragme, mais il démontre qu’il n’est pas possible de réaliser les deux opérations de mesure simultanément.

En effet, le choix de mesurer l’une ou l’autre des variables implique l’emploi de dispositifs expérimentaux mutuellement exclusifs. D’une part, la mesure de la position fait appel à un diaphragme connecté de façon rigide au support qui définit le cadre spatial de référence, et d’autre part, celle de l’impulsion fait appel à un diaphragme mobile (pour enregistrer le recul) en suspension sur ce même support. Ainsi, la mesure de la position pour une particule exclut la possibilité de mesurer son impulsion et vice-versa comme le souhaitait Einstein. La première mesure sur une particule a une implication directe : « an influence on the very conditions which define the possible types of prediction regarding the future behavior of the system » [Bohr 1935b, p. 700]. Par conséquent, lorsque Einstein, Podolsky, et Rosen parlent, dans leur définition du « critère de réalité », de prédire avec certitude la valeur d’une quantité physique « sans d’aucune manière perturber un système », ils font état d’une situation ambiguë. Bohr n’exclut pas la localité, il n’y a pas d’effet sur la seconde particule, mais étant donné que la « réalité physique » de tout phénomène est dépendante de l’ensemble des conditions définissant les différents types de prédiction le concernant, la perturbation du système par le choix de la mesure de la position ou de l’impulsion d’une particule rend les conclusions de l’article EPR caduques.

Le résultat de toute mesure en mécanique quantique nous informe non pas sur l’état de l’objet en tant que tel, mais sur l’ensemble de la situation expérimentale à laquelle il appartient. C’est donc principalement à l’appui d’un argument qui prend le système étudié

comme un ensemble indissociable – objet et appareillage – que Bohr sauve, de son point de vue, la complétude de la mécanique quantique¹.

2.3. La question du réalisme

En observant que la réponse de Bohr à Einstein se situe sur le terrain du critère de réalité physique, on comprend rapidement en quoi la dispute entre les deux hommes reflète la question complexe du réalisme en mécanique quantique. Einstein souhaite démontrer que la mécanique quantique est incomplète car elle ne peut rendre compte de la réalité physique de toutes les entités. De son côté, en assumant que l'objet étudié forme avec l'appareillage conduisant à son observation un système indivisible, Bohr conçoit la mécanique quantique comme une théorie de l'observation et écarte toutes considérations ontologiques sur les entités en tant que telles. Les deux hommes semblent alors se placer au cœur d'un long débat philosophique qui oppose le réalisme scientifique à l'instrumentalisme². Le réalisme scientifique est une thèse qui affirme l'existence des entités décrites par les théories scientifiques et de leurs attributs vis-à-vis des situations d'observation, alors que l'instrumentalisme conçoit les théories scientifiques comme des instruments nous permettant de prédire des observations et de concevoir commodément une description des phénomènes. La science aurait alors pour but principal de « sauver les apparences »³, les concepts scientifiques étant uniquement définis par des procédures instrumentales de mesure. L'instrumentalisme trouve notamment l'une de ses formes contemporaines dans le positivisme de Mach et à sa suite chez les positivistes logiques pour lesquels l'objet premier et unique de la science est de construire des théories empiriquement adéquates.

Ainsi, l'apparente dichotomie mise explicitement en avant par les discussions sur le paradoxe EPR vaut à Bohr d'être régulièrement associé à un courant antiréaliste, voire positiviste, pendant qu'Einstein tient la position du réaliste. Cette dernière, bien avant la réponse de Bohr et en préambule de l'article EPR, est rendue explicite par un commentaire

¹ Pour une version plus détaillée de cette conclusion et l'appui que Bohr peut prendre sur la différence entre l'observation en mécanique classique et en mécanique quantique voir Jammer [Jamm 1974, pp. 196-197].

² Sur le débat entre les deux courants philosophiques – et une définition plus complète de ceux-ci – voir la définition de réalisme par Tiercelin dans le *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences* [Tier 2006], et l'article « Scientific Realism » par Chakravartty de la *Stanford Encyclopedia of Philosophy* [Chak 2017].

³ L'expression est popularisée par l'ouvrage *Sauver les apparences. Sur la notion de théorie physique de Platon à Galilée* publié en 1908 par Pierre Duhem [Duhe 1908].

que l'on prête à Podolsky dans un article du *New York Times* publié le 4 mai 1935 sous le titre « Einstein Attacks Quantum Theory » :

Physicists believe that there exist real material things independent of our minds and our theories. We construct theories and invent words (such as electron, position, etc.) in an attempt to explain to ourselves what we know about our external world and to help us to obtain further knowledge of it. Before a theory can be considered to be satisfactory it must pass two severe tests. First, the theory must enable us to calculate facts of nature, and these calculations must agree very accurately with observation and experiment. Second, we expect a satisfactory theory, as a good image of objective reality, to contain a counterpart for every element of the physical world. A theory satisfying the first requirement may be called a correct theory, while, if it satisfies the second requirement, it may be called a complete theory¹.

La littérature à notre disposition qui utilise le débat entre Bohr et Einstein pour traiter de la question du réalisme de l'un ou l'autre des acteurs est impressionnante². Celle-ci atteste de l'étonnante vigueur du débat réaliste dans l'interprétation de la théorie quantique. Or il convient de noter qu'une grande partie de la littérature vise à contester la stricte opposition entre les deux acteurs, et à montrer que la complémentarité de Bohr n'est pas synonyme d'abandon du réalisme³. Cette littérature témoigne non seulement de la perception populaire d'une reprise d'un débat entre le réalisme scientifique incarné par Einstein et l'instrumentalisme incarné par Bohr, mais aussi que cette perception doit être dépassée. En

¹ Extrait de l'article « Einstein Attacks Quantum Theory » paru le 4 mai 1935 dans le *New York Times*. Reproduit par Jammer [Jamm 1974, p. 189].

² Il est difficile d'être exhaustif sur le sujet tant la bibliographie est vaste. Voici cependant quelques pistes pour le lecteur. Pour des considérations générales sur le réalisme à l'appui du débat EPR voir Hooker [Hook 1972], Wojciech [Wojc 1989] Whitaker [Whit 2004], Plotnisky et Khrennikov [PIKr 2015], mais aussi la discussion qui en est faite par Mehra et Rechenberg [MeRe 2000b, pp. 747-759]. Sur le réalisme d'Einstein, avec un large recours au débat EPR mais aussi à l'une de ses plus importantes conséquences avec le problème du « chat de Schrödinger » voir Fine [Fine 1986]. Voir aussi Beller et Fine et leur analyse approfondie de la réponse de Bohr en 1935 [BeFi 1994]. Les sources de la note suivante, concernant Bohr et le réalisme, sont aussi utiles.

³ Voir Murdoch qui reconstruit chez Bohr ce qu'il appelle « a weaker form of realism », combinant des aspects réalistes et antiréalistes [Murd 1987 ; 1994]. Favrholt [Favr 1994], Krips [Krip 1994], Mackinnon [Mack 1994], ou encore Folse [Fols 1985 ; 1986 ; 1994] soulèvent la difficulté de fournir une réponse définitive sur le sujet. Ce dernier cependant le range parmi les réalistes, alors que pour Faye il est un antiréaliste [Faye 1994].

effet, comme en témoigne Jammer, au-delà des apparences, une grande variété de positions philosophiques sont tenables, et tenues, au sein même de l'interprétation de Copenhague¹ :

Nor it [the Copenhagen interpretation] is necessarily linked with a specific philosophical or ideological position. It can be, and has been, professed by adherents to most diverging philosophical views, ranging from strict subjectivism and pure idealism through neo-Kantianism, critical realism, to positivism and dialectical materialism [Jamm 1974, p.87].

3. Fock : un réaliste scientifique

Les deux articles dans *Physical Review* d'Einstein, Podolsky et Rosen, et de Bohr, sont publiés en 1936 en russe dans *Uspekhi fizicheskikh nauk*. Ils sont alors accompagnés d'une longue introduction de Fock où ce dernier prend clairement parti pour Bohr [Fock 1936c]. Par conséquent, au vu de nos considérations précédentes, la question de la position du physicien russe vis-à-vis du réalisme scientifique nous apparaît légitime. Dans nos développements, nous observerons que la cohérence du discours de Fock dans le débat EPR se développe à l'appui de ses conceptions antiréductionniste, mais aussi qu'il se présente comme un véritable réaliste scientifique. Cette position s'exprime chez lui de façon assez particulière dans son rapport aux mathématiques et la nécessité de leur donner une signification physique. Sur cette base, nous pourrions ainsi reconstruire comment les principes épistémologiques qui guident la pensée de Fock se manifestent directement dans sa pratique scientifique. C'est ainsi que nous élaborerons une grille de lecture épistémologique que nous appliquerons dans le chapitre suivant à son interprétation des théories modernes de la physique.

3.1. Contexte et aperçu général

C'est une lettre du 4 avril 1936 de Fock à Bohr qui nous renseigne sur les circonstances de la publication en russe des articles du débat EPR :

Notre rencontre à Leningrad et à Kharkov en 1934 fut mémorable pour moi. Par la suite, j'ai beaucoup pensé à nos discussions, en particulier ces derniers temps où j'ai étudié vos travaux publiés dans Phys. Rev. (en réponse à l'article d'Einstein et al.). Bien que je connusse déjà votre

¹ Sur ce sujet voir notamment Beller qui discute les différentes positions au sein de l'école de Copenhague concernant le réalisme [Bell 1996] ou Camilleri qui en introduction de son article sur la construction du « mythe de l'interprétation de Copenhague » met en avant l'hétérogénéité de celle-ci [Cami 2009].

point de vue, c'est seulement maintenant que je le comprends parfaitement, après avoir à nouveau pensé à votre claire et convaincante représentation. Etant donné que l'éclaircissement de votre point de vue est de grand intérêt pour un large cercle de physiciens, selon la proposition de l'éditeur local « Les progrès des sciences physiques », j'ai traduit en russe votre article de Phys. Rev. qui sera publié avec une introduction par moi, et la traduction de l'article d'Einstein, Podolsky et Rosen à paraître dans ce même journal. J'espère que cela ne vous dérange pas¹.

L'un des enseignements à tirer de cette lettre est bien évidemment que Bohr ait pu influencer Fock lorsqu'il s'agit des questions d'interprétation de la mécanique quantique. En effet, le voyage du Danois en URSS en 1934 n'est pas seulement une occasion pour Fock de se retrouver au cœur des débats sur la mesure des champs quantiques², il s'apparente aussi à une véritable initiation à la complémentarité au contact de son fondateur.

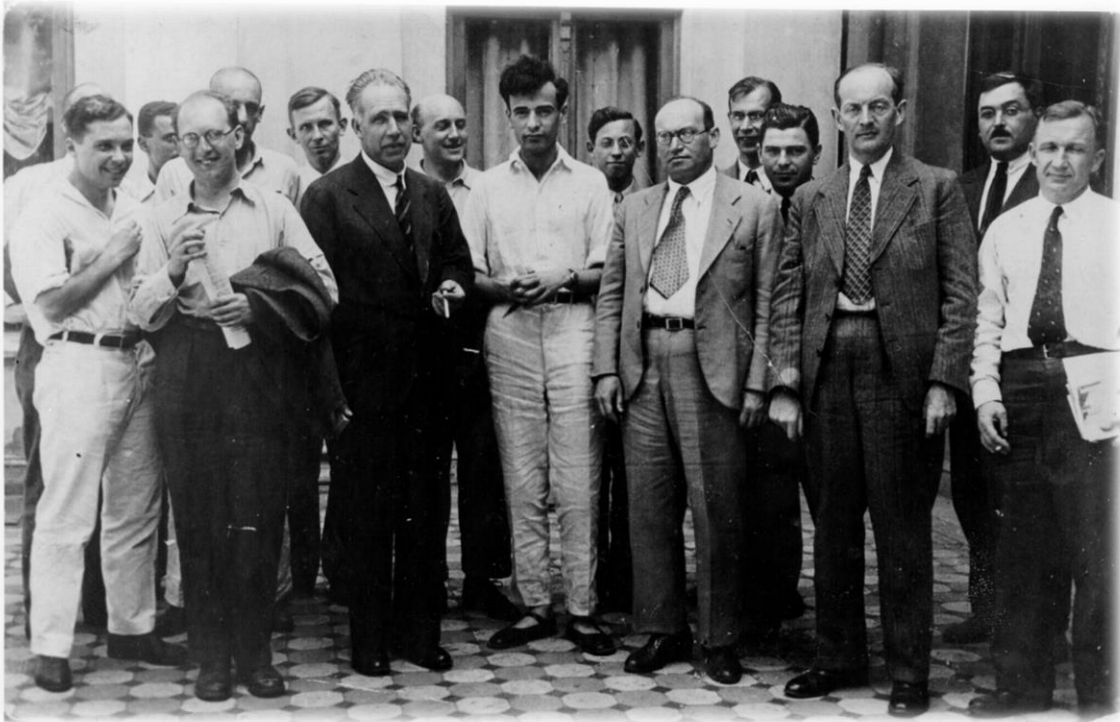


Figure 10. Niels Bohr à Kharkov en 1934. De gauche à droite : Ivanenko D., Tisza L., Rosenfeld L., Rumer Yu., Bohr N., Crowther J.G., Landau L., Plesset M., Frenkel Ya., Waller I., Williams E., Gordon W., Fock V. A., Tamm I. [Niels Bohr Archive].

¹ Lettre de Fock à Bohr du 4 avril 1936 - Niels Bohr Archives, Microfilm B. S. C. 1930-1945, N°19. Original en allemand.

² Voir la note 2 en page 148. Bohr et Rosenfeld font en mai 1934 à Léningrad un exposé sur le problème de la mesure des champs quantiques. Voir Skaar Jacobsen [Skaa 2012, pp. 87-88].

De façon concrète, les questions d'interprétation de la théorie quantique deviennent un véritable sujet de production scientifique pour Fock suite à la visite de Bohr. Il entend notamment les diffuser dans la communauté des physiciens soviétiques¹ et c'est le cas pour la première fois le 21 février 1935 lorsqu'il présente au cours de la réunion annuelle de l'Université de Léninegrad un exposé intitulé « Chto vnesla teoriya kvantov v osnovnyye predstavleniya fiziki. » (Qu'apporte la théorie quantique aux notions de base de la physique)². Aussi, le 6 février 1936 à l'université N. D. Zelinski de Moscou, il fait une intervention intitulée « Osnovy kvantovoy mekhaniki i granitsy yeye prilozhimosti » (Principes de la mécanique quantique et les limites de son applicabilité). Au cours de celle-ci il aborde le débat Bohr-Einstein de façon succincte. Publié par l'université dans un premier temps [Fock 1936a], cet exposé paraît aussi en trois parties dans *Priroda* (Nature), journal scientifique généraliste de l'Académie des sciences de l'URSS [Fock 1936e ; 1936f ; 1936g]. Ces présentations, conjuguées à celles que nous avons discutées au chapitre précédent sur les approximations et le problème à plusieurs corps, mais aussi à l'introduction des articles du débat EPR, témoignent toutes d'une prise de recul de Fock sur la théorie quantique.

La cohérence de cet ensemble se manifeste notamment au travers des positions antiréductionnistes que nous avons développées précédemment. Le domaine d'applicabilité de la mécanique quantique, ainsi que de ses concepts respectifs, est discuté. Comme Fock le précise dans sa conférence à l'Université de Moscou le point de contact entre la théorie de Schrödinger et la mécanique classique peut être caractérisé dans le cas d'une particule matérielle par deux inégalités. Pour la première, il note tout d'abord que les effets quantiques s'estompent dans le cas de grandes masses et de faibles accélérations. Pour une particule de masse m , de vitesse v et d'accélération w , la solution de l'équation de Schrödinger peut être « exprimée avec une précision suffisante » par la solution des équations de la physique classique si l'inégalité suivante est respectée [1936g, p. 51] :

¹ Cette volonté est notamment exprimée dans l'introduction aux articles du débat EPR. La publication de la traduction de l'article de Bohr est notamment justifiée car « il a contribué dans une large mesure à la clarification pour de nombreux physiciens des nouveaux concepts physiques qui sont liés à la mécanique quantique » [Fock 1936c, pp. 436-437].

² L'exposé est publié en 1935 par *Sotsialisticheskaya rekonstruktsiya i nauka* (Reconstruction socialiste et science), aussi connu sous l'acronyme *SORENA* [Fock 1935c].

$$\frac{mv^3}{w} \gg \hbar$$

Comme nous l'indique de façon plus explicite son article sur les approximations de 1936 [Fock 1936d, p. 1082], avec cette inégalité Fock fait directement référence à une méthode d'approximation aujourd'hui connue sous le nom de WKB – Wentzel-Kramers-Brillouin¹. Cette approximation permet d'étudier le régime semi-classique d'un système quantique, la fonction d'onde étant développée asymptotiquement au premier ordre de la puissance du quantum d'action \hbar .

Pour la seconde inégalité, comme l'explique le physicien russe à Moscou, pour que le caractère ondulatoire de la matière soit lui aussi insignifiant dans le phénomène étudié les inégalités de Heisenberg doivent être prises en considération :

$$\Delta x \Delta p \gg \hbar$$

Fock affirme alors que « si chacune de ces conditions est respectée, il est possible d'utiliser avec une précision suffisante *les concepts classiques et les équations classiques*² » [Fock 1936a, p. 51]. L'apparition d'une limitation pour l'application des concepts, qui n'est pas évoquée pour la première inégalité seule, souligne l'importance fondamentale du principe de Heisenberg pour les questions d'interprétation. Surtout, nous retrouvons l'idée que chaque théorie possède un appareillage conceptuel qui lui est propre. Ajoutons enfin qu'en ce qui concerne la généralisation de la mécanique quantique vers la théorie quantique relativiste Fock pose aussi une condition sous forme d'inégalité, la limite relativiste de la vitesse de la lumière : $v < c$.

La perspective antiréductionniste discutée au chapitre précédent se retrouve donc très clairement dans les premiers écrits de Fock relatifs à l'interprétation de la mécanique quantique. Mais comme nous allons en particulier l'illustrer dans la sous-section suivante avec l'exemple de la fonction d'onde, le discours tenu par le physicien soviétique sur l'émergence de concepts entre théories, sur leur antiréductionnisme, lui permet aussi de justifier la position qu'il tient dans le paradoxe EPR, à savoir de soutenir Bohr. Car comme en témoigne ses premiers mots dans son introduction au débat, la question qui se pose avec la mécanique

¹ Pour plus d'informations sur cette méthode d'approximations et les contributions respectives de Wentzel, Kramers et Brillouin, voir Mehra et Rechenberg [MeRe 2000a, pp. 20-36].

² Souligné par nous-même.

quantique est bien celle d'une théorie qui ne répond plus à une vision traditionnelle de la physique :

En mécanique quantique nous sommes confrontés à de nouvelles idées physiques, si différentes des représentations habituelles de la théorie classique, que leurs développements présentent des difficultés considérables, en particulier aux esprits éduqués dans la physique classique [Fock 1936c, p. 436].

3.2. Les notions classiques et quantiques d' « état »

Dans cette même introduction aux articles du débat EPR, Fock synthétise l'opposition entre les différents acteurs de la façon suivante :

La controverse entre Einstein, Podolsky et Rosen, d'une part, et Bohr, d'autre part, peut, si on le souhaite, être considérée comme un différend sur la signification physique de la fonction d'onde [Fock 1936c, p. 437].

La question ici posée est par ailleurs si importante qu'elle fait l'objet d'une publication à part entière, « Fizicheskiy smysl volnovoy funktsii v kvantovoy mekhanike » (La signification physique de la fonction d'onde en mécanique quantique) [Fock 1936f], suite au redécoupage dans *Priroda* de la conférence moscovite de Fock du 6 février 1936 [Fock 1936a]. Comme nous allons l'observer, en plaçant la signification physique de la fonction d'onde au centre du débat, le développement suivi par Fock dans le cas de l'EPR est riche d'enseignements sur la façon dont il s'appuie sur ses conceptions antiréductionnistes pour justifier la complétude de la mécanique quantique.

En effet, le discours de Fock ne peut être compris que si l'on prend en compte l'incommensurabilité des concepts classiques et quantiques, et en particulier de la notion d' « état ». Dans son discours sur la formation des notions nous avons déjà noté (voir *Figure 9*) que Fock considère la notion d'état individuel des électrons dans un atome comme un concept émergent de l'approximation faite à partir de la mécanique quantique dans la méthode de Hartree-Fock. Il est d'ailleurs explicite sur les notions qui appartiennent ou n'appartiennent pas à la mécanique quantique, dans le sens de la théorie de Schrödinger :

Therefore, in quantum mechanics there exist such notions as mass and charge of particles and the notions of the mechanical system in its proper meaning (i. e., independent from radiation), of the system stationary state (for example, of an atom or molecule), but there are no such

notions as the states of particular particles forming the system (electrons in the atom) and of the objective description of the system behavior [Fock 1936d, p. 1078]¹.

Ainsi, pour Fock, l'erreur d'Einstein dans le paradoxe EPR vient justement de sa persistance à conserver en mécanique quantique ces deux dernières notions :

Einstein dit que le concept de base de la théorie est la notion d'état, décrit par une fonction d'onde. Einstein comprend le mot « état » dans le sens qui lui est habituellement attribué en physique classique, c. à. d. dans le sens de totalement objectif et totalement indépendant de toute information le concernant. De là vient tout le paradoxe [Fock 1936c, p. 437].

Cette notion d'objectivité est importante. Elle est définie par Fock à l'aide de celle « d'expérience la plus précise possible » [p. 438] qui désigne le processus expérimental permettant de déterminer de façon simultanée le plus grand nombre de grandeurs mécaniques possible. Or, en mécanique classique, un agencement de différents dispositifs expérimentaux permet d'obtenir sans interférences l'ensemble des informations sur un système étudié. Par conséquent, l'état de ce dernier peut être considéré comme objectif car il n'est pas nécessaire de préciser le processus permettant d'obtenir l'information à son sujet.

Fock oppose à cette vision dite « objective » de l'état, une version quantique qui « fusionne avec le concept "d'information sur l'état obtenu comme résultat d'une expérience déterminée la plus précise possible" »². Ainsi, pour le Russe, la fonction d'onde ne « décrit pas l'état dans le sens ordinaire, mais plutôt "l'information sur l'état" » [p. 437]. Cette notion d'état au sens quantique ne peut pas être considérée comme un concept objectif tel que décrit précédemment, et la raison invoquée par Fock de cette perte d'objectivité est bien évidemment le théorème d'indétermination de Heisenberg :

En effet, les relations de Heisenberg montrent que les différentes expériences peuvent interférer les unes avec les autres. C'est pourquoi il peut y avoir une infinité d'expériences les plus précises possibles : l'une d'entre elle sera l'expérience la plus précise possible sur la position, une autre sur la quantité de mouvement, et ainsi de suite [p. 438].

¹ Traduit du russe par V. V. Fock [Fock 2004, p. 397].

² L'emploi du verbe « se fusionner » (*slivat'sya* forme imperfective de *slit'sya*) est importante. En effet, il annonce la liberté prise par Fock dans nombre de ses travaux ultérieurs d'employer directement le terme « état », bien souvent accompagné du qualificatif « quantique », pour désigner ce qu'il entend par le concept « d'information sur l'état obtenu comme résultat d'une expérience déterminée la plus précise possible ».

Pour un même système, à chaque résultat d'expérience est associé une fonction d'onde qui fournit l'enregistrement des informations obtenues au cours de cette expérience. Lors d'une mesure, un système physique voit son état totalement réduit à celui qui a été mesuré ; c'est ce qui est généralement appelé la « réduction du paquet d'onde »¹. Cette dernière présuppose que la fonction d'onde d'un système se compose d'une superposition de vecteurs propres – ce que Fock appelle « l'information sur l'état » – qui se réduit à un vecteur propre unique au cours de l'observation. Or, en considérant que la fonction d'onde décrit pour un système donnée un état « objectif », Einstein ne peut admettre la réduction du paquet d'onde par l'opération de mesure, et considère donc la théorie comme incomplète. *A contrario*, en admettant que la fonction d'onde décrit « l'information sur l'état », le paradoxe disparaît. Ici, c'est en acceptant le caractère émergent et incommensurable des concepts de la physique entre différentes théories, en étant rigoureux sur leurs définitions et la détermination de leur domaine d'applicabilité, que Fock développe son raisonnement.

3.3. Les mathématiques comme langage de la nature

En dépit du fait que le débat Bohr-Einstein ait pu être décrit comme l'objet d'une simple opposition entre deux philosophies, et après avoir observé que Fock en donne une réponse sur la base d'une analyse conceptuelle, nous devons mettre l'accent sur le fait que le Russe considère que c'est le contenu de la théorie qui permet de trancher le débat :

[...] la réponse à la question du premier article [Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?], qui coïncide avec la réponse de Bohr, est immédiatement issue de considérations qui peuvent se retrouver directement dans le cadre de la mécanique quantique [p. 436].

Pour Fock, l'article de Bohr n'a aucune valeur heuristique, il n'apporte rien de nouveau si ce n'est la « clarification pour de nombreux physiciens des nouveaux concepts physiques qui sont liés à la mécanique quantique » [p. 437]. Alors, comment définir précisément ce « cadre de la mécanique quantique » qui contient déjà toute l'information, y compris celle conduisant à son interprétation ? Il apparaît qu'il s'agit tout simplement du formalisme mathématique. Fock

¹ Conceptualisée par Heisenberg dès son article fondamental sur les relations d'indétermination [Heis 1927], la « réduction du paquet d'onde » est notamment incorporée au formalisme de la théorie en 1932 par von Neumann [Neum 1932].

est explicite sur son rôle fondamental dès 1932 dans son manuel *Nachala kvantovoy mekhaniki* (Principes de la mécanique quantique) :

Pour identifier et décrire les nouveaux concepts et propriétés des objets physiques, c.-à-d. pour la formulation des nouvelles lois de la nature, il était nécessaire de créer une nouvelle langue [...] En parlant de langue, nous avons principalement à l'esprit la langue mathématique [Fock 1932a, p. 12].

Fock a une approche du formalisme mathématique qui lui est propre et nous souhaitons en révéler le contenu en montrant tout d'abord ce qui l'oppose à Bohr sur ce point.

Si le Danois ne nie pas que « the soundness of quantum-mechanical description [...] is based on a coherent mathematical formalism covering any procedure of measurement » [Bohr 1935b, p. 696], c'est bien sur ce dernier aspect, sur les processus expérimentaux, qu'il développe sa réponse à Einstein, Podolsky et Rosen :

The extent to which an unambiguous meaning can be attributed to such an expression as “physical reality” cannot of course be deduced from *a priori* philosophical conceptions, but – as the authors of the article cited themselves emphasize – must be founded on a direct appeal to experiments and measurements [p. 696].

Fock, en revanche, met directement l'accent sur le rôle des relations d'indétermination et de la fonction d'onde, qui sont des notions mathématiques de la mécanique quantique. S'il peut traiter – et résoudre – le paradoxe en s'appuyant sur la signification de la fonction d'onde, c'est pour deux raisons principales : d'une part le théorème d'indétermination de Heisenberg justifie l'abandon de la notion d'état « objectif », et d'autre part la règle de Born justifie le concept « d'information sur l'état », en donnant à ce dernier une représentation formelle. La règle de Born, souvent appelée « interprétation probabiliste », est énoncée par Max Born en 1926¹. Dans sa forme la plus simple elle exprime alors que le carré du module de la fonction d'onde d'une particule donne la probabilité de trouver celle-ci en un point donné. De façon généralisée, elle permet d'accéder à la répartition des probabilités pour les différentes observables d'un système. À plusieurs reprises en 1936, Fock souscrit très clairement à ce type

¹ Pour plus d'informations sur la règle de Born dans son contexte historique, voir Jammer [Jamm 1974, pp. 38-44] ainsi que Mehra et Rechenberg [MeRe 2000a, pp. 36-55]. L'article fondateur de Born sur le sujet, « Zur Quantenmechanik der Stossvorgänge » (Sur la mécanique quantique des processus de collision), est publié dans *Zeitschrift für Physik* en 1926 [Born 1926].

d'approche de la fonction d'onde qui permet de mathématiser l' « information sur l'état ». C'est notamment exprimé de façon très claire dans son article sur les approximations :

The information written down in the form of the wave function also allows one to calculate *the probabilities* of different results of later measurements of different quantities, and also the *mean value* of such measurements results [Fock 1936d, p. 1077]¹.

Bien entendu, comme la grande majorité de la communauté des physiciens, Bohr accepte aussi la règle de Born, et la différence des approches respectives de Bohr et Fock dans le débat EPR pourrait sembler futile. Mais l'insistance du physicien Russe sur ce point, ainsi que le fait qu'il a pu à plusieurs reprises dans sa carrière mentionner ses divergences avec le Danois en ce qui concerne sa perception du formalisme mathématique de la mécanique quantique, nous incite à penser que sa démarche n'est pas anodine. Notamment, notons que dans un article de 1951, intitulé « Kritika vzglyadov Bora na kvantovuyu mekhaniku » (Critique des vues de Bohr sur la mécanique quantique), Fock développe et explicite son opposition à Bohr :

Le rôle qu'assigne Bohr à la mécanique classique dans la description et l'explication des phénomènes atomiques est extrêmement curieux. Plutôt que d'admettre directement que l'objet et le but de la mécanique quantique sont une étude plus approfondie des propriétés des objets atomiques, Bohr dès le début dit : « An adequate tool for the complementary mode of description is offered by the quantum-mechanical formalism »². Ainsi le rôle de la mécanique quantique se réduit à l'élaboration de recettes formelles pour le calcul des probabilités des différents résultats de l'observation, sans aucune appréhension de la nature des phénomènes. En décrivant le formalisme de la mécanique quantique, Bohr met fortement l'accent sur son caractère soi-disant seulement symbolique. Bohr dit que dans ce formalisme

¹ Traduit du russe par V. V. Fock [Fock 2004, p. 396]. Voir aussi l'introduction de l'approche probabiliste dans le cas d'une sommation de deux fonctions d'ondes dans l'article de 1936 sur la signification de la fonction d'onde [Fock 1936f]. Fock introduit alors la règle de Born pour répondre à la question suivante : « Comment lier la probabilité de l'une ou l'autre cas avec les valeurs incluses dans l'enregistrement de nos informations, c. à. d. la fonction d'onde ? » [p. 9]. Dans l'article introductif au débat EPR, Fock fait mention de l'opérateur densité introduit en 1932 par von Neumann [Fock 1936c], qui « permet de calculer les probabilités et l'espérance mathématique de toutes les grandeurs mathématiques propres aux informations disponibles » [p. 439].

² Fock cite ici l'article « On the notions of causality and complementarity » publié en 1948 dans *Dialectica* [Bohr 1948], et qui lui sert de fil rouge à sa critique de Bohr. Même si Fock cite Bohr en russe, nous préférons ici reproduire les passages originaux du Danois en anglais.

« the canonical equations of classical mechanics are retained while the physical variables are replaced by symbolic operators subjected to a non-commutative algebra » [Fock 1951a ,p. 8].

Comme nous allons le développer, Fock souhaite en réalité s'opposer à cette approche du formalisme de la mécanique quantique par Bohr comme un outil purement symbolique. Dans son analyse de la philosophie de la physique de Bohr publiée en 1987, Murdoch justifie cette perception par le Soviétique de l'approche du Danois [Murd 1987, pp. 216-221]. Il met en avant le fait que pour Bohr une théorie purement mathématique est une construction idéale de la raison, dont les entités sont abstraites. Par conséquent son applicabilité au monde physique réel est d'ordre instrumental. Pour Murdoch, Bohr « held a non-realist view of the cognitive status of applied mathematics – non-realist in the sense that he was highly doubtful of the view that the physical world has a structure that is uniquely describable in terms of some theory of pure mathematics » [Murd 1987, p. 217].

En 1951, Fock continue :

On ne sait pas pourquoi le formalisme mathématique de la mécanique quantique serait plus symbolique que le formalisme de n'importe quelle autre théorie physique. Les mathématiques fonctionnent toujours avec des symboles, mais puisque dans les théories physiques ces symboles admettent une certaine interprétation physique, ils cessent d'être des symboles abstraits, et reflètent la réalité. C'est le cas quel que soit la complexité du formalisme mathématique appliqué. L'équation de Schrödinger de la mécanique quantique n'est pas plus ou moins symbolique que l'équation de Hamilton-Jacobi en mécanique classique. Bohr souligne que la mécanique classique traite avec des variables physiques alors que la mécanique quantique n'a affaire qu'à des opérateurs symboliques. Il est difficile de résister à la considération qu'une telle comparaison est nécessaire à Bohr, afin de se laisser la possibilité d'émettre des doutes quant à la réalité de l'existence des propriétés physiques avec lesquels fonctionne la mécanique quantique. Le désir de se passer d'une interprétation directe du formalisme de la mécanique quantique, en lui laissant seulement une signification symbolique, conduit Bohr à l'absurde. Ainsi, il dit : « These symbols themselves, as is indicated already by the use of imaginary numbers, are not susceptible to pictorial interpretation ». Comme si les nombres imaginaires incarnaient quelque chose de mystique et que leur utilisation éliminait la possibilité d'une interprétation visuelle ! Pourtant, on les utilise en continu dans la physique classique, en particulier en électronique [Fock 1951a ,pp. 8-9]¹.

¹ *Ibid.*

Fock témoigne ici clairement d'une conception qui peut être considérée comme une approche platonicienne des mathématiques appliquées : les « symboles » mathématiques peuvent être interprétés physiquement et reflètent la réalité. Le primat de la pensée sur les mathématiques que l'on observe chez Bohr n'est pas partagé par Fock. Chez lui, la réalité possède une structure qui peut être décrite par une théorie mathématique, et à ses yeux, l'essence même de sa discipline est de pouvoir la révéler. C'est cette relation aux mathématiques qui soutient chez Fock une très claire position épistémologique en faveur du réalisme scientifique qui affirme l'existence des entités postulées par les théories scientifiques. Une position que Fock n'hésite pas à clamer dans le débat EPR :

La mécanique quantique est véritablement engagée dans l'étude des propriétés objectives de la nature, dans le sens où ses lois sont dictées par la nature elle-même et non pas par l'imagination humaine [Fock 1936c, p. 437].

Un abandon de l'objectivité telle que discutée ici – dans le sens où elle écarte la pensée humaine – conduirait nécessairement à une forme de subjectivisme, et par conséquent, à un abandon du réalisme¹. Il faut alors noter que cette notion d'objectivité ne doit pas être confondue avec celle utilisée dans nos développements pour caractériser les concepts d' « états » classique et quantique. En effet, dans ce second cas, la perte d'objectivité d'un « état » quantique est une conséquence directe de la question de l'observation par des instruments physiques classiques qui, en vertu du théorème d'indétermination et de l'antiréductionnisme des théories, ne peuvent donner un compte-rendu complet des différents concepts émergents de la mécanique quantique. Pour Fock, il n'y a dans ce sens aucune forme de subjectivité, et par conséquent le réalisme est conservé dans la théorie quantique.

Notons que la conception du formalisme mathématique que nous venons de décrire chez Fock est le fondement d'une approche particulièrement pragmatique, pour ne pas dire prosaïque, du problème philosophique de la réalité physique. En effet, il apparaît qu'à aucun moment de sa carrière Fock ne se pose de questions sur les implications éventuelles d'une telle position. Le schéma selon lequel la réalité du monde extérieur est directement accessible à la pensée au travers du formalisme mathématique est accepté tel quel, sans qu'à ses yeux il

¹ Pour une discussion de l'objectivisme et du subjectivisme voir Nadeau [Nade 2006].

ne puisse, ni ne doive, être questionné. C'est la raison pour laquelle le problème EPR est traité par le physicien russe comme un pur problème de logique. Inévitablement, pour spécifier cette attitude, il est essentiel d'établir un lien avec la personnalité de Fock. Citons son collègue Piotr Kapitsa : « [Fock] is quite cut off from ordinary life by almost total deafness. His whole life is a persistent struggle with scientific problems »¹. En 1938, son professeur Rozhdestvenskiy, dans un document soutenant l'élection du théoricien comme Académicien, explique sa manière de penser : « Fock thinks by mathematical images and it is very difficult for him to go deeply into the mentality of an experimentalist or average man »². Ce genre de propos conduisent notamment Gennady Gorelik, dans le cadre de ses travaux sur Fock et la relativité générale, à s'exprimer sur lui en ces termes : « [i]f one had to characterize the foundation of Fock's frame of mental references in two words, they seem to be "mathematicity and sobriety" » [Gore 1993, p. 322]. Indéniablement, l'homme dévoue sa vie à la science, aux problèmes physiques, et aborde leur résolution en vertu d'une rationalité profondément logique et mathématique, comme en témoigne très clairement son approche du problème EPR. Par conséquent, les implications philosophiques discutées par beaucoup n'ont pour lui aucun intérêt dès lors qu'elles sortent du cadre strict de la résolution d'un problème physique.

3.4. L'importance de la « signification physique »

Si le caractère fondamental du formalisme mathématique pour la description de la réalité du monde extérieur mis en avant chez Fock n'a aucune véritable implication philosophique pour le physicien, il convient toutefois d'explicitier le rôle qu'il joue dans son approche pratique des sciences, et par conséquent de préciser la nature pragmatique de sa pensée. Dès 1927, dans sa première publication en russe dédiée à la mécanique quantique et traitant concrètement de son expression mathématique, il considère que « pour la compréhension de la théorie de Schrödinger il est *indispensable*³ de se familiariser avec les règles de base du formalisme mathématique dans lequel sont traités ses concepts [niveaux d'énergie, intensité des raies spectrales] » [Fock 1927a, p. 111]. En effet, comme déjà mentionné, « en physique

¹ Lettre de Kapitsa à Mezhlauk du 12 février 1937 [BoRS 1990, pp. 337-338].

² Cité et traduit en anglais par Gorelik [Gore 1993, p. 321]. Le document original est reproduit en 1990 par V. Ya. Frenkel [Fren 1990, pp. 165-169].

³ Souligné par nous-même.

théorique [l]es symboles [d'une théorie mathématique] correspondent à des notions physiques bien déterminées » [Fock 1960, p. 10]. Et c'est ce point qui joue un rôle fondamental quant à la pratique scientifique du soviétique.

Celui-ci est formellement développé dès 1930, dans un exposé intitulé « Predel'nyye zadachi teorii kvantov » (Problèmes extrémaux de la mécanique quantique), qui est aussi publié en 1935 dans *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Fock 1935d]¹. Par « problèmes extrémaux » il faut entendre l'approche mathématique de la mécanique quantique, soit la théorie des opérateurs linéaires. Ainsi, le sujet de cette présentation de Fock est le suivant : « the relation between the mathematical theory of extremal problems and the physical theory of quanta »². Le Russe met bien ici en relation une pure théorie physique, celle de la théorie quantique, à une pure théorie mathématique, celle des opérateurs linéaires. Il faut alors noter l'application toute particulière qu'il met à démontrer l'adéquation de la théorie mathématique à la théorie physique, en la confrontant à la nécessité non seulement de décrire des quantités physiques, mais aussi que chacune de ses notions puisse faire l'objet d'une interprétation physique. Fock conclut alors dans le cas présent : « a certain physical notion corresponds to each notion from the mathematical theory of linear operators »³. Plus encore, il propose un « lexique » qui permet la traduction des notions du langage mathématique vers le langage physique⁴ :

¹ Nous travaillons ici sur la base de la traduction par V. V. Fock publiée en 2004 dans les *Selected Works* de Fock [Fock 2004, pp. 381-387]. L'original y est indiqué comme ayant été publié dans le tome 15 de *Uspekhi fizicheskikh nauk*, en 1935. Il subsiste néanmoins un doute sur sa publication. En effet, l'article est introuvable dans la version du tome 15 de l'année 1935 publiée en ligne par la revue.

² *Ibid*, [p. 381].

³ *Ibid* [p. 386].

⁴ *Ibid* [p. 387].

Mathematics	Physics
Linear operator L	Physical quantity λ
Characteristic numbers λ'	Values taken by the physical quantity
Fundamental function for the characteristic number λ	State of a mechanical system for which λ , equals λ'
Commutativity of operators	Simultaneous observability of physical quantities
Absolute value squared $ \psi ^2$ of the wave function	Probability density
Normalization $\int \psi ^2 dV = 1$	Total sum of probabilities equals 1
Orthogonality $\int \bar{\varphi}\psi dV = 0$	Incompatibility of states φ and ψ .
Completeness of the system of fundamental functions $\psi(r, \lambda')$	Values $\lambda = \lambda', \lambda'' \dots$ are the only possible ones
Integral $\int \bar{\psi}L\psi dV$	Expectation value of quantity λ in state ψ .
Square of the decomposition coefficient of $\varphi(r)$ by $\psi(r, \lambda')$, $ \int \bar{\psi}(r, \lambda')\varphi(r)dV ^2$	Probability of the equality $\lambda = \lambda'$ in the state φ
Normalization for the continuous spectrum	Finite probability of the inequality $\lambda' < \lambda < \lambda' + \Delta\lambda$

Ce « lexique » témoigne en réalité dès 1930 de la volonté affichée par Fock de donner systématiquement au formalisme mathématique, et donc aux théories, une véritable « signification physique ». Si, comme il l'entend, le formalisme mathématique reflète la réalité, il doit être en mesure de pouvoir s'exprimer au travers de concepts purement physiques. Aux yeux de Fock, l'explicitation de la « signification physique » du formalisme mathématique est une étape indispensable du travail du physicien. C'est aussi le cas pour des notions mathématiques particulièrement abstraites, telle la symétrie cyclique de la fonction d'onde pour un problème à plusieurs corps que nous avons introduite dans nos développements sur la méthode de Hartree-Fock (I.3.5). En effet c'est de sa volonté de

« comprendre le sens physique de la condition de symétrie cyclique »¹ que Fock en déduit que les deux déterminants de sa fonction d'onde pour un système à plusieurs corps se comportent comme si chacun était composé d'électrons de même spin [Fock 1940]. Mais nous avons aussi pu faire le constat de la nécessaire explicitation de la « signification physique » du formalisme mathématique avec l'approche que fait Fock de la fonction d'onde dans le cadre du débat EPR. Ici, nous touchions au plus près les questions d'interprétation.

Dans cette dernière direction, la seconde édition publiée en 1976 du manuel de mécanique quantique de Fock [Fock 1932An], qui revendique de traiter plus largement des questions épistémologiques, est révélatrice. D'une part, elle s'apparente à un véritable plaidoyer en faveur d'une méthodique révélation de la signification physique du formalisme mathématique de la théorie – comme c'est déjà le cas dans la première édition de 1932 [Fock 1932a] –, mais d'autre part, on observe très clairement que c'est toute l'interprétation de la théorie qui est dépendante de cette démarche :

The use of this apparatus [the theory of linear operator] in quantum mechanics made it possible to give a theoretical explanation of some fundamental properties of matter that could not be explained in the classical way and also to calculate the values of many quantities observed in experiments (for instance, the frequencies in atomic spectra). But more than that – and this is no less important to us – the physical interpretation of the mathematical concepts used in quantum mechanics leads to a number of profound and principled conclusions [Fock 1932An, p. 19].

Afin d'illustrer plus concrètement nos propos nous pouvons ici anticiper nos discussions du chapitre suivant sur l'interprétation à proprement parler de la mécanique quantique par Fock. En effet, il est intéressant de noter que le physicien russe n'hésite pas à plusieurs reprises à identifier directement le théorème d'indétermination de Heisenberg à la complémentarité de Bohr. En 1949, dans un article intitulé « Osnovnyye zakony fiziki v svete dialekticheskogo materializma » (Principales lois de la physique à la lumière du matérialisme dialectique », il explique : « Il y a une règle générale qui indique la limite d'applicabilité des modèles classiques. C'est la relation d'incertitude de Heisenberg que Bohr appelle relation (ou principe) de complémentarité » [Fock 1949, p. 39]. Dans un registre légèrement différent, en 1960, dans « Critique épistémologique des théories récentes » il déclare que « [l]a situation

¹ À partir de la traduction anglaise de E. D. Trifonov [Fock 2004, pp. 476].

qui est caractérisée par l'emploi combiné des aspects contrastants est nommé par Bohr *complémentarité* et les relations de Heisenberg sont nommées relations de complémentarité » [Fock 1960, p. 10]¹. Très clairement la complémentarité est identifiée par Fock comme l'expression physique d'un élément central du formalisme mathématique.

3.5. Une nécessaire rigueur physique

Le rôle fondamental accordé par Fock aux mathématiques en physique théorique ne le prive pas pour autant de tracer une frontière fondamentale entre les deux disciplines. Celle-ci est notamment rendue explicite par une présentation² faite le 12 octobre 1940 à l'Institut de recherche de physique de l'Université de Léningrad sur le livre *Matematische Grundlagen der Quantenmechanik* (Fondements mathématiques de la mécanique quantique) publié en 1932 par von Neumann [Neum 1932]. John von Neumann³, mathématicien hongro-américain, est particulièrement connu pour son rôle dans l'axiomatisation de la mécanique quantique⁴. Cette approche trouve alors l'une de ses formes les plus abouties dans l'ouvrage ici discutée par Fock. Plus précisément, en 1940, ce dernier s'intéresse au troisième chapitre, « Die quantenmechanische Statistik » (Les statistiques quantiques). En toute fin d'exposé, il s'adonne à un commentaire riche d'enseignement sur sa conception du travail de physicien et de mathématicien :

Moralité. La différence entre le physicien et le mathématicien.

Le physicien s'intéresse au résultat. Il a besoin qu'un résultat soit vrai, et la rigueur du raisonnement est pour lui secondaire.

Le mathématicien est intéressé par le raisonnement. Il a besoin d'un raisonnement rigoureux ; un résultat rigoureux est obtenu nécessairement à partir de prémisses. Si les prémisses sont vraies, le résultat est vrai – mais pour un mathématicien cela n'a pas d'importance.

¹ Pour approfondir, voir la discussion faite par Jammer de l'identification des relations d'indétermination à la complémentarité [Jamm 1974, p. 60].

² « O knige Neyman ». ARAN SPb, 1034-1-156.

³ Pour des détails biographiques voir Ulam [Ulam 1958], et plus spécifiquement van Hove pour un compte-rendu de ses contributions à la mécanique quantique [Hove 1958].

⁴ Sur ce point on peut consulter Lacki [Lack 2000a].

Neumann est un mathématicien typique : chez lui tout est strictement rigoureux, mais rien n'est vrai¹.

Il faut ici comprendre « vraies » selon une approche réaliste du problème. Pour Fock, les prémisses ne sont vraies que si elles reflètent la réalité du monde extérieur. Fock oppose ainsi un concept de rigueur mathématique à un autre de rigueur physique qu'il définit en 1936 dans son exposé sur les approximations comme « le compte-rendu correct de tout les facteurs vraiment essentiels pour un problème physique » [Fock 1936d, p. 1070]. La rigueur physique est alors considérée comme « nécessaire » pour résoudre les problèmes physiques, et se trouve être complémentaire de la rigueur mathématique qui est-elle nécessaire à la résolution du problème de l'analyse².

De nos investigations sur l'approche épistémologique de sa discipline par Fock nous avons identifié différentes caractéristiques qui nous aident à reconstruire ces « facteurs essentiels » à la rigueur physique. Nous en dénombrons trois :

- Prémisses et résultats d'un problème doivent refléter la réalité du monde extérieur.
- Le formalisme mathématique employé doit présenter une signification physique explicite.
- Le domaine d'applicabilité des théories et concepts doit être clairement défini.

Dans leur application concrète, c'est notamment à l'appui de ces critères que Fock rend compte de difficultés liés à l'électrodynamique quantique, et en particulier la résolution de l'équation représentant l'évolution dans le temps de l'interaction entre la matière et un champ électromagnétique. En effet, apparaissent différents termes pour lesquels il n'est pas possible de donner une signification physique. Par conséquent, Fock estime : « in order to

¹ « O knige Neyman ». ARAN SPb 1034 – 1034-1-156. La critique du travail de von Neumann est particulièrement virulente. En effet, avant cet ultime commentaire, Fock avait déjà conclu : « Le livre de Neumann est très difficile à lire, étant donné que le principal obstacle est secondaire (en particulier les détails mathématiques). Mais le comprendre jusqu'à la fin procure de la frustration. La quasi-totalité [de ce qui est dit] dans la partie physique est soit insignifiant, soit faux. L'analyse du processus de mesure est totalement faux. Reste vrai : l'introduction de l'opérateur statistique et l'étude de ses propriétés les plus simples, bien que l'on puisse se passer de celui-ci, en se limitant aux fonctions d'onde et en appliquant la théorie des probabilités. [...] Pour le reste il s'agit de mathématiques pures : la théorie des opérateurs linéaires ».

² Voir [Fock 2004, p. 389] pour la version anglaise.

obtain minimal physical rigor here, we need to give up a mathematical one »¹. La solution est ainsi d'écarter tout simplement les termes qui posent problèmes. En conclusion de son article sur la méthode des fonctionnelles, où on retrouve aussi la dimension correspondante à la détermination du domaine d'applicabilité, Fock résume la situation :

As we mentioned in the Introduction, the basic equation of quantum electrodynamics can be solved only approximatively. This equation does not account for the structure of material particles and their properties at rather high energies; therefore its accurate solutions hardly have a physical meaning. More exact description of matter and radiation properties should be based on essentially new ideas and this is one of the main problems of the further development in theoretical physics [Fock 1937b, p. 109]².

Une description plus réaliste des propriétés de la matière et des rayonnements nécessite une nouvelle théorie au domaine d'application élargi afin que ses équations possèdent une véritable signification physique. En revanche, la mécanique quantique est présentée comme une théorie qui d'un point de vue physique remplit tout les critères nécessaires à sa validité :

From the physical point of view this theory – quantum mechanics in its proper meaning – presents a closed logical scheme operating with notions defined sufficiently rigorously. In all the cases when the basic assumptions of the theory are fulfilled (where the most important of them have been already mentioned) the calculations made on the basis of quantum mechanics are in complete agreement with the experiment [Fock 1936d, p. 1076]³.

Les facteurs essentiels qui peuvent rendre compte de la « rigueur physique » d'un problème se présentent comme de véritables outils permettant d'évaluer la validité d'une théorie. Ils définissent une ligne de conduite méthodologique à appliquer pour la résolution des problèmes physiques, mais aussi comme dans le cas du débat EPR, pour rendre compte des questions d'interprétation. Dans ce sens, on devine alors chez Fock une prédominance du rôle du formalisme mathématique, mais aussi une attention toute particulière portée à la définition et à la validité de l'application des différents concepts de la physique.

¹ *Ibid* [p. 394].

² Traduit du russe par A. V. Tulub [Fock 2004, p. 420].

³ Traduit du russe par V. V. Fock [Fock 2004, p. 395].

4. Conclusion

La discussion que nous venons de conduire sur la question du réalisme en mécanique quantique nous a permis de compléter notre approche des considérations épistémologiques de Fock. Celles-ci, que ce soit son antiréductionnisme ou son réalisme scientifique, se construisent et s'expriment au contact des difficultés conceptuelles soulevées par la théorie quantique. Le caractère profondément singulier de cette dernière vis-à-vis de la physique classique exige le recours à une interprétation physique fondamentalement nouvelle. En particulier, nous avons pu au travers de nos considérations sur l'interprétation de Copenhague et le paradoxe EPR, souligner le rôle joué dans la théorie par la question de l'observation. Mais surtout, et bien évidemment les deux éléments sont connectés, la mécanique quantique est une théorie qui cristallise les débats scientifiques sur la question de la position philosophique à adopter sur le réalisme. Bien que la conception d'une opposition entre Einstein le réaliste et Bohr le positiviste soit caricaturale, elle reflète toutefois un imaginaire collectif qui oblige les scientifiques à clarifier leur position sur le sujet.

C'est le cas de Fock, qui non seulement défend la complétude de la mécanique quantique dans le sillage de Bohr, mais affirme aussi aborder ce problème d'un point de vue réaliste scientifique. La théorie est pour lui véritablement engagée dans l'étude des propriétés objectives de la nature qui en dicte les lois. Nous avons alors pu constater que sa position est sous-tendue par une approche platonicienne des mathématiques appliquées. Le chapitre premier nous avait permis de mettre en exergue le rôle tout particulier joué par les mathématiques dans la pratique scientifique du physicien, celui-ci s'illustrant abondamment lorsqu'il est question de manipulation du formalisme. Nous avons alors émis l'hypothèse que leur importance devait *a priori* prendre une place à part entière dans ses conceptions épistémologiques. Dans ce sens, les développements du présent chapitre dressent alors le constat que l'intérêt que Fock manifeste tout au long de sa carrière pour les mathématiques s'accompagne de la ferme croyance qu'elles représentent fidèlement le monde qui nous entoure. Le formalisme mathématique d'une théorie véhicule une profonde signification physique que le physicien se doit d'explicitier dans ses travaux : à chaque entité ou concept mathématique d'une théorie physique, quel que soit son niveau d'abstraction, doit pouvoir correspondre une entité ou un concept physique.

De plus, comme nous le savons déjà suite à nos développements du chapitre précédent, chaque concept a pour Fock un domaine d'application qui lui est propre. Son antiréductionnisme vient le servir dans la réponse qu'il apporte à Einstein, Podolsky et Rosen suite à leur attaque à l'encontre de la complétude de la mécanique quantique : leur erreur aura été de confondre deux concepts d'« état » – classique et quantique – qui ne peuvent avoir ni le même sens, ni le même domaine d'application. C'est en explicitant ce point pour la fonction d'onde et en révélant sa signification physique que Fock écarte le paradoxe ; en d'autres termes, en s'appuyant sur son antiréductionnisme et sur son réalisme il donne une réponse explicite au trio de Princeton. L'approche épistémologique du problème par le physicien Russe conditionne un ensemble cohérent qui s'exprime concrètement au travers d'une fine analyse mathématique et conceptuelle. Notons que Fock ne s'aventure en réalité que très peu sur le terrain de la philosophie, posant ses principes épistémologiques comme des vérités générales au service d'une bonne pratique scientifique. Cette dernière est avant tout guidée par un critère de rigueur physique dont il est essentiel de rappeler les trois critères fondamentaux que nous avons reconstruit :

- Prémisses et résultats d'un problème doivent refléter la réalité du monde extérieur.
- Le formalisme mathématique employé doit présenter une signification physique explicite.
- Le domaine d'applicabilité des théories et concepts doit être clairement défini.

Ce sont ces trois critères qui composent la grille de lecture sur laquelle nous nous appuyerons dans le chapitre suivant pour aborder plus concrètement les interprétations des théories modernes de la physique et témoigner de la grande cohérence scientifique dont il fait preuve à ce sujet.

Nous parlons bien de théories modernes de la physique au pluriel, la relativité générale étant incluse. Car nous souhaitons démontrer que le compte-rendu que nous avons dressé sur l'antiréductionnisme et le réalisme scientifique de Fock dans le cadre de la mécanique quantique s'érige sans aucune difficulté comme une description de principes épistémologiques généraux applicables aussi à la théorie de la relativité. Le concept de rigueur physique est un guide immuable à la pensée du physicien, quel que soit le domaine discuté. Ainsi, il convient de préciser que notre choix de présenter l'épistémologie de Fock dans le cadre de la mécanique quantique est guidé avant tout par des raisons historiques et de cohérence. En effet, rappelons que le physicien russe est principalement occupé jusqu'à la fin

des années 1930 par des travaux concernant la mécanique et l'électrodynamique quantique, et que ce sont ces théories qui sont les plus discutées du point de vue de l'interprétation à cette même période. Alors, c'est dans leur cadre que l'on voit naturellement éclore chez Fock une véritable réflexion épistémologique. Le physicien jusqu'alors concerné quasi-uniquement par le souci de développer et d'explicitier le formalisme mathématique des problèmes qu'il aborde, se passionne soudainement pour les questions d'interprétation.

Il faut noter que le choix de Fock de se tourner vers ces dernières en théorie quantique est concomitant du repli sur soi opéré par l'Union soviétique dans le courant des années 1930 et dont nous avons partiellement discuté l'impact sur sa carrière dans le premier chapitre (I.2.2.2). C'est la raison principale pour laquelle nous avons dû au cours de nos développements nous appuyer presque exclusivement sur des publications en langue russe : en raison de la nouvelle donne géopolitique, Fock ne peut être inclus dans un débat international. Il développe donc sa pensée jusqu'au milieu des années 1950 – qui sonne la reprise des relations internationales – de façon isolée, dans un cadre d'influence soviétique dont nous développerons le rôle à partir du chapitre cinq. Privé de débat avec ses collègues étrangers, l'intérêt du physicien russe pour les questions d'interprétation n'est que peu connu lorsque celui-ci refera son entrée sur la scène internationale vingt ans plus tard – un point que nous discuterons au chapitre huit (VIII.1). Il se présente cependant fort d'avoir su proposer entretemps des interprétations inédites et cohérentes de la mécanique quantique et de la relativité générale dont nous allons maintenant discuter les traits principaux.

Chapitre quatrième – Interprétation des théories modernes de la physique

Les deux chapitres qui ont précédé nous ont permis de reconstruire les principes à la base de la pensée épistémologique de Fock, mais aussi d'évaluer leur rôle direct dans sa production scientifique. Nous avons ainsi pu établir une grille de lecture en vue d'une meilleure compréhension de son approche des théories modernes de la physique. C'est cette dernière étape que nous souhaitons maintenant aborder. Soulignons que lorsque nous parlons d'« approche des théories », bien qu'une évidente dimension technique soit présente et qu'elle nous accompagnera dans nos développements, la finalité qui est la nôtre est celle de l'aspect interprétatif des théories. Comme évoqué en introduction générale, rappelons que Fock est aussi connu pour avoir largement contribué dans la seconde moitié de sa carrière – c'est une de ses activités principales après la Seconde Guerre mondiale – à essayer d'élucider la question de l'interprétation non seulement de la mécanique quantique, mais aussi de la relativité générale. Il est l'auteur dans chaque cas de figures de développements témoignant d'une approche originale des théories.

Afin de clarifier quels sont les objectifs du présent chapitre, quelques commentaires préliminaires sont nécessaires. Notons tout d'abord, de façon quelque peu romantique, le caractère irréconciliable des deux théories. La mécanique quantique traite du monde atomique, est gouvernée par une équation linéaire et est intrinsèquement indéterministe. La relativité générale concerne les grandes échelles, emploie des équations non-linéaires et poursuit un idéal de description déterministe des phénomènes. Malgré tout, ce chapitre souhaite non seulement expliciter certaines caractéristiques singulières de l'interprétation de chacune des théories par Fock, mais surtout témoigner de la grande cohérence du physicien théoricien dans le regard qu'il porte sur sa discipline. Il n'a pas échappé au lecteur que jusqu'à présent nous nous sommes avant tout penchés sur la théorie quantique, et que c'est en son sein que nous avons reconstruit la pensée de Fock. Or nous observerons que la grille de lecture établie a tout autant de sens si on l'applique à la relativité générale. Le caractère antiréductionniste et réaliste de l'épistémologie de Fock, et par conséquent le rôle qu'il donne

au concept de rigueur physique dans son approche pratique des théories, sera ainsi confirmé. Nous souhaitons donc avant tout montrer que l'interprétation de la mécanique quantique et de la relativité générale par le physicien soviétique, malgré le caractère en apparence irréconciliable des deux théories, est le fruit d'une même approche méthodologique, mais aussi que de cette dernière en découle le caractère singulier.

Ce double enjeu, qui ne peut être abordé que par une approche en simultané des deux théories est absent de la littérature secondaire qui trop souvent ne traite que de l'une ou l'autre. Même chez Loren Graham qui dans *Science, Philosophy and Human Behavior in the Soviet Union* propose une analyse de l'interprétation par Fock de la mécanique quantique et de la relativité générale, les deux points sont abordés de façon discontinue dans des chapitres dédiés respectivement à une vision plus globale de chacune des théories en URSS [Grah 1987]. Il n'existe pas de véritable connexion, et la seule qui puisse se faire évidente au lecteur est le rôle accordé par Graham au matérialisme dialectique dans la pensée de Fock. Néanmoins ce rôle reste relativement obscur, et pourrait se résumer aux mots d'un autre historien des sciences, Gennady Gorelik, qui dans un article sur Fock et la relativité générale déclare vaguement : « [u]ndoubtedly Fock found in *Diamat* [dialectical materialism] something important and interesting for himself » [Gore 1993, p. 325]. Si nous discuterons au prochain chapitre cette question du matérialisme dialectique – qui recoupe en réalité de nombreux points déjà examinés –, nous affirmons ici qu'aborder le problème à l'appui des concepts d'antiréductionnisme et de réalisme nous permet non seulement une clarification individuelle de l'interprétation de chaque théorie par Fock, mais aussi de mettre en évidence la grande cohérence épistémologique du physicien russe et comme nous le verrons au chapitre suivant d'éclaircir le rôle joué par le matérialisme dialectique.

Signalons donc qu'au cours du présent chapitre nous nous détachons volontairement de la littérature secondaire sur les positions interprétatives de Fock, notamment en raison du rôle qui y est accordé au matérialisme dialectique. Nous ne contestons pas ce rapprochement, il est fondé et nous en détaillerons les mécanismes, mais pour diverses raisons, probablement liées au dogmatisme de la philosophie marxiste en URSS mais aussi au caractère particulier du discours scientifique de Fock qui sera discuté au chapitre sept, il nous semble qu'il fait en réalité trop souvent écran aux véritables principes épistémologiques mis en jeu dans le travail de Fock et a par conséquent empêché le commentateur d'accéder aux outils de lecture que

nous avons pu établir¹. Or c'est en appliquant ces outils directement aux travaux de Fock que nous estimons être les plus à même d'en tirer la quintessence de son approche. Rappelons toutefois que nous ne poursuivons pas l'objectif de réaliser une véritable exégèse technique des interprétations de la mécanique quantique et de la relativité générale par Fock. Les conséquences physiques, en particulier dans le cas de la théorie de la gravitation, sont majeures et nécessitent une étude approfondie qui n'entre pas dans le cadre de nos travaux.

Dans un premier temps du présent chapitre nous reviendrons donc sur la théorie de la mécanique quantique, afin de donner une vision plus complète de son interprétation. En effet, en particulier après la Seconde Guerre mondiale, Fock va tout d'abord marquer sa différence avec Bohr en critiquant frontalement ce dernier, avant d'être en mesure dans les années 1960 de présenter une interprétation de la théorie qu'il considère comme aboutie. Dans un second temps, nous aborderons la question de l'interprétation de la relativité générale. Etant donné que celle-ci n'a jusqu'à présent pas été discutée, il sera nécessaire de faire quelques développements introductifs et notamment un historique de l'intérêt de Fock pour cette théorie. Il sera particulièrement intéressant de nous appuyer sur les premiers travaux majeurs de Fock en relativité générale en 1939 afin de saisir au sein d'un problème théorique concret ce qui fait l'originalité de son approche. Du constat alors dressé nous pourrons enfin décrire l'interprétation que Fock fait de ce qu'il appelle la théorie de la gravitation. Dans chaque cas, nous nous attacherons à démontrer le rôle joué par les principes épistémologiques discutés précédemment.

Sources :

Notre parti pris de nous détacher dans nos développements de la littérature secondaire sur Fock et son interprétation des théories modernes de la physique ne nous dispense pas de signaler les différentes sources à notre disposition. En effet, elles ont été dans de nombreux cas une source d'inspiration et peuvent s'avérer utile au lecteur désireux d'avoir un autre point de vue. Nous avons déjà mentionné *Science, Philosophy and Human Behavior in the Soviet Union* de Loren Graham qui est le principal ouvrage qui développe à la fois

¹ Signalons toutefois l'excellent article de Gennady Gorelik, « Vladimir Fock: Philosophy of Gravity and Gravity of Philosophy », qui sans parvenir à reconstruire l'ensemble de notre analyse des considérations de Fock sur la relativité générale en effleure de très nombreux points et fut une inestimable source d'inspiration pour nous [Gore 1993].

l'interprétation de Fock en mécanique quantique et en relativité générale [Grah 1987], et dont une version condensée des principaux développements se trouve aussi dans *Science in Russia and the Soviet Union : A Short History* [Grah 1993, pp. 112-117]. Graham développe aussi en 1982 une étude socio-historique comparative entre Arthur Eddington et Vladimir Fock qui s'intéresse aux questions d'interprétation de la relativité générale [Grah 1982]. Mais l'étude à nos yeux la plus complète et la plus pertinente sur ce sujet est à mettre à l'actif de Gennady Gorelik avec « Vladimir Fock: Philosophy of Gravity and Gravity of Philosophy » [Gore 1993]. Pour ce qui est de l'interprétation de la mécanique quantique, la position de Fock est généralement discutée dans le cadre de son opposition à Bohr et de sa visite à Copenhague en 1957. Nous reviendrons sur ce point au chapitre huit mais notons en particulier l'approche d'Olival Freire Jr. dans son article « Sobre o diálogo Fock-Bohr » [Frei 1994].

Les sources secondaires écartées, la nature de nos développements ne pouvaient donc nous conduire qu'à une analyse rigoureuse des publications de Fock. Et nous avons la chance que celui-ci ait largement publié sur les questions d'interprétation dans théories dans la seconde partie de sa carrière. Le lecteur trouvera des informations bibliographiques complémentaires en introduction de chaque partie, mais notons ici que nous avons été dans un premier temps motivés par l'idée d'exploiter des documents qui permettent de mettre en avant le caractère singulier de l'approche de Fock. C'est le cas d'une part de sa critique de Bohr en 1951 [Fock 1951a], et d'autre part de son approche du problème du mouvement en relativité générale [Fock 1939c]. Dans un second temps nous avons choisi de détailler l'interprétation des théories par le physicien soviétique sur la base de documents qui présentent chez lui un point de vue complet de sa pensée. Différentes possibilités s'offrant à nous, c'est aussi le choix de la commodité qui a été fait en privilégiant des sources en français ou en anglais. Ainsi, pour la mécanique quantique c'est « La physique quantique et les idéalizations classiques » [Fock 1965c] qui est notre référence principale, et pour la relativité générale l'introduction en anglais de la seconde édition de sa monographie sur le sujet [Fock 1955a']. Notons que celle-ci se démarque particulièrement par son côté synthétique, et que nous complétons parfois nos propos avec un article en français de 1966 intitulé « Les principes physiques de la théorie de la gravitation d'Einstein » [Fock 1966a].

1. Interprétation de la mécanique quantique

En 1932 Fock débute *Nachala kvantovoy mekhaniki* (Principes de la mécanique quantique) par quelques considérations sur « l'objet et les fondations physiques » de la théorie [Fock 1932a, pp. 9-12]. Nous avons évoqué précédemment le fait qu'il affirme déjà dans cet ouvrage le rôle fondamental du formalisme mathématique comme langage de la mécanique quantique. Cependant, nous avons omis de mentionner que dans ce court compte-rendu des aspects interprétatifs de la théorie il fait le choix de se positionner, sans véritable discussion, comme un partisan de l'école de Copenhague : « Nous allons ici essayer [...] de commencer par une présentation de la nature physique des nouveaux concepts [de la mécanique quantique] dans l'esprit de Heisenberg et Bohr » [p. 9]. Sans formellement la nommer, Fock décrit brièvement les principes de la complémentarité.

De façon générale Fock accorde à Bohr « le mérite de soulever la question de la nécessité de réviser les concepts classiques » [p. 11]. Mais comme nous avons déjà pu l'esquisser avec le débat EPR, guidé par ses vues réalistes et antiréductionnistes, le Russe va faire sienne cette nécessité. Alors, plus de quatre décennies plus tard, en préface de la seconde édition de son manuel de mécanique quantique il déclare :

Otherwise, the subject matter of the book (both the mathematical theory and its physical interpretation) remains the same, except for certain news formulations of an epistemological character (the concepts of relativity with respect to the means of observation and of potential possibility) [...]. The new formulations are more precise than the previous ones [Fock 1932An, p. 7].

Très clairement, Fock nous indique ici que sa pensée sur les aspects épistémologiques de la mécanique quantique s'est entretemps étoffée.

Notons que l'on peut aussi illustrer la dynamique suivie par Fock à l'aide d'un parallèle avec le physicien américain David Bohm. Brillant élève d'Oppenheimer à Berkeley, il est l'auteur en 1951 – à 33 ans comme Fock – d'un premier ouvrage sur la mécanique quantique, *Quantum Theory* [Bohm 1951]. S'y reflètent avant tout les conceptions de Bohr, mais à l'image du physicien russe qui en 1932 appuie déjà sur le rôle du formalisme, on y observe que Bohm combine les idées du Danois avec ses propres conceptions réalistes, soulignées par une

description ontologique du monde quantique¹. Comme chez Fock, cela préfigure le développement d'un point de vue original sur la mécanique quantique, ici, l'interprétation causale². Insistons alors sur le fait que dans la carrière d'un scientifique l'écriture d'un manuel qui s'inscrit dans l'orthodoxie d'un domaine apparaît comme un moyen d'établir sa carrière et d'affirmer sa stature professionnelle. Il devient alors plus facile par la suite, d'un point de vue social, de pouvoir exprimer des conceptions hétérodoxes sur une théorie. L'objet de la présente partie est alors non seulement de faire l'exposé de l'interprétation de la mécanique quantique par Fock dans sa version la plus aboutie, d'évaluer le rôle qu'y jouent les principes épistémologiques discutés jusqu'à présent, mais aussi de rendre compte de l'évolution de ses idées.

1.1. La critique de Bohr en 1951

Après une première approche du problème de l'interprétation de la mécanique quantique par Fock à la fin des années 1930, notamment autour du paradoxe EPR, il convient de mettre en avant une première étape majeure dans l'exposition formelle de sa pensée sur la théorie, à savoir sa critique de Bohr dans les années 1950. En effet, bien que Fock apporte son soutien à Bohr dans le cadre de son opposition à Einstein, nous avons déjà pu mettre en avant que le Russe et le Danois procèdent selon une approche différente. Ainsi, les points de désaccord entre les deux hommes se matérialisent de façon explicite en 1951 dans un article publié dans *Uspekhi fizicheskikh nauk* sous le titre « Kritika vzglyadov Bora na kvantovuyu mekhaniku » (Critique des vues de Bohr en mécanique quantique) [Fock 1951a]. Fock y procède à une critique d'un article de Bohr publié en 1948 dans *Dialectica*, intitulé « Sur les notions de causalité et de complémentarité » [Bohr 1948], article que le Russe considère comme une « expression des vues correctes de l'école de Copenhague mais aussi comme une expression des vues en mécanique quantique qui dominent parmi les physiciens étrangers » [Fock 1951a, p. 3].

L'approche de Fock possède une indéniable dimension idéologique, celui-ci prenant le parti du matérialisme dialectique face à la philosophie « idéaliste » pouvant conduire à « une interprétation incorrecte de la mécanique quantique » [p. 3]. Néanmoins, bien que cet article

¹ Sur Bohm, son ouvrage de 1951, et la dynamique qu'il suit vers sa propre interprétation de la mécanique quantique voir Freire Junior [Frei 2015, pp. 25-28].

² *Ibid* [p. 21-25].

puisse posséder différents niveaux de lecture, il convient de souligner comme nous l'avons annoncé en introduction de ce chapitre, que notre ambition est ici de lui appliquer la grille de lecture établie précédemment, afin de montrer en quoi la critique de Bohr par Fock est une importante étape intermédiaire en vue du développement par le Russe d'une formulation complète de son interprétation de la mécanique quantique. Plus tard, en 1965, Fock appuie en effet sur le rôle d'une telle critique dans la construction de sa pensée :

Le mérite d'une nouvelle position du problème de la description des phénomènes à l'échelle atomique appartient à Niels Bohr ; le point de vue adopté dans le présent article est le résultat de nos recherches et méditations ayant pour but d'approfondir, de préciser – et si nécessaire de critiquer et de corriger – les idées de Bohr [Fock 1965c, p. 223].

Comme nous avons pu le constater par la nécessité chez Fock de procéder avec une grande rigueur physique, il est essentiel pour le Soviétique d'analyser rigoureusement les différents concepts utilisés dans une théorie.

Il en découle une attention toute particulière apportée à la terminologie employée par Bohr. C'est notamment le cas du terme « causalité », dont Fock regrette l'emploi par le Danois dans un sens trop restrictif, strictement déterministe. En effet, Bohr estime que le principe de causalité a perdu sa place dans une théorie évidemment probabiliste car il le comprend en ces termes : « In Physics, causal description [...] rests on the assumption that the knowledge of the state of a material system at a given time permits the prediction of its state at any



Figure 11. Vladimir Fock et Niels Bohr en discussion à Moscou en 1961 [Niels Bohr Archive].

subsequent time » [Bohr 1948, p. 312]. Mais selon Fock, pour qui « la causalité ne se réduit pas à un unique déterminisme et comprend une notion plus générale de régularité » [Fock 1951a, p. 4], il ne peut être question de parler d'abandon de la causalité en mécanique quantique. S'il n'est ici pas explicite sur ce qu'il entend par causalité¹, il est évident comme le montre en 1960 sa publication dans le journal français *La Pensée* [Fock 1960, p. 13], que le physicien de Leningrad fait référence à l'idée que « la cause doit précéder l'effet », une notion dont « il n'y a [...] aucun doute [qu'elle] reste applicable dans la physique quantique » [Fock 1960, p. 13]. Fondamentalement, Bohr et Fock ne s'opposent pas sur ce point, mais le second juge nécessaire d'effectuer cette clarification terminologique, car il est fondamental à ses yeux que le principe de causalité ne puisse être contesté. Or, en parlant d'abandon de la causalité lorsqu'il est question de déterminisme, le Russe estime que Bohr prend le risque de voir son discours mal interprété². Comme nous l'expliciterons plus précisément en trame de fond des chapitres à venir³, il faut ici noter que ces commentaires de Fock reflètent aussi une approche généralisée parmi les auteurs soviétiques qui dès les années 1930 défendent ardemment la causalité en mécanique quantique⁴.

La suite de la critique de Fock se base sur une distinction qui possède un caractère fondamental quant à la compréhension de la théorie. Afin de clarifier nos développements à venir nous l'introduisons ici conceptuellement avant d'en observer les implications directes. Nous le savons, Fock accorde au formalisme de la mécanique quantique la caractéristique d'être une représentation fidèle de la réalité du monde extérieur, et les entités mathématiques qui le composent d'avoir une véritable contrepartie physique dans la nature. Par conséquent la fonction d'onde décrit pour lui des objets quantiques qui possèdent une

¹ Si Fock ne juge pas nécessaire de donner ici une définition précise c'est que « la formulation exacte du principe de causalité dans sa forme générale est une question philosophique et [surtout que] la solution à cette question appartient aux classiques du marxisme » [Fock 1951a, p. 4].

² Il faut de plus noter que le discours de Fock sur la causalité sert aussi de réponse aux tenants d'une interprétation « statistique » – ou « causale » – de la mécanique quantique. Particulièrement populaire au début des années 1950, ses acteurs cherchent à conserver le déterminisme dans la théorie. Voir nos développements ultérieurs (VII.2.2.2 et VIII.1.2.2).

³ Voir en particulier les commentaires du chapitre huit (VIII.1.2.1).

⁴ Sur ce point voir Graham [Grah 1988, p. 307] et Kojevnikov [Koj 2012, p. 233]. Parmi les auteurs russes actifs sur le sujet dans les années 1930 notons en particulier la contribution de Ioffé en 1934 [Ioff 1934].

réalité propre. *A contrario*, Bohr ne se prononce jamais sur le sujet. Dans son interprétation de la mécanique quantique il n'a jamais recours à la notion d'objet quantique, car l'objet qui est étudié est toujours conçu en termes de situations où le quantum d'action h peut être négligé. La mécanique quantique s'apparente pour lui à une théorie de l'observation et l'objet étudié est indissociable de l'appareillage de mesure au travers duquel il est observé.

Une large portion de l'article de Fock est ainsi dédiée à la discussion de diverses considérations de Bohr sur l'appareillage de mesure et le système étudié. C'est en particulier le cas des propos suivant du Danois :

The very fact that quantum phenomena cannot be analysed on classical lines thus implies the impossibility of separating a behaviour of atomic objects from the interaction of these objects with the measuring instruments which serve to specify the conditions under which the phenomena appear.

In particular, the individuality of the typical quantum effects finds proper expression in the circumstance that any attempt at subdividing the phenomena will demand a change in the experimental arrangement, introducing new sources of uncontrollable interaction between objects and measuring instruments [Bohr 1948, p. 313].

Fock revient tout d'abord sur l'emploi des mots « interaction incontrôlable » pour spécifier la relation entre l'objet étudié et le dispositif de mesure. Il y perçoit l'expression de « l'incapacité de produire une mesure supplémentaire, sans violer la condition de mesure donnée », en somme « une tentative d'expliquer à l'aide des termes de la physique classique, la situation qui découle des relations de Heisenberg, appliquée à l'interaction entre l'objet et l'instrument » [Fock 1951a, p. 6]. Fock souligne alors que Bohr n'est pas suffisamment explicite sur ce qu'il entend par « instrument de mesure », à savoir s'il considère que ce dernier comprend « la partie où l'objet [étudié] se trouve dans des conditions externes fixes et où le phénomène se développe sans interférence, ou s'il entend que l'instrument est le dispositif qui entre en vigueur au dernier stade de l'expérience et sert à enregistrer le résultat de la mesure » [p. 6].

En faisant ce constat le physicien soviétique anticipe en réalité de futurs développements sur une éventuelle subdivision de l'expérience en mécanique quantique, car il n'est en réalité pas dupe, et il a bien conscience que Bohr est dans une perspective qui affirme l'impossibilité de séparer le comportement des objets atomiques de l'appareil de mesure, et la nécessité de considérer toute expérience dans son ensemble en vertu de « l'indivisibilité des processus

atomiques » [p. 11]. Ce fait est par ailleurs souligné par le Danois dans la définition qu'il donne du concept de « phénomène », aussi citée par Fock :

As a more appropriate way of expression, one may strongly advocate limitation of the use of the word phenomenon to refer exclusively to observations obtained under specified circumstances, including an account of the whole experiment [Bohr 1948, p. 317 ; Fock 1951a, p. 11].

Le Russe souligne dans un premier temps qu'à son sens cette définition souffre d'un manque de référence directe à l'objet à l'origine du phénomène, un objet qui pour lui est quantique. Mais surtout, l'ensemble de son discours a pour objet de mettre en évidence ce qu'il considère comme une contradiction interne des considérations de Bohr. En effet, étant donné qu'il est nécessaire chez le Danois de considérer l'expérience dans son ensemble, sa définition de phénomène ne peut rendre compte du fait qu'aux yeux de Fock la mesure viole en réalité les « circonstances spécifiées » sous lesquelles il est étudié. Cela est dû au fait que pour Bohr, l'interaction qui régit la relation entre l'objet quantique étudié et l'appareil de mesure est incontrôlable [Fock 1951a, p. 11].

Fock se propose alors pour éviter cette contradiction de rompre avec la nécessité de recourir à une approche de l'expérience comme un ensemble indivisible, et introduit explicitement à ce stade l'idée de subdivision de l'expérience :

Il est clair que « les conditions déterminées avec précision » et l'« interaction incontrôlable » doivent s'appliquer seulement à des stades différents de l'expérience.

La nécessité de diviser l'expérience entre le phénomène non perturbé et l'acte de mesure va de soi. En effet, le phénomène non perturbé peut se produire dans des conditions naturelles que nous ne pouvons pas perturber (par exemple, le rayonnement des atomes dans n'importe quelle étoile) [p. 11].

La subdivision de l'expérience en mécanique quantique proposée par Fock ne se limite cependant pas à deux parties, on en retrouve trois. Il distingue en effet une partie préparatoire, une partie active et une partie d'enregistrement. Pour les présenter, nous nous appuyons comme le Russe sur l'exemple de l'observation d'un diagramme de diffraction résultant du passage d'électrons à travers un réseau cristallin [pp. 6-7].

La partie correspondant à la préparation est celle qui fixe les conditions de l'objet quantique à observer, à savoir dans notre cas la source du faisceau d'électrons, mais encore

le diaphragme et autres dispositifs périphériques associés au cristal : « c'est la partie qui fixe les conditions de l'objet avant qu'il entre en partie active ». Cette partie active est pour Fock « la partie du dispositif où le phénomène lui-même se produit ». Il s'agit bien évidemment du cristal, dont, comme le rappelle Fock, la présence pour des phénomènes de diffraction est significative : sans cristal pas de diffraction, avec un cristal une diffraction. Cette dernière n'est par ailleurs pas dépendante du dispositif utilisé dans la troisième partie, celle d'enregistrement. En effet, pour l'observation du diagramme de diffraction, l'expérimentateur peut recourir à différents dispositifs, que ce soit une « plaque photographique, une rangée de compteurs ou tout autre mécanisme en mesure de déterminer les coordonnées des électrons » [p. 7]. À la différence du cristal, essentiel à la partie active, les détails sont ici indifférents. Pour conclure sur cette distinction en trois parties, Fock appuie sur sa vision réaliste des événements de la physique en déclarant qu' « il convient de noter que puisque le phénomène peut se produire dans des conditions naturelles, les parties préparatoire et active peuvent se réaliser par elle-même, et que la partie d'enregistrement exige, en règle générale, un dispositif spécial » [p. 7].

Pour Fock, c'est en refusant de procéder à cette subdivision du processus expérimental en mécanique quantique que Bohr commet une « erreur physique »¹ : il « ignore que l'expérimentation physique, en plus d'un stade initial et final (préparation de l'objet et acte réel de mesure) possède aussi un état intermédiaire, lorsque d'une certaine manière l'objet préparé se trouve dans les conditions externes fixées ». En effet, cet état intermédiaire, la partie active, est pour Fock la seule à même de décrire l'essence de la mécanique quantique : « car c'est dans cette partie intermédiaire que s'applique l'équation d'onde de la mécanique quantique, tandis que la préparation de l'objet et le résultat de la mesure doivent être décrits dans le langage de la physique classique » [p. 12]. Implicitement, le rôle accordé à cette étape de l'expérience met alors l'accent sur une perception réaliste des objets quantiques.

Cela se fait au prix d'une reconsidération générale du problème en mécanique quantique. Car comme nous pouvons ici l'observer, en plus de donner une réponse à ce qu'il considère

¹ Fock parle dans son article d'une erreur « physique » de Bohr mais aussi d'une erreur « philosophique » [Fock 1951a, p. 12]. Si les deux sont étroitement liées, « parce qu'en interprétant de façon incorrecte des faits physiques les physiciens idéalistes étrangers essaient de justifier leur philosophie », leur distinction montre que Fock ne résume pas sa critique de Bohr à un discours purement idéologique.

comme des contradictions internes de l'interprétation de Bohr, en s'attardant de façon plus concrète sur l'appareil de mesure, Fock parvient à définir un cadre interprétatif plus général à ses développements dans le débat EPR sur la signification de la fonction d'onde. C'est la principale nouveauté de l'approche de Fock par rapport à 1936 : en développant sa critique de Bohr il se penche de façon plus concrète le problème de l'observation en mécanique quantique. Néanmoins il continue d'insister sur le fait que ce qu'il considère comme fondamental dans la théorie est d'une autre nature :

La partie essentielle de la mécanique quantique qui permet une compréhension plus profonde de l'étude des propriétés des objets atomiques, n'est pas formulée à l'aide du principe d'incertitude mais à l'aide d'un formalisme mathématique comprenant des opérateurs dans un espace de Hilbert, des équations d'onde, des fonctions d'ondes etc... [p. 13].

Fock assure à nouveau que le formalisme mathématique est l'outil qui permet d'accéder à la connaissance du système étudié. Les relations de Heisenberg, qui conduisent à « l'indétermination sur la mesure des coordonnées et de la quantité de mouvement » [p. 13], définissent pour leur part les limites d'applicabilité de la théorie. La fonction d'onde, elle, joue toujours pour Fock un rôle particulier en vue de l'étude des phénomènes quantiques, mais elle trouve maintenant sa place dans une étude du processus d'observation, ce qui n'a pas lieu chez Bohr :

L'état de l'objet dans l'étape intermédiaire se décrit par la fonction d'onde. Cet état est caractérisé, comme nous l'avons dit, par la probabilité de tel ou tel comportement potentiel d'un objet en fonction de chaque influence externe possible. L'état donne ainsi la configuration de l'objet, ce qui est quelque chose de pleinement réaliste, en dépit du fait que pour déterminer cette configuration il faut la briser [p. 12].

Notons alors que la brisure ici mentionnée fait référence à l'acte de mesure, la dernière partie du dispositif expérimental, qui pour Fock induit de façon systématique un brutal changement des conditions physiques dans le domaine quantique. Ainsi, pour conclure nos propos sur la critique de Bohr et refermer la boucle qui a été ouverte, notons que c'est en fin de compte sur ce point que le physicien de Leningrad s'appuie pour éclaircir son point de vue sur la causalité :

Il est naturel que, dans la mécanique quantique, la fonction d'onde décrivant avec un certain degré de précision l'état d'un système qui se trouve dans des conditions physiques données, cesse d'être applicable lorsque les conditions changent rapidement et ne sont plus bien définies. Quand les conditions physiques sont données, un changement d'état se produit selon une loi bien définie, en pleine conformité avec le principe de causalité. Quand ces conditions changent brusquement et de façon indéfinie, il n'y a aucun moyen d'exiger que ce changement d'état soit prédéterminé. Mais ce changement d'état est loin d'être non méthodique, et est soumis à une certaine loi de probabilité, qui correspond également au principe de causalité. L'état de l'objet au moment précédent immédiatement l'intervention extérieure détermine la probabilité du comportement de cet objet suite à cette intervention. Il faut de plus dire que son état lui-même est caractérisé par une probabilité qui détermine le comportement de l'objet sous toutes les influences externes potentielles [pp. 4-5].

Dans la subdivision du processus d'observation en mécanique quantique induite par Fock, le physicien désigne donc la dernière étape, celle de la mesure, comme responsable du « changement d'état » de la fonction d'onde, en d'autres termes, de la réduction du paquet d'onde. Mais si cette dernière exclue toute approche déterministe du problème, elle reste soumise aux lois de probabilités du formalisme mathématique de la mécanique quantique, qui n'excluent en rien un lien de cause à effet et restent donc conformes au principe de causalité.

1.2. La physique quantique et les idéalizations classiques

Cette critique de Bohr en 1951 n'est toutefois qu'une étape intermédiaire en vue de la pleine exposition par ce dernier de son interprétation de la théorie quantique. Dans les années qui suivent cette publication, Fock est très peu actif en mécanique quantique et ce jusqu'à son séjour en février-mars 1957 à Copenhague où avec Bohr ils échangent sur leurs désaccords¹. C'est à sa suite que le Russe va s'attacher à formaliser son interprétation de la théorie, dont il donne une version aboutie en 1965 dans un livret publié par l'Université d'Etat de Leningrad, *Kvantovaya fizika i stroyeniye materii* (Physique quantique et structure de la matière) [Fock 1965]. Cette même année, une traduction française de l'essentiel² de cette

¹ Nous reviendrons en détail sur cet épisode au cours du chapitre huit (VIII.1.2).

² Seuls quelques paragraphes non essentiels sont manquants, en particulier un court compte-rendu historique des développements de la mécanique quantique, ainsi que quelques considérations sur les opérateurs en mécanique quantique et le problème à plusieurs corps. Le lecteur à la recherche d'une version anglaise de la

publication est aussi éditée en français dans le journal *Dialectica* sous le titre « La physique quantique et les idéalizations classiques » [Fock 1965c]. C'est principalement en prenant appui sur ces sources, et en mettant en relief les enseignements issus de nos investigations sur les vues épistémologiques de Vladimir Fock, que nous allons ici présenter ce qui doit être considéré comme l'interprétation de la mécanique quantique par le physicien soviétique. Notons alors d'ores et déjà que la question de l'observation y reçoit un traitement bien plus important qu'auparavant.

1.2.1. Les limites de la description classique des phénomènes

En se positionnant dans une perspective antiréductionniste entre la mécanique quantique et la mécanique classique, Fock est dans un premier temps contraint d'explicitier les raisons pour lesquelles la description classique des phénomènes possède des « traits particuliers [...] qui la rendent inapplicable aux objets atomiques ». Le physicien russe estime que « la description classique d'un phénomène physique est caractérisée par certaines idéalizations ou abstractions » [Fock 1965c, p. 225]. Il en distingue deux, qu'il nomme « absolutisation » et « détaillisation ».

L'« absolutisation » de la notion de phénomène physique repose sur l'indépendance supposée du phénomène des conditions dans lesquelles il est observé. Pour Fock, en mécanique classique :

On traitait un phénomène physique comme quelque chose qui se déroule pour soi, et non comme quelque chose qui exige, pour être perçu, certains moyens d'observation bien définis. Autrement dit, on considérait un phénomène non pas relativement à un appareil de mesure de structure donnée, mais, tout au plus, relativement à un appareil de mesure dont le mouvement est donné (c'est-à-dire, relativement à un système de référence donné) [p. 225].

Le lecteur attentif notera que ce discours fait ici écho à la notion d'objectivité discutée par Fock dans le cadre du débat EPR. Nous avons néanmoins mentionné que cette notion relative aux moyens d'observation devait être différenciée d'une forme spécifique d'objectivité qui en s'intéressant à la dimension humaine de la question s'oppose directement à la subjectivité.

pensée de Fock en trouvera des versions condensées dans « Quantum Physics and Philosophical Problems » publié en 1971 dans *Foundations of Physics* [Fock 1970'] ou encore avec le chapitre « The physical and epistemological bases of quantum mechanics » de la version anglaise publiée en 1976 du cours de mécanique quantique, *Fundamentals of Quantum Mechanics* [Fock 1932An, pp. 13-21].

C'est pourquoi, afin d'éviter toute confusion, Fock préfère ici utiliser le terme d'« absolutisation ».

La seconde abstraction de la mécanique classique décrite par Fock, la « détaillisation » est directement liée à la précédente. 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. Par conséquent : « il devrait être possible d'après la physique classique, de conduire l'expérience de façon que tous les aspects du phénomène se manifestent à la fois et cela avec une précision illimitée » [p. 226]. Cette notion d'expérience unique pour déterminer l'état complet d'un système nous renvoie alors à la notion « d'expérience la plus précise possible » introduite dans le débat EPR par Fock pour spécifier la notion d'« état » employée par Einstein [Fock 1936c, pp. 437-438]. Alors qu'il désignait cette notion d'état comme « objective », dans sa terminologie des années 1960 elle devient « absolue ».

En 1965, Fock continue d'argumenter dans le sens d'une « absolutisation de la notion d'« état d'un système » » en mécanique classique. Cette notion est alors interprétée comme « une caractéristique intégrale et complète, comme quelque chose capable de caractériser le système jusqu'au bout (pour le moment donné) » [Fock 1965c, p. 226]. Par conséquent, en raison de la possibilité de considérer l'évolution de l'état physique d'un système au cours du temps, Fock voit en ces abstractions de la physique classique un indéniable argument en faveur d'une conception de la causalité comme un strict déterminisme. En effet, pour le physicien russe, l'hypothèse du déterminisme, qui « exige que le cours d'un phénomène soit déterminé d'une manière unique par l'état initial du système et les lois du mouvement » [p. 227], se retrouve en mécanique et en électrodynamique classiques, deux théories dans lesquelles il est possible de déterminer l'état postérieur d'un système à partir de son état initial.

Pour Fock, la description classique est donc absolue, détaillée et déterministe. Néanmoins il illustre à l'appui d'exemples – la dualité onde-corpuscule des électrons et la symétrie sphérique de l'atome d'hydrogène – qu'il existe un certain nombre de contradictions entre les propriétés des objets atomiques et la physique classique [pp. 223-225]. Par conséquent la description classique, applicable avec une grande précision aux objets d'échelle macroscopique, devient inapplicable aux micro-objets tels que l'électron. Il est alors pour Fock évident que le physicien doit répondre à la question suivante : « quelle est la limite

d'applicabilité et quelle est la précision de la méthode classique de description ? » [p. 230]. De nos développements précédents nous savons d'ores et déjà que la réponse apportée par Fock s'appuie sur les relations d'indétermination de Heisenberg. Il est toutefois intéressant de noter que Fock insiste sur le fait qu'elles « ne fixent aucunement des limites à notre connaissance de la nature » [p. 232]. Il souligne que les quantités $\Delta x, \Delta p_x, etc.$ ne sont en rien des « erreurs » ou « inexactitudes » des résultats de la mesure qui présupposeraient l'existence de valeurs exactes des quantités mesurées, ces dernières ne se prêtant pas à la mesure pour une raison inconnue. Pour Fock, l'enseignement à tirer du formalisme mathématique se place dans une perspective réaliste, et les inégalités de Heisenberg sont par essence davantage l'expression d'une inexistence que d'une simple impossibilité :

En réalité, la vraie cause de l'impossibilité de mesurer exactement 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 [p. 231].

La limite d'applicabilité de la description classique des phénomènes physiques, ne signifie en rien l'abandon d'une description réaliste de la nature. Absolutisme, détaillisme et déterminisme « ne forment nullement une prémisse nécessaire, et donnée une fois pour toutes, pour la description scientifique des phénomènes naturels » [p. 229].

1.2.2. Le principe de relativité par rapport aux moyens d'observation

L'abandon de la description classique est donc acté pour les phénomènes quantiques. La nouvelle méthode pour les étudier doit se fonder sur ce qu'il est réellement possible d'obtenir en mesurant les objets atomiques et Fock nous rappelle alors que malgré tout il ne faut pas oublier que les appareils de mesure et les conditions extérieures doivent eux toujours être décrits selon la méthode classique. Seulement, en vertu du théorème d'indétermination et « pour ne pas dépasser les limites du possible, les valeurs des paramètres qui caractérisent les moyens d'observation ne peuvent être fixés qu'avec une incertitude satisfaisant aux inégalités de Heisenberg » [p. 233].

En effet, Fock reconnaît bien que l'une des principales caractéristiques du domaine quantique est que son étude ne peut se passer d'un intermédiaire : l'appareil de mesure. Un objet atomique ne peut se manifester concrètement qu'après avoir interagi avec l'appareil,

ce qui induit l'obligation d'introduire explicitement les moyens d'observation dans la description des objets atomiques. Si Fock ne réduit pas la mécanique quantique à une simple théorie de l'observation, il accepte le caractère nécessaire de celle-ci : « L'acte de la connaissance n'est jamais purement spéculatif, mais repose sur des observations qui ont nécessairement un caractère matériel ». C'est l'acte de l'observation qui permet, suite à l'interaction entre l'objet atomique et un appareil de mesure dont la description est classique, la connaissance du comportement et des propriétés de l'objet atomique, alors que les prévisions de la théorie « prennent la forme de tels ou tels résultats de ces interactions » [p. 233].

L'introduction de l'appareil de mesure comme élément à part entière de la nouvelle description des phénomènes physiques permet ainsi de rendre compte d'une situation où les différents aspects et propriétés d'un objet ne se manifestent pas ensemble, où l'abstraction classique du « détaillisme » n'a plus cours. Comme le rappelle Fock, c'est notamment le cas lorsqu'il y a incompatibilité entre les conditions extérieures pour que l'objet quantique se révèle sous l'un ou l'autre de ses différents aspects, soit lorsque nous avons affaire à des propriétés complémentaires au sens de Bohr. Dans ce cadre, pour le Russe « il n'y a pas de sens à envisager comme simultanées des propriétés complémentaires. C'est pourquoi le concept du "dualisme ondulatoire-corpusculaire" est bien fondé et ne contient aucune contradiction logique interne » [p. 234].

Pour Fock, renoncer au « détaillisme » n'implique en rien un renoncement du réalisme, mais simplement une reconsidération des processus de description des phénomènes :

En acceptant, comme élément primaire de la description du comportement d'un objet atomique, le résultat de son interaction avec un appareil classique, nous sommes loin de considérer l'objet comme « moins réel » que l'appareil, ou de réduire les propriétés de l'objet aux propriétés de l'appareil. Nous ne faisons qu'introduire le concept de *relativité par rapport aux moyens d'observations*, qui généralise le concept bien connu de relativité par rapport à un système de référence [p. 234].

Plus tard, en 1972, lors d'une conférence à l'Instituto Nazionale di Alta Matematica de Rome, Fock érige le concept de relativité par rapport aux moyens d'observation au rang d'un principe gnoséologique dont « le rôle a été particulièrement grand pendant la période de création [de la théorie de la relativité et de la mécanique quantique] ; l'analyse des possibilités réelles

d'observation [ayant] aidé à trouver les lois de la nature qui déterminent ces possibilités et qui en sont à la base » [Fock 1973, p. 327].

La circularité de la seconde proposition de Fock renforce en réalité le rôle fondamental des mathématiques dans son approche de la théorie. Si le concept de relativité par rapport aux moyens d'observation a son importance pour la recherche scientifique, c'est avant tout parce qu'il contribue à l'élucidation des lois de la nature qui, rappelons-le, s'expriment pour Fock en langage mathématique et qui définissent la signification physique concrète – les possibilités réelles d'observation – du concept susmentionné. Il n'est ainsi pas surprenant de constater que Fock, après avoir mis en relief la question des moyens d'observation, introduit à ce stade de ses développements le fait que le passage d'une description classique des phénomènes à une description quantique requière un nouveau formalisme mathématique plus complexe :

La nouvelle position du problème de la description des phénomènes physiques, dont le point de départ est l'idée de relativité par rapport aux moyens d'observation, exige un formalisme mathématique plus développé et plus compliqué que celui de la physique classique qui ne posait pas la question des moyens d'observations et « absolutisait » les phénomènes [Fock 1965c, pp. 237-238].

Ce formalisme mathématique, qui doit rendre compte de l'interaction de l'objet atomique avec l'appareil de mesure, et donc du fait qu'il n'est pas nécessairement possible d'aboutir à un résultat calculable d'avance de façon déterministe, fait appel à une approche probabiliste sur laquelle s'appuie Fock dans la suite de ses développements.

1.2.3. Possibilité potentielle

Dans le prolongement de ses réflexions de 1951 sur Bohr, Fock a donc clairement continué à s'intéresser à la question de l'observation en mécanique quantique pour laquelle il apporte ici une réponse plus formelle sous la forme du principe de « relativité par rapport aux moyens d'observation ». L'effort de clarification conceptuelle qui se manifeste sur ce point, mais aussi dans les considérations de Fock sur les abstractions en mécanique classique, se poursuit sur ce qui a jusqu'à présent représenté le noyau dur de l'interprétation de la théorie par le Soviétique, la question de la signification physique du formalisme mathématique et en particulier de la fonction d'onde. Il procède alors à une analyse rigoureuse des concepts émergents qui découlent du formalisme mathématique de la mécanique quantique.

Les considérations développées en 1965 rejoignent celles du physicien russe dans le cadre du débat EPR et en particulier son approche de la notion d'« état » décrite par la fonction d'onde. Souvenons-nous qu'il estimait en 1936 que la notion d'état au sens quantique fusionnait avec le concept « d'information sur l'état obtenu comme résultat d'une expérience déterminée la plus précise possible » [Fock 1936c, p. 437]. En 1951, l'état est caractérisé « par la probabilité de tel ou tel comportement potentiel d'un objet en fonction de chaque influence externe possible » [Fock 1951a, p. 12]. En 1960, « l'état quantique d'un système se rapporte à ce qui est virtuellement possible » en vertu du concept de « probabilité d'un fait qui est virtuellement possible » [Fock 1960, pp. 11-12]. Et en 1965 – ce sont les termes qu'il garde jusqu'à la fin de sa vie – Fock préfère s'appuyer sur la notion de « possibilité potentielle » pour définir l'état en mécanique quantique [Fock 1965c, p. 234]. Ces errances terminologiques soulignent toute la difficulté de définir les nouveaux concepts de la mécanique quantique. On peut toutefois observer que dans chaque cas le discours de Fock sur ces notions s'accompagne de régularités : elles font appel au caractère probabiliste de la mécanique quantique et permettent de caractériser le système quantique en amont d'une opération de mesure donnée. Le caractère non déterministe de la mécanique quantique – qui pour Fock s'exprime directement au travers du formalisme mathématique – implique en effet que dans le cas d'une étude statistique de l'interaction d'un objet quantique dans un état initial fixé avec un instrument, on obtienne un résultat sous la forme d'une distribution de probabilité. Cette distribution de probabilité reflète les « possibilités potentielles » d'obtenir tel ou tel résultat suite à une mesure effectuée sur cet objet quantique dans ce même état initial.

Dans la perspective de la subdivision de l'expérience en mécanique quantique telle que développée en 1951 dans sa critique de Bohr, Fock distingue dans son texte de 1965 une « expérience initiale » et une « expérience finale ». L'expérience initiale regroupe la partie préparatoire et la partie active de l'expérience. Elle permet « de tirer des conclusions concernant le comportement futur d'un système physique ; ces conclusions se rapportent aux résultats des interactions futures du système avec différents appareils de mesure » [Fock 1965c, p. 235]. Par conséquent « l'expérience initiale se rapporte à l'avenir » [p. 236]. Elle conduit à des pronostics qui ne peuvent être vérifiés qu'à la suite de l'interaction du système avec un appareil de mesure, soit l'expérience finale, que nous connaissons déjà comme la phase d'enregistrement de la subdivision effectuée en 1951. Fock estime donc que celle-ci est un « procédé de vérification [...] qui se rapporte au passé » [p. 236]. Il faut souligner que pour

une même expérience initiale, donc pour un même état initial, il est possible de procéder à des expériences finales de différents types, et donc relatives à différentes quantités. Il est alors possible d'obtenir selon une approche statistique la répartition des probabilités pour chaque quantité mesurable dans l'expérience finale.

Dans le formalisme mathématique c'est bien évidemment la fonction d'onde qui est en mesure de donner les probabilités pour l'expérience finale, quelle qu'elle soit, découlant d'une expérience initiale donnée : la fonction d'onde est la même pour toutes les quantités physiques. Elle décrit ainsi les différentes « possibilités potentielles » pour chaque type d'expérience finale :

Comme la fonction d'onde donne la description la plus complète de l'état d'un système physique, on peut dire que dans la mécanique quantique l'état d'un système est caractérisé par les réactions virtuellement possibles du système avec les appareils de mesure [p. 239].

C'est par conséquent l'acte de la mesure qui transforme le virtuellement possible pour chaque quantité physique – les possibilités potentielles – en un fait accompli. La fonction d'onde contient ainsi tout autant une description des propriétés de l'objet physique lui-même que celle de son comportement par rapport aux moyens d'observation.

On peut ici noter que le concept de « possibilité potentielle » en mécanique quantique rejoint l'approche plus générale des probabilités par Karl Popper et le concept de « propension » [Popp 1957 ; 1959]¹. La probabilité est conçue comme une propension physique, soit la tendance d'un type donnée de situation physique à obtenir un résultat d'un certain type. Ce type donné de situation physique, dont le résultat d'une expérience est dépendant, est considéré par Popper comme un certain ensemble de « conditions de production » [Popp 1959, p. 34]. Alors, un ensemble de conditions de production a la propension p de produire un résultat E . Une expérience déterministe a une propension égale à 0 ou 1 pour chaque résultat possible, alors que dans une approche non déterministe la propension de chaque résultat prend des valeurs non triviales – différentes de 0 ou 1. L'approche de Popper se revendique comme fondamentalement réaliste, comme le

¹ Sur la théorie de la propension de Popper voir les développements de Hájek dans l'article « Interpretations of Probability » de la *Stanford Encyclopedia of Philosophy* [Haje 2011].

manifestent notamment ses considérations sur la mécanique quantique¹. La propension est à ses yeux une véritable réalité physique, et il rejoint ici clairement Fock dans sa démarche intellectuelle. L'« expérience initiale » du physicien russe détermine les « conditions de production » de Popper, et par conséquent les concepts de « possibilité potentielle » et de « propension » se confondent. Si l'on sait que Popper a été influé pour sa théorie de la propension par le philosophe Américain Charles S. Peirce, l'approche de Fock semble totalement indépendante².

1.3. Conclusion intermédiaire

Nous avons pu observer que la question de l'interprétation de la mécanique quantique est développée par Vladimir Fock en suivant différentes étapes. Nous en avons distingué trois principales : dans un premier temps son intervention dans le débat entre Bohr et Einstein en 1936, puis sa critique de Bohr après-guerre, et enfin une exposition se voulant plus complète et aboutie de la question, notamment élaborée après la rencontre du Russe avec le Danois à Copenhague en 1957. Il est à noter que chaque étape marque une amplification des considérations concernant l'approche de la notion d'observation dans la théorie, et en particulier des processus d'expérimentation. Dans cette partie, en suivant la structure d'une publication de Fock [Fock 1965c], nous avons étudié dans un premier temps ce qui fait de la mécanique quantique une théorie fondamentalement nouvelle par rapport à la mécanique classique : la perte de l'absolutisme, du détaillisme et du déterminisme, combinée à la nécessaire introduction du concept de relativité par rapport aux moyens d'interprétation. Par conséquent, nous pourrions laisser penser que c'est avant tout sur ce constat que repose la pensée du physicien de Léningrad.

Cependant en traversant le temps, nous avons pu constater que cette dernière possède certaines régularités, notamment en ce qui concerne l'approche de la fonction d'onde, et que ce sont elles qui dessinent ce qui pour Fock est essentiel dans l'approche de la théorie. Car si Fock reproche en 1951 à Bohr de « diminuer[r] le rôle de la mécanique quantique (lui laissant seulement une signification symbolique) et [d']exagérer[r] l'importance de la relation

¹ Voir les considérations de Howard dans son article « Popper and Bohr on Realism in Quantum Mechanics » [Howa 1992] et de Freire Jr. dans « Popper probabilidade e mecânica quântica » [Frei 2004a].

² Sur l'influence de Peirce sur Popper voir Hájek [Haje 2011].

d'incertitude » [Fock 1951a, p. 13] en se focalisant sur la question de la description classique de l'expérience en mécanique quantique, le Russe utilise au contraire son discours sur les moyens d'observation comme un appui vers une description des phénomènes quantiques en tant que tels. En effet, aux yeux de Fock la complémentarité n'embrasse pas tous les traits caractéristiques de la théorie [Fock 1960, pp. 10-11]. Car il souhaite s'appuyer sur une approche réaliste du formalisme mathématique pour parvenir à une étude concrète des propriétés atomiques et des phénomènes quantiques. Il propose ainsi de rompre avec l'idée « d'indivisibilité des processus atomiques », et en subdivisant l'expérience isole l'instant où le formalisme mathématique s'exprime le mieux. Peu importe l'issue de l'expérience, la fonction d'onde a pour Fock une signification physique qui lui est propre et qui s'exprime au travers du concept de « possibilité potentielle ».

Surtout, nous avons pu constater que la question du réalisme, mais aussi du réductionnisme, que nous avons érigés comme des principes fondamentaux de l'épistémologie de Fock dans les années 1930, restent des régularités majeures de son discours au travers du temps sur la mécanique quantique. Certes, la question de la signification physique de la fonction d'onde est fondamentale, mais surtout l'opposition antiréductionniste entre le domaine classique et quantique des phénomènes, qui se retrouve en fil rouge au travers de la discussion de la notion d'état, est étendue à une opposition entre une description absolue, détaillée et déterministe des phénomènes, et une description relative aux moyens d'observation et non déterministe. Cette dernière possède alors ses propres concepts émergents que Fock s'efforce de clarifier. Car l'exigence de rigueur physique se traduit globalement chez Fock par une minutieuse analyse conceptuelle mais aussi terminologique qui, en mettant notamment en évidence des contradictions dans le discours de Bohr, aide le physicien soviétique à développer sa propre pensée.

Pour autant Fock réussit-il pleinement son objectif de donner de la mécanique quantique une interprétation réaliste ? Dans son étude de l'approche de la théorie par Popper, Don Howard souligne que le philosophe s'appuie non seulement sur le concept de propension, mais aussi sur celui de « définitude » [Howa 1992]. À ses yeux, les variables conjuguées d'une mesure sont correctement définies de façon simultanée. C'est cette combinaison qui permet à Popper de se revendiquer d'une position réaliste en mécanique quantique, car la définitude garantit l'indépendance de l'observateur et de l'observé. Mais nous le savons, la « définitude » est un concept hautement contestable, et Fock lui-même, en notant l'abandon

de l' « absolutisme » et du « détaillisme » dans la théorie ne prend pas le parti de Popper. En raison de la proximité entre les concepts de « propension » et de « possibilité potentielle », on peut alors considérer que la conclusion d'Howard sur le philosophe autrichien met à mal la position de Fock :

So Popper's version of the propensity interpretation, incorporating the definiteness thesis, qualifies as a realistic interpretation in the traditional sense. But if definiteness is denied, as I think it ought to be, and the holism of the orthodox quantum mechanical description of interactions is accepted, then it must be understood that, on its own, the propensity interpretation's place in the tradition is open to question [p. 55].

La réponse implicite de Fock à la problématique ici soulevée est bien évidemment que la fonction d'onde est une représentation réaliste d'un concept purement quantique, la « possibilité potentielle », qui en vertu de son caractère émergent ne peut pas être questionnée dans un cadre classique. Mais comme le souligne Graham, « the extension of a concept of realism to statements concerning potential situations rather than actual situations was open to a number of logical objections » [Grah 1987, p. 343]. Notons alors pour conclure que potentiellement conscient de ces difficultés, mais peu enclin à les affronter, Fock se cache prudemment derrière un critère d'objectivité :

Ce point de vue [le recours au concept de « possibilité potentielle »] n'a d'ailleurs rien de subjectif si l'on définit l'objet de la physique atomique comme l'étude des relations entre l'homme (un expérimentateur idéal) et un système atomique. Pour nous, l'expérimentateur idéal et le système atomique appartiennent l'un et l'autre au monde extérieur et objectif. L'expérimentateur idéal peut même être remplacé par un appareil de mesure (enregistreur idéal) [...]. Puisque les faits sont objectifs et que les lois par lesquelles les probabilités sont calculées le sont aussi, une théorie opérant avec les faits et les probabilités qui en découlent est, dans son ensemble, complètement objective [Fock 1960, p. 12].

Nous avons déjà noté au cours du chapitre précédent (III.3.3) le caractère profondément pragmatique de l'approche par Fock du problème de la réalité physique, le physicien s'appuyant sur le schéma selon lequel la réalité du monde extérieur est directement accessible à la pensée au travers du formalisme mathématique. Ici, ses réflexions vis-à-vis de la notion d'objectivité des faits étudiés témoignent à nouveau de sa fuite en avant face aux multiples implications d'un débat philosophique sur le réalisme et de sa tendance à tenir une position

dogmatique à son sujet. Fock ne semble pas être intéressé à l'idée d'approfondir le débat. Ainsi, il est alors essentiel de noter qu'en tenant cette position, aux yeux d'un grand nombre de ses contemporains profondément impliqués dans ces questions, le physicien russe se prive de la possibilité de présenter une version aboutie de sa pensée.

2. Interprétation de la relativité générale

Si la théorie quantique et son interprétation ont occupé une bonne partie de la carrière de Fock, le physicien soviétique développe aussi sur la théorie de la relativité générale une interprétation qui lui est propre, et qui diffère du point de vue développé par le fondateur de la théorie, Albert Einstein. Ce dernier joue ici un rôle similaire à celui que tient Bohr dans le cadre de la mécanique quantique : il est le tenant d'une orthodoxie concernant l'interprétation de la relativité générale. L'approche par Fock de la théorie implique de très nombreuses conséquences physiques dont nous ne ferons pas une exégèse complète, celle-ci nécessitant une approche indépendante. En effet, notre souhait au cours de la présente partie est avant tout de rendre compte de la façon dont les considérations sur les vues épistémologiques de Fock que nous avons développées jusqu'à présent se manifestent aussi dans le cadre de la relativité générale, et témoignent de la cohérence générale de l'approche par Fock des théories modernes de la physique. Etant donné que nous n'avons jusqu'à présent pas discuté de la théorie de la relativité générale il semble essentiel dans un premier temps de cette section de formuler un historique des points de contact que Fock a avec cette théorie. Nous nous pencherons alors concrètement sur les premiers travaux de Fock en relativité générale qui en 1939 témoignent déjà de l'approche singulière du physicien soviétique. C'est sur la base de ces résultats techniques que nous pourrons alors aborder directement la question de l'interprétation de la théorie.

2.1. Considérations historiques

Quiconque aurait sous les yeux la bibliographie de Fock serait étonné de constater l'irruption inattendue de travaux dédiés à la relativité générale en 1939 après plus de dix ans consacrés quasi-exclusivement à la théorie quantique. Il faut cependant noter que la théorie ne lui est pas inconnue, et qu'à différentes reprises il s'y trouve directement confronté. Ainsi, nous souhaitons ici dresser un bref compte-rendu des différents points de contact de Fock avec la théorie de la relativité générale avant 1939. En effet, même si nous ne pourrons pas

rentrer dans les détails, notamment en raison de la nature des documents à notre disposition, ils sont autant d'éléments sur lesquels nous pourrions nous appuyer dans notre étude de la pensée du physicien russe sur la théorie d'Einstein.

2.1.1. Frederiks et Friedmann, figures de proue de la relativité en URSS

En 1963, Fock signe dans *Uspekhi fizicheskikh nauk* un court article intitulé « Raboty A.A. Fridmana po teorii tyagoteniya Eynshteyna » (Travaux de A. A. Friedmann sur la théorie de la gravitation d'Einstein). Dans cet article, qui est l'un des rares témoignages du physicien russe sur la période de ses études et sur ses enseignants, il se prononce sur deux d'entre eux, Friedmann et Frederiks :

Aleksandr Aleksandrovitch Friedmann et Vsevolod Konstantinovitch Frederiks, professeurs à l'Université de Pétrograd (maintenant Léningrad), furent les deux premiers à familiariser les physiciens russes, qui travaillaient à Pétrograd, avec la théorie de la gravitation récemment créée par Einstein. Cela était au tout début des années vingt, seulement quand le blocus de la Russie soviétique fut levé, et que la littérature scientifique venant de l'étranger commença à arriver. À l'Institut de physique de l'Université se tenait un séminaire, où entre autres choses avaient lieu des présentations sur la théorie d'Einstein. Les participants au séminaire étaient des professeurs et des étudiants dans leur dernière année (qui n'étaient pas très nombreux). Les intervenants habituels de la théorie de la gravitation étaient V. L. Frederiks et A. A. Friedmann, mais parfois aussi Yu. A. Krutkov, V. P. Bursian et d'autres. Je me souviens clairement des présentations de Frederiks et Friedmann. Le style de leurs exposés était très différent : Frederiks comprenait profondément le côté physique de la théorie mais n'aimait pas les calculs mathématiques, Friedmann lui mettait l'accent non pas sur la physique mais les mathématiques. Il luttait pour la rigueur mathématique et attribuait une grande importance à la formulation complète et exacte des conditions initiales. Les discussions qui avaient lieu entre Frederiks et Friedmann étaient très intéressantes [Fock 1963, p. 353].

Les deux hommes sont des pionniers de la théorie de la relativité générale en URSS. Dans le contexte d'isolement de la Russie en raison de la Première Guerre mondiale, de la Révolution de 1917 puis de la guerre civile russe, le retour à Pétrograd de Frederiks¹ depuis l'Allemagne

¹ Pour des considérations biographiques détaillées sur Frederiks voir sa biographie en russe par Sonin et Frenkel [SoFr 1995], ou l'article en anglais de Vizgin et Frenkel qui considère sa carrière en relativité et en physique des cristaux liquides [ViFr 2002].

à l'été 1918 favorise grandement la diffusion de la théorie¹. Diplômé de l'Université de Genève, Frederiks poursuit ses recherches en Allemagne où il est retenu durant les événements de la Grande Guerre. Il bénéficie cependant à Göttingen de la protection de Hilbert qui en fait son assistant. Le mathématicien allemand est très actif durant cette période dans le domaine de la relativité générale², et Frederiks devient ainsi un spectateur privilégié de ses développements. Une fois en URSS il en devient naturellement un promoteur et est notamment en charge en 1921 d'un cours sur le sujet à l'Université de Pétrograd.

Frederiks, qui a rejoint l'Université en 1919, côtoie Friedmann qui est quant à lui professeur de mathématiques³. Dans une lettre à Ehrenfest datée du 6 août 1920, Friedmann manifeste déjà tout son intérêt pour la théorie de la relativité⁴. Un intérêt qui se concrétise dans ses travaux bien connus aux fondements de la cosmologie non-statique [Fried 1922 ; 1924]. Friedmann découvre que les équations d'Einstein permettent de décrire un univers en évolution et il introduit pour la première fois l'idée d'un univers en expansion. On le décrit alors comme cultivant une rare combinaison d'une approche mathématique extrêmement rigoureuse avec la passion d'un naturaliste se tournant vers les problèmes fondamentaux des sciences naturelles⁵.

¹ Pour un compte-rendu de la réception en URSS de la théorie de la relativité (restreinte et générale) voir Vizgin et Gorelik [ViGo 1987]. Les auteurs détaillent les différents facteurs qui favorisent la diffusion de la théorie. En parallèle du rôle de Frederiks on peut notamment signaler la parution en russe de travaux d'Einstein, notamment *Teoriia otnositel'nosti (obshchedostupnoe izlozhenie)* [La théorie de la relativité. Un compte-rendu populaire] édité en 1921 à Berlin [p. 283]. Plus singulier, Vizgin et Gorelik signalent que les changements révolutionnaires des propriétés de l'espace et du temps ont, suite à la Révolution bolchévique, un écho tout particulier au sein de la société soviétique. La corrélation entre les changements en science et dans la société donnent notamment à Einstein une renommée particulière, Lénine le considérant comme l'un des « grand réformateur des sciences naturelles ». Sur proposition de A. F. Ioffé, P. P. Lazarev et V. A. Steklov il est même élu en 1922 membre étranger de l'Académie russe des sciences, et en 1926 Académicien honoraire de l'Académie des sciences de l'URSS [p. 284]. Une autre source importante sur la réception de la théorie de la relativité en URSS est l'ouvrage de Vucinich, *Einstein and Soviet Ideology* [Vuci 2001].

² Sur le rôle joué par Hilbert dans les développements de la relativité générale on peut consulter l'ouvrage de Mehra, *Einstein, Hilbert, and the Theory of Gravitation* [Mehr 1974].

³ Sur Friedmann, voir sa biographie par Tropp, Frenkel et Chernin [TrFC 1993].

⁴ Lettre mentionnée par Vizgin et Gorelik [ViGo 1987, p. 286]. Friedmann y explique être occupé par les aspects axiomatiques de la relativité restreinte et vouloir se pencher sur les principes de la relativité générale.

⁵ *Ibid* [p. 245]. Voir aussi Vizgin et Gorelik [ViGo 1987, pp. 285-286].

En dépit de la différence des approches de Frederiks et Friedmann mise en avant par Fock en 1963, les deux hommes collaborent sur un ouvrage dont ils résument ainsi l'objectif : « to set forth sufficiently rigorously from the logical point of view the bases of the tensor analysis, multi-dimensional geometry, electrodynamics, and the special and general principle of relativity »¹. Intitulé *Osnovy teorii otnositel'nosti* (Principes fondamentaux de la théorie de la relativité), seule une partie sur l'analyse tensorielle en est publiée en 1924 [FrFr 1924], reprenant notamment des développements de Friedmann dans son ouvrage de 1923, *Mir kak prostranstvo i vremya* (Le monde comme espace et temps) [Fried 1923]. Elle permet alors de définir les principaux contours de la façon dont les deux hommes abordent la relativité. Comme nous le rapportent Vizgin et Gorelik, ils se placent dans une approche géométrique de la théorie :

[The published part of the book] is based on a very solid mathematical foundation of the geometry of general linear connection in the manifold of arbitrary dimensionality and the theory of groups. The starting point for the authors turns out to be the geometry of space-time (they do not believe in an electromagnetic global picture of the world, as is noted directly in the introduction²) [ViGo 1987, p. 291].

2.1.2. Le jeune Fock et la théorie de la relativité

L'apprentissage par Fock de la théorie de la relativité se fait au contact de Frederiks et Friedmann. Certains reconnaîtront peut-être dans la combinaison de l'intuition physique et l'aisance mathématique qui caractérise Fock l'influence de ces deux hommes. Cette vision est certainement trop réductrice, mais comme le souligne déjà Gorelik en 1993 [Gore 1993 ,p. 309], il est vrai que l'« importance [attribuée] à la formulation complète et exacte des conditions initiales » [Fock 1963, p. 353] que Fock reconnaît à Friedmann, désigne tout aussi bien sa propre personne et, comme constatée au chapitre précédent, son exigence de rigueur physique. Les deux hommes se connaissent par ailleurs bien et Fock est même un acteur secondaire des articles à l'origine de la cosmologie non-statique de Friedmann : « Je me

¹ Friedmann et Frederiks [FrFr 1924, p. 3], cités par Vizgin et Gorelik [ViGo 1987, p. 287].

² Cette mention par Vizgin et Gorelik, et donc potentiellement par Frederiks et Friedmann, fait directement référence à l'approche de la théorie par Frenkel qui l'enseigne notamment à l'Université de Pétrograd au printemps 1922. En effet, il considère que les propriétés de l'espace et du temps sont conditionnées par les forces électromagnétiques qui se manifestent sous la forme de forces gravitationnelles [ViGo 1987, p. 289-291].

souviens encore bien de ces travaux, et pour cause, j'ai traduit en allemand pour A. A. Friedmann le second d'entre eux (et peut-être bien les deux), et j'ai aussi attiré son attention sur un cas d'espace à courbure négative qu'il n'avait pas considéré » [p. 354].

Hormis cela, l'intérêt de Fock pour la théorie de la relativité à cette période ne se manifeste concrètement qu'au travers de prises de notes durant des séminaires et les cours de Friedmann¹. Cependant, un document daté du 6 septembre 1922 attire particulièrement notre attention². Il s'agit de notes manuscrites d'un exposé donné par le physicien au cours d'un cercle de discussion philosophique³. La nature du document en rend la lecture et l'interprétation difficile : composé de phrases courtes, à l'organisation passablement floue, il s'apparente davantage pour certaines parties à un aide-mémoire. Par conséquent, nous nous abstiendrons en particulier de spéculer sur ce qui n'a pas été dit. Cet exposé possède toutefois un intérêt majeur pour saisir la pensée de Fock au début des années 1920, le physicien, bien que se considérant comme un « profane » en philosophie, ayant « l'intention d'exposer les principes physiques de la théorie de la relativité et de souligner certains points de convergence avec des questions philosophiques ».

Signalons tout d'abord que Fock expose les principes physiques de la théorie en distinguant de façon schématique et simplifiée trois étapes historiques de son élaboration :

- (1) La fusion de l'espace et du temps dans un monde quadridimensionnel
- (2) L'explication de la gravité à l'aide du rejet de la géométrie euclidienne du monde
- (3) L'explication des phénomènes électromagnétiques à l'aide de la poursuite de la généralisation de la géométrie (Weyl).

¹ « Konspekty rabot A. A. Fridmana, A. Eynshteyna, T. Levi-Chivita, Uitekera po teorii otnositel'nosti, P. Diraka i Lanchosa po kvantovoy mekhanike », 25 mars 1922-1927 - ARAN SPb, 1034-1-461. Voir aussi, « Po teorii otnositel'nosti. (O pervykh rabotakh Eynshteyna) » [Au sujet de la théorie de la gravitation. (Sur les premiers travaux d'Einstein)], 4 mars 1922 - 11 mars 1922 – ARAN SPb, 1034-1-190.

² « O fizicheskikh osnovakh teorii otnositel'nosti i nekotorykh tochkakh soprikosnoveniya s filosofskimi voprosam. Doklad v filosofskom kruzhke » [Sur les bases théoriques de la théorie de la gravitation et de certains points de contacts avec les questions philosophiques. Exposé au *kruzhok* philosophique], 6 septembre 1922 – ARAN SPb, 1034-1-191.

³ Il s'agit ici vraisemblablement d'un *kruzhok*, un cercle de discussion intellectuel et informel traditionnel de l'époque tsariste, dont la tradition perdure avec quelques ajustements dans les milieux scientifiques des années 1920. Pour plus d'informations voir l'étude de Aleksandrov [Alek 1997].

L'étape (1) correspond bien évidemment à la relativité restreinte, la (2) à la relativité générale, mais il est intéressant d'observer que Fock mentionne explicitement dans un troisième temps les travaux de Weyl et sa tentative – en l'occurrence non réussie – en 1918 de modéliser les champs électromagnétiques et gravitationnels en termes des propriétés géométriques de l'espace-temps [Weyl 1918]¹. La conclusion de ce processus historique est alors claire pour Fock dans son exposé de 1922 : « La géométrie a englouti la physique ». Il semble ainsi, comme Frederiks et Friedmann dans leurs ouvrages à venir [Fried 1923 ; FrFr 1924], se placer dans une approche géométrique de la théorie.

La connexion avec les questions philosophiques dans la présentation de Fock se manifeste alors sous la forme d'un fil rouge propre à la pratique scientifique : « la recherche de ce qui est réellement existant dans la nature ». Ainsi, Fock se positionne clairement dans une perspective réaliste, et nous donne des critères qui lui sont propres pour définir le concept de réalité :

Définition de ce qui est réellement existant. C'est ce qui est perçu par tous les observateurs de la même manière. Exemples :

- a) Un objet, visible de différents côtés ;
- b) Un objet, vu par des observateurs en mouvement ; sa masse et sa dimension.

Si deux observateurs voient des choses différentes, il est clair qu'ils ne considèrent pas l'ensemble de l'objet, mais ses facettes.

Le document ici discuté suggère alors que Fock souhaite questionner cette perspective réaliste, où ce sont les régularités qui définissent la réalité, au prisme des théories modernes de la physique. Ainsi, il reconnaît que pour la théorie de la relativité l'espace et le temps n'existent pas indépendamment. Mais l'espace-temps unifié, en raison de l'invariance du carré de l'intervalle d'espace-temps, doit pour sa part être considéré.

Plus loin, Fock généralise ses considérations sur le réalisme :

¹ Notons que la théorie de Weyl est au programme des cours de Friedmann sur la théorie de la relativité générale que Fock suit en 1922. Voir la prise de note du 25 mars 1922 dans « Konspekty rabot A. A. Fridmana, A. Eynshteyna, T. Levi-Chivita, Uitekera po teorii otноситel'nosti, P. Diraka i Lanchosa po kvantovoy mekhanike », 25 mars 1922-1927 – ARAN SPb, 1034-1-461. Pour plus d'informations sur Weyl et ses travaux de 1918 voir Straumann [Stra 1996] et Vizgin [Vizg 1989]. Rappelons ici, comme évoqué au chapitre premier (I.1.1), la filiation de travaux de Fock avec ceux de Weyl, notamment sur les invariances de jauge auxquelles il contribue en 1926 et 1929 avec ses transformations de gradient [Fock 1926b ; 1929c].

Et maintenant le physicien croit à l'existence des atomes et des électrons, ni plus ni moins, que l'existence des « grands » objets habituels. S'il était un « réaliste naïf », il le reste. Mais il a remplacé ce qu'il estimait auparavant comme une substance ou une abstraction (intervalle, force) réelle, par une nouveauté qu'il estime toujours comme réellement existante.

Il est ainsi remarquable d'observer que dès 1922, lorsque le physicien évoque le passage d'une théorie – traitant des « grands » objets, soit la mécanique classique – à une autre – traitant des atomes et des électrons, soit la théorie quantique –, il suggère une acceptation simplement réaliste des nouveaux objets et concepts de la nouvelle théorie. Aussi, on constate dans une phrase quelque peu isolée que Fock manifeste clairement la prééminence qu'il accorde aux objets mathématiques : « Prenons la grandeur $G_{\mu\nu}$. Nous ne disons pas : elle est égale à zéro quand il n'y a pas de matière, mais plutôt ceci : l'égalité nulle signifie qu'il n'y a pas de matière, c'est le manque de matière qui est un symptôme de l'égalité nulle de $G_{\mu\nu}$ ».

L'exposé ne nous permet pas d'élaborer davantage sur la position philosophique tenue par Fock dans sa jeunesse, même s'il est particulièrement frappant de constater que se manifestent d'ores et déjà certaines caractéristiques fondamentales de nos développements des deux chapitres précédents. Ainsi, nous retiendrons principalement deux choses : d'une part qu'il est l'expression manifeste d'un intérêt de Fock pour la théorie de la relativité, restreinte et générale, et d'autre part d'une ouverture aux questions philosophiques et d'interprétation, et en particulier au thème du réalisme.

2.1.3. La généralisation de la théorie quantique comme point de contact

Malgré l'expression d'un intérêt manifeste pour la relativité générale au début des années 1920, il faut attendre la fin des années 1930 pour que Fock se penche à nouveau de façon concrète et spécifique sur la théorie. Entre-temps, celle-ci ne se manifeste dans son travail qu'au travers de la généralisation relativiste pour un espace courbe de la théorie quantique, que ce soit dans le cadre de l'équation de Schrödinger [Fock 1926b], mais aussi de l'équation de l'électron de Dirac [Fock 1929b ; Fock 1929c ; 1929e]. Rappelons que dans le premier cas Fock a recours à un espace à cinq dimensions, et que dans le second cas il propose avec Ivanenko de « géométriser » la théorie de Dirac :

In the past two decades, endeavours have been made repeatedly to connect physical laws with geometrical concepts. In the field of gravitation and of classical mechanics, such endeavours have found their fullest accomplishment in Einstein's general relativity. Up to now, quantum

mechanics has not found its place in this geometrical picture; attempts in this direction (Klein, Fock) were unsuccessful. Only after Dirac had constructed his equations for the electron, the ground seems to have been prepared for further work in this direction [Folv 1929b, p. 798]¹.

Fock continue ainsi de se placer dans la perspective de son exposé philosophique de 1922, où considérant que « la géométrie a englouti la physique »² il reconnaît non seulement l'intérêt de la démarche de Weyl en 1918 [Weyl 1918], mais aussi de l'approche de la théorie à Léningrad par Friedmann [FrFr 1924].

Quelques années plus tard, Fock est à nouveau confronté à la relativité générale lorsqu'il participe le 22 novembre 1935 à la défense de la thèse de Bronstein en tant que rapporteur. Le travail de Bronstein porte alors principalement sur la quantification des champs gravitationnels faibles³. Il existe un procès-verbal abrégé de l'événement : le document se présente comme très bref et probablement loin de refléter l'intégralité des discussions, notamment entre Bronstein et Fock⁴. Néanmoins, notons le commentaire suivant de Fock au cœur d'une analogie entre la relativité générale et une possible théorie électrodynamique non-linéaire⁵ : « Therefore, the introduction of the gravitational radius raises the same objections as in electrodynamics »⁶. S'il ne rentre pas dans le détail de ces objections, le physicien russe se montre ici clairement sceptique vis-à-vis de l'un des résultats de la théorie de la relativité générale, le rayon gravitationnel – ou rayon de Schwarzschild. Introduit par Karl Schwarzschild en 1916 [Schw 1916], il définit le rayon d'une sphère tel que la vitesse de

¹ Traduit de l'allemand par Goenner dans « On the History of Unified Field Theories » [Goen 2004, p. 105]. Cette source est conseillée au lecteur pour l'approche complète des développements des travaux de Fock en 1929 qui en est faite.

² O fizicheskikh osnovakh teorii otноситel'nosti i nekotorykh tochках soprikosnoveniya s filosofskimi voprosam. Doklad v filosofskom kruzhek [Sur les bases théoriques de la théorie de la gravitation et de certains points de contacts avec les questions philosophiques. Exposé au *kruzhok* philosophique] – ARAN SPb, 1034-1-191.

³ Sur le travail de Bronstein et la défense de sa thèse voir Gorelik et Frenkel [GoFr 1994] ainsi que Gorelik [Gore 2005].

⁴ Le document est reproduit dans son ensemble et commenté en russe par Gorelik et Frenkel [GoFr 1985]. L'essentiel de la discussion entre Fock et Bronstein est aussi traduite en anglais par Gorelik [Gore 2005].

⁵ Born et Infeld tentent notamment à partir de 1933 de développer une telle théorie avec pour objectif de supprimer le problème des divergences d'énergie dans l'électrodynamique quantique.

⁶ *Ibid* [Gore 2005, p. 1047]

libération à sa surface est égale à la vitesse de la lumière, de sorte qu'un objet dont toute la masse se trouve à l'intérieur, mais aussi la lumière, ne peuvent s'en échapper. Il est un résultat direct des équations d'Einstein, dont la non-linéarité est, comme le rappellent Gorelik et Frenkel dans leur analyse de l'opposition entre Bronstein et Fock [GoFr 1985, p. 315], une conséquence du principe d'équivalence. Ce dernier, que nous expliciterons au cours de la section suivante (IV.2.3.2), est un des fondements de la relativité générale et Fock se montrera par la suite critique à son sujet.

Ainsi, en rapport à notre souci d'observer les points de contact entre Fock et la théorie de la relativité générale, il semble raisonnable bien qu'hypothétique, de penser que les échanges à l'occasion de la thèse de Bronstein – dont Fock est au demeurant proche collègue – aient pu pousser ce dernier, quelque peu inexpérimenté en relativité générale, à se pencher de façon concrète sur les différents concepts ici en jeu. Mais jusqu'à présent, ni des travaux en mécanique quantique relativiste, ni des échanges avec Bronstein, nous ne pouvons tirer de grandes conclusions sur Fock et la théorie de la relativité générale. Ces quelques remarques éparses montrent seulement qu'il garde un œil sur la théorie. C'est donc de façon quelque peu imprévisible qu'en 1938, au plus tard en avril¹, Fock décide de se pencher concrètement sur la théorie de la relativité générale.

2.2. 1939 : Une importante percée dans le monde de la relativité générale

En février 1939, de façon quasi-simultanée², Fock envoie en russe au *Zhurnal Eksperimental'noy i Teoreticheskoy Fiziki* [Fock 1939c] et en français au *Journal of Physics-USSR*³ [Fock 1939c'] l'article qui signe avec succès son entrée dans le monde de la relativité générale. Intitulé « Sur le mouvement des masses finies d'après la théorie de gravitation einsteinienne », cet article résout un difficile problème relatif aux équations du mouvement dans la théorie d'Einstein. Il faut noter que cette contribution scientifique de Fock pose de façon relativement concrète les fondations de son interprétation de la relativité générale. Par conséquent, bien que nous ne détaillerons pas le « problème du mouvement » en relativité générale, nous souhaitons ici donner les principales caractéristiques du travail de Fock, à

¹ Une indication apportée au premier article de Fock dévolu à la relativité générale indique que celui-ci a été élaboré entre avril 1938 et janvier 1939 [Fock 1939c, p. 410].

² L'article en russe est reçu par la revue le 13 février, celui en français le 26 février.

³ Il s'agit d'un journal en langue étrangère édité à Moscou.

savoir l'usage des coordonnées harmoniques et l'importance donnée au contenu physique, afin de mettre en avant les éléments les plus significatifs pour notre compréhension de son interprétation de la théorie.

2.2.1. Problème du mouvement

Le « problème du mouvement » est posé par Einstein dès l'élaboration de la théorie de la relativité générale¹. Il affirme en effet dès 1913 que le mouvement d'une masse ponctuelle suit une géodésique dans l'espace-temps à quatre dimensions [Eins 1913]. Cette loi géodésique est alors supposée exacte pour des particules tests qui sont sujettes aux effets du champ gravitationnel mais dont les effets sur le champ peuvent être négligés. Par conséquent il est possible de déterminer la trajectoire de la particule en résolvant les équations de champ d'Einstein en l'absence de la particule. Cependant, si le problème n'est initialement pas posé par Einstein pour des particules agissantes sur le champ gravitationnel, il est clair que dans le cas de plusieurs corps de masses comparables, les équations du champ d'Einstein, qui ne sont pas linéaires, ne peuvent permettre une solution exacte du problème. Il n'est ainsi pas possible d'établir une loi des forces universelle analogue à la loi de la gravitation universelle de Newton, mais seulement une loi approximée.

Il est alors établi au cours des années qui suivent l'élaboration de la théorie par Einstein, que les lois du mouvement – et en particulier la loi géodésique –, ne peuvent être énoncées indépendamment des équations de champ et qu'elles en sont même une conséquence directe. En dépit de différents travaux antérieurs – notamment par Weyl et Eddington – on attribue généralement ce résultat à Einstein et Grommer en 1927 [EiGr 1927]². Douze ans plus tard, on accorde toujours à Einstein, ici avec Infeld et Hoffman, la dérivation des équations approximées du mouvement de plusieurs particules de masses comparables [EiIH 1938]³.

Le problème traité par Fock dans « Sur le mouvement des masses finies d'après la théorie de gravitation einsteinienne » est similaire à celui de Einstein, Infeld et Hoffman et il obtient à son tour une approximation des équations du mouvement pour un système de corps

¹ Nous suivons ici Havas qui en 1989 examine avec beaucoup d'attention « The early History of the “Problem of Motion” in General Relativity » [Hava 1989].

² *Ibid.* Havas décrit avec précision les différentes contributions à ce problème précis [pp. 237-254].

³ *Ibid.* Havas discute aussi les différentes étapes intermédiaires majeurs en vue de l'article de Einstein, Infeld et Hoffman, dont divers résultats avaient déjà été établis [pp. 254-265].

massifs. Prenant connaissance des travaux du trio alors que son article est déjà terminé, Fock s'empresse de composer un addendum :

Dans un nouveau mémoire dont nous avons pris connaissance lorsque le présent article était déjà sous presse, A. Einstein, L. Infeld et B. Hoffmann ont traité un sujet analogue et ont déduit explicitement les équations du mouvement des équations de gravitation. Cependant, ces auteurs posent le problème d'une manière tout à fait différente de la nôtre : ils traitent les masses comme des singularités ponctuelles. Le point de vue des trois auteurs se rattache ainsi à 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 (à voir le paragraphe 1 de notre mémoire). L'introduction des singularités ponctuelles conduit cependant à certaines difficultés assez graves, notamment celles qui se rattachent à la question d'unicité de la solution. Nous avons évité ces difficultés en attribuant aux masses des dimensions finies.

En certains rapports les résultats obtenus par les trois auteurs sont plus complets que les nôtres, tandis qu'en d'autres rapports ils sont moins complets. D'un côté ces auteurs ont obtenu non seulement les équations du mouvement de Newton, mais aussi les corrections pour ces équations. Mais de l'autre côté leurs résultats sont limités par l'hypothèse des masses ponctuelles. Il est clair, par exemple, que cette hypothèse exclue la possibilité de déterminer le tenseur matériel à l'intérieur des masses. D'ailleurs, les calculs et les résultats des trois auteurs sont moins explicites que les nôtres ; par exemple, la relation entre la loi de l'équivalence de la masse et de l'énergie et les équations de la gravitation n'a pas été remarquée [...].

La manière de poser le problème, les méthodes de calcul et le caractère général des deux mémoires étant différents, nous pouvons nous borner ici à ces quelques remarques et nous abstenir d'une révision quelconque du texte de notre mémoire [...] [Fock 1939c', pp. 115-116].

Nous le voyons, l'addendum de Fock est une occasion pour lui de souligner les différences entre son approche et celle de Einstein, Infeld et Hoffman. Plus tard, au sein de sa monographie, dans une « étude critique » du développement de la théorie de la gravitation et du mouvement des masses, Fock donne davantage de poids à cette opposition, en la plaçant à l'origine d'une opposition entre deux « écoles » :

The development of the ideas laid down in the paper by Einstein and Grommer in 1927 began in the years 1938-1939 quite independently in two directions. The work of Einstein, Infeld and their collaborators is concerned with the one development, the work of Fock and his

collaborators with the other; the papers of Papapetrou, which appeared after 1950, can also be counted as going in the second direction [Fock 1955a', p. 397].

Les commentaires qui suivent ce constat dans la monographie de Fock mettent l'accent sur deux points principaux qui distinguent les deux approches du problème du mouvement : d'une part l'usage par Fock des coordonnées harmoniques, et d'autre part, le traitement du tenseur métrique¹ pour lequel le physicien russe considère, comme souligné dans l'addendum de 1939, que le choix de travailler avec des masses ponctuelles soulève des difficultés. Nous souhaitons maintenant développer ces deux points respectifs dans le cadre de l'article de 1939.

2.2.2. Coordonnées harmoniques

La question du choix par Fock des coordonnées harmoniques en 1939, mais surtout leur défense tout au long de sa carrière, est l'une des composantes du travail du Soviétique en relativité générale les plus discutées dans la littérature². Nous reviendrons plus spécifiquement dessus dans la section suivante (IV.2.3.5) afin de mesurer leur place dans l'interprétation de la théorie, mais dans le cadre de nos commentaires sur l'article de 1939 il convient tout d'abord de les définir et de discuter les modalités de leur introduction par le physicien russe.

En relativité générale, le système de coordonnées est dit harmonique s'il possède la propriété suivante :

$$\square x_\nu = 0$$

où \square est l'opérateur d'Alembertien, généralisation du laplacien dans la métrique du champ gravitationnel. Fock n'innove pas sur ce point, et se place en réalité dans une perspective ouverte par de Donder et Lanczos au début des années 1920. Il les mentionne par ailleurs directement [Dond 1921 ; Lanc 1922]³. Alors, en vue de la résolution du problème du mouvement, ce choix de coordonnées permet selon Fock de rendre sa démarche nettement plus claire en comparaison d'Einstein, Infeld et Hoffman :

¹ Fock désigne alors en français le tenseur métrique sous le nom de « tenseur matériel », en anglais il est le « mass tensor ».

² Dans le cadre précis de 1939 c'est le cas de Gorelik [Gore 1993]. Pour des commentaires plus généraux et des références complémentaires nous renvoyons le lecteur à nos développements de la section suivante.

³ On parle d'ailleurs aujourd'hui de jauge de de Donder, de jauge de Fock ou plus simplement de jauge harmonique.

The interpretation of the results of the work of Einstein's school is made difficult by the fact that the coordinate system is not specified from the start (in the way we specified the harmonic coordinate system), but instead is determined from approximations to approximation by means of various supplementary conditions which are sometimes introduced implicitly [Fock 1955a', p. 397].

Ce choix apparaît donc avant tout méthodologique, d'autant plus que :

In general, however, one can say that the coordinates that are in fact employed in this work [Einstein, Infeld, Hoffman] differ so little from harmonic coordinates that the differences have no effect on the equations of motion in second order [Fock 1955a', pp. 397-398].

En effet, en 1939 Fock souligne tout d'abord le « très grand avantage du système de coordonnées harmoniques sur tous les autres systèmes » [Fock 1939c', p. 87] en raison des simplifications apportées à l'expression du tenseur de Ricci, qui définit la courbure de l'espace-temps.

Cependant, le physicien russe ne se limite pas à des considérations purement mathématiques concernant le système de coordonnées harmoniques. En effet, il y voit 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 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 1939c', p. 88].

En conclusion, Fock émet même l'hypothèse de l'assimilation du système harmonique à un système galiléen (inertiel), valable pour la relativité générale :

Pour trouver la solution des équations d'Einstein, nous avons fait usage d'un système de coordonnées que nous avons nommé système harmonique, mais qui mérite, peut être, le nom du système galiléen (système d'inertie). Il nous semble très probable que ce système de coordonnées se détermine d'une manière unique (à une transformation de Lorentz près, la

même dans tout l'espace) si l'on tient compte des conditions qui exigent que l'espace soit euclidien à l'infini¹, ainsi que les conditions d'harmonicité [...]. Cette hypothèse est rendue très probable par le fait que la solution approchée obtenue dans les paragraphes précédents a été déterminée sans aucune ambiguïté. La possibilité d'introduire, dans la théorie de relativité générale, un système de coordonnées galiléen mérite, il nous semble d'être notée [p. 114].

Du choix de résoudre le problème du mouvement en utilisant un système de coordonnées se présentant avant tout comme avantageux d'un point de vue mathématique, Fock semble donc tirer d'essentielles conclusions physiques. Il nous laisse cependant dans l'expectative quant à leur véritable signification. Malgré tout, comme le conclut Gorelik, ce que laisse entendre l'article de 1939 c'est qu'il n'est pas « simplement la solution à un certain problème, mais le début d'un vaste programme de travail » [Gore 1993, p. 315]. Nous partageons cette idée, et estimons de plus que l'ensemble peut être lu au prisme de nos développements précédents sur l'épistémologie de Fock.

2.2.3. Contenu physique

Dès 1939, Fock est assez explicite sur les attentes de son travail en relativité générale, au-delà de la résolution du problème du mouvement :

[Nous admirons] la création géniale d'Einstein – sa théorie de la gravitation, si riche en idées physiques malgré son aspect abstrait. Montrer cette richesse en faisant ressortir les idées physiques de l'appareil mathématique nécessairement compliqué – c'est précisément le but du présent mémoire [Fock 1939c', p. 83].

Ainsi, en conclusion il affirme que cet article n'est qu'une étape :

Les résultats obtenus dans notre mémoire ainsi que les questions qui s'y rattachent démontrent avec évidence que la théorie de la gravitation d'Einstein est extrêmement riche en conséquences physiques, qu'il ne reste qu'à dévoiler. Le dévoilement et l'étude

¹ Notons, en vue de la suite de nos développements, que la dépendance dans l'hypothèse formulée par Fock vis-à-vis de la possibilité de concevoir l'espace comme « euclidien à l'infini » – asymptotiquement plat – revient à se détacher de toutes considérations cosmologiques, ce que fait clairement Fock : « Il nous semble qu'étant donné l'état de nos connaissances sur l'univers, chaque tentative de considérer l'univers en entier doit inévitablement se réduire à une spéculation assez mal fondée. C'est pourquoi nous évitons tout ce qui a une relation quelconque avec le problème cosmologique » [Fock 1939c', p. 113]. Nous développons les rapports de Fock à la cosmologie dans la section suivante (IV.2.3.1).

approfondie de ces conséquences transforment cette théorie formelle en une théorie physique et pour ainsi dire tangible [p. 115].

Fock propose donc de donner du contenu physique à une théorie « abstraite » et « formelle ». Il fait ici écho à la perception manifestement généralisée dans la communauté des physiciens que la relativité générale, à défaut d'être considérée comme une véritable théorie physique, serait devenue à partir des années 1920 un véritable « fief mathématique »¹. Ce phénomène est notablement étudié par Jean Eisenstaedt dans son article « La relativité générale à l'étiage : 1925-1955 », où il détaille les raisons pour lesquelles la théorie de la relativité générale connaît une période creuse dans les décennies qui suivent l'enthousiasme de son élaboration [Eise 1986]. Il met notamment en avant le manque de connexion de la théorie avec l'expérience, sa fonction strictement utilitaire en tant que super-théorie de la structure physico-géométrique de l'espace-temps, mais aussi la véritable mathématisation de la physique qui s'opère avec la relativité générale, repoussant certains physiciens et séduisant définitivement les mathématiciens. Aux vues de nos considérations précédentes, nous le savons, Fock n'est en rien impressionné par la difficulté mathématique de la théorie. Néanmoins il considère qu'il est de son devoir de physicien, de faire preuve de rigueur physique, et par conséquent d'extraire du formalisme mathématique de la relativité générale sa signification physique, en ses propres termes donc, de « fai[re] ressortir les idées physiques de l'appareil mathématique » [Fock 1939c', p. 83].

Comme discuté dans la sous-section précédente, les coordonnées harmoniques possèdent aux yeux de Fock un indéniable avantage dans ce sens. Mais d'autres éléments témoignent aussi de la volonté du physicien soviétique de faire preuve de rigueur physique dans son approche du problème du mouvement. Ils font en particulier écho à la différence principale avec Einstein, Infeld et Hoffmann discutée par Fock dans son addendum : le traitement des masses comme des singularités ponctuelles ou possédant des dimensions finies. Pour Fock le choix du trio est grandement influencé 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 1939c', p. 115]. En effet, Einstein ne semble considérer la relativité générale que comme une étape intermédiaire en vue d'une théorie unifiée des

¹ L'expression, utilisée par Eisenstaedt est empruntée à M. A. Tonnelat [Eise 1986, p. 165]

interactions gravitationnelles et électromagnétiques, véritable objet de son programme de recherche¹.

Fock, du moins dans le cadre du problème du mouvement en relativité générale, ne partage pas du tout ce point de vue. Au contraire, dans la perspective antiréductionniste que nous lui connaissons, il souhaite considérer la théorie pour ce qu'elle est concrètement, à savoir « une théorie de la gravitation » qui possède son propre domaine d'applicabilité :

Les considérations que nous venons d'indiquer [sur la non prise en compte des forces électromagnétiques en comparaison des travaux de Einstein et Grommer de 1927] sont intimement liées avec la différence fondamentale entre le point de vue accepté par nous et celui adopté par Einstein sur le problème en question, ainsi que sur toute la théorie de la relativité générale. Pour nous, cette théorie 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 [p. 82].

Notons que si Fock n'exclut pas la possibilité de phénomènes « dans lesquels un rôle également important appartient aux lois de la gravitation et aux lois de la mécanique quantique » [p. 82], c'est en redéfinissant explicitement le domaine d'applicabilité de la relativité générale et de la mécanique quantique qu'il suggère implicitement la nécessité d'un recours à une théorie totalement nouvelle pour la description de ces phénomènes. Fock reste clair sur la relativité générale et le problème ici étudié, seule la gravitation est concernée. Il est alors ici en totale rupture avec sa position de 1922 qui voyait dans les travaux de Weyl sur la géométrisation des champs électromagnétique un prolongement naturel de la théorie².

¹ Sur ce point voir Eisenstadt [Eise 1986, pp. 165-178] ou encore Bergmann sur la place de la relativité générale dans un processus plus général [Berg 1982].

² O fizicheskikh osnovakh teorii otnositel'nosti i nekotorykh tochkakh soprikosnoveniya s filosofskimi voprosam. Doklad v filosofskom kruzhe [Sur les bases théoriques de la théorie de la gravitation et de certains points de contacts avec les questions philosophiques. Exposé au *kruzhok* philosophique] – ARAN SPb, 1034-1-191.

Une position à laquelle il semblait donner du crédit en 1926 dans son approche à cinq dimensions de l'équation de Klein-Gordon [Fock 1926b] puis en 1929 en géométrisant la théorie de l'électron de Dirac [Fock 1929b ; Fock 1929c]. Or, comme nous le soulignerons au chapitre suivant (V.2.2), le caractère antiréductionniste de la pensée de Fock se forge très probablement au contact de sa lecture d'ouvrages marxistes au début des années 1930. Ainsi, il existe une véritable rupture entre le Fock des années 1920, et celui des années 1930 qui redéfinit avec précision le domaine d'application des théories.

En 1939, le physicien russe ne partage donc pas le point de vue d'Einstein qui « croit apercevoir dans sa théorie de relativité un moyen pour la solution du problème des particules élémentaires » [p. 82] et commet donc l'erreur « d'expliquer les particules élémentaires comme points singuliers du champ » [p. 83]. C'est pourquoi, alors que « lorsque Einstein parle des points singuliers, il pense en premier lieu, aux particules élémentaires et non aux corps célestes » [p. 83], quand Fock pose les hypothèses physiques fondamentales de son article il a « en vue un problème du type astronomique, c'est-à-dire le problème du mouvement des corps célestes dans l'espace vide » [p. 89] :

Comme on sait, la distribution des masses dans l'espace mondial [sic] est loin d'être uniforme, les masses étant concentrées en forme de corps célestes qui se trouvent à des grandes distances l'un de l'autre. Conformément à cela, nous allons admettre que les composantes du tenseur matériel sont nulles dans tout l'espace excepté quelques régions isolées dont les dimensions sont petites relativement à leurs distances ; chacune de ces régions correspond à un corps céleste. Le nombre de ces corps (des masses isolées) reste évidemment arbitraire ; c'est une des données du problème [p. 89].

Pour Fock, il est raisonnable de considérer un système de corps célestes que tout un chacun peut aisément identifier à notre système solaire. Ainsi, il se positionne clairement dans une perspective réaliste, et cette approche conduit à des considérations différentes de celles d'Einstein, Infeld et Hoffman sur le tenseur métrique – « matériel » chez Fock. Comme nous l'avons évoqué précédemment, ce point, avec les coordonnées harmoniques, est identifié dans sa monographie par le physicien russe comme l'une des caractéristiques principales de son approche [Fock 1955a', p. 397].

Même si en fin de compte, tant les travaux de Fock et que ceux d'Einstein, Infeld et Hoffmann permettent de traiter des systèmes planétaires en mécanique céleste, il est

intéressant de voir que les fondements des choix du physicien de Leningrad se manifestent dans sa volonté de donner au problème de la rigueur physique, conformément à ses conceptions antiréductionnistes et réalistes. Par conséquent, comme nous allons maintenant le développer, les principes épistémologiques qui guident la pratique scientifique chez Fock se retrouvent clairement dans son interprétation de la théorie de la relativité générale. En effet, cette dernière repose grandement sur les éléments jusqu'alors esquissés.

2.3. La relativité physique ne peut être générale et la relativité générale ne peut être physique

Peu de temps après ses travaux sur le problème du mouvement, Fock publie dans *Priroda* (Nature) un court article en hommage à Einstein qui vient de fêter ses 60 ans [Fock 1939e]¹. Fock y est élogieux envers l'auteur de la théorie de la relativité et met en particulier en avant une approche de la relativité générale comme une théorie de la gravitation au « contenu physique extrêmement riche » [p. 97]. Mais, dans la continuité de ses travaux sur le problème du mouvement, il n'hésite pas à indiquer qu'il ne partage pas l'idée d'Einstein que la théorie de la relativité générale est le point de départ pour la révision des problèmes en physique atomique en vue d'une théorie unifiée. Fock ajoute de plus, de façon similaire à la critique de Bohr en 1951, un volet philosophique à sa critique d'Einstein :

Comme de nombreux physiciens, Einstein accompagne parfois la présentation de sa théorie physique par des considérations philosophiques qui sont d'un niveau loin d'être aussi soutenu que celui de la théorie. Parfois il se positionne du côté de la philosophie idéaliste. Cependant, cette phraséologie idéaliste d'Einstein, bien évidemment, n'enlève rien à la valeur de sa théorie physique qui nous révèle de façon objective les lois de la nature [p. 97]

Ce commentaire de Fock, même si nous discuterons plus tard la place tout particulière qu'il prend d'un point de vue dogmatique dans le contexte soviétique, peut être simplement reçu comme l'annonce de divergences concrètes entre Fock et Einstein en ce qui concerne l'interprétation de la théorie. Et en effet, sur la base de ses résultats obtenus dans le problème

¹ Même si nous n'avons pu le consulter, nous pensons que cet article est identique à un autre publié dans le journal de l'université de Leningrad, *Leningradskiy Universitet*, le 23 mars 1939 [Fock 1939d]. Il coïncide donc avec la soumission de l'article sur le problème du mouvement au *Zhurnal Eksperimental'noy i Teoreticheskoy Fiziki* [Fock 1939c] et au *Journal of Physics* [Fock 1939c'] reçu respectivement par les deux revues le 13 et le 26 février.

du mouvement, Fock va développer après-guerre une interprétation de la théorie qui se différencie clairement de celle d'Einstein. Nous souhaitons maintenant analyser celle-ci à l'aide de la grille de lecture développée précédemment dans notre analyse des vues épistémologiques de Fock.

Contrairement au cas de la mécanique quantique, la question de l'interprétation de la relativité générale par Fock ne semble pas connaître de variations historiques notables, que ce soit dans l'approche ou dans le contenu. Ainsi, sur la base de l'article de 1939, nous pouvons directement dresser un compte-rendu complet de l'interprétation par Fock de la théorie. Si certains points précis peuvent être explicités à l'aide de sources plus techniques et spécifiques, différents documents, en différentes langues, présentent un point de vue complet qui peut être utile au lecteur. Notons en particulier un fascicule publié en 1967 en russe sous le titre *Teoriya Eynshteyna i fizicheskaya otnositel'nost'* (La théorie d'Einstein et la relativité physique) [Fock 1967]. Le lecteur à la recherche d'une source en français peut se tourner vers la présentation de Fock du 1^{er} février 1966 à l'Institut Henri Poincaré. Elle est intitulée « Les principes physiques de la théorie de la gravitation d'Einstein » [Fock 1966a]. Enfin, les principes généraux de l'interprétation de la théorie de la relativité générale par Fock sont explicites dans sa monographie sur la discipline, *Teoriya prostranstva, vremeni i tyagoteniya* (La théorie de l'espace, du temps et de la gravitation), publiée en russe en 1955 [Fock 1955a], en anglais en 1959 [Fock 1955An], en allemand en 1960 [Fock 1955All] et en roumain en 1962 [Fock 1955Ro]. Dans nos développements à venir, nous suivrons principalement la structure de la présentation faite par Fock en introduction de la seconde édition anglaise de sa monographie [Fock 1955a'].

2.3.1. Relativité restreinte et relativité générale : domaines d'applicabilité

Afin de comprendre pleinement l'interprétation de la théorie de la relativité générale par Fock il convient tout d'abord de prendre en compte les considérations du physicien russe sur la relativité restreinte et sur ce qui oppose les deux théories. Dans sa monographie de 1955 Fock traite de chacune d'entre-elles, et en vertu de son exigence de rigueur physique il procède de façon nécessaire à une claire définition de leurs domaines d'applicabilité respectifs. Initialement, dans une perspective géométrique, Fock énonce que relativité restreinte et générale se distinguent par le type d'espace dont elles traitent :

From the geometrical point of view the theory of space and time naturally divides into the theory of uniform, Galilean, space and the theory of non-uniform, Riemannian and Einsteinian, space [Fock 1955a', p. 1].

La relativité restreinte traite donc d'un espace¹ « homogène » alors que la relativité générale traite d'un espace « inhomogène ». L'espace homogène possède pour le physicien russe les caractéristiques suivantes :

- Tous les points dans l'espace et instants dans le temps sont équivalents.
- Toutes les directions sont équivalentes.
- Tous les systèmes inertiels, en mouvement uniforme et linéaire relativement à un autre, sont équivalents.

Dans le cadre de la relativité restreinte cette homogénéité se manifeste alors au travers d'un groupe de transformations qui laisse invariant l'intervalle entre deux points de l'espace-temps : c'est le groupe de Lorentz. Notons qu'en vertu de la troisième caractéristique ici énoncée – qui n'est autre que le principe de relativité de Galilée – Fock utilise la terminologie « espace Galiléen » pour le désigner.

La gravitation universelle n'est pour sa part pas compatible avec la supposition d'un espace homogène. Fock en rappelle la raison donnée par Einstein : « It is that not only the inertial mass, but also the gravitational mass of a body depends on its energy » [Fock 1955a', p. 2]. La présence de matière déforme l'espace-temps et une théorie de la gravitation doit donc se concevoir sur la base d'un espace inhomogène. Pour Fock c'est l'unique objet de l'appareillage mathématique développé par Einstein sous le nom de relativité générale. Nous discuterons au cours de la sous-section suivante de la forme que peut prendre cet espace inhomogène. Mais tout d'abord, il est nécessaire de prêter attention à certains commentaires de Fock qui permettent d'éclaircir le domaine d'application de la relativité générale, et l'attitude à adopter pour son étude. Dans ce but nous avons tout d'abord besoin de préciser ce que Fock entend dans sa monographie par « espace dans son ensemble » et « conditions aux limites » :

We use terms such as “space as a whole”, “conditions at infinity”, etc., not literally, but in the mathematical sense accepted in field theory. By “space as a whole” we mean a region so large

¹ Sauf mention contraire, dans nos développements sur la théorie de la relativité, le mot « espace » doit être compris comme faisant référence à un espace-temps à quatre dimensions.

that at its boundaries the field due to the systems we are considering is negligibly small. “Conditions at infinity” refer to the boundaries of this region [p. 2].

Fock peut alors poser quelques principes méthodologiques à appliquer dans la théorie :

In order to construct a theory of gravitation or to apply it to physical problems [...] one must [...] characterize the properties of space as a whole. If one does not do this, it is quite impossible to state any problem uniquely. This is particularly clear in the view of the fact that the equations of the gravitational, or any other field, are partial differential equations, the solutions of which are unique only when initial, boundary or other equivalent conditions are given. The field equations and the boundary conditions are inextricably connected and the latter can in no way be considered less important than the former. But in problems relating to the whole of space, the boundary conditions refer to distant regions and their formulation requires knowledge of the properties of space as a whole [p. 3].

Il convient alors de souligner que l’attitude de Fock, comme avec l’introduction de la notion de « possibilité potentielle » en raison du caractère probabiliste de la mécanique quantique, est avant tout dictée par la forme que prend le formalisme mathématique de la relativité générale. Cette dernière recourt à une géométrie différentielle et des équations différentielles partielles qui permettent la description du phénomène de gravitation en termes d’une métrique variable de l’espace temps. Méthodologiquement, les exigences mathématiques de la solution de ces équations imposent au physicien une grande rigueur dans la manière de penser les situations physiques ; comme pour toutes théories des champs, une attention toute particulière doit alors être portée aux conditions aux limites.

En dépit du fait que Fock soit un témoin privilégié de la naissance de la cosmologie non-statique avec Friedmann, c’est cette nécessaire attention aux conditions aux limites, requise par le formalisme de la théorie, qui le conduit à se détourner la cosmologie. Un effet, celle-ci est pour lui incapable, en l’état de la connaissance, de définir correctement le système : « We never use “space as a whole” to denote the Universe. A consideration of the Universe seems to us impossible for gnosiological reasons » [p. 2]. En fonction du problème traité, c’est donc le physicien qui doit définir comme « espace dans son ensemble » une région finie d’espace-temps pour laquelle une spécification des conditions aux limites d’extension spatio-temporelle est nécessaire à la solution du problème :

The actual dimensions of the region can differ according to the nature of the particular problem: for an atom or a molecule a distance of the order of a micron can be considered infinitely great, for the solar system, a light year, for the galactic system, a thousand million light years [p. 2].

Nous pouvons maintenant clairement exposer ce que sont les théories de la relativité restreinte et de la relativité générale pour Fock. Nous l'avons vu, d'un point de vue géométrique, ou plus simplement mathématique, il les différencie en fonction du type d'espace dont elles traitent :

From the geometrical point of view the theory of space and time naturally divides into the theory of uniform, Galilean, space and the theory of non-uniform, Riemannian and Einsteinian, space [p. 1].

Mais qu'en est-il d'un point de vue physique ? Pour Fock : « the subject of [special relativity] is the formulation of physical laws in accordance with the properties of Galilean space ». Mais jamais un point de vue similaire n'est formulé pour la relativité générale. En effet, si cette dernière recourt à un espace inhomogène c'est avant tout pour exprimer la déformation de la métrique de l'espace-temps par le champ gravitationnel, et non pas pour imposer aux lois physiques une invariance étendue – qu'exprimerait un principe de relativité générale. À notre sens, c'est ce qu'il faut comprendre quand Fock se plaît à rappeler que la relativité générale est avant tout une théorie de la gravitation. S'il a pu un temps se laisser séduire par l'idée que la théorie puisse traiter d'autres types de phénomènes – comme en témoigne sa référence aux travaux de Weyl en 1922 – il est évident que dès 1939, comme le rend explicite sa critique de l'approche d'Einstein, ce n'est plus du tout le cas et qu'il a clairement redéfini ce qui pour lui est le domaine d'application de la théorie : « Elle est applicable aux phénomènes dans lesquels la gravitation joue un rôle prépondérant » [p. 82].

En définitive, il faut retenir que la théorie de la relativité générale et de la relativité restreinte, bien que géométriquement étant deux théories de l'espace-temps, traitent de phénomènes physiques exclusifs. Ainsi, au cours de la simplification séquentielle de l'électrodynamique quantique à laquelle procède Fock en 1936 [Fock 1936d], et que nous avons déjà discutée au chapitre deux dans le cadre de nos réflexions sur l'antiréductionnisme (II.3.1), il n'est pas étonnant de voir que la théorie de la relativité restreinte est introduite en

tant que telle pour qualifier la théorie de l'électron de Dirac, alors qu'il n'est jamais fait mention de la relativité générale, qui ne peut traiter des phénomènes à l'échelle atomique.

2.3.2. Espaces inhomogènes et principe d'équivalence

Une fois bien établi le domaine d'application de la théorie de la relativité générale, nous pouvons plus concrètement nous pencher sur une question laissée en suspens : les caractéristiques de l'espace inhomogène étudié. Fock ne cherche pas à définir de façon formelle un espace inhomogène – à l'appui par exemple de systèmes de coordonnées curvilignes – car cela reviendrait à étendre la notion de relativité, et comme nous le constaterons au cours de nos développements c'est à l'opposé de ses intentions. Notons alors que si ce type d'espace exige un cadre riemannien, la non constance de sa métrique est à mettre en rapport avec le champ gravitationnel correspondant à la configuration des sources. Ainsi, dans sa monographie de 1955, Fock peut se concentrer sur deux types de configurations qui ont pour lui le mérite d'être applicables à des problèmes réalistes de la physique.

Le premier est le cas d'un espace homogène à l'infini. Dans cette perspective les masses et leurs champs gravitationnels ont un caractère local, et sont « intégrées dans un espace Galiléen sans limites » [Fock 1955a', p. 3]. C'est le type d'espace auquel Fock a recours dans son article de 1939 sur le problème du mouvement, et qui permet de décrire des systèmes similaires au système solaire. La seconde catégorie d'espace inhomogène utilisée par Fock est désignée par celui-ci sous le nom d'« espace de Friedmann-Lobatchevski ». En effet, il est initialement considéré par Friedmann et obéit à la géométrie de Lobatchevski. Dans ce type d'espace, la condition principale est une répartition des masses relativement uniforme dans tout l'espace. L'existence d'un champ gravitationnel bien défini est permise lorsque la densité moyenne de la matière pondérable est différente de zéro. Ainsi, l'espace de Friedmann-Lobatchevski autorise la description d'un univers d'une échelle différente au cas considéré comme galiléen à l'infini :

For this reason, one can surmise that when in cosmology one considers enormous regions, thousands of millions of light years in extension and approximatively uniformly filled with galaxies, the space of Friedmann-Lobachesvsky will be a better approximation to reality than Galilean space [p. 3].

Les espaces de la relativité générale, inhomogènes et décrits par une géométrie non-euclidienne, gardent cependant la particularité d'être homogènes si on considère un espace

infinitésimal. Ceci est connecté au principe d'équivalence introduit par Einstein en 1907 qui affirme que les effets d'un champ gravitationnel sont identiques aux effets d'une accélération du référentiel de l'observateur [Eins 1907]. En tout point de l'espace, il existe donc un référentiel localement inertiel, celui en chute libre dans le champ de gravitation, qu'aucune expérience non-gravitationnelle locale ne peut distinguer d'un référentiel non soumis à la gravitation. Ce référentiel localement inertiel peut être considéré, localement aussi, comme un simple espace de Minkowski utilisé en relativité restreinte.

Chez Einstein, le principe d'équivalence est assis sur l'observation fondamentale de l'égalité des masses inertielles et gravitationnelles, parfois désignée par Fock sous le nom de « loi de Galilée ». Cependant, d'une analyse rigoureuse des concepts ici en jeu, Fock conclut au caractère fondamental de la loi de Galilée face au principe d'équivalence :

[T]he law of equality of inertial and gravitational mass has the following advantage over the principle of equivalence: in the first place it is not confined to local considerations, in the second it avoids dealing with frames of reference in accelerated motion – the precise definition of which is not easy to make [Fock 1955a', p. 3].

Or c'est aussi par ce biais que se manifeste la critique que fait Fock d'Einstein. Si le Russe reconnaît volontiers le caractère heuristique du principe d'équivalence dans l'élaboration de la théorie¹, il considère qu'Einstein, en lui accordant une importance trop grande, tire les mauvaises conclusions sur sa propre théorie. Pour Fock, le caractère local du principe d'équivalence est inadéquat lorsqu'il s'agit de considérer l' « espace dans son ensemble » :

One should note that Einstein did not fully appreciate the inadequacy of a local description and the importance of boundary conditions. This is why it is necessary to change substantially Einstein's statement of the basic problems of gravitational theory; this has been done in the author's research and in this book [p. 3].

Rappelons alors que c'est le formalisme de la théorie, et en particulier ses équations différentielles partielles, qui pour Fock exige du physicien une grande rigueur sur les

¹ En 1966 Fock dit notamment : « Quant au principe d'équivalence, il a sans doute indiqué à Einstein la voie conduisant à la solution du problème de la gravitation » [Fock 1966a]. Sur le rôle du principe d'équivalence dans l'élaboration de la théorie de la relativité générale voir Norton [Nort 1989].

conditions aux limites. Si le principe d'équivalence est un outil utile, il ne permet pas un traitement rigoureux du problème.

2.3.3. Covariance des équations

Si le principe d'équivalence est un élément fondateur du processus intellectuel lié au développement de la relativité générale par Einstein, la covariance générale de ses équations en est, elle, une caractéristique essentielle¹. Einstein est motivé par l'idée que la description des phénomènes physiques ne doit pas dépendre de l'observateur, et qu'un système de coordonnées n'est pas meilleur qu'un autre. L'idéal est alors de formuler la théorie de la relativité générale en utilisant des expressions intrinsèques invariantes, indépendantes du système de coordonnées. Reprenons les mots de Fock pour définir la covariance :

We consider a transformation of the coordinates accompanied by a transformation of dependent variables or functions, according to some specified rule, for instance, the tensor rule. We examine the appearance of the equations satisfied by the original and the transformed functions. If, as a result of the transformation, the new functions of the new variables satisfy equations of the same appearance as the old functions of the old variables, the equations are called covariant. Covariance permits one to write down equations without presupposing any particular coordinate system [Fock 1955a', p. 4].

Dans les équations de la relativité générale la covariance est garantie par l'introduction du langage tensoriel. Fock souligne, comme pour le principe d'équivalence, que la covariance possède une véritable valeur heuristique car elle limite la variété de la forme des équations, et rend ainsi leur choix plus facile. Cependant, dans son souci permanent de saisir la signification physique du formalisme mathématique usité dans une théorie, Fock se voit ici obligé de constater que pour la covariance générale il n'y en a aucune : « Thus, covariance of equations in itself is in no way the expression of any kind of physical law » [p. 5]. En effet, comme le souligne le physicien de Leningrad, tout type d'équations ou presque peut être exprimé sous forme covariante du moment que l'on autorise l'introduction de fonctions auxiliaires. C'est le cas pour les équations de Lagrange en mécanique classique, mais c'est surtout précisément ce qui se produit avec le tenseur géométrique en relativité générale.

L'idée de covariance générale est donc pour Fock un pur artifice mathématique qui bien qu'utile dans la résolution des problèmes n'a aucune signification physique et n'a que peu de

¹ Sur le sujet voir notamment Stachel [Stac 1989].

sens lorsqu'il est question d'interpréter la théorie : les physiciens ont tort de voir en l'introduction de l'exigence de covariance générale des équations de la relativité générale un principe fondamental et caractéristique de cette dernière. Pour appuyer cette idée, Fock n'hésite pas à développer une expression covariante de la relativité restreinte afin de montrer que la principale différence de la relativité générale avec la théorie dont elle découle reste le caractère inhomogène de l'espace étudié. En 1957, lors d'une conférence à Copenhague il se montre plus explicite encore sur le sujet que dans sa monographie :

What I wish to stress is that the properties of the uniform Galilean space-time can be expressed in a generally covariant manner. On the other hand, the Einsteinian gravitation theory supposes the space-time to be nonuniform. It is just this fundamental assumption, and not the general covariance of equations, that distinguishes the gravitation theory from the theory of the Galilean space-time.

This distinction has not been sufficiently understood, or in any case not sufficiently stressed, by many physicists and, paradoxical as it may seem, by Einstein himself [Fock 1957b, pp. 325-326]¹.

Alors, l'absence pour Fock de signification physique de la covariance générale va avoir une grande incidence sur la compréhension par le physicien russe d'une autre notion à laquelle elle est intimement liée : le principe de relativité générale.

2.3.4. Principe de relativité

Dans ses écrits sur la théorie d'Einstein, Fock est particulièrement loquace en ce qui concerne le principe de relativité. Et pour cause, il cristallise à ses yeux l'interprétation incorrecte qui est faite de la relativité générale. Il entend en effet démontrer que ce principe « est lié de façon très étroite au concept d'uniformité » [Fock 1955a', p. 6], et par conséquent inadapté à la théorie « généralisée » d'Einstein. Pour simplifier, le principe de relativité est un principe qui affirme que les lois physiques s'expriment de manière identique dans tous les référentiels inertiels. Initialement découvert par Galilée pour les phénomènes mécaniques il est étendu avec la relativité restreinte aux phénomènes de l'électromagnétisme. L'idée de covariance généralisée des équations effectuée par Einstein en relativité générale est traditionnellement associée à une généralisation du principe de relativité pour y inclure la

¹ Fock mentionne qu'il n'est pas le premier à appuyer cette idée, et fait notamment au mathématicien français Elie Cartan et son article de 1927, « La théorie des groupes et la géométrie » [Cart 1927].

gravitation. Les lois de la physique s'exprimeraient de manière identique dans tous les référentiels, qu'ils soient inertiels ou non. C'est de cette idée que la théorie développée par Einstein en 1915 tire son nom de « relativité générale ».

Dans ses développements Fock insiste tout particulièrement sur le caractère physique du principe de relativité qu'il n'hésite pas par la suite à qualifier de « principe de relativité physique ». Notons en particulier ses propos dans un article de 1966 intitulé « Les principes physiques de la théorie de la gravitation d'Einstein » [Fock 1966a] :

Le principe de relativité physique exige l'existence des phénomènes physiques correspondants dans deux laboratoires (systèmes de référence) en mouvement réciproque. Si ce principe a lieu, on peut faire correspondre à chaque phénomène dans le premier laboratoire un phénomène identique (tout à fait pareil) dans le second laboratoire. En d'autres termes, le principe de relativité physique exige et présuppose l'identité des conditions physiques dans deux laboratoires (systèmes de référence) en mouvement réciproque [p. 207].

Pour Fock, il n'est pas uniquement question que les lois de la physique s'expriment de manière identique dans tous les référentiels, en effet, c'est l'ensemble des « conditions physiques » qui est concerné. En cela il fait usage d'un principe de relativité étendu qui témoigne d'une exigence physique renforcée. Par conséquent, il est nécessaire « pour exprimer la relativité physique de tenir compte de toutes les équations qui déterminent un phénomène physique et non seulement des équations différentielles du champ » [p. 208]. Or, sous un changement de coordonnées, la covariance des équations ne concerne que les relations fonctionnelles, pas les conditions initiales et aux limites qui se trouvent être modifiées. Mais en vertu de la nécessité de considérer « l'espace comme un ensemble », ces dernières sont primordiales pour Fock dans la définition du système étudié en relativité générale. Pour rétablir la forme des conditions initiales et aux limites après une transformation de coordonnées, et exprimer la relativité physique au sens de Fock, il faut introduire un changement physique dans le phénomène ; « par exemple, s'il s'agit d'une simple rotation des axes d'espace et si le phénomène considéré se réduit au mouvement rectiligne d'un point matériel, il faut remplacer le mouvement de long de l'axe X primitif par un mouvement le long du nouvel axe X » [p. 208].

Ce processus, qui permet d'assurer la « relativité physique » vis-à-vis d'une transformation de coordonnées en restaurant l'expression mathématique du phénomène physique, est

appelé par Fock « principe d'adaptation physique » [p. 208] Le physicien le rattache au concept de l'invariance :

Si, dans un système de référence, la description du phénomène est donnée par certaines fonctions (coordonnées et impulsions des points matériels, composantes du champ, etc.), le principe d'adaptation physique exige qu'après le changement des variables indépendantes suivi du changement du phénomène la forme mathématique de ces fonctions reste la même. Cela veut dire que ce principe est satisfait si toutes les fonctions décrivant le phénomène (y compris les composantes des tenseurs) se comportent envers ce double changement comme des invariants [pp. 208-209].

La « relativité physique » n'est alors obtenue que si l'adaptation physique est vérifiée, étendant ainsi l'exigence première de covariance des équations. Dans le cas des transformations de Lorentz dans la théorie de la relativité restreinte l'adaptation physique est supposée toujours possible pour tous les champs étudiés, et c'est en cela que la relativité physique est pour Fock une propriété liée à l'homogénéité de l'espace. En revanche, dans le cas de transformations arbitraires des coordonnées, l'adaptation physique n'est pas toujours possible, et en dépit de la covariance des équations, la « relativité physique » n'a plus lieu : « 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 » [p. 209].

C'est ce raisonnement qui conduit Fock à conclure que « la relativité physique ne peut être générale et la relativité générale ne peut être physique » [p. 212]. Le physicien de Leningrad estime ainsi avoir mis en évidence que la signification physique usuellement accordée à la théorie de la relativité générale n'est pas justifiée. En interprétant la « relativité générale » comme « covariance des équations différentielles pour un changement arbitraire de coordonnées », Einstein a manqué de rigueur physique. Par conséquent il appelle à abandonner le nom de « relativité générale » traditionnellement attribué à la théorie de 1915, fruit de « l'interprétation incorrecte de la théorie par son auteur » [p. 207], pour une version plus explicite sur le contenu de la théorie, à savoir « théorie de la gravitation » ou « théorie chrono-géométrique de la gravitation »¹. Le nom de « relativité » reste quant à lui légitime pour la théorie de la relativité restreinte dont le qualificatif s'avère alors inutile.

¹ L'idée de « chrono-géométrie » est emprunté par Fock au physicien néerlandais A. D. Fokker [Fokker 1955].

2.3.5. Coordonnées privilégiées

En conséquence des éléments jusqu'ici présentés, le résultat physique le plus emblématique de l'interprétation par Fock de la théorie de la gravitation est que selon lui il peut exister pour chaque type d'espace étudié un système de coordonnées privilégié. Notamment, le physicien russe juge qu'« il est possible que dans un espace de Friedmann-Lobachesvsky il [...] existe des systèmes de coordonnées privilégiés » [Fock 1955a', p. 4], et il renvoie cette question à de futures investigations. En revanche, tout au long de sa carrière il est catégorique sur le fait que dans le cas d'un espace uniforme à l'infini les coordonnées harmoniques, dont il fait usage dès 1939, représentent un système de coordonnées privilégié. L'argumentation de Fock repose alors sur le fait que sous les transformations de Lorentz entre les coordonnées harmoniques « 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 1966a, p. 209]. Pour résumer, l'emploi de ces coordonnées permet de procéder facilement à une adaptation physique du système, et par conséquent de conserver la « relativité physique ». En 1966, Fock décrit ainsi la situation :

Voyons maintenant s'il y a une relativité physique dans l'espace d'Einstein. Dans le cas général, non. Non seulement les transformations générales sont incompatibles avec le principe d'adaptabilité physique dont nous avons parlé plus haut, mais il n'existe pas, en général, de groupe plus restreint qui satisfait à ce principe. Cependant, pour une classe importante des espaces d'Einstein (celle qui correspond à la distribution insulaire des masses et permet de fixer les conditions à l'infini) la relativité physique existe. Dans ce cas, on peut introduire les coordonnées harmoniques et considérer le groupe des transformations de Lorentz entre ces coordonnées. Comme nous avons déjà remarqué plus haut, on peut alors adapter les conditions physiques (la distribution et le mouvement des masses) à ces transformations. Les composantes du tenseur métrique, qui se transforment par la loi tensorielle pour un changement des coordonnées, se comportent comme des invariants si ce changement est accompagné par une adaptation physique. Ici les coordonnées harmoniques jouent un rôle privilégié : pour ces coordonnées seulement les transformations admettant une adaptation physique - c'est-à-dire, exprimant la relativité physique - sont linéaires (celles de Lorentz). Mais il va sans dire que l'existence de la relativité physique pour la classe considérée des espaces d'Einstein ne dépend pas des coordonnées employées [pp. 214-215].

Ainsi, si Fock nie l'idée que la théorie d'Einstein représente une généralisation du « principe de relativité physique », il n'exclut cependant pas que pour certaines classes d'espaces inhomogènes celle-ci soit réalisée à l'appui d'un choix judicieux de coordonnées. Ces dernières, qui permettent en plus de la covariance des équations une mise en œuvre effective du principe d'adaptation physique, présentent alors un inévitable caractère privilégié dans la théorie.

Avant de conclure sur l'interprétation par Fock de la relativité générale il est aussi intéressant de noter que l'idée de coordonnées privilégiées vient appuyer chez lui un discours sur la nature de l'accélération. S'il est possible de choisir un groupe de systèmes de référence privilégiés dans lesquels l'accélération d'un corps donné possède une même valeur, alors celle-ci possède un caractère absolu, ce que Fock défend dès 1947 [Fock 1947a]. Plus encore, il soutient aussi une conception absolue de l'espace-temps. Elle diffère toutefois de celle de Newton pour l'espace, qui considère qu'il joue une partie active dans tous les processus mécaniques – comme responsable de l'inertie de la matière – et comme n'étant pas sujet à l'influence des masses et de leurs mouvements. Pour Fock :

L'idée d'espace absolu comme une partie active des processus mécaniques peut être sauvée si nous comprenons l'espace¹ absolu comme chaque espace qui a ses propres propriétés objectives (par exemple, une métrique spécifique), même si ces propriétés sont sujettes à l'influence des masses et leurs mouvements [Fock 1956c, p. 110].

Alors, la défense d'une conception de l'espace-temps et de l'accélération comme absolus, doublée de celle de l'existence de système de coordonnées privilégiées, symbolisent grandement le caractère non orthodoxe de l'interprétation de la relativité générale par Fock. Le second point est par ailleurs celui qui est le plus attaqué par ses contemporains, un aspect sur lequel nous reviendrons tout au long du chapitre huit lorsque nous discuterons de la réception des travaux du physicien russe.

2.3.6. Conclusion intermédiaire

En conclusion de nos considérations sur l'interprétation de la théorie de la relativité générale par Vladimir Fock, il semble essentiel de souligner qu'à plusieurs reprises son exigence de rigueur physique, construite sur les bases de ses considérations épistémologiques

¹ Comprendre ici « espace » dans le sens élargi d' « espace-temps » dans le cadre de la théorie de la gravitation.

sur le réductionnisme et le réalisme scientifique, vient justifier l'attitude qu'il adopte. L'antiréductionnisme du physicien russe, et la nécessaire explicitation du domaine d'applicabilité d'une théorie physique, le conduit à considérer que la théorie d'Einstein de 1915 est simplement une théorie des champs gravitationnel traitant d'un point de vue géométrique d'un espace-temps inhomogène. Ce point de vue est bien évidemment appuyé chez Fock par une approche réaliste du formalisme mathématique qui soutient l'idée que la théorie doit être traitée de façon stricte comme toute autre théorie des champs. Par conséquent, une attention toute particulière aux conditions initiales et conditions aux limites doit être portée. L'exigence de rigueur physique chez Fock prend sa forme la plus emblématique au travers de son approche du principe de relativité. Une conception traditionnelle de ce dernier, non-fockienne, insiste sur l'invariance des équations et se manifeste dans la théorie au travers de leur covariance. Mais dans une démarche fockienne, pour que le principe de relativité soit « physique » les conditions initiales et aux limites doivent aussi être considérées, et il faut adjoindre à la covariance générale une notion d'adaptation physique. Pour Fock, la covariance générale seule n'a aucune signification physique, elle n'est qu'un simple outil mathématique.

De façon concrète, ce sont les différents ingrédients nécessaires à l'indispensable rigueur physique d'une théorie qui sont présents : domaine d'applicabilité, signification physique du formalisme mathématique et description de phénomènes réels – au travers de la nature des différentes situations traitées. Ainsi, comme nous l'avons montré, c'est directement de ce cadre que découle naturellement chez Fock une interprétation non-orthodoxe de la théorie de la gravitation d'Einstein et le tant discuté caractère privilégié des coordonnées harmoniques qui la feront largement connaître.

3. Conclusion

Mécanique quantique et relativité sont les deux théories majeures du siècle dernier, deux théories qui renouvellent fondamentalement l'approche de la physique et manifestent inéluctablement la nécessité d'une interprétation. Nous l'avons explicité, Fock est parmi les physiciens théoriciens impliqués dans la résolution de problèmes physiques concernant les deux théories, l'un de ceux qui joue aussi un rôle sur les questions d'interprétation. Sa démarche est résolument proche de sa propre pratique scientifique et dans chaque cas son

indépendance le caractérise. Il incarne une forme de dissonance face aux positions orthodoxes personnifiées d'une part par Bohr en mécanique quantique, et d'autre part par Einstein en relativité générale. On le devine déjà, cet aspect est une caractéristique essentielle de sa carrière, et les chapitres six à huit se pencheront concrètement sur les différentes conséquences de ses prises de position.

De façon manifeste, tant en mécanique quantique qu'en relativité générale, il est essentiel de considérer que Fock s'appuie sur le formalisme mathématique préétabli et ne le remet pas en question. La problématique qui se posait alors à nous était de savoir ce qui le motivait dans la direction d'une double remise en question de l'interprétation considérée comme orthodoxe pour chaque théorie. Pour répondre à celle-ci, la nécessité qui s'est faite nôtre était de révéler la cohérence sous-jacente aux deux approches de Fock. Invoquer le matérialisme dialectique aurait été une façon de procéder, mais c'était prendre le risque de tomber dans la caricature idéologique alors que les idées avancées par Fock reposent avant tout sur une connaissance précise des théories et de leurs implications techniques. C'est pourquoi le rôle de la philosophie marxiste ne sera discuté qu'au chapitre suivant et que nous nous sommes initialement penchés sur des questions plus spécifiques de prise de position épistémologique face aux problématiques soulevées aux début des années 1930 par la théorie quantique. En procédant de la sorte il nous semble de plus que nous rendons hommage à Fock : en effet, il faut bien saisir qu'il est avant tout un scientifique qui dédie sa vie à la résolution de problèmes physiques et que ses inspirations d'ordre philosophique sont dépendantes de cet objectif initial.

Ainsi, de nos considérations sur les principes épistémologiques de la pensée de Fock nous avons établi que le physicien s'astreint à une exigence de rigueur physique dans son travail. Alors, les critiques de Bohr et d'Einstein sont un moyen pour Fock d'inviter l'auditeur à mesurer les lacunes de ses « opposants » sur ce point précis, et le constat qui est le nôtre en conclusion de ce chapitre est que c'est bien sur cette base qu'il construit ses interprétations des théories modernes de la physique. L'antiréductionnisme épistémologique du physicien soviétique combiné à son réalisme scientifique – sous-tendu par une forme de réalisme platonicien des mathématiques appliquées – le poussent d'une part à privilégier l'expression directe par la fonction d'onde du caractère probabiliste de la théorie dans le cadre de la mécanique quantique, et d'autre part à appuyer l'importance des conditions aux limites et initiales des équations de la relativité générale.

Fock admet le cœur de la compréhension par Bohr de la mécanique quantique, mais il considère que le Danois se détourne du sens véritable de la théorie en limitant son approche de la théorie à une simple théorie de l'observation. À ses yeux, les objets et phénomènes quantiques ont une réalité propre sur laquelle nous pouvons directement être renseignés via le formalisme de la théorie. Ne pas en tenir compte c'est ne pas couvrir l'ensemble du champ des possibilités offertes aux scientifiques, un champ qui se matérialise notamment par le concept de « possibilité potentielle ». Pour ce qui est de la relativité générale, Fock se montre plus distant d'Einstein qu'il ne l'est de Bohr. Le traitement qu'il fait de la théorie implique non seulement un rejet de la notion de relativité « générale » mais elle donne aussi lieu à l'idée que les problèmes physiques doivent être traités à l'aide d'outils spécifiques – par exemple les « coordonnées harmoniques ». Ainsi, on peut noter que si pour la mécanique quantique on se restreint globalement au domaine de l'interprétation, en relativité générale les implications sont plus importantes dans le domaine de l'application de la théorie.

Néanmoins, de ces considérations sur deux théories que tout oppose, ce sont avant tout les régularités dans l'approche générale de sa discipline que nous avons voulu mettre en avant chez Fock. Indéniablement, le physicien est guidé de façon cohérente par ses considérations épistémologiques qui comme nous l'avons développé auparavant sont largement discutées au sein de la communauté scientifique et conditionnent concrètement pour divers physiciens des règles élémentaires à appliquer dans leur pratique scientifique. Ainsi, alors que l'idée de modernité semble privilégier une pensée réductionniste et antiréaliste, Fock se distingue en nous proposant une interprétation consistante de la mécanique quantique et de la relativité générale qui repose sur une forme de cohérence dictée par la combinaison de ses vues antiréductionnistes et réalistes. Mais alors que comme chez Einstein il est possible de prôner une forme d'opportunisme philosophique [Eins 1949], que tant le réductionnisme que le réalisme offrent une multitude de positions différentes à adopter, chez Fock la rigueur physique est indissociable d'une forme de rigueur philosophique – épistémologique. Par conséquent, il ne s'écarte pas de la ligne de conduite qu'il s'est fixée, et comme nous allons maintenant le discuter, le matérialisme dialectique lui offre un cadre philosophique idéal pour structurer sa pensée.

Chapitre cinquième – Matérialisme dialectique

Nos développements sur la pensée scientifique de Fock se sont jusqu'à présent largement affranchis de considérations sur le contexte socio-culturel pour se limiter au contexte scientifique, et par conséquent à une stricte approche des composantes épistémologiques mises en jeu dans les questions d'interprétations des théories de la physique moderne. Comme précisé en introduction du précédent chapitre, cette approche avait pour avantage de nous éloigner d'une forme d'écran de fumée idéologique, véhiculé par la philosophie du matérialisme dialectique, qui a longtemps tenu éloignés les commentateurs de Fock du véritable contenu épistémologique de sa pensée. Or, l'épistémologie est une branche de la philosophie et l'Union soviétique est un espace particulier au sein duquel cette dernière, via cette même pensée initialement forgée par Marx et Engels, joue un rôle sans commune mesure. En effet, le matérialisme dialectique s'y manifeste sous la forme d'une idéologie qui suite à la Révolution d'Octobre va progressivement s'immiscer sous forme dogmatique dans chaque strate de la société.

Dans le même temps, comme nous l'avons souligné en introduction générale, Fock lui-même se revendique du matérialisme dialectique au cours de sa carrière scientifique, vantant même ses mérites en direction d'une correcte compréhension des théories modernes de la physique. Notre souhait n'est donc pas d'établir si Fock a été influencé par le matérialisme dialectique, mais plutôt quel est le rôle joué par celui-ci dans la pensée du physicien russe. Ici, nos constatations des chapitres précédents, et notamment l'approche initiale distincte de l'antiréductionnisme et réalisme, vont être appuyées par nos conclusions sur la philosophie marxiste. Nos développements montreront qu'au travers de la dialectique cette dernière est particulièrement influente en ce qui concerne la structuration chez Fock d'une approche antiréductionniste de la physique, alors que nous constaterons aussi à l'appui de nos considérations sur le matérialisme une forme de prédisposition chez le physicien à sa pleine acceptation. Ce point est essentiel car il sera aussi important d'évaluer au cours de nos développements ce qui dans l'acceptation par le physicien soviétique du matérialisme dialectique est de l'ordre d'une imposition dogmatique, d'un opportunisme scientifique, ou d'une sincère sympathie philosophique.

Ce dernier point, et en particulier l'idée d'une potentielle imposition dogmatique soulignant le caractère singulier du matérialisme dialectique en URSS, appuie le fait que le présent chapitre joue aussi un rôle charnière au sein de notre étude. Il effectue la bascule entre ce qui est de l'ordre d'une étude épistémologique et technique des travaux scientifiques de Fock et de ce qui est du domaine d'une histoire sociale des sciences où nous étudierons plus concrètement l'évolution du physicien dans son environnement. Ainsi, bien que nos développements soient ici axés sur le thème de la philosophie, nous prendrons un soin tout particulier à historiciser nos considérations.

Ce chapitre cinquième est donc celui qui détaille la question de la philosophie sous-jacente à l'épistémologie de Fock, et ce dernier ne s'est que très peu prononcé sur le rôle concret du matérialisme dialectique sur sa pensée. C'est pourquoi afin de reconstruire celui-ci avec précision il nous sera indispensable dans un premier temps de définir attentivement ce qu'est le matérialisme dialectique, le contenu véhiculé indépendamment par chacun des termes de sa dénomination, et surtout de constater son impact plus spécifique sur l'approche des sciences. Pour ce faire nous nous pencherons sur les idées générales de cette philosophie, énoncées initialement par Marx et Engels, avant de mettre l'accent sur le rapport avec les sciences au travers des écrits de Lénine. Nous savons que ce dernier est la principale référence de Fock dans son apprentissage de la philosophie marxiste. Alors, dans un second temps, nous pourrons nous pencher sur la compréhension de cette dernière par le physicien russe. La distinction entre matérialisme et dialectique sera déterminante dans l'évaluation précise de l'influence de la philosophie marxiste sur Fock, mais aussi les raisons pour lesquelles il y adhère pleinement. Et c'est ici que nos développements antérieurs se révéleront précieux, les considérations sur la dialectique rejoignant celles sur l'antiréductionnisme, et celles sur le matérialisme, le réalisme. Ce chapitre sera clos par une approche de la philosophie marxiste dans le contexte politique soviétique, ce qui aura pour but de préparer le lecteur aux chapitres suivants. En effet, nous questionnerons le rapport entretenu par les autorités bolchéviques avec le matérialisme dialectique. Plus spécifiquement, nous aborderons la rupture politique et idéologique induite par la mise en place du stalinisme à l'aube des années 1930 et son impact direct sur la philosophie des sciences, afin d'évaluer en conclusion la position philosophique de Fock prise dans son contexte.

Sources :

Pour l'ensemble de nos considérations sur le matérialisme dialectique nous prenons ici largement appui sur deux ouvrages qui sont *l'Histoire des philosophies matérialistes* de Pascal Charbonnat [Char 2013] et *Science and Philosophy in the Soviet Union* de Loren Graham [Grah 1972]. Le premier, étude récente et unique de l'historiographie en langue française sur la philosophie matérialiste, a le mérite de replacer le matérialisme dialectique dans sa dynamique historique pour en faire ressortir non seulement les principales caractéristiques mais aussi les altérations qui lui sont propres au cours du temps. Le second est à considérer comme la première grande investigation historique de l'impact du matérialisme dialectique sur les sciences dans le contexte soviétique, et présente par conséquent un intérêt tout particulier pour nous. Dans le même registre la thèse de Simon Gouz sur le généticien britannique J. B. S. Haldane, *Biographie d'une vision du monde : Les relations entre science, philosophie et politique dans la conception marxiste de J.B.S. Haldane* [Gouz 2010], présente un chapitre très complet sur les rapports entre matérialisme dialectique et science, où il faut noter que l'accent est mis sur la dialectique. De façon plus spécifique, notons l'intérêt particulier pour nos développements des travaux sur Lénine de Lilian Truchon [Truc 2015], et sur les disputes philosophiques de la fin des années 1920 et du début des années 1930 de Joravsky [Jora 1961] et Josephson [Jose 1991].

Nos travaux d'archives ont été conduits avec l'espoir initial de clarifier les liens de Fock avec le matérialisme dialectique. Cependant la tâche a été complexifiée par le fait que, dans un état d'esprit général que nous mettrons particulièrement en évidence au cours des chapitres suivants, Fock n'est que très peu loquace sur ses influences philosophiques. Il préfère les synthétiser sous forme de principes épistémologiques directement appliqués à sa pratique scientifique. Ainsi, la principale source qui est la nôtre pour donner une impulsion véritable à notre reconstruction du rôle joué par le matérialisme dialectique dans la carrière de Fock est un commentaire publié en septembre 1966 dans *Slavic Review* d'un article de Loren Graham, intitulé « Quantum Mechanics and Dialectical Materialism » [Fock 1966b ; Grah 1966a], où le physicien discute de façon ouverte la question du matérialisme dialectique en tant qu'objet indépendant. Néanmoins, au-delà de notre étude qui tend à extraire des sources publiées l'influence du matérialisme dialectique sur la pensée de Fock, les archives viennent immédiatement lever les ultimes doutes qui pourraient subsister sur l'adhésion de

Fock à la philosophie marxiste. Tout d’abord, nous y avons trouvé la confirmation que Fock a lu des classiques du marxisme. Mais surtout, et même si nous n’utiliserons pas ces documents dans le corps de texte, notons qu’il existe des exemples de correspondance où le physicien continue de défendre, en privé, son adhésion au matérialisme dialectique¹. C’est ce genre de documents qui nous ont permis dans notre processus de recherche de confirmer la sincérité du discours de Fock et ainsi de procéder plus rapidement et efficacement à une analyse de son contenu.

1. Qu’est-ce que le matérialisme dialectique ?

L’expression « matérialisme dialectique » fait son apparition avec son équivalent, « dialectique matérialiste », en 1886 chez Engels dans *Ludwig Feuerbach und der Ausgang der klassischen deutschen Philosophie* (Ludwig Feuerbach et la fin de la philosophie classique allemande) [Enge 1886]². Elle est reprise et popularisée dès 1887 par Joseph Dietzgen pour qui être un « social-démocrate » c’est être un « matérialiste dialectique » dans *Streifzüge eines Sozialisten in das Gebiet der Erkenntnistheorie* (Incursions d’un socialiste dans la région de la connaissance) [Diet 1887]. Georgui Plekhanov favorise lui sa diffusion dans les milieux socialistes russes³. Néanmoins, l’apparition tardive de la dénomination ne reflète pas la véritable mise au point des idées qui la composent, et qui appartiennent initialement au duo Marx-Engels qui développe l’idée d’un matérialisme ayant su assimiler et intégrer les enseignements de la dialectique idéaliste de Hegel. Afin de rendre plus audibles nos propos sur le matérialisme dialectique et sur l’impact qu’il a pu avoir sur Fock, nous définirons dans un premier temps de manière indépendante l’une de l’autre, mais dans le cadre marxiste, les notions de matérialisme et de dialectique. C’est alors que nous verrons dans quelle perspective Marx et Engels les unissent. Enfin, à l’aide de l’ouvrage *Materializm i empiriokrititsizm* (Matérialisme et empiriocriticisme) de Lénine [Leni 1909], nous poserons

¹ Voir notamment la correspondance de Fock avec l’historien des sciences est-allemand, Friedrich Herneck [ARAN SPb, 1034-3-48 et 1034-3-324] et le philosophe suisse, Müller-Markus [ARAN SPb, 1034-3-118 et 1034-3-570].

² Sur l’émergence du terme « matérialisme dialectique » voir Charbonnat [Char 2013, p. 505]

³ *Ibid* [pp. 527-535]

concrètement le cadre philosophique qui nous intéresse, celui des rapports entretenus par la philosophie matérialiste dialectique avec les sciences.

1.1. Définitions préliminaires

1.1.1. Matérialisme

Comme en témoigne la très complète étude de Pascal Charbonnat, *Histoire des philosophies matérialistes*, donner une définition précise du concept philosophique de matérialisme n'est pas chose aisée :

La persistance du problème de la définition du matérialisme tient au fait que cette philosophie est toujours l'enjeu d'une lutte idéologique. Selon que l'on se range de son côté ou non, et selon l'intérêt que l'on trouve à s'en réclamer, sa définition varie entre des pôles opposés. La contradiction existe ainsi à l'intérieur même du matérialisme, à travers les multiples approches qu'il est possible de faire de lui [Char 2013, p. 564].

Par conséquent, afin d'éviter certaines digressions inutiles pour nos développements ultérieurs, nous allons directement recentrer notre définition du matérialisme dans le cadre de la philosophie marxiste. Si comme pour tout matérialisme il est considéré que toute chose est composée de matière, et que tout phénomène est le résultat d'interactions matérielles, la dimension essentielle qui prime chez les marxistes est le caractère immanent de la matière, par opposition à la transcendance qui implique une cause extérieure.

Afin d'être plus spécifique, on peut notamment s'appuyer sur la définition donnée par Engels dans *Ludwig Feuerbach und der Ausgang der klassischen deutschen Philosophie* (Ludwig Feuerbach et la fin de la philosophie classique allemande) [Enge 1886]. Le philosophe allemand y conçoit le matérialisme comme une approche immanentiste de l'origine des choses. La nature existe pour elle-même et trouve en elle-même la raison de ses transformations. Le matérialisme est alors avant tout une pensée libérée de toute entité transcendante. Ici, la question que se pose Engels n'est pas de savoir si la matière prime sur la pensée, ou *vice-versa*, car la pensée est à la fois l'objet d'une histoire biologique – matérielle – et dans le même temps capable de modifier le monde matériel en apprivoisant les forces de la nature par la connaissance. En somme :

Le matérialisme est la conception strictement immanentiste du principe ultime des choses. Il est à la fois une ontologie, car il conçoit l'être de chaque chose dans une complète

indépendance, c'est-à-dire sans adjonction étrangère, et une gnoséologie, dans la mesure où il fait du réel la source de toute rationalité [Char 2013, p. 563].

1.1.2. Dialectique

Le terme « dialectique » dans « matérialisme dialectique » fait directement référence à la pensée du philosophe allemand du XIX^e siècle, Georg Wilhelm Friedrich Hegel. La dialectique hégélienne repose sur la contradiction – la négation du principe d'identité – comme moyen d'appréhender le mouvement réel qui gouverne les choses du monde¹. L'exposé le plus révélateur de la méthode de Hegel se trouve dans la première partie de son *Enzyklopädie der philosophischen Wissenschaften* (Encyclopédie des sciences philosophiques), publiée en 1817 à Heidelberg [Hege 1817]. Hegel y montre que chaque entité, réelle ou intelligible, se manifeste par une identité stable à un moment donné, mais participe à une totalité qui exige le renversement de cette identité. De façon explicite, dans la philosophie marxiste, Hegel est simplifié et on tire de son discours trois lois de la dialectique qui définissent les principes du mouvement des choses, ou plus précisément, dans un cadre matérialiste, de la matière. Ces lois y sont alors tout autant valides pour les sciences que pour l'histoire du développement humain.

Dans sa thèse, Simon Gouz souligne que les trois lois de la dialectique sont introduites par Engels de façon différente en fonction de ses divers écrits [Gouz 2010]. Si parfois « ces lois ne sont pas présentées comme données *a priori* mais comme abstraites, produites par le développement historique lui-même » [p. 552], dans la seconde préface à *l'Anti-Dühring* il est question de lois « régissant » les phénomènes naturels [Enge 1877, p. 22], « laissant la possibilité de les interpréter comme des énoncés situés sur le même plan que les lois scientifiques » [Gouz 2010, p. 552]. Cette seconde présentation est notamment reprise par les versions les plus dogmatiques du matérialisme dialectique, et en particulier lorsqu'une ligne idéologique unique est adoptée en URSS au début des années 1930. Toutefois, la souplesse du discours d'Engels, permet, comme l'indique Loren Graham, de voir subsister un courant du matérialisme dialectique soviétique, non officiel, qui conçoit les trois lois de la dialectique comme des lois provisoires susceptibles de modification ou de remplacement en fonction de l'évolution de la science [Grah 1987, p. 47]. Quoi qu'il en soit, les trois lois de la dialectique

¹ Sur Hegel et la dialectique, notamment dans la perspective de la philosophie des sciences, on peut consulter Renault [Rena 2001].

restent un des fondements du matérialisme dialectique et nous en donnons ici un bref aperçu¹.

La première loi de la dialectique est celle du passage de la quantité à la qualité. Une accumulation de variations apparemment identiques conduit à une transformation fondamentale de l'état d'un objet. De la même façon, des retraits purement quantitatifs sont à l'origine d'un changement qualitatif de l'objet. Pour Marx et Engels cette loi est bien évidemment valable pour l'ensemble des sciences, de la physique à l'histoire. Ils ont notamment recours² pour illustrer leurs propos à l'exemple des hydrocarbures en chimie qui se définissent qualitativement selon la quantité de CH₂ dont ils sont composés : le méthane possède la formule chimique CH₄, l'éthane C₂H₆ et ainsi de suite selon la formule C_nH_{2n+2}.

La seconde loi est celle de l'interpénétration des contraires. L'identité de chaque chose est en constant mouvement ; la contradiction est le moteur de tout phénomène. Cette loi s'oppose à toute idée fixiste. Dans le mouvement réel, les choses entretiennent une lutte incessante entre leurs formes contraires, qui les poussent à se transformer elles-mêmes en de nouvelles formes contradictoires. Prenons comme Engels l'exemple de l'identité du corps organique³. Un animal est à tout instant le même et un autre. En effet, au cours du temps, ses cellules meurent, naissent, au point qu'au bout d'un certain temps, tous les atomes le composant ont été remplacés. Cependant son unité reste la même. Cette loi est en définitive une explication pour l'énergie inhérente à la nature. La matière possède la possibilité de se mouvoir en raison de ses propres contradictions et oppositions internes.

La troisième loi est celle de la négation de la négation. Pour qu'une chose passe d'une forme à une autre elle doit nier son état actuel, qui est aussi la négation d'un état antérieur. La négation devient un concept positif, la lutte entre l'ancien et le nouveau conduisant à des synthèses supérieures. C'est la loi qui conditionne le mouvement dans le temps et dans l'univers, qui n'a ni début ni fin. Engels prend l'exemple du grain d'orge⁴. Celui-ci devient une plante qui est la négation de l'état de grain, mais produit à son tour des grains qui annoncent sa propre disparition, soit la négation de la négation précédente.

¹ Un compte-rendu plus détaillé est notamment disponible chez Graham [Grah 1987, pp. 46-57] et Charbonnat [Char 2013, p. 505-509].

² C'est le cas avec Engels dans l'*Anti-Dürhing* [Enge 1877, pp. 161-163].

³ *Ibid* [pp. 102-103].

⁴ *Ibid* [pp. 171-172].

Ensemble, ces trois lois expriment alors sous des points de vue différents un même mouvement, le cycle éternel du développement progressif de l'être – on pourrait parler de spirale – qui se transforme sans cesse, et que Marx et Engels se chargent alors dans la seconde moitié du XIX^e siècle d'intégrer à leur vision matérialiste du monde.

1.2. Mise au point du matérialisme dialectique : Marx et Engels

L'ascendance matérialiste des travaux de Marx et Engels se manifeste notamment dès 1841 avec la thèse de doctorat de Marx sur Épicure et Démocrite, *Differenz der demokritischen und epikureischen Naturphilosophie* (Différence de la philosophie de la nature chez Démocrite et Épicure) [Marx 1902]. Mais les deux hommes souhaitent intégrer à cette philosophie la nécessité de s'interroger sur l'origine historique et sociale de l'humanité. Dans le cadre de ce programme, la société humaine possède une valeur à part entière dans le monde animal, elle est un mode d'existence unique avec des lois particulières. Ainsi, l'élaboration matérialiste de la dialectique va se situer dans le prolongement du matérialisme historique, théorie du devenir historique et des rapports de production. À l'aide de la dialectique, Marx et Engels ont pour but d'aboutir à une connaissance scientifique de l'histoire, de la société. En appliquant au processus historique les lois de la nature, le matérialisme dialectique vise à analyser les évolutions des sociétés humaines, et notamment les périodes révolutionnaires où l'évolution naturelle s'accélère. Suivons alors Charbonnat pour saisir brièvement les différents blocs constitutifs de la construction de la pensée de Marx et Engels [Char 2013, pp. 488-509].

Les deux philosophes adhèrent à la démarche dialectique hégélienne très rapidement, mais dès 1844, le jeune Marx, suivi en 1845 par Engels, se montre critique, en considérant qu'Hegel n'a pas été en mesure de dépasser le point de vue de l'idéalisme, philosophie qui considère que la nature de la réalité repose sur l'esprit. Les deux hommes estiment que l'idée du mouvement est maintenue dans les bornes de la pensée philosophique pure, en faisant de l'esprit l'origine de la nature et de l'homme. Ici, la dialectique de Hegel tend à nier toute objectivité, à dépasser l'objet extérieur et matériel pour parvenir à la conscience de soi. La critique de l'idéalisme est présentée par Charbonnat comme le premier temps du développement de la philosophie de Marx et Engels : « Cette négation fondatrice [la critique de l'idéalisme] révèle la contradiction propre à la pure spéculation : la réduction de l'origine du réel, par conséquent de son mouvement, à des catégories fictives, c'est-à-dire transcendantes » [Char 2013, p. 495].

C'est sous l'influence de la philosophie de Ludwig Feuerbach¹, critique de la religion, que Marx et Engels prennent totalement conscience de la nécessité d'une affirmation franche du matérialisme. Feuerbach renverse l'idée de primauté de la pensée sur l'être et les entités spirituelles deviennent des productions de la conscience humaine. La nature peut enfin exister pour elle-même et l'origine de la pensée est alors située dans l'être. Le philosophe souhaite en réalité réaliser une forme de synthèse du matérialisme et de l'idéalisme au moyen d'une nouvelle doctrine qui parviendrait à une authentique conscience de soi : l'homme devient le nouveau Dieu. Mais Marx et Engels dépassent ces idées et lui objectent qu'il est impensable de ne pas tenir compte de l'humain dans son activité pratique et sociale, de le diviniser sans saisir l'origine réelle de son être, en faisant abstraction du cours de l'histoire. Le véritable matérialisme leur permet d'aller plus loin, car il montre que la religion est un produit social dont l'origine se situe dans les conditions d'existence de l'homme. La vie sociale détermine les hommes et est l'agent de leur transformation. L'immanentisme de Marx et Engels se fonde alors sur la compréhension de l'origine réelle et spécifique de l'humanité : les conditions d'existence sociale.

Après avoir rejeté les entités vides et abstraites de la dialectique hégélienne en imposant un retour aux fondements naturels de l'homme, et après avoir, contrairement à Feuerbach, renoué avec l'existence réelle et sociale, il faut pour achever le matérialisme dévoiler le contenu matériel des déterminations réelles de l'humain. Ceci est réalisé à travers une critique des philosophies matérialistes précédentes. Marx et Engels leurs reprochent une forme de fixisme – matérialisme mécaniste –, une incapacité à prendre en compte l'instabilité inhérente aux entités naturelles, pourtant rendue évidente dans l'hypothèse cosmologique de Kant-Laplace, la géologie de Lyell, la chimie organique et bien entendu le darwinisme. Alors, c'est la dialectique qui peut permettre une critique efficace de ces anciennes formes de matérialisme.

Cependant, comme le souligne Charbonnat, « le mouvement conduisant à [la] nouvelle philosophie matérialiste n'est pas linéaire » [Char 2013, p. 502]. Les points évoqués précédemment s'effectuent en réalité de façon plus ou moins simultanée dans les premières années des échanges entre Marx et Engels. Et c'est alors dès 1846 avec *Die deutsche Ideologie*

¹ Ludwig Feuerbach est un philosophe allemand du XIX^e siècle, initialement disciple puis critique d'Hegel, qui s'impose rapidement comme un des chefs de file du courant matérialiste allemand.

(L'idéologie allemande) [MaEn 1846], que la conception matérialiste des deux hommes s'accompagne véritablement de la méthode dialectique, bien que cette dernière soit implicite. Ce texte, publié uniquement à titre posthume, marque de plus une véritable rupture entre le matérialisme et l'idéalisme, des réponses étant apportées à la question de l'origine des représentations mentales. Très clairement à cette occasion, l'idéalisme, qui regroupe donc les partisans de la transcendance et érige la fiction en mode de connaissance, devient l'adversaire de la philosophie matérialiste. On y affirme que c'est bien l'immanence qui doit primer :

Le matérialisme de Marx et d'Engels installe l'immanence dans la société et l'histoire. Après s'être libéré du créateur surnaturel, l'homme doit rejeter la transcendance de son mode d'existence particulier. Il ne tire pas la spécificité de son être des représentations qu'il s'en fait, mais du contenu déterminé de cet être, c'est-à-dire de la façon dont il produit les ressources nécessaires à celui-ci. Cette origine pratique et sociale de l'homme fait comprendre que toutes ses productions sont issues du même monde, y compris les idées les plus éthérées. Les représentations mentales descendent sur terre ; la conscience de leur dépendance à l'égard de la réalité concrète signifie leur réconciliation avec l'homme en chair et en os [Char 2013, p. 504].

Sur cette base, les deux philosophes allemands développent un véritable matérialisme dialectique qui, en tant que prolongation du matérialisme historique, étend la méthode dialectique au-delà de l'étude de la société, pour l'appliquer aussi à celle de la nature. Cette volonté se fait notamment forte au travers de deux ouvrages relativement tardifs de Engels que sont l'*Anti-Dühring* publié en 1877 [Enge 1877], et la *Dialektik der Natur* (Dialectique de la nature), ouvrage incomplet publié pour la première fois en 1925 seulement [Enge 1925]. Le premier est une réponse à l'influent philosophe allemand Eugen Dühring¹, qui tout en se réclamant du socialisme rejetait la dialectique de Hegel et critiquait les théories économiques de Marx. Le second, production inachevée de Engels rédigée entre 1873 et 1883 et publiée seulement en 1925, est une investigation des rapports entre la science et la philosophie marxiste. De façon générale Marx et Engels considèrent la méthode dialectique comme la garantie d'une conception matérialiste véritable. Le matérialisme dialectique résume les conditions de validité du savoir et expose de façon générale les principes de la connaissance

¹ Dühring est un philosophe et économiste allemand qui est notamment maître de conférences de l'Université de Berlin entre 1864 et 1874.

positive du réel. Dans cette perspective, les trois lois de la dialectique de Hegel sont alors celles auxquelles obéit la matière.

1.3. Sur les sciences : le point de vue de Lénine

Comme nous venons de le constater, la philosophie du matérialisme dialectique prétend donc s'appliquer directement au domaine des sciences. Si l'on doit résumer en quelques mots la place de la pensée marxiste pour ces dernières, il est judicieux de faire référence à Loren Graham qui dans son ouvrage majeur de 1987, *Science, Philosophy, and Human Behavior in the Soviet Union*, poursuit explicitement l'objectif d'étudier les relations entre le marxisme soviétique et les sciences [Grah 1987]¹. Nous ne prétendons pas ici dépasser le remarquable point de vue général qu'il a su développer sur la question, mais seulement pousser ses investigations concernant le personnage de Fock. Graham évoque donc ainsi le matérialisme dialectique :

Contemporary Soviet dialectical materialism as a philosophy of science is an effort to explain the world by combining these principles: All that exists is real; this real world consists of matter-energy; and this matter-energy develops in accordance with universal regularities or laws. A professional philosopher would say, therefore, that dialectical materialism combines a realist epistemology, an ontology based on matter-energy, and a process philosophy stated in terms of dialectical laws [Grah 1987, p. 24].

La position de la philosophie marxiste en rapport avec la science se développe comme nous l'avons vu au travers de différents écrits de Marx et Engels. Nous avons déjà mentionné la thèse de doctorat de Marx de 1841, *Differenz der demokritischen und epikureischen Naturphilosophie* (Différence de la philosophie de la nature chez Démocrite et Épicure) [Marx 1902], différents ouvrages de Engels, *l'Anti-Dühring* [Enge 1877], la *Dialektik der Natur* (Dialectique de la nature) [Enge 1925], auxquels nous pouvons ajouter *Ludwig Feuerbach und der Ausgang der klassischen deutschen Philosophie* (Ludwig Feuerbach et la fin de la philosophie classique allemande) [Enge 1886]. Nombre des positions avancées sur ces questions par les deux hommes sont alors reprises plus tard dans *Materializm i*

¹ Pour un compte-rendu très complet de la question, le lecteur peut aussi consulter le chapitre « La conception des sciences dans le marxisme de Marx, Engels et Lénine » de la thèse de Simon Gouz [Gouz 2010, pp. 543-639]. L'accent y est particulièrement mis sur le rôle de la dialectique. On peut aussi consulter Joravsky dont l'approche est particulièrement intéressante pour le contexte soviétique [Jora 1961, pp. 3-23].

empiriokrititsizm (Matérialisme et empiriocriticisme) de Lénine [Leni 1909], un ouvrage qui aura une influence considérable en Union soviétique¹.

Comme le souligne Graham, l'ensemble susmentionné se révèle relativement hétérogène, faisant parfois l'objet de contradictions. Les dates de publications et de compositions des différents documents aident grandement « à la compréhension de l'évolution, de la modification et de la structure de la pensée Soviétique marxiste sur la nature de la science » [Grah 1987, p. 25]. C'est en cela que *Matérialisme et empiriocriticisme* est un ouvrage à part. Car il faut non seulement prendre en compte l'importance politique de son auteur, mais aussi qu'étant le dernier écrit parmi les travaux précités, il est plus tard considéré comme la résolution d'une importante controverse philosophique parmi les Marxistes russes. En effet, sous le terme « empiriocriticisme » Lénine développe ouvertement une critique des pensées du physicien et philosophe autrichien Ernst Mach et du philosophe allemand Richard Avenarius, qui au début du XX^e siècle attirent l'attention en Russie des marxistes A. Bogdanov, A. V. Lounatcharski, V. Bazarov ou encore N. Valentinov.

Il est ici essentiel de dire un mot sur Mach, dont l'œuvre est majeure pour la science moderne, tant d'un point de vue scientifique que philosophique². L'Autrichien développe une forme de « physique des sensations » où, pour simplifier, procédant d'un principe d'économie il affirme que les scientifiques doivent se contenter des données empiriques pour obtenir des résultats. Se gardant de tout commentaire sur la réalité, Mach développe l'idée d'un monde consistant seulement en nos sensations, conception qu'il affirme en 1886 dans *Beiträge zur Analyse der Empfindungen* (Contributions à l'analyse des sensations) [Mach 1886]. C'est donc dans un contexte de propagation de ces thèses considérées comme idéalistes dans le milieu marxiste, que Lénine se décide en 1908 à rédiger *Matérialisme et empiriocriticisme*. Il se donne « pour tâche, dans ces notes, de rechercher où se sont égarés les gens qui nous offrent, sous couleur du marxisme, quelque chose d'incroyablement incohérent, confus et

¹ Sur ce point voir en particulier les développements de Joravsky dans son ouvrage *Soviet Marxism and Natural Science. 1917-1932* [Jora 1961]. Il développe notamment d'importantes considérations sur « l'esprit de parti en philosophie », indispensables pour comprendre le rôle joué dans la société soviétique par les écrits de Lénine [pp. 3-44]. Graham [Grah 1987, pp. 34-35] souligne aussi l'importance, sur un plan secondaire toutefois, d'une autre publication des idées de Lénine, à savoir les *Filosofskie tetradi* (Cahiers philosophiques) publiés en 1933 [Leni 1933]. Il s'agit de notes, extraits et autres fragments compilés après la mort de Lénine.

² Sur la philosophie de Mach voir l'ouvrage de Verley [Verl 1998].

réactionnaire » [Leni 1909, p. 32]. La portée philosophique de l'ouvrage de Lénine est un sujet largement discuté dans la littérature, probablement en raison de sa nature polémique¹. Certains commentaires, comme celui de Josephson, se montrent assez radicaux :

Materialism and Empiriocriticism is characterized by vulgar materialist generalizations, lengthy diatribes, and excessively long quotations of opponents followed by brief, haughty ridicule. Had the Bolsheviks not succeeded in 1917, it is doubtful that Lenin's book would be read today [Jose 1991, pp. 249-250].

Notons néanmoins en contrepartie de ce sévère constat, l'ouvrage récent de Lilian Truchon, *Lénine épistémologue*, qui permet de rééquilibrer le débat :

Mon ouvrage visait notamment [à] valoriser la contribution inestimable de Lénine comme épistémologue et matérialiste en dénonçant pour ce faire toutes les caricatures (réalisme naïf, dogmatisme virulent, contenu polémique ennuyeux, mauvaise connaissance de l'histoire de la philosophie et des auteurs traités, etc.) dont a fait l'objet *Matérialisme et Empiriocriticisme* [Truc 2015, postface].

Si notre sujet n'est pas de trancher dans ce débat, reconnaissons que l'étude de Truchon permet d'extraire de façon convaincante le contenu épistémologique de l'ouvrage de Lénine. Ce dernier reprend largement le volet philosophique des thèses de Marx et Engels, même si en défendant les fondateurs du matérialisme dialectique face au révisionnisme de ses contemporains, Lénine souhaite avant tout en préserver la portée critique et révolutionnaire. Par conséquent, un compte-rendu des principales thèses de *Matérialisme et empiriocriticisme* est nécessaire à la poursuite de notre étude en raison de son impact sur la société soviétique, mais surtout, comme nous le discuterons plus tard (V.2), sur Fock en personne.

Car il faut aussi noter que parmi les classiques du marxisme, l'ouvrage de Lénine est le seul qui traite principalement de la physique, et plus encore, comme en témoigne son chapitre cinq intitulé « La révolution moderne dans les sciences de la nature et l'idéalisme philosophique » [Leni 1909, pp. 279-344], de ses avancées les plus récentes². Il est certes vrai

¹ Voir notamment la critique du physicien marxiste Pannekoek qui dans *Lénine philosophe* soutient que l'ouvrage de Lénine n'a été écrit que pour écarter les opposants politiques [Pann 1938].

² Pour étayer nos commentaires sur ce point voir Vizgin qui montre que Lénine est bien au fait des développements de la physique au cours de la période 1890-1910 [Vizg 1981, pp. 229-236], ainsi que Truchon [Truc 2015, pp. 125-144].

que le penseur russe ne mentionne jamais Einstein, mais il a consulté, entre autres, « La physique des électrons » de Paul Langevin [Lang 1905], *La valeur de la science* de Henri Poincaré [Poin 1905], *Life and Matter* d'Oliver Lodge [Lodg 1905], *La physique moderne : son évolution* de Lucien Poincaré [Poin 1906], mais aussi *The Corpuscular Theory of Matter* de Joseph J. Thomson [Thom 1907] ou encore *Neuere Anschauungen über die Struktur der Materie* de Augusto Righi (Vues récentes sur la structure de la matière) [Righ 1908], autant d'ouvrages de scientifiques à la pointe des derniers développements de la physique atomique et de la théorie de la relativité. Lénine fait avant tout la critique de ces écrits, qui témoignent en réalité d'un processus de transition en physique d'une explication mécanique de la matière vers une explication électromagnétique. S'il rejette alors les appels philosophiques à la « disparition de la matière » qui en découlent [Leni 1909, pp. 287-295], le philosophe accepte en revanche très bien l'idée que le concept de matière doit être repensé et qu'il ne se limite pas à une conception mécaniste du monde. Constatons aussi que s'il n'en tire pas les mêmes conclusions, Lénine reprend aussi à son compte l'idée de « crise en physique » développée par Henri Poincaré et le philosophe Abel Rey [Poin 1905 ; Rey 1907 ; Leni 1909, pp. 281-287]¹. À ses yeux la discipline est prête pour une essentielle redéfinition du concept de matière, et il attire alors la sympathie de physiciens qui vivent concrètement les changements des révolutions quantique et relativiste.

Pour ces différentes raisons, c'est donc au travers de l'ouvrage de Lénine que nous choisissons de discuter de l'approche matérialiste dialectique des sciences. Comme le souligne Simon Gouz, parce qu'il est en confrontation directe avec, entre autres, Bogdanov qui reprend les idées de Mach et que par conséquent « il est amené [...] à réfuter [...] l'idée qu'aucune connaissance objective n'est possible, Lénine est conduit à développer positivement une théorie de la connaissance » [Gouz 2010, p. 586]². Ainsi, au cœur de la critique de Mach, on peut trouver chez Lénine diverses thèses gnoséologiques que se charge d'isoler Truchon : il s'agit de « la possibilité de la connaissance objective, le caractère cognitif et explicatif de la science, la théorie du reflet, la catégorie philosophique de la matière, le processus de

¹ Voir Vizgin sur la notion de crise en physique chez Lénine et ses influences [Vizg 1981, pp. 236-256].

² Gouz indique que dans *l'Anti-Dühring* [Engel 1877] Engels est lui davantage dans l'optique de développer un système philosophique global, car la critique de Dühring porte sur la prétention à affirmer des vérités absolues. Voir ses développements sur la différence d'approche entre Engels et Lénine [Gouz 2010, pp. 579-588].

connaissance comme asymptote » [Truc 2015, p. 10]. Graham dans ses propos sur l'ouvrage de Lénine est plus concis, et met en avant le fait que « la théorie du reflet » et le « processus de connaissance comme asymptote »¹ sont les deux principes élémentaires sur lesquels s'appuie le bolchévique pour contrer ses opposants de l'époque [Grah 1987, p. 42]. En effet, certains principes gnoséologiques s'entrecoupent, et en vue de nos considérations sur l'impact du matérialisme dialectique sur l'épistémologie de Fock nous pouvons aussi nous concentrer sur ces deux éléments, car en définitive, alors que le premier fait écho à la question du réalisme, le second trouve sa place dans un discours sur le réductionnisme. Cependant pour affiner nos discussions sur le réalisme nous évoquerons aussi brièvement la question du concept philosophique de matière.

La théorie du reflet est un outil sur lequel s'appuie Lénine pour défendre l'objectivité des sciences, dans le sens d'une vérité indépendante de la subjectivité humaine. Le postulat idéaliste de la théorie de la connaissance selon laquelle le sujet est identique à l'objet s'oppose directement à une thèse réaliste, dualiste, défendue par Lénine. Pour obtenir un savoir vrai et objectif il faut réaliser l'adéquation cognitive entre le sujet et l'objet. La connaissance passe par la perception puis la reproduction de l'objet dans notre pensée. Cependant le sujet et l'objet ne doivent pas être considérés comme identiques *a priori*. Dans la théorie du reflet la métaphore optique renvoie donc à la possibilité de représenter le monde extérieur à l'aide de ses capacités cognitives. Sur ce sujet, Lénine s'inspire directement de Feuerbach, Dietzgen et surtout Engels² pour affirmer sa position selon laquelle dans « la théorie matérialiste, la théorie du reflet [...] les choses existent hors de nous. Nos perceptions et nos représentations en sont les images. Le contrôle de ces images, la distinction entre les vraies et les fausses images nous est fournie par la pratique » [Leni 1909, p. 127].

La question du primat ontologique de l'être sur la pensée se pose ici. Et il convient de souligner que Lénine rompt avec Engels et s'appuie sur la théorie du reflet pour conserver l'immanence unique de la matière : « Nos sensations, notre conscience ne sont que l'*image* du monde extérieur, et l'on conçoit que la représentation ne peut exister sans ce qu'elle représente, tandis que la chose représentée peut exister indépendamment de ce qui la représente [Leni 1909, pp. 84-85] ». Il ne faut cependant pas concevoir cette réflexion dans

¹ Ce concept est repris par Graham derrière l'idée que pour Lénine « la nature est infinie ».

² Sur la théorie du reflet et les influences des divers auteurs sur Lénine voir Truchon [Truc 2015, pp. 80-90].

une perspective matérialiste mécaniste, fixiste, car il existe bien en vertu de la dialectique « une structure asymétrique qui exclut l'idée d'une contemplation reflétant passivement le reflété, immédiatement et totalement » [Truc 2015, p. 84]. La dialectique met en avant les processus de transformation des objets, d'évolution et de développement dans la nature, et permet de se détacher d'un pur « réalisme naïf » qui rendrait compte d'un simple reflet sensible.

Dans le cadre de la théorie du reflet, la dialectique joue alors un rôle essentiel pour définir les notions de « vérités relatives et absolues », ainsi que ce que Truchon appelle « la progression asymptotique infinie de la connaissance »¹. Notons tout d'abord qu'ici Lénine s'inspire avant tout de Engels et en particulier de *l'Anti-Dühring* [Enge 1877], où les concepts de vérités absolues et de vérités relatives permettent de décrire le processus historique de connaissance de la réalité objective. Citons directement le philosophe allemand, un passage sur lequel s'appuie Lénine [Leni 1909, pp. 153-154], pour mieux saisir la place accordée par les marxistes à la notion de vérité en science :

La vérité et l'erreur, comme toutes les déterminations de la pensée qui se meuvent dans des oppositions polaires, n'ont précisément de validité absolue que pour un domaine extrêmement limité, comme nous venons de le voir, et comme M. Dühring le saurait lui aussi, s'il connaissait un peu les premiers éléments de la dialectique, qui traitent justement de l'insuffisance de toutes les oppositions polaires. Dès que nous appliquons l'opposition entre vérité et erreur en dehors du domaine étroit que nous avons indiqué plus haut, elle devient relative et impropre à l'expression scientifique exacte ; cependant si nous tentons de l'appliquer comme absolument valable en dehors de ce domaine, nous échouons complètement ; les deux pôles de l'opposition se transforment en leurs contraires, la vérité devient erreur et l'erreur vérité [Enge 1877, p. 119].

Engels appuie ses propos à l'aide de l'exemple de la loi de Boyle-Mariotte qui relie la pression et le volume d'un gaz parfait à pression constante. À haute pression elle n'est plus valable. Cependant cela ne signifie pas pour Engels que la loi doit être considérée comme une erreur,

¹ *Ibid* [pp. 98-122]. La figure de l'asymptote n'est pas employée directement dans les écrits de Lénine, ni d'Engels. Truchon s'inspire toutefois d'une lettre d'Engels à Conrad Schmidt datée du 12 mars 1895 où il mentionne que la représentation conceptuelle d'une chose par la pensée s'approche toujours d'une « manière asymptotique » de la réalité [Truc 2015, note 2, p. 98].

et le physicien doit retenir qu'elle « ne se revèl[e] donc exacte qu'à l'intérieur de limites déterminés » [Enge 1877, p. 120]. Elle devient une vérité relative, pour lequel le scientifique ne peut exclure à l'avenir une limitation plus étroite ou un changement d'énoncé au cours de recherches futures. Dans les mots de Lénine en 1909 :

Ainsi, la pensée humaine est, par nature, capable de nous donner, et nous donne effectivement la vérité absolue qui n'est qu'une somme de vérités relatives. Chaque étape du développement des sciences intègre de nouveaux grains à cette somme de vérité absolue, mais les limites de la vérité de toute proposition scientifique sont relatives, tantôt élargies, tantôt rétrécies, au fur et à mesure que les sciences progressent [Leni 1909, p. 154].

L'intégration du relativisme dans la science ne signifie pas pour autant que cette dernière s'y réduit. Elle n'est en rien une négation de la vérité objective (absolue), mais une forme de « relativité historique des limites de l'approximation de nos connaissances par rapport à cette vérité » [Leni 1909, p. 156]. C'est ici que le processus historique de connaissance de la réalité objective prend la forme d'une approche perpétuelle de la vérité absolue à travers diverses vérités relatives, et que la science poursuit une progression asymptotique au cours de son développement. Pour résumer, dans les mots de Truchon :

En effet, le marxisme ne conteste à aucun moment la relativité de la vérité mais ajoute que cela n'a pas le sens d'une négation de la vérité objective, mais d'une reconnaissance des limites qu'imposent à chaque génération les conditions historiques de notre connaissance dans la progression de celle-ci vers la vérité objective [Truc 2015, p. 100].

Ajoutons de plus que pour Lénine c'est aussi une façon d'affirmer que la science n'est pas un dogme, « au mauvais sens de ce mot, une chose morte, figée, ossifiée » [Leni 1909, p. 156].

Comment ce processus de progression asymptotique de la connaissance est-il pour autant infini ? Une réponse peut-être est donnée à l'appui du rapport d'identité particulier que Lénine semble entretenir dans *Matérialisme et empiriocriticisme* entre le concept philosophique de matière et la réalité du monde extérieur :

Si la réalité objective nous est donnée, il faut lui attribuer un concept philosophique ; or, ce concept est établi depuis longtemps, très longtemps, et ce concept est celui de la *matière*. La matière est une catégorie philosophique servant à désigner la réalité objective donnée à l'homme dans ses sensations qui la copient, la photographient, la reflètent, et qui existe indépendamment des sensations [Leni 1909, p. 148]

Comme souligné par Truchon, pour Lénine, « dans son sens philosophique la catégorie de matière est seulement la condition méthodologique pour une connaissance objective » [p. 91]. Ce concept philosophique ne concerne pas la question de l'ontologie de la matière et le matérialisme de Lénine s'accompagne donc d'un postulat épistémologique : une attitude réaliste s'exprime au travers du principe gnoséologique qu'est la catégorie philosophique de matière. Nous rejoignons ici nos considérations sur le contexte scientifique de l'époque, que Lénine met bien en avant dans le chapitre cinq de son ouvrage : « La révolution moderne dans les sciences de la nature et l'idéalisme philosophique » [Leni 1909, pp. 279-344]. Car si le philosophe a bien compris que la catégorie philosophique de matière doit être repensée et qu'elle est susceptible de perfectionnement en fonction des avancées de la science, il y voit aussi une justification de la dialectique qui s'oppose à toute approche fixiste. La découverte de nouvelles propriétés et états de la matière est nécessairement possible, et il est indispensable d'élargir l'exploration de cette dernière. C'est ici que s'affirme le caractère infini du processus de progression de la connaissance, car la matière est considérée comme un concept infiniment complexe. On se situe alors à l'opposé de l'idéalisme, qui en concevant la transcendance comme une forme ultime d'expression, oblige l'homme à se limiter à la conscience et accepter son incapacité à décrire les choses pour elles-mêmes.

1.4. Conclusion intermédiaire

Afin de conclure brièvement nos considérations – développées afin de préparer la discussion de la position philosophique tenue par Fock – sur le matérialisme dialectique en tant que philosophie naturelle, nous souhaitons ici simplement reprendre la liste de ses principaux principes telle qu'élaborée par Graham dans *Science, Philosophy, and Human Behavior in the Soviet Union* :

- The world is material, and is made up of what current science would describe as matter-energy.
- The material world forms an interconnected whole.
- Man's knowledge is derived from objectively existing matter.
- The world is constantly changing, and indeed, there are no truly static entities in the world.
- The changes in matter occur in accordance with certain over-all regularities or laws.
- The laws of the development of matter exist on different levels corresponding to the different subject matters of the sciences, and therefore one should not expect in every

case to be able to explain such complex entities as biological organisms in terms of the most elementary physiochemical laws.

- Matter is infinite in its properties, and therefore man's knowledge will never be complete.
- The motion present in the world is explained by internal factors, and therefore no external mover is needed.
- Man's knowledge grows with time, as is illustrated by his increasing success in applying it to practice, but this growth occurs through the accumulation of relative – not absolute – truths [Grah 1987, pp. 62-63].

2. Le matérialisme dialectique dans la vie scientifique de Fock

Fock rend clair à plusieurs reprises au cours de sa carrière son adhésion au matérialisme dialectique. L'exemple le plus connu en est le suivant, en introduction de sa monographie sur la théorie de la relativité :

The philosophical side of our views on the theory of space, time and gravitation was formed under the influence of the philosophy of dialectical materialism, in particular under the influence of Lenin's "Materialism and Empiriocriticism", The teachings of dialectical materialism helped us to approach critically Einstein's point of view concerning the theory created by him and to think it anew. It helped us also to understand correctly, and to interpret, the new results we ourselves obtained. We wish to state this here, although this book does not explicitly touch philosophical questions [Fock 1955a', p. 8].

Sur cette base, aucun doute n'est possible : le matérialisme dialectique est une philosophie qui possède une véritable influence sur la pensée scientifique de Fock. Ce dernier le revendique clairement, elle joue un rôle pour ce qui est de l'interprétation de la relativité. Et compte-tenu de la cohérence épistémologique dans l'approche des théories de la relativité générale et de la mécanique quantique que nous avons mise en avant au chapitre précédent, il ne fait aucun doute que le paragraphe suscité pourrait aussi bien s'appliquer à cette seconde théorie. Il devient alors nécessaire de clarifier la nature de la relation entre la pensée épistémologique de Fock et le matérialisme dialectique. Une relation que le lecteur attentif aura par ailleurs probablement déjà esquissée suite à nos développements sur la philosophie marxiste. Mais en l'explicitant, nous ambitionnons aussi de contextualiser l'adhésion de Fock au matérialisme dialectique, et de mieux saisir les différents mécanismes alors en jeu. En effet,

comme cela sera discuté par la suite (V.3), la question de la philosophie marxiste en URSS possède une indéniable dimension dogmatique au sujet de laquelle en conclusion de ce chapitre nous nous devons de positionner Fock.

2.1. Fock et la lecture des auteurs marxistes

En 1949, lors d'une réunion où sont discutés divers travaux qui ont vocation à être présentés lors d'une conférence, Fock prend la parole et déclare avec une certaine désinvolture : « Nous avons tous lu Lénine, nous savons tous qu'une théorie physique est le reflet de la réalité, qu'elle est le reflet de ces lois qui existent dans la nature »¹. Cette citation nous indique on ne peut plus clairement que Fock a lu Lénine, ce qui concorde avec le témoignage de A. D. Aleksandrov pour qui il a pris connaissance de *Matérialisme et empiriocriticisme* [Leni 1909] en 1932². Aleksandrov estime même que Fock y a trouvé quelque chose d'intéressant et d'important pour lui, sans pour autant être explicite à ce sujet. De toute évidence néanmoins, on peut déjà noter que la théorie du reflet est un élément qui n'a pas échappé à Fock lors de sa lecture de Lénine.

Mise à part la certitude ici avancée que Fock a consulté *Matérialisme et empiriocriticisme* en 1932, nous ne savons que très peu de choses sur son rapport aux autres classiques du marxisme. Il n'existe dans les archives qu'une prise de notes datée des années 1940 sur l'*Antidürhing* de Engels [Enge 1877]³. Sur un simple cahier d'écolier, les annotations sont assez linéaires, très peu critiques, reproduisant simplement les idées principales de Engels, mais uniquement pour la partie de l'ouvrage qui concerne la « philosophie » et développe largement les questions scientifiques⁴. On peut ajouter que cette prise de notes semble se faire en amont d'un article – ou exposé – esquissé dans les pages suivantes du cahier sous le titre « Osnovnyye idei sovremennoy teoreticheskoy fiziki v svete dialekticheskogo materializma » (Idées fondamentales de la physique théorique moderne à la lumière du

¹ Stenogrammy zasedaniy Orgkomiteta Vsesoyuznogo soveshchaniya fizikov. 17, 18, 19 i 20 yanvarya 1949 (Transcriptions des réunions du Comité d'organisation d'URSS de la rencontre des physiciens. 17, 18, 19 et 20 janvier 1949) – GARF, 9396-1-247.

² Voir Gorelik qui a notamment interviewé Aleksandrov en 1989 [Gore 1993, pp. 311-312].

³ Konspekt knigi Engel'sa « Anti-Dyuring » (Notes sur le livre de Engels « Anti-Dühring ») – ARAN SPb, 1034-2-42.

⁴ L'ouvrage de Engels est découpé en trois parties, la première concernant la « philosophie », la seconde l'« économie politique », et la dernière le « socialisme ».

matérialisme dialectique) ¹. Cette démarche témoigne d'une approche relativement méthodique de la philosophie marxiste par le physicien soviétique.

Impossible cependant de savoir si celle-ci est systématique, ce sont ici les uniques traces de la lecture par Fock des classiques marxistes. Notons malgré tout, même si nous reviendrons plus précisément sur le contexte dans la partie suivante (V.3), que les scientifiques soviétiques sont encouragés dans les années 1930 à participer à des groupes d'études sur la pensée marxiste. Au-delà de la lecture des ouvrages susmentionnés, il est fort probable que Fock ait aussi été guidé dans son assimilation du matérialisme dialectique par ce type d'activités propres à son environnement. Toutefois, comme nous ne possédons pas de traces écrites, il est difficile d'en évaluer le véritable impact. On peut simplement souligner que pour ce qui est des lectures de Fock dont nous avons fait le constat concret, il est question des deux ouvrages de référence en ce qui concerne une approche des sciences naturelles dans un cadre matérialiste dialectique – l'*Antidühring* est, rappelons-le, une véritable source pour Lénine et son *Matérialisme et empiriocriticisme*. De plus, le fait que nous ne trouvions nulle part chez Fock la manifestation d'un intérêt pour les questions économiques ou de société nous laisse légitimement penser que l'ouvrage de Lénine, qui est consacré à la physique, soit pour lui une référence de choix lorsqu'il est question de discuter de philosophie marxiste. C'est pourquoi il apparaît d'autant plus sensé de centrer notre étude sur les liens entre la pensée de Fock et cette œuvre en particulier.

2.2. Apport du point de vue épistémologique : la dialectique

Quel est donc ce que Fock a trouvé, selon Aleksandrov, d'intéressant et d'important² pour lui dans la lecture de Lénine ? Donner une réponse à cette question n'est pas chose aisée car jamais Fock ne s'exprime explicitement sur le sujet. De ses écrits on semble être contraints de considérer que le matérialisme dialectique est une position philosophique générale, connue de tous, et dont la compréhension des sciences découle naturellement. En vue d'une

¹ Il est probable que ce projet soit le même que celui que nous discutons en première partie du chapitre 7 et qui est intitulé « Tri osnovnyye zakona sovremennoy fiziki » (Trois lois fondamentales de la physique moderne).

² Voir Gorelik [Gore 1993, pp. 311-312].

éventuelle clarification, rappelons ici les mots de Fock en introduction de *La théorie de l'espace, du temps et de la gravitation* :

The philosophical side of our views on the theory of space, time and gravitation was formed under the influence of the philosophy of dialectical materialism, in particular under the influence of Lenin's "Materialism and Empiriocriticism", The teachings of dialectical materialism helped us to approach critically Einstein's point of view concerning the theory created by him and to think it anew. It helped us also to understand correctly, and to interpret, the new results we ourselves obtained. We wish to state this here, although this book does not explicitly touch philosophical questions [Fock 1955a', p. 8].

Mis à part cette note au lecteur, jamais Fock dans cette monographie ne fait de nouvelle référence au matérialisme dialectique pour expliciter sa position et en quoi cette dernière influence son travail. On y dénote alors un intérêt avant tout épistémologique, le matérialisme étant considéré comme un outil concret à appliquer non seulement à la critique scientifique, mais aussi à l'analyse des résultats de sa propre démarche.

Pour aller plus loin que ce maigre constat, Fock ne nous donne que peu de matière à exploiter. En réalité, l'une des rares sources¹ où il discute de façon ouverte la question du matérialisme dialectique en tant qu'objet indépendant est un commentaire publié en septembre 1966 dans *Slavic Review* d'un article de Loren Graham, intitulé « Quantum Mechanics and Dialectical Materialism » [Fock 1966b ; Grah 1966a]². Fock reçoit de façon plutôt positive l'article de Graham qui traite des débats philosophiques en Union soviétique en se concentrant en particulier sur les trois acteurs que sont le philosophe Omel'yanovskiy, le physicien Blokhintsev et Fock en personne. Ce dernier souhaite néanmoins clarifier un point concernant le rôle joué par le matérialisme dialectique auprès des scientifiques. En effet, dans les mots de Graham, les scientifiques qui acceptent le matérialisme dialectique le font avant tout car ils sont des « réalistes cognitifs, des savants qui acceptent l'objectivité du monde extérieur » [Grah 1966a, p. 409], et ce point, que nous avons discuté au travers de la question

¹ Certaines de ces idées, en particulier sur la dialectique, sont aussi résumées dans la conclusion d'un article de 1957 sur l'interprétation de la mécanique quantique [Fock 1957a].

² Le commentaire de Fock et l'article de Graham sont publiés dans le même numéro de *Slavic Review*. En effet, la contribution de Fock n'est pas spontanée. C'est la revue qui lui demande avant publication s'il peut commenter l'article de Graham, ce dernier ayant auparavant suggéré qu'il serait l'intervenant le plus approprié. Lettre de la rédaction de *Slavic Review* à Vladimir Fock datée du 3 mai 1966 - ARAN SPb 1034-2-217.

du réalisme scientifique, ne fait aucun doute lorsqu'il s'agit de Fock. Mais ce dernier rejette l'idée avancée par l'historien américain selon laquelle « the laws of dialectic play no role in the minds of Soviet physicists » [p. 409-410]. Fock est explicite, pour lui : « The essence of dialectical materialism is just the *combination of the dialectical approach with the acceptance of the objectivity of the external world* ». Mais surtout, les deux composantes sont nécessaires à l'approche scientifique : « [w]ithout a dialectical approach materialism would reduce to mechanical materialism, which was obsolete even at the beginning of the twentieth century and is still more obsolete now » [Fock 1966b, p. 412]¹.

Nous sommes ici dans un discours très proche de celui des fondateurs du matérialisme dialectique qui comme nous l'avons vu (V.1.2) combattent fermement le matérialisme mécaniste. Malgré tout, l'affirmation franche selon laquelle la dialectique joue un rôle essentiel pour Fock est ici particulièrement intéressante. Voici ce qu'il nous dit plus précisément sur son apport :

Dialectics plays an essential role in obtaining new outlooks on the external world and the appropriate ways of its description. To solve the contradictions between classical and quantum

¹ Quelques pages plus loin, toujours dans le même numéro de *Slavic Review*, Graham apporte une réponse à Fock éclairante sur l'objet de la discorde : « Professor Fock disagreed with my observation that in the thinking of Soviet scientists “the laws of dialectic play no role.” I would like to point out, first of all, that he has quoted only a part of my sentence; the entire sentence was “The laws of dialectic play no role in the minds of Soviet physicists except very rarely, perhaps, as a reminder that matter and its laws are more complicated than a simple materialist might think.” Then end of the sentence is not inconsequential since it shows that Professor Fock’s further belief that I therefore equate Soviet physicists with “mechanical materialists” is not altogether correct. I would include him among those physicists that believe that dialectics throws in a clash of complexity saving them from simple, or vulgar, materialism. But I would reaffirm my opinion that the individual laws of dialectic are useless as guides at specific moments of research in reaching specific conclusions. At the most, the laws of dialectic provide a useful general *point d’appui* for the scientist in reminding him how contradictory and difficult the explication of nature may be and how dangerous it is to reduce the complex phenomena on one level to combinations of simple mechanisms on a lower level. But despite this helpful advice the dialectic has no predictive value » [Grah 1966b, p. 420]. Cette réponse et la réaction de Fock nous laissent penser que le désaccord initial provient aussi d'une incompréhension sur la signification de « lois de la dialectique ». Graham semble employer cette formule dans un sens restreint, faisant strictement référence aux trois lois de la dialectique, alors que Fock semble la concevoir dans son sens large, à savoir l'ensemble du rôle joué par la dialectique dans la philosophie marxiste.

mechanical description, between causal and probabilistic laws, between wave properties and corpuscular properties of matter, between elementarity and mutual transformability of particles, between the objectivity of micro-objects and the necessity of introducing measuring instruments to describe their properties, etc., etc. – to solve any of these problems a dialectical approach is quite indispensable. Before proceeding to the solution one must first of all realize that the contradictions are of dialectical nature, so that they must vanish if a more general and a more appropriate formulation of laws of nature is found. (In the early history of quantum mechanics an instance of that proceeding is given by the conscious application of dialectics by Bohr, who formulated the “semi-classical” quantum mechanical laws in spite of the apparent contradictions, later solved by the [wave] quantum mechanics.) [p. 412]

Il apparaît ici évident, dans le cas de la théorie quantique, que les résultats obtenus par Fock à l’appui de la dialectique se situent au niveau des problèmes posés par la théorie à l’interface mécanique classique / mécanique quantique.

Il est aussi intéressant de noter que Fock donne à la dialectique un rôle dans la perspective d’une analyse des développements scientifiques au cours de l’histoire :

On the contrary, application of the laws of dialectics permits materialistic philosophy to develop with the development of science. Even such statements of classical materialism as complete independence of existence from the possibility of perception can be reconsidered and, if necessary, revised without altering the essence of dialectical materialism. The ability of this form of philosophy to keep pace with science is one of its characteristic features. Dialectical materialism is a living and not a dogmatic philosophy [p. 412].

Cette idée d’une compatibilité de la dialectique avec une approche historique de la connaissance n’est pas sans faire écho à l’article de 1936 sur le rôle des approximations en physique [Fock 1936d] que nous avons déjà largement discuté au chapitre deux (II.3.1). En effet, lorsque Fock y procède à une simplification séquentielle des théories il fait écho au processus historique de leur développement : « the course of the historical development of mechanics and physics is inverted to some extent »¹.

De plus, rappelons que ce dernier article questionne les relations interthéoriques, comme celles entre mécanique classique et quantique, et qu’il est notre premier support dans nos développements sur l’antiréductionnisme de Fock. Le lecteur attentif aura déjà remarqué la

¹ Traduit du russe par V. V. Fock [Fock 2004, p. 402].

multitude de similarités entre l'attitude antiréductionniste de Fock et l'importance de la dialectique dans l'approche des sciences au prisme du matérialisme dialectique, que ce soit chez Lénine ou Engels. De toute évidence, à ce niveau précis du développement de la pensée épistémologique du physicien russe, la philosophie marxiste semble intervenir concrètement. Nous allons revenir sur ce point dans un instant après avoir étayé l'idée que Fock a bien entendu le message véhiculé par les penseurs marxistes.

En 1987, Graham, dans son ouvrage *Science, Philosophy and Human Behavior in the Soviet Union*, fait référence à la réponse de Fock à son article de 1966¹. Mais en dépit de l'importance que Fock accorde à la dialectique dans sa pensée, l'historien ne semble pas en avoir mesuré les véritables implications². En effet, lorsque Graham discute du caractère non orthodoxe de l'interprétation de la relativité générale par Fock, c'est sur le matérialisme qu'il appuie :

But he discussed and defended relativity within the framework of dialectical materialism; there is considerable evidence that in the process he became sincerely interested in philosophical problems of the sciences. His emphasis on the necessity for physical content in scientific explanations – and not just mathematical forms – is clear in many of his writings. This emphasis may well have been linked to his materialism [Grah 1987, pp. 368-369].

Ni ici, ni pour la mécanique quantique³ il n'est question de la dialectique. Pour comprendre ce qui a échappé à Graham, il faut souligner à nouveau que Fock n'emploie qu'à de très rares occasions une formulation explicite des concepts philosophiques des classiques du marxisme en lien avec la dialectique, et son discours sur le sujet est particulièrement opaque. Et pour en

¹ Voir la note la note 97 de la page 355 de l'ouvrage de Graham [Grah 1987, p. 493]. L'article de 1966 n'est autre qu'une version préliminaire du chapitre dédié à la mécanique quantique du livre de l'historien.

² Voir la note 1 p. 271. Graham s'arrête à une description générale de la dialectique, et potentiellement valable chez Fock, qui dit : « the laws of dialectic provide a useful general *point d'appui* for the scientist in reminding him how contradictory and difficult the explication of nature may be and how dangerous it is to reduce the complex phenomena on one level to combinations of simple mechanisms on a lower level » [Grah 1966b, p. 420]. Mais alors que l'historien effleure ici la question du réductionnisme, jamais il ne la met en application dans ses considérations sur les interprétations par Fock des théories modernes de la physique.

³ L'emphase est mise chez Graham sur la défense du réalisme : « Fock completed his interpretation of quantum mechanics with an affirmation of a realist (he would say dialectical materialist) position on the philosophy of science » [Grah 1987, p. 343].

revenir à nos considérations sur la philosophie marxiste, nous pensons à la façon dont les questions sur le réalisme sont façonnées par la dialectique, en particulier au travers de la « théorie du reflet » et surtout des notions de « vérités absolues et relatives ».

L'un des rares exemples où Fock mentionne explicitement la théorie du reflet en tant que telle nous est donné par le compte-rendu de la réunion de préparation d'une conférence que nous avons citée dans la sous-partie précédente. Pour ce qui est de la question des vérités absolues et relatives, on ne trouve que quelques de rares mentions des théories physiques comme des vérités relatives. C'est le cas en 1957 dans « Ob interpretatsii kvantovoy mekhaniki » (Sur l'interprétation de la mécanique quantique) publié dans *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Fock 1957a] où Fock déclare : « Each theory, including quantum mechanics, is only a relative truth, but this does not justify the non-acceptance of new ideas and concepts introduced by it. Physical concepts will certainly develop, but it is already clear today that this development will further depart from classical conceptions and in no case return to them »¹. Notons alors qu'en plus de la notion de vérité relative Fock introduit ici l'idée d'une progression asymptotique de la connaissance scientifique.

Par conséquent, bien que peu présents de façon explicite dans les écrits scientifiques de Fock, il nous apparaît tout de même que le physicien soviétique connaît parfaitement les principes gnoséologiques avancés par Lénine dans *Matérialisme et empiriocriticisme* [Leni 1909]. En revenant alors sur l'article de 1936 sur les approximations [Fock 1936d], nous souhaitons lever le filtre que Fock nous impose à propos de ses liens avec le matérialisme dialectique en mettant en évidence la correspondance entre l'épistémologie alors avancée – celle qui fait l'objet de nos développements au cours du chapitre second (II.3.1) – et la philosophie marxiste au travers des principes gnoséologiques qui structurent la pensée de Lénine. Tout d'abord, il apparaît évident qu'en prenant pour postulats de départ dans son raisonnement de 1936 que « le but de la physique théorique est la formulation mathématique des lois de la nature » et que les « équations de la physique théorique ne peuvent jamais être absolument précises » [p. 1070], que toute théorie est une approximation, que Fock donne corps aux concepts philosophiques de théorie du reflet et de vérité relative. De plus, en acceptant dans cet article la possibilité de concepts émergents entre différentes théories, il

¹ La traduction anglaise est tirée de la publication de l'article dans le numéro 7 de l'année 1957 du *Czechoslovakian Journal of Physics* [Fock 1957a'].

reprend aussi Lénine qui « contre le matérialisme mécaniste et le réductionnisme physiologiste, [...] souligne que la matière contient des propriétés émergentes, sans que cela implique de rompre la nécessaire continuité de la matière » [Truc 2015, p. 121]. Si ces concepts émergents sont compris comme des éléments complémentaires en vue d'une accumulation de connaissances vers une vérité absolue, alors cette idée fait bien évidemment écho à l'un des passages clés de Lénine que nous avons déjà cité :

Chaque étape du développement des sciences intègre de nouveaux grains à cette somme de vérité absolue, mais les limites de la vérité de toute proposition scientifique sont relatives, tantôt élargies, tantôt rétrécies, au fur et à mesure que les sciences progressent [Leni 1909, p. 154].

On peut alors sur cette base tirer trois conclusions majeures. Tout d'abord, le marxisme ne prétend pas qu'il soit possible d'atteindre la vérité absolue, ce que Fock valide en 1936 en affirmant que *toute* théorie est une approximation. Ensuite, mentionnons que Lénine, en insistant sur le caractère pourrait-on dire « flexible » de la connaissance, en évoquant tout aussi bien des vérités relatives « tantôt élargies » que « tantôt rétrécies », favorise dans l'approche de Fock l'idée que nous assistions tantôt à la formation, et tantôt à la disparition de notions physiques au cours du passage d'une théorie à une autre. Enfin, il apparaît que le physicien, sans jamais mentionner Lénine en 1936 ou l'un des concepts de la philosophie marxiste de façon explicite, semble prendre au pied de la lettre les mots du philosophe pour les transposer à la pratique quotidienne de sa discipline. En effet, « les limites de la vérité de toute proposition scientifique » deviennent un objet potentiel d'investigation scientifique au travers de son intérêt manifeste pour la recherche des limites d'applicabilité d'une notion scientifique ou de la théorie qui lui correspond.

En somme, au cœur du matérialisme dialectique nous retrouvons l'ensemble des composantes du cheminement intellectuel qui est celui de Fock en 1936 et que nous avons mis à l'honneur dans nos investigations sur son antiréductionnisme. Ainsi, en ayant connaissance de la lecture de Lénine par Fock au début des années 1930, mais aussi du fait que celui-ci revendique en avoir été inspiré, nous pouvons affirmer que la philosophie marxiste, et en particulier son penchant dialectique, s'instille dans la pensée épistémologique de Fock, fonde les postulats de base à son approche antiréductionniste de la physique, telle que nous l'avons décrite au second chapitre (II.3). Car de façon plus généralisée, le

matérialisme dialectique est par essence antiréductionniste, et Engels, en vertu de la relation hégélienne entre la quantité et la qualité, défend notamment cette position dans la *Dialectique de la nature* [Enge 1925]¹. Il considère simplement que chaque niveau de l'être possède ses propres caractéristiques qualitatives. On peut alors constater que là où le débat qui s'en suit se situe généralement dans une perspective synchronique – sur les relations de réduction entre différents niveaux de complexification de la nature, entre différentes disciplines – Fock, en lisant attentivement Lénine, voit aussi la possibilité de transposer cet antiréductionnisme philosophique général dans une perspective diachronique, au sein même de la physique, pour distinguer différents niveaux parmi les théories qui la composent.

2.3. Prédispositions de Fock à l'acceptation du matérialisme dialectique : réalisme

Tout un chacun aura probablement déjà opéré le rapprochement entre réalisme scientifique et matérialisme dans la pensée de Fock. Malgré tout, nous estimons ici, pour des raisons que nous allons maintenant clarifier, que la relation entre les deux n'est plus de l'ordre de l'influence, mais de la prédisposition à accepter une posture philosophique. Dans nos développements du chapitre trois sur le réalisme scientifique (III.3) nous avons omis de mentionner une subtile distinction entre les deux courants du réalisme que sont le matérialisme et le platonisme, parfois appelé idéalisme objectif. En effet, si le matérialisme insiste sur la matérialité de la réalité du monde extérieur, il aussi est possible de concevoir la « réification » de choses immatérielles, comme le fait Platon avec son monde des Idées². En 1993, Gorelik semble associer Fock à cette dernière tendance : « Behind Fock's *Diamat* [dialectical materialism], however, one could, with some imagination, recognize something close to Platonic (true mathematical) idealism » [Gore 1993, p. 325]. Il est alors vraisemblablement guidé dans cette direction par l'importance des mathématiques dans la pensée de Fock. En effet, la philosophie platonicienne accorde elle aussi dans ses développements un rôle central aux entités mathématiques. Cependant, en soulignant de notre côté que le caractère platonicien de la pensée de Fock concerne les mathématiques *appliquées*, nous avons introduit une nuance importante. Car le réalisme accordé par Fock aux entités mathématiques est pour sa part indissociable de leur signification physique, et en cela il bascule vers le matérialisme, bien que celui-ci ne soit pas affirmé dans les articles que nous

¹ Sur ce point voir les commentaires de Graham [Grah 1987, pp. 35-36].

² Sur le platonisme voir Piettre [Piet 2006] et Balaguer [Bala 2016].

avons étudiés. Pour clarifier ce propos, l'appuyer, mais aussi saisir ce qui dans le discours de Lénine a pu séduire Fock, certains commentaires complémentaires sur le matérialisme dialectique sont nécessaires.

Au cours de sa critique des empiriocriticistes dans *Matérialisme et empiriocriticisme* Lénine propose de larges développements sur la question de la représentation du monde extérieur¹. Il attaque notamment la théorie des hiéroglyphes de Plekhanov qui s'inspire de la théorie du symbolisme du physicien allemand H. von Helmholtz, similaire avant lui à celle de Kant². Ces penseurs avancent l'idée que les représentations humaines ne sont que des signes conventionnels et non pas une copie des choses réelles et des processus naturels. Ils tracent ainsi une démarcation entre l'objet en soi et l'objet dans la représentation du sujet. Des scientifiques comme Mach, Hertz ou encore Poincaré s'inscrivent aussi dans cette dynamique, qui dans la lignée de *La science et l'hypothèse* du dernier nommé, publié en 1902 [Poin 1902], prend la forme d'une doctrine appelée conventionnalisme³.

Lénine critique directement Plekhanov chez qui, *a contrario* du matérialisme dialectique, les sensations provoquées par l'action des diverses formes de la matière en mouvement ne sont qu'une expression conventionnelle de cette dernière ; elles ne sont pas des images du monde extérieur – comme dans la théorie du reflet. Ainsi les représentations, qu'il s'agisse de sensations ou de concepts scientifiques, n'ont qu'une valeur pratique, et à l'inverse de la théorie du reflet aucune ressemblance entre le signe conventionnel et l'objet décrit n'est exigée. En revanche, comme le souligne Truchon : « Par contre, pour les matérialistes conséquents, les termes de “reflet”, “image”, “copie”, auxquels on veut leur substituer ceux de “signe”, “symbole” ou “hiéroglyphe”, supposent nécessairement et inévitablement la réalité objective qu'elle reflète » [Truc 2015, p. 115]. C'est cette position que défend Lénine

¹ Sur ce point voir Truchon [Truc 2015, pp. 114-117], Graham [Grah 1987, pp. 38-41] mais aussi Charbonnat [Char 2013, p. 603].

² Pour Helmholtz voir son *Optique physiologique* [Helm 1867]. Voir aussi les développements de Kant sur la dialectique transcendantale dans la *Critique de la raison pure* [Kant 1781, pp. 329-357]. Notons que des personnages comme Mach, Hertz ou encore Poincaré s'inscrivent aussi dans ce courant. Pour ce dernier c'est notamment le cas au travers du courant « conventionnaliste » dans lequel il s'inscrit. Voir *La science et l'hypothèse* publié en 1902 [Poin 1902].

³ Sur le conventionnalisme voir l'entrée du *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences* par Schmid [Schm 1906].

en 1909 car il voit dans cette théorie du symbolisme une négation de l'objectivité. Pour lui, le reflet fidèle de ce qu'est un objet en soi passe par une perception de ses propriétés indépendante de la conscience, ce que la théorie des hiéroglyphes ne peut malheureusement pas exclure. Et c'est cette condition essentielle qui permet de ne pas tomber dans l'idéalisme :

Si les sciences de la nature nous donnent, dans leurs théories, *uniquement* des métaphores, des symboles, des formes de l'expérience humaine, etc., et non une image de la réalité objective, il est absolument indiscutable que l'humanité est en droit de se créer, dans un autre domaine, des « concepts » *non moins* « réels » : Dieu, etc. [Leni 1909, p. 380].

Ainsi, pour Lénine, bien que Plekhanov se revendique matérialiste sa position est fragilisée par le symbolisme qu'il accorde aux représentations. Il ouvre en effet la porte à l'acceptation de concepts immatériels, à des constructions de la pensée. Plus largement, l'idéalisme objectif, en traitant d'entités abstraites, tombe sous le coup de la même critique.

Pour en revenir plus spécifiquement à Fock, il est évident que la question du formalisme mathématique d'une théorie physique est centrale lorsqu'il s'agit d'évoquer les représentations du monde extérieur. Et ici, nos développements sur le physicien dans le chapitre trois (III.3), à savoir l'idée qu'il considère que les mathématiques reflètent la réalité du monde extérieur, mais aussi sa critique des conceptions de Bohr sur le caractère symbolique du formalisme de la mécanique quantique, sont en totale adéquation avec les idées de Lénine que nous venons de discuter. Comme mentionné auparavant, dans les textes sur lesquels nous nous sommes appuyés pour faire le constat de son réalisme scientifique, Fock ne se présente pas comme un matérialiste. Malgré tout, il nous semble d'une part que c'est l'emphase mise sur la signification physique du formalisme mathématique qui l'empêche de donner sens à des objets dont la réalité puisse être contestée. D'autre part, Fock est un physicien, son travail consiste concrètement en l'étude de la matière, et les implications plus larges du débat entre la philosophie matérialiste et idéaliste ne semblent pas l'intéresser. Par conséquent, il nous semble qu'en vue de l'affirmation claire d'une position matérialiste, il n'y a qu'un pas qu'il va bientôt franchir.

Car comme nous l'avons discuté précédemment (III.3.4), il faut tout d'abord rappeler que cette attitude de Fock vis-à-vis du formalisme mathématique est antérieure à sa lecture de Lénine en 1932. L'ensemble de sa carrière en mécanique quantique est la combinaison d'une véritable maîtrise mathématique avec une grande intuition physique, et c'est très tôt qu'il

affirme la nécessité de se pencher sur la signification physique du formalisme employé¹. C'est pourquoi nous estimons qu'il y a ici entre Fock et le matérialisme dialectique un point d'accroche assez naturel, qui a favorisé la pleine acceptation de cette philosophie par le physicien soviétique. Lénine est venu conforter sa position réaliste et l'intérêt de son approche scientifique. Ainsi, il est vrai qu'influencé par ses lectures philosophiques – et possédant une véritable prédisposition en ce sens –, le physicien russe va finir par affirmer explicitement le caractère matériel du monde extérieur. C'est notamment le cas lorsqu'en 1965 il dresse un constat général sur la nature des champs électromagnétiques :

Les progrès de l'électrodynamique à la fin du XIX^e siècle n'ont fait que consolider le point de vue du déterminisme absolu admis en physique. Comme résultat important de ces progrès, on peut signaler la reconnaissance de la nature matérielle du champ électromagnétique : on a reconnu que ce champ est non pas une notion auxiliaire introduite pour exprimer l'interaction entre corps matériels, mais une réalité physique en soi, comme les corps matériels eux-mêmes [Fock 1965c, p. 228].

De façon plus explicite encore, il affirme dans ses développements sur la mécanique quantique que « l'acte de la connaissance n'est jamais purement spéculatif, mais repose sur des observations qui ont nécessairement un caractère matériel » [p. 233].

Le penchant matérialiste de Fock est aussi évident dans la théorie de la relativité. Celui-ci se manifeste dès 1939 au travers de son approche générale de la théorie, de son désir de « fai[re] ressortir les idées physiques de l'appareil mathématique » [Fock 1939c', p. 83]. Souvenons-nous par exemple son emploi de la dénomination de tenseur « matériel » pour désigner le tenseur métrique, ou encore son souci d'une description la plus réaliste possible de la répartition des masses dans l'univers. Plus concrètement encore, en 1953 il déclare que la relativité générale « est une brillante confirmation du matérialisme dialectique, en particulier son principe qui dit que la matière, le mouvement et l'espace sont organiquement connectés » [Fock 1953a, p. 171]. Alors, « la recherche de ce qui est réellement existant dans

¹ Rappelons l'exposé de 1930 intitulé « Predel'nyye zadachi teorii kvantov » (Problèmes extrêmes de la mécanique quantique), publié en 1935 dans *Uspekhi fizicheskikh nauk*, qui donne un « lexique » qui permet la traduction des notions du langage mathématique vers le langage physique [Fock 1935d].

la nature »¹, qui motivait déjà Fock en 1922, trouve simplement dans le discours du physicien une expression plus formelle.

2.4. Conclusion intermédiaire

En amont de la conclusion générale de ce chapitre, qui détaillera les véritables enseignements à tirer de l'impact de la philosophie marxiste sur la carrière de Fock, résumons simplement ici les deux points principaux de nos développements. Tout d'abord, notons que dans le cas du physicien russe Graham a raison de penser qu'il accepte le matérialisme dialectique car il fait partie d'une catégorie de scientifiques qui sont des « réalistes cognitifs, des savants qui acceptent l'objectivité du monde extérieur » [Grah 1966a, p. 409]. Dans sa lecture de *Matérialisme et empiriocriticisme*, on peut effectivement penser que Fock en 1932 est séduit par la défense du réalisme par Lénine et en particulier par celle de l'objectivité des modes de représentation de la nature, du formalisme mathématique. Nous l'avons vu, Fock est naturellement enclin à accepter une vision matérialiste du monde, et celle-ci s'exprime clairement dans sa pratique scientifique et son souci constant de donner aux entités mathématiques une claire signification physique. D'autres part, soulignons que Fock n'est pas un simple matérialiste, et que l'aspect dialectique de la philosophie marxiste a pour lui un véritable intérêt. De sa lecture de Lénine il a compris les enseignements de la théorie du reflet, de la notion de vérité relative face aux vérités absolues mais aussi de progression asymptotique de la connaissance. En découle alors une position épistémologique antiréductionniste qui contribue à formater l'exigence de rigueur physique qui guide Fock dans son travail, mais aussi sur la voie de ses interprétations non-orthodoxes des théories modernes de la physique. Par conséquent lorsque le physicien se revendique du matérialisme dialectique, sa démarche est sincère et invite le lecteur à se pencher sur une philosophie qui pour lui apporte un véritable éclairage sur les sciences.

¹ « O fizicheskikh osnovakh teorii otnositel'nosti i nekotorykh tochках soprikosnoveniya s filosofskimi voprosam. Doklad v filosofskom kruzhke » [Sur les bases théoriques de la théorie de la gravitation et de certains points de contacts avec les questions philosophiques. Exposé au *kruzhok* philosophique], 6 septembre 1922 – ARAN SPb, 1034-1-191.

3. La rupture du stalinisme

Après avoir reconstitué les caractéristiques de l'adhésion de Fock au matérialisme dialectique d'un point de vue purement philosophique, il nous apparaît nécessaire d'apporter quelques précisions sur la place de la pensée marxiste dans le contexte soviétique. En effet, la Révolution russe d'Octobre 1917, conduite par Lénine, est un moment décisif pour la philosophie matérialiste dialectique, car elle ouvre la voie à sa large diffusion mais aussi son application concrète sous forme d'idéologie d'État¹. Sur ce processus nous souhaitons tout particulièrement nous pencher sur l'arrivée au pouvoir de Staline à la fin des années 1920 qui fait du matérialisme dialectique un véritable dogme mais qui s'accompagne aussi d'un important dévoiement de l'essence même des idées de Marx et Engels. Soulignons que c'est dans ce contexte que Fock découvre puis applique la philosophie marxiste. Nous pourrions ainsi mettre en évidence le fait que la lecture de textes marxistes par le physicien n'a rien d'un événement fortuit mais aussi préparer nos développements à venir dans les chapitres suivants, qui sont pour leur part relatifs au contexte politique et à la diffusion de ses idées. Ainsi, dans un premier temps nous proposerons quelques considérations générales sur l'impact du stalinisme pour le matérialisme dialectique avant de nous pencher plus spécifiquement sur le domaine des sciences.

3.1. Une altération de la philosophie au service de la politique

En 1940, le philosophe Henri Lefebvre signe un ouvrage intitulé *Le matérialisme dialectique* qui deviendra un classique pour les milieux marxistes français [Lefe 1940]. Comme l'indique un avant-propos rédigé des années plus tard, l'ouvrage est alors une réponse à ceux qui veulent faire du marxisme un dogme :

Ce petit livre représente un épisode de la lutte acharnée à l'intérieur du marxisme (et au-dehors du marxisme) entre les dogmatiques et la critique du dogmatisme. [...] Le dogmatisme est fort, il dispose de la force, celle du pouvoir, de l'Etat et de ses institutions. De plus, il a des

¹ Nos commentaires se focalisant avant tout sur la période stalinienne nous invitons le lecteur intéressé par les premières années ayant suivies la Révolution russe à consulter l'étude de Dominique Colas intitulée *Le léninisme* [Cola 1982]. Elle est avant tout une analyse de la politique soviétique centrée sur la personnalité de Lénine, mais il faut noter qu'elle prépare parfaitement à une analyse des bouleversements provoqués par son successeur.

avantages ; il est simple, il s'enseigne facilement ; il élude les problèmes complexes, et c'est précisément son sens et son but ; à ses partisans, il donne à la fois un sentiment d'affirmation vigoureuse et de sécurité.

Lorsque ce livre fut écrit [...] le marxisme officiel ou « institutionnel » dérivait déjà vers une philosophie systématique de la nature. Au nom des sciences « positives », et notamment de la physique, on tendait à considérer la philosophie comme un cadre pour rassembler les résultats de ces sciences et pour obtenir un tableau définitif du monde. Dans les milieux dirigeants, sous l'impulsion de Staline et de Jdanov, on voulait ainsi fusionner la philosophie avec les sciences naturelles en « fondant » la méthode dialectique sur la dialectique de la nature [p. 5].

Dans son ouvrage, Lefebvre pointe donc le doigt sur l'orientation dogmatique prise par la philosophie du matérialisme dialectique sous l'impulsion de Staline, bénéficiant de la machinerie de l'État. Une orientation qui a pour conséquence une simplification excessive du message initial du marxisme : d'une méthode d'analyse globale, on se dirige progressivement vers une doctrine à laquelle sont subordonnées les sciences dans leur ensemble.

L'altération du matérialisme dialectique durant la période stalinienne possède une indéniable dimension politique que nous pouvons ici à nouveau appuyer grâce à l'analyse historique des philosophies matérialistes de Charbonnat [Char 2013, pp. 544-584]. Car si Lefebvre nous explique que l'État et les « institutions » sont les garants du caractère dogmatique du marxisme soviétique, il faut noter qu'ils en sont aussi une cause et que la politique stalinienne en est à l'origine. La démarche de Staline peut être résumée en quelques mots par sa volonté de prémunir son autorité de tout mouvement contestataire, la bureaucratie qui s'est progressivement mise en place en URSS craignant par-dessus tout l'action politique des masses¹. Cette bureaucratisation de la société soviétique résulte entre autres du drame que représente l'enchaînement de la Grande Guerre et de la guerre civile russe pour l'économie et l'appareil de production soviétique². Dès lors que « les hommes doivent se partager la misère, il se forme d'inévitables rapports inégalitaires » dont la

¹ Sur le stalinisme voir Tucker [Tuck 1990]. Son approche tend à montrer qu'il n'y a pas de suite logique entre léninisme et stalinisme, et même si ce point est historiquement discutable – Charbonnat notamment ne le partage pas dans l'ouvrage qui nous sert ici de référence principale –, il a le mérite de mettre l'accent sur ce qui fait la particularité de la période stalinienne.

² Voir Colas sur le léninisme [Cola 1982]. Mais pour un historique complet de l'Union soviétique notons ici aussi à toutes fins utiles l'indispensable *Histoire de l'Union soviétique* de Werth [Wert 2012].

bureaucratisation est l'expression concrète, « ne raisonn[ant] qu'en fonction de ses seuls privilèges, et se laiss[ant] peu à peu gagner par les idéaux bourgeois » [Char 2013, p. 547]¹.

L'autorité bureaucratique se transforme donc progressivement en une véritable dictature, qui propage une forme caricaturale de la pensée de Marx et d'Engels afin de conserver sa position dominante. Pour s'assurer le contrôle des masses, le régime doit faire en sorte que ces dernières soutiennent la doctrine du matérialisme dialectique, et c'est pourquoi, alors qu'il existe dans les années 1920 des discussions relativement ouvertes du point de vue philosophique, dans les années 1930 la situation se durcit progressivement². Tout type d'opposition politique doit être éliminée. Suite à l'exil de Trotski en 1929, Staline devient concrètement le dirigeant suprême de l'URSS. La célébration de ses 50 ans le 21 décembre de la même année marque le début du culte de sa personnalité, mais surtout il ne tarde pas à engager une vaste série de réformes – industrialisation forcée, planification et collectivisation des terres – qui vont radicalement changer la face du pays : c'est le « Grand Tournant ». Mais celui-ci s'accompagne de plus d'une révolution culturelle. Un décret du 25 janvier 1931 du Comité central du Parti communiste condamne officiellement les différents courants philosophiques qui jusqu'alors débattaient librement. Une unique ligne idéologique que Staline incarne est consacrée et la « dictature bureaucratique s'installe donc immédiatement dans le monde intellectuel, peu de temps après la prise de pouvoir politique » [Char 2013, p. 551]. Les conséquences sont claires, on assiste à :

[...] la transformation du matérialisme dialectique en un dogme officiel ayant perdu toute perspective critique. Il devient un discours stéréotypé qui n'exprime plus qu'un acte de soumission au régime stalinien [...] La défiguration du matérialisme dialectique par le stalinisme a pour véritable raison le besoin organique de la bureaucratie d'empêcher toute discussion libre, qui à terme remettrait en cause son pouvoir. Elle impose un dogme à la place d'une philosophie par crainte qu'un espace de liberté, même dans les sphères philosophiques, puisse conduire à une contestation révolutionnaire [Char 2013, p. 551].

¹ Notons que Charbonnat suit ici la critique faite par Trotsky en 1937 du système soviétique dans *La révolution trahie* [Trot 1937].

² Notons que Graham qui discute de façon directe du statut des sciences en URSS met en avant les mêmes mécanismes d'évolution au sein de la société soviétique [Grah 1987, pp. 9-23].

Car il faut insister sur le fait que de cette volonté politique, c'est bien le côté critique et révolutionnaire du matérialisme dialectique, en somme son aspect dialectique, qui s'estompe rapidement. La bureaucratie travestit concrètement les idées de Marx, d'Engels et de Lénine. Le discours philosophique en URSS tend continuellement à épouser les contours tracés par le pouvoir et à démontrer que l'idée de renversement, ou de révolution n'a plus aucune actualité dans un pays « socialiste ». Comme le souligne Charbonnat, ce phénomène s'accompagne de plus d'une séparation du philosophe et du scientifique, du philosophe et du militant révolutionnaire, en entités distinctes [Char 2013, pp. 565-566]. Le pouvoir bureaucratique cloisonne les fonctions car il a besoin d'exécutants spécialisés. Peu à peu on tombe dans la stagnation intellectuelle.

La ligne stalinienne du matérialisme dialectique est notamment définitivement fixée en 1938 avec la publication du livre *Istoriya vsesoyuznoy kommunisticheskoy partii (bol'shevikov)* (Histoire du Parti communiste bolchévique de l'URSS) [Komi 1938]. Au sein du quatrième chapitre, « O dialekticheskom i istoricheskom materializme » (Sur le matérialisme dialectique et le matérialisme historique) [pp. 99-127], rédigé par Staline en personne, est fixé une bonne fois pour toute le noyau conceptuel de la nouvelle orthodoxie marxiste :

Staline conçoit les processus de la connaissance comme un rapport hiérarchique entre différentes instances. Les sciences ont besoin d'être soumises à un centre de commandement unique, distinct et supérieur par nature. Ce rôle est confié au matérialisme dialectique : il donne à tous les savoirs une méthode absolue et en contrôle la bonne application. La philosophie matérialiste consisterait ainsi en un ensemble de principes universels, offrant ses conditions de possibilités à toute connaissance [Char 2013, p. 568].

Dans ce cadre la dialectique ne devient qu'une méthode d'investigation qui peut juger d'elle-même si telle ou telle science respecte ses propres principes. Elle ne reflète plus le mouvement des phénomènes. La véritable dialectique est dénaturée, les concepts sont dans un rapport unique de causalité mécanique, et Staline affirme que le mouvement des choses ne conduit pas nécessairement à leur disparition. Contradiction et renversement brutal sont exclus de la philosophie marxiste. Staline impose clairement des rapports figés et autoritaires dans la pensée. Avec la dialectique, le matérialisme dialectique se présente comme une philosophie qui n'absolutise pas les connaissances. En l'éliminant, le dirigeant soviétique en

fait un véritable dogme. Notons ici que c'est directement à ce texte de Staline que Lefebvre réagit en 1940 [Lefe 1940].

Malgré tout, il est intéressant d'observer qu'en faisant du matérialisme dialectique une doctrine d'Etat, la bureaucratie soviétique propage de façon inédite les textes fondateurs de Marx, Engels et Lénine. Il en résulte une grande popularité de cette philosophie, bien que cela en soit trop souvent une version tronquée en vue de la justification du pouvoir bolchévique. La révolution culturelle implique une vaste réorganisation du système éducatif et le matérialisme dialectique commence à être enseigné de façon obligatoire à toute une jeune génération d'étudiants¹. L'enseignement en est autoritaire, dogmatique. Les jeunes scientifiques sont bien évidemment concernés, tel Dmitri Blokhintsev, qui comme nous le développerons plus tard (VII.2.2.2) deviendra un opposant de Fock sur l'interprétation de la physique quantique². Ceux qui sont déjà établis sont aussi encouragés à participer à des groupes d'études sur la pensée marxiste, et comme nous l'avons mentionné (V.2.1) il est fort probable que Fock ait aussi été guidé dans son assimilation du matérialisme dialectique par ce type d'activités. Assurément c'est dans ce contexte qu'il lit *Matérialisme et empiriocriticisme* de Lénine, et le témoignage d'Aleksandrov nous apprend que Fock regrette qu'il soit inculqué de façon « policière »³. Mais que le physicien de Lénine ait pris connaissance de façon spontanée, au cours d'un séminaire, ou en suivant certaines recommandations, il est possible que sa position de scientifique de premier plan lors de la révolution culturelle lui ait permis de prendre plus de recul sur cet ouvrage et d'en avoir une lecture très personnelle. Ainsi, il a vraisemblablement pu intérioriser de façon très précise les principes gnoséologiques à la base des développements de Lénine, y compris, à contre-courant de la dynamique stalinienne, ceux pour lesquels la dialectique joue un rôle fondamental.

3.2. Un impact notable sur la philosophie des sciences

En conservant cette forme d'indépendance vis-à-vis de son approche du matérialisme dialectique Fock va se retrouver confronté à la communauté des philosophes des sciences et autres chiens de garde qui se veulent les garants de la ligne idéologique tracée par les

¹ Sur l'impact de la révolution culturelle sur l'enseignement soviétique voir Fitzpatrick [Fitz 1979].

² Sur Blokhintsev et le matérialisme dialectique voir Kojevnikov [Kojé 2012, p. 225].

³ Voir Gorelik [Gore 1993, pp. 311-312].

autorités bolchéviques. Nous discuterons dans le prochain chapitre des conflits qui en résultent et notamment de leur dimension politique mais il est tout d’abord indispensable de faire un état des lieux des forces en présence. Celui-ci ne peut être réalisé sans prendre en considération la relative liberté intellectuelle qui existe dans les années 1920 en Union soviétique et l’émergence de deux groupes influents en philosophie des sciences, les « mécanistes » et les « dialecticiens », ces derniers étant aussi appelés « Déborinites »¹. En effet, nombre des acteurs de cette dispute formatent partiellement la nature des échanges auxquels prendra part Fock dès la fin des années 1930. Notons que les deux groupes s’opposent sur l’interprétation des textes fondamentaux du marxisme-léninisme, et en particulier à cette époque déjà, sur la dialectique.

Le groupe des « mécanistes » est principalement composé de physiciens et d’ingénieurs, N. P. Kasterin, Ya. I. Grdina, G. A. Kharazov, ou encore V. F. Mitkevich pour ne citer qu’eux, qui se réunissent notamment autour de la personne de A. K. Timiryazev, fils du grand biologiste russe K. A. Timiryazev, promoteur des idées de Darwin en Russie. Les mécanistes souhaitent combattre l’idéalisme, qui a leur sens s’insinue dans la philosophie matérialiste au travers de l’approche suivie par les dialecticiens. Pour les mécanistes, la dialectique n’impose pas de tutelle aux sciences, elle n’a pas d’existence autonome, et n’est pas une méthode qui émerge directement des sciences en elles-mêmes. Ils considèrent comme nécessaire de garder le contact avec une version concrète de la pratique scientifique, et trouvent ainsi leur salut dans une véritable synthèse de la théorie et de la pratique, afin de pouvoir donner une véritable description de ses interconnexions organiques et inorganiques du monde. Les mécanistes tombent alors dans la critique de la physique moderne, en particulier sur trois points de discordance : l’émergence d’une approche statistique des processus atomiques et moléculaires, le concept de relativité, et la nature discrète du rayonnement². Ce mouvement résulte en une forme de fixisme en physique, pourtant combattu par les fondateurs du matérialisme dialectique, et de dévotion à l’encontre de la physique classique. Celle-ci est particulièrement

¹ Sur l’opposition entre ces deux groupes et leur trajectoires respectives voir Josephson [Jose 1991, pp. 225-275], Vizgin [Vizg 1999, pp. 1260-1261], Kanayama [Kana 2013], Charbonnat [pp. 608-612] et surtout Joravsky [Jora 1961] qui est celui qui explore la controverse le plus en profondeur.

² Voir Josephson [Jose 1991, p. 228].

incarnée par Timiryazev, fervent défenseur de la mécanique newtonienne qui attaque publiquement et continuellement toute forme de déviation à sa pensée¹.

Le groupe des « dialecticiens » est lui conduit par A. M. Deborin, rédacteur en chef de la principale revue philosophique soviétique, *Pod Znamenem Marksizma*, fondée en 1922. À son mouvement on peut associer des noms tels que V. P. Ergoshin, S. Yu. Semkovskiy ou encore B. M. Hessen². Deborin défend la spécificité de la dialectique, et reproche aux mécanistes de réduire la connaissance aux présupposés des sciences de la nature, ainsi que de méconnaître la notion de bond ou de saut. La dialectique est vue comme une méthode générale qui cherche à s'intégrer aux sciences sans perdre sa nature et son indépendance philosophique. Les dialecticiens sont alors pour l'ensemble prêts à accepter les plus récentes avancées de la physique moderne, pensant que certains de ses principes comme l'indétermination au niveau quantique et la dualité onde-corpuscule sont des preuves de la compatibilité des sciences et du matérialisme dialectique.

Toutefois, au tournant des années 1930, ces deux groupes connaissent respectivement d'importantes défaites publiques. C'est tout d'abord le cas des mécanistes qui sont officiellement répudiés par les dialecticiens au second Congrès des Instituts de recherche scientifique en 1929³. Mais la victoire est de courte durée pour les dialecticiens qui sont à leur tour condamnés en 1931. Deborin doit faire son autocritique face aux accusations d'avoir détourné la philosophie des questions pratiques et politiques. Lui et ses collègues sont accusés d'« idéalisme menchévique » et d'avoir échoué à mettre en avant le rôle de la lutte des classes en physique⁴. Mais comme le montrent notamment les travaux de Joravsky [Jora 1961, pp. 205-271], Vucinich [Vuci 1980] ou encore Charbonnat [Char 2013, pp. 608-612], ces défaites sont avant tout le fruit d'une volonté politique plus que l'issue d'un véritable débat philosophique. En effet, dans sa tentative de poser les fondations économiques du premier état socialiste, accompagné par le souci de contrôler tous les aspects de la société soviétique,

¹ *Ibid* [pp. 228-232].

² Hessen est bien connu des historiens des sciences en raison de son intervention au second Congrès international d'histoire des sciences et techniques à Londres en 1931. Intitulée « Les racines sociales et économiques des Principia de Newton », elle est pour beaucoup un élément fondateur de la sociologie des sciences [Hess 1931].

³ Voir Joravsky [Jora 1961, pp. 205-214].

⁴ *Ibid* [pp. 251-271]. Voir aussi Voir Josephson [Jose 1991, p. 232].

Staline s'est efforcé de codifier l'idéologie soviétique, de l'unir, et d'en établir un courant officiel. Il est simplement pour lui question d'éliminer « les forces centrifuges caractéristiques de la philosophie marxiste-léniniste des années 1920 » [Vuci 1980, p. 236].

Les groupes condamnés au début des années 1930 par les gardiens de l'idéologie du Parti communiste sont alors remplacés par un nouveau groupe plus flexible de la « jeunesse stalinienne ». Parmi eux, M. B. Mitin, P. F. Yudin, F. K. Konstantinov et autres personnages qui proclament l'esprit du Parti comme cœur de la philosophie marxiste, y compris en science. C'est également à la même période que E. Kolman et A. A. Maksimov, qui deviendra l'un des opposants majeurs de Fock, deviennent les principaux philosophes pour les sciences naturelles, et nouveaux membres majeurs du bureau d'édition de *Pod znamenem Marksisma* suite à l'éviction de ce poste de Déborin¹. Ceux que Graham [Grah 1982, p. 128] considère comme des marxistes sophistiqués, des « middle-men » qui appréciaient la physique moderne et la défendaient – S. Yu. Semkovskiy, A. A. Bogdanov, A. Goltsman ou encore B. G. Hessen – sont remplacés par un nouveau genre de philosophes staliniens qui se trouvent aussi être plus hostiles à la science moderne. Clairement, au cœur de la dynamique stalinienne précédemment décrite, la dimension politique prend le dessus et on veille alors à ce que le matérialisme dialectique ne soit plus utilisé comme une méthode d'analyse, mais comme une doctrine à laquelle sont subordonnées les sciences dans leur ensemble. C'est dans cet environnement que Fock va évoluer en tant que physicien intéressé par les questions d'interprétation des théories modernes de la physique.

4. Conclusion

L'histoire de l'Union soviétique est indissociable de l'idéologie qui est la sienne, le matérialisme dialectique. L'histoire de Fock, si l'on veut reconstruire la trajectoire du physicien et de son interprétation des théories modernes de la physique en prenant en compte tous les facteurs qui la composent, est soumise à la même règle. Le physicien a lu *Matérialisme et empiriocriticisme* [Leni 1909] au début des années 1930 et cet ouvrage a eu un indéniable impact sur sa pensée scientifique. Les principes gnoséologiques avancés dans l'ouvrage de Lénine servent de fondements aux principes épistémologiques qui dessinent l'exigence de

¹ Voir Vizgin [Vizg 1999, 1261] et Kanayama [Kana 2013, pp. 204-205].

rigueur physique à laquelle Fock est attaché. Si le physicien soviétique, en tant que réaliste, montre de véritables prédispositions à l'acceptation du matérialisme dialectique, il est aussi évident que ce dernier, en particulier par son volet dialectique, l'aide à définir le cadre de pensée qui est le sien lorsqu'il aborde les questions d'interprétation des théories modernes de la physique. L'influence est concrète, directe, rigoureuse, et au cours de sa carrière, Fock ne s'en cache pas. Néanmoins, nous avons passé deux chapitres (II et III) à reconstruire l'épistémologie du physicien sans jamais avoir besoin de recourir à un texte où il affirme son adhésion au matérialisme dialectique. Cet aspect de nos développements, qui reflète en réalité une des caractéristiques de la pensée de Fock, mérite ici d'être clarifié.

Le premier constat essentiel à dresser lorsqu'il est question d'interprétation des théories physiques est que le fait d'adhérer au matérialisme dialectique ne place personne dans une situation privilégiée. En effet, nous avons pu l'observer avec Fock, les questions discutées émergent avant tout de problématiques posées par les théories elles-mêmes, et si cela tombe sous le sens commun de nos jours il n'est pas inutile de rappeler le constat fait par Graham dans le cas de la mécanique quantique : « [o]ne of the most notable characteristics of the Soviet controversy over quantum mechanics was its similarity to the worldwide discussion on this topic » [Grah 1987, p. 5]. Car bien évidemment les questions d'interprétation ne sont pas le propre de physiciens se revendiquant de telle ou telle position philosophique, mais elles cristallisent avant tout des débats entre différentes sensibilités, qui comme nous avons pu le montrer au cours des chapitres précédents se matérialisent par des principes épistémologiques généraux par rapport auxquels tout physicien se positionne consciemment ou inconsciemment. C'est notamment le cas du réductionnisme et du réalisme.

Quel est alors dans ce cadre le rôle qu'il nous faut accorder au matérialisme dialectique dans le cas de Fock ? Comme déjà établi, on observe que la théorie quantique confronte Fock aux problématiques de l'interprétation au débat des années 1930. La question de l'antiréductionnisme vient répondre à certaines difficultés soulevées entre autres par la question de la mesure des champs en électrodynamique quantique, alors que celle du réalisme est centrale dans le débat sur la complétude de la mécanique quantique. Alors, nous le savons maintenant, le matérialisme dialectique offre un cadre philosophique au sein duquel cohabitent réalisme et antiréductionnisme. Et si sur le premier Fock se retrouve dans sa lecture de Lénine, il en extrait probablement le second. Ainsi, la philosophie marxiste définit un cadre de pensée général à partir duquel Fock reconstruit une épistémologie qui lui permet

de faire face aux enjeux interprétatifs de la science moderne. Mais plus encore, cette épistémologie devient un prisme de lecture – au travers de la notion de rigueur physique –, une méthode d'analyse, grâce à laquelle Fock peut se lancer non seulement dans la critique de Bohr et d'Einstein, mais aussi l'analyse de ses propres résultats afin de parvenir à une compréhension à ses yeux convenable des théories de la physique moderne.

Lorsqu'il commence à se pencher sur les problèmes interprétatifs de la mécanique quantique en 1935-1936, Fock estime qu'il n'a nul besoin de définir le cadre de pensée philosophique dans lequel il se place car celui-ci se réduit aisément à toute une série de notions élémentaires de la pratique scientifique : approximations, signification physique, domaine d'applicabilité, rigueur physique, etc... Ce medley, qui n'a que peu de cohérence ainsi présenté, a pourtant le mérite aux yeux du Russe d'être d'une part idéologiquement neutre, et surtout d'autre part d'avoir une signification relativement explicite pour tout physicien dans l'approche des problèmes qui lui sont posés. Car il ne faut pas l'oublier, Fock est avant tout un physicien, et il dédie sa vie à la résolution de problèmes scientifiques, qu'ils soient mathématiques ou interprétatifs. Alors il faut bien saisir que peu importe la raison pour laquelle il lit Lénine, lorsqu'il y trouve quelque chose d'important pour lui, c'est que cela a du sens dans son quotidien de scientifique. Dans *Matérialisme et empiriocriticisme* il est de toute évidence séduit par la cohérence générale de l'approche des sciences et par la pertinence pour ses propres interrogations des principes gnoseologiques énoncés, mais pour autant, les implications philosophiques de l'ouvrage ne l'intéressent guère. C'est pourquoi il faut attendre que le contexte soviétique exige de ses scientifiques qu'ils se revendiquent du matérialisme dialectique pour que Fock soit explicite à ce sujet.

C'est dans cette direction que nous conduit la dernière partie de ce chapitre, qui pose les jalons de la situation qui sera décrite au cours du suivant : les attaques politiques et philosophiques à l'encontre de la communauté des physiciens théoriciens durant la période stalinienne. Pris dans son contexte, il faut souligner l'indépendance de Fock dans son approche du matérialisme dialectique, ce dernier, bien qu'adopté dans le cadre soviétique, ne se présentant pas chez lui comme un dogme qui lui est imposé. En restant très proche de la pensée de Lénine, le physicien ne tombe pas dans le dévoiement institutionnalisé de la philosophie marxiste. Lorsqu'il déclare en 1955 que le matérialisme dialectique lui est utile « pour approcher critiquement » l'interprétation de la relativité générale par Einstein, mais aussi pour « comprendre correctement, et interpréter les nouveaux résultats [qu'il a] obtenus

» [Fock 1955a', p. 8], Fock rappelle qu'il est avant tout une méthode d'analyse à ses yeux. Il ne cherche pas à lui subordonner les sciences comme le souhaite Staline. De plus il continue toute sa vie de considérer la dialectique comme un élément essentiel de sa pensée comme en témoignent ses échanges avec Graham [Fock 1966b]. Alors, inévitablement, face au dogmatisme des autorités et aux gardiens de l'idéologie du Parti communiste, Fock va devoir défendre sa position, et à travers celle-ci, les théories modernes de la physique.

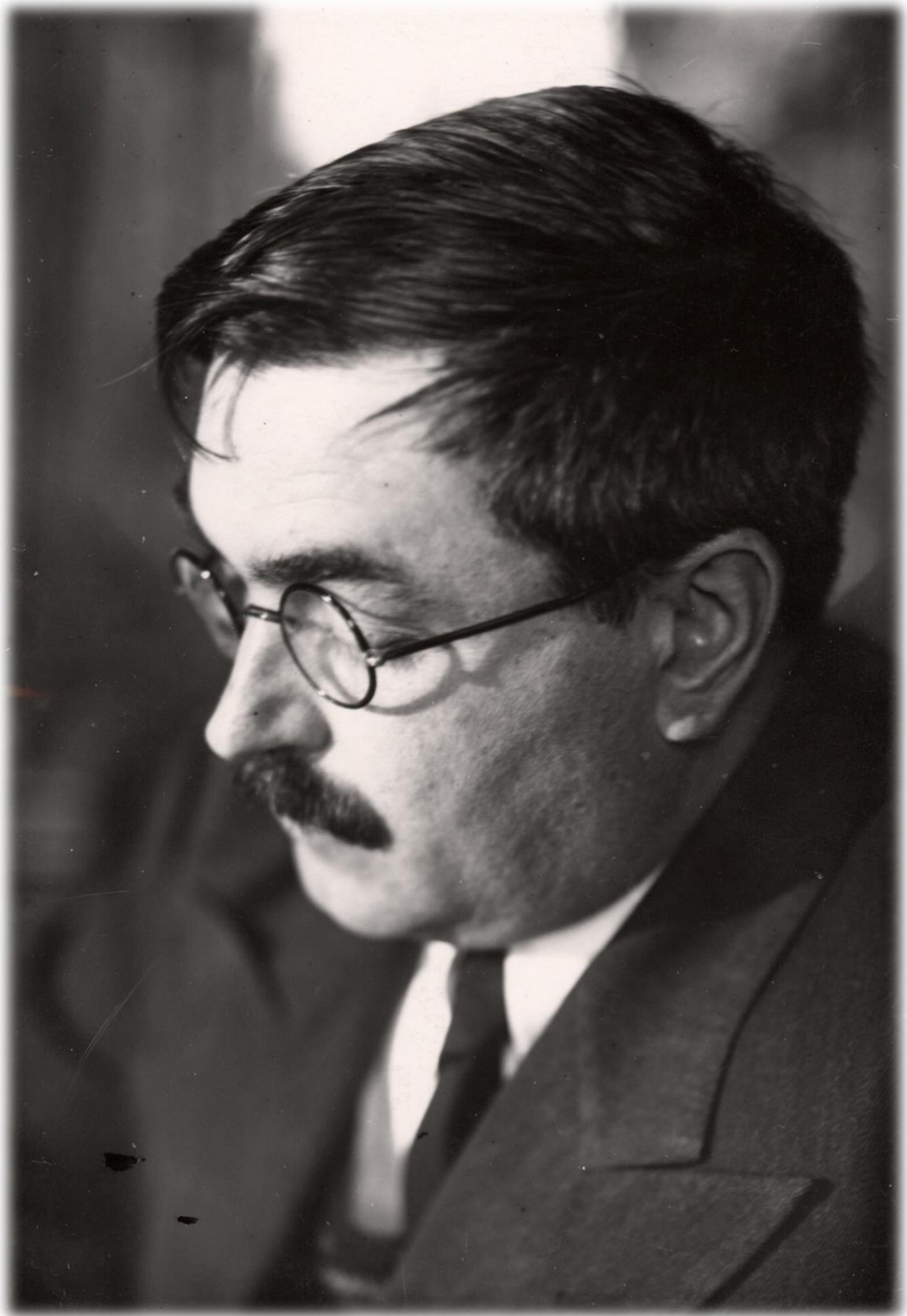


Figure 12. Vladimir Fock. Photographie non datée [Niels Bohr Archive].

Chapitre sixième – Défense des théories modernes de la physique

La dernière partie du précédent chapitre, au travers de la question du dévoiement de la philosophie du matérialisme dialectique durant la période stalinienne, a esquissé l'étroite collusion entre l'idéologie marxiste et la politique soviétique. Transformé en dogme, le matérialisme dialectique devient un outil de contrôle pour un régime qui se caractérise à chaque étape de son développement comme de plus en plus autoritaire. La science, en devenant l'objet premier du matérialisme dialectique, n'échappe bien évidemment pas à cette logique générale. Suite à la révolution culturelle débute alors ce que Vladimir Vizgin appelle une « 'guerre de trente-ans' menée par les physiciens contre l'incompétente interférence idéologique et philosophique des autorités dans la science » [Vizg 1999, 1259]¹. Durant cette période, les théories modernes de la physique sont en effet régulièrement attaquées par des individus se revendiquant de la bonne philosophie marxiste. Mais comme le suggèrent les mots de Vizgin, le présent chapitre ne souhaite pas se pencher de façon soutenue sur le contenu des débats qui en découlent, et qui ne présentent en réalité que peu d'intérêt, mais sur la dimension politique qui les englobe. En effet, par leur intermédiaire se manifestent non seulement la volonté concrète du régime d'affirmer son autorité, mais aussi de profondes oppositions au sein même de la communauté des physiciens. Alors, les philosophes marxistes ne deviennent que des alliés de circonstance et le débat philosophique qu'un moyen de pression, notamment à l'encontre de l'élite de la physique soviétique, incarnée par ses physiciens théoriciens les plus brillants.

Le caractère éminemment politique des débats philosophiques en Union soviétique est un sujet largement discuté dans la littérature². Par conséquent nos développements n'entendent

¹ Il est intéressant de noter que le choix du titre de l'article de Vizgin, « The nuclear shield in the 'thirty-year war' of physicists against ignorant criticism of modern physical theories », fait directement référence à un article parmi les plus polémiques de Fock « Contre la critique ignorante des théories physiques modernes » [Fock 1953a].

² Voir nos considérations sur les sources en fin de cette introduction.

pas en être une étude exhaustive, mais simplement en faire une courte synthèse qui participe de façon nécessaire à notre investigation générale sur Fock. Car il faut noter que, dans l'immense majorité des cas, l'historiographie souligne le rôle essentiel de Fock en tant que défenseur des théories modernes de la physique au cours de cette période instable de l'histoire soviétique. Cet aspect est indissociable de la carrière de Fock, et l'objectif qui est ici le nôtre est de décrire les modalités contextuelles de la position tenue par Fock face aux différentes attaques subies par la communauté des physiciens théoriciens, alors que le prochain chapitre en développera les modalités discursives. Si nous souhaitons évaluer l'impact de l'autoritarisme soviétique sur la carrière de Fock et sur son interprétation des théories modernes notons que ce chapitre est indispensable mais non suffisant et qu'il forme avec le suivant un ensemble. Nous observerons que le rôle joué par Fock dans le contexte politique soviétique se caractérise non seulement par un rapport singulier aux autorités de son État, mais aussi par une volonté affichée de participer concrètement au débat d'un point de vue idéologique. En effet, en raison de l'influence du matérialisme dialectique sur sa pensée épistémologique, le physicien n'hésite pas à se poser comme le garant de la bonne interprétation des théories modernes de la physique, et à se confronter directement aux philosophes marxistes.

En somme, nous nous proposons dans le présent chapitre de nous pencher sur la question de l'influence du politique sur la communauté des physiciens et bien entendu sur l'attitude adoptée par Fock dans ce cadre. Sa structuration est dictée avant tout par le cours des événements historiques, et notamment la Seconde Guerre mondiale – ou plutôt Grande Guerre patriotique d'un point de vue soviétique¹ – qui marque une forme de rupture dans le conflit entre scientifiques et autorités politiques, les forces convergeant assez naturellement vers l'objectif de combattre un ennemi unique². Par conséquent, il apparaît évident de découper le présent chapitre en deux parties, la première concernant les années 1930, et la seconde l'après Seconde guerre mondiale. Dans un premier temps nous nous pencherons donc sur la progressive dégradation de la situation en physique suite au Grand Tournant

¹ Les Russes et autres membres de l'ex-Union soviétique désignent par Grande Guerre patriotique le conflit qui oppose spécifiquement l'URSS à l'Allemagne nazie, et qui donc s'écoule de juin 1941 à mai 1945.

² Voir les développements de Kremontsov sur la période de la Grande Guerre patriotique dans *Stalinist Science* [Krem 1997, pp. 96-128].

stalinien. Nous mettrons alors en évidence comment Fock est contraint de quitter le domaine de la science pure pour s'engager dans le débat politique et idéologique ainsi que les modalités initiales qu'il pose pour celui-ci. Dans un second temps nous observerons comment le contexte émergent de la Guerre froide cristallise les tensions d'avant-guerre et la façon dont Fock devient explicitement l'un des porte-parole de la communauté scientifique en vue de la défense des théories modernes de la physique.

Sources :

Depuis la chute de l'URSS, la question de l'influence du politique sur les sciences a été l'un des sujets les plus discutés de l'histoire des sciences soviétiques, et l'historiographie regorge de sources très complètes sur le sujet. De l'indispensable ouvrage de Krementsov, *Stalinist Science* [Krem 1997], qui donne un aperçu général des questions institutionnelles, aux études plus spécifiques à la physique de Josephson, *Physics in Revolutionary Russia* [Jose 1991], Kojevnikov, *Stalin's Great Science* [Koje 2004], Pollock, *Stalin and the Soviet Science Wars* [Poll 2006], mais aussi Sonin, *Fizicheskiy idealizm* (Idéalisme physique) [Soni 2017], auxquels s'ajoutent une myriade d'articles traitant de sujets plus ou moins ciblés, le lecteur a à sa disposition un compte-rendu assez complet de la situation relative aux conflits politiques dans la physique soviétique. Parmi ces articles, soulignons ici le rôle particulier joué par « The nuclear shield in the 'thirty-year war' of physicists against ignorant criticism of modern physical theories » de Vizgin dont nous reprenons largement la structure logique [Vizg 1999]. La littérature étant si riche sur le sujet il n'est pas impossible que nous ayons involontairement omis de citer quelques travaux. Notons toutefois que toutes les références mentionnées se recoupent pour mettre en avant le caractère politique des débats idéologiques dans la physique soviétique, et que c'est bien là que se situe le point névralgique du présent chapitre.

Les archives sont dans ce cas plus éloquentes que pour les chapitres précédents. Mais il faut noter que bien souvent les travaux de nos prédécesseurs nous ont sur ce sujet coupé l'herbe sous le pied et que par souci d'économie¹ nous n'avons pas systématiquement reproduit leur démarche de terrain. Par conséquent, bien souvent, les résultats du travail d'archive sont communiqués au lecteur au travers de la littérature secondaire ici mentionnée. Quoi qu'il en soit, il faut souligner la propension des institutions soviétiques en général, et de

¹ Voir nos commentaires de l'introduction générale sur les spécificités du travail d'archive en Russie.

Fock en particulier, à conserver tout type de correspondances, donnant ainsi à l'historien de nombreux outils utiles pour reconstruire l'évolution du physicien dans son contexte. Sans elles, il n'aurait pas été possible de saisir la nature du rapport de Fock avec les autorités. Notons aussi que la seconde partie de nos développements doit beaucoup à la pratique soviétique qui consiste à sténographier les échanges d'un grand nombre de réunions scientifiques. Les documents ici exploités proviennent alors principalement des Archives de l'Académie des sciences à Moscou (ARAN), du fond Fock de sa filiale à Saint-Pétersbourg (ARAN SPb), et des Archives d'État de la Fédération de Russie à Moscou (GARF).

1. Avant-guerre – l'impossible conciliation ?

Comme discuté dans le chapitre précédent (V.3.2), suite à la révolution culturelle et l'imposition d'une ligne idéologique unique, le domaine de la philosophie des sciences est nouvellement incarné par une jeune garde de philosophes qui proclament l'esprit du Parti comme cœur de la pensée marxiste et sont plutôt hostiles à la science moderne. Les attaques contre les scientifiques, et surtout contre les physiciens, ne se font pas attendre. Dès 1931, Kolman s'en prend notamment à Frenkel pour avoir déclaré durant une conférence que « la méthode dialectique n'a aucun droit de revendiquer un rôle majeur en science ». Le philosophe ajoute : « this is only one instance of an outrageous foray of a hardened Machist who heads a group of physicists, the so-called 'Leningad school' (Gamow, Landau, Bronstein, Ivanenko and others) »¹. Cet exemple manifeste parfaitement le changement d'atmosphère que va connaître le monde de la physique dans les années 1930, qui connaît de plus de vastes bouleversements institutionnels et est confronté à une pression croissante du pouvoir politique. Cette dernière atteint son paroxysme avec les purges staliniennes de 1936-1937. L'attaque de Kolman montre aussi que la physique théorique, et ici directement le milieu auquel appartient Fock, est une cible privilégiée. Ainsi, une fois décrite dans les grandes lignes la progressive dégradation de la physique au cours des années 1930, nous nous pencherons plus spécifiquement sur la position adoptée par Fock avant-guerre face aux attaques scientifiques, politiques et idéologiques à son encontre, mais aussi à l'encontre des théories modernes de la physique.

¹ Cité et traduit chez Vizgin [Vizg 1999, p. 1261, note 1].

1.1. Une progressive dégradation de la situation en physique

1.1.1. Réorganisation disciplinaire

À Odessa, du 19 au 24 août 1930, est organisé le septième Congrès des physiciens russes – par ailleurs premier Congrès des physiciens de l'Union soviétique – par l'Association des physiciens russes qui poursuit depuis sa fondation en 1919 le projet d'établir une véritable communauté disciplinaire et d'étroits contacts avec l'étranger¹. Ce Congrès révèle les premières traces de la révolution culturelle accompagnant le Grand Tournant. Notamment, deux sessions plénières inaugurales dédiées aux « connexions entre la physique et le matérialisme dialectique » et au « problème des cadres et du lien entre la physique et la production », sont tenues. Il y est aussi question de mécanique ondulatoire et de polarité (chimie), mais ce Congrès est surtout le dernier de la sorte, le Grand Tournant ayant raison de l'Association russe des physiciens, probablement dissoute en 1931. Elle est remplacée par une entité issue de la bureaucratie, l'Association de physique du Ministère de l'industrie lourde². Ce changement illustre alors les bouleversements que connaît la physique soviétique en entrant dans une nouvelle ère, celle de la « science stalinienne »³.

Dès les premiers jours de la Révolution russe les bolchéviques ont conscience de l'importance que peuvent jouer sciences et technologies dans la réalisation de leurs idéaux, mais c'est avec Staline que celles-ci sont pleinement mobilisées pour servir les intérêts de l'État et qu'elles se placent totalement au service de la « construction socialiste ». L'importance des sciences dans le programme socio-économique soviétique conduit les dirigeants, dans le même temps qu'ils en favorisent les développements, à établir un véritable

¹ Sur le septième Congrès des physiciens russes voir Josephson [Jose 1991, pp. 153-154] qui discute aussi de l'Association des physiciens russes voir Josephson, en présente les missions à sa création [pp. 82-96] mais aussi certains de ses succès internationaux comme son sixième Congrès en septembre 1928 à Moscou [pp. 133-138].

² *Ibid.* Une sous-partie est consacrée à la création de l'Association de physique du Ministère de l'industrie lourde et à ses conséquences [pp. 152-162].

³ En employant l'expression « science stalinienne » dans nos développements nous faisons notamment référence aux travaux de Nikolai Kremensov et en particulier son ouvrage *Stalinist Science* qui propose une étude très complète des tenants et aboutissants de l'organisation de la science pendant la période stalinienne [Krem 1997]. Voir aussi Josephson sur la réorganisation de la physique durant les premières années de la planification stalinienne [Jose 1991, pp. 140-183], où encore Graham qui illustre les changements de la révolution culturelle en observant la trajectoire suivie par l'Académie des sciences de l'URSS [Grah 1993, pp. 93-98].

système de contrôle sur l'ensemble des aspects de la vie scientifique. Comme l'indique la création d'une nouvelle Association de physique, directement subordonnée au Ministère de l'industrie lourde, l'État fait le choix d'une réorganisation qui lui permet de transmettre directement ses exigences à la communauté scientifique. Pour cela, les autorités s'appuient largement sur un appareil bureaucratique complexe qui surveille et organise le travail : « By the end of the 1930s, a huge, centralized, hierarchical, isolated, planned and politicized state science system had emerged in Russia » [Krem 1997, p. 53]. La physique n'échappe pas à la règle générale, comme en témoigne la dissolution de l'Association russe des physiciens. Mais notons toutefois qu'en s'appuyant sur certaines figures de premier plan et les investissements reçus du gouvernement, les physiciens – en particulier à l'Institut physico-technique de Leningrad sous le patronage de Ioffé¹ –, gardent un certain contrôle. Comme le souligne Josephson : « [the physicist] was therefore able to undertake research of interest to the state, to expand the research basis and network through internal reorganizations and the establishment of new institutes, and to embark on new programs in nuclear and solid-state physics » [Jose 1991, p. 183].

L'Institut dirigé par Ioffé joue un rôle central en ce qui concerne la physique théorique à l'aube de la révolution culturelle². Mais notons que la discipline connaît une situation délicate, notamment en raison du caractère radicalement proche de l'appliqué que possède l'idéologie soviétique. La science se doit avant tout d'être de nature technologique et utilitaire, d'être le moteur d'une créativité pratique au service du peuple et de la « reconstruction socialiste », et par conséquent nombre de réformes vont dans ce sens. Dans ce cadre la physique théorique se présente comme trop abstraite, et se trouve être dévalorisée au profit de la physique appliquée. Prenons pour exemple la découverte du neutron en 1932 par James Chadwick. Peu après celle-ci, Rozhdestvenskiy organise à l'Institut d'optique d'Etat un séminaire ayant pour vocation de couvrir les principales questions théoriques et pratiques de l'époque. S. E. Frish y fait une présentation sur les travaux de Chadwick. En son sein, le Comité local du Parti Communiste la discute, et comme Frish le rapporte : « it was judged to be an attempt to divert the attention of the Institute's scientists from urgent practical tasks by telling them stories of

¹ Josephson consacre dans son ouvrage *Physics and Politics in Revolutionary Russia* de longs développements à l'Institut physico-technique de Leningrad [Jose 1991, pp. 82-102 et 162-168].

² *Ibid* [pp. 215-225]. Voir aussi Kojevnikov [Kojé 2004, pp.89-90].

bourgeois physicists amusing themselves by finding useless particles »¹. Clairement, les attaques visent à « éradiquer les tentatives de ‘vieux spécialistes’ de faire de la science pure »². De plus, la physique théorique doit faire face à la tension provoquée par la nécessité de donner une interprétation aux théories modernes du XX^e siècle. Elle se traduit en Union soviétique par l’exigence croissante d’adapter les concepts de la physique aux exigences du matérialisme dialectique. Mais si cette question gagne inévitablement le terrain de la philosophie, nous observerons comme l’indique déjà l’exemple du neutron, qu’elle se caractérise aussi par une forte dimension politique.

1.1.2. Attaques philosophiques : la Session de Mars en 1936

La question des attaques philosophiques contre les théories de la physique moderne est déjà largement discutée dans la littérature, notamment anglophone³. Nous souhaitons ici en illustrer brièvement la dimension politique à l’aide de ce que Vizgin considère comme un moment crucial des débats entre physiciens et philosophes, l’organisation en 1936 de la Session de Mars de l’Académie des sciences de l’URSS [Vizg 1999, p. 1263]. A l’ordre du jour de cette Session, se trouve notamment une évaluation des performances de l’Institut physico-technique de Léningrad mais aussi de l’Institut d’optique d’État⁴. Selon l’étude du sujet faite par Josephson, la Session de Mars 1936 se présente alors comme une véritable tentative du pouvoir d’affirmer son autorité :

The March 1936 Academy of Sciences session appears to have been a well-orchestrated attempt – coming from within the Academy, Narkomtiazhprom, and the Party itself – to

¹ Frish S. E., *Skovz’ Prizmu Vremeni* (A la lumière du temps), Moscou : Politizdat, 1992, p. 191. Le passage est cité et traduit chez Vizgin [Vizg 1999, p. 1261].

² *Ibid* [p. 190]. Cité et traduit chez Vizgin [Vizg 1999, p. 1261].

³ On peut mentionner Josephson [Jose 1991] et Kanayama [Kana 2013] pour l’entre-deux guerres mais aussi Vizgin [Vizg 1999] et Kojevnikov [Koj 2004] qui étendent aussi leurs études après la Seconde guerre mondiale. Nous mettons en avant ces publications en raison de leur accessibilité, mais nous aurons aussi recours tout au long des développements de ce chapitre à des sources russes.

⁴ Voir les résolutions de la Session, publiées dans le numéro spécial de *Uspekhi fizicheskikh nauk* qui lui est consacré [Dive 1936, pp. 839-846]. Dans ce volume sont publiées les six principales interventions, qui sont celles de Ioffé, Vavilov, Rozhdestvenskiy, Tamm, Frenkel et Fock. Pour ce dernier il s’agit de la présentation du problème à plusieurs corps en mécanique quantique, que nous avons notamment discutée au chapitre second [Fock 1936a] (II.3.2.2).

weaken Ioffe's influence once and for all. As such, it was part and parcel of the move to eliminate centers of power or influence that rivaled the Moscow Party apparatus and Stalin. And Soviet physicists had been denied Ioffe's able stewardship [Jose 1991, p. 305].

L'aspect politique semble aussi se doubler d'une dimension idéologique. En effet, au cours de la réunion de préparation de la Session, parmi les responsables de l'Académie des sciences, G. M. Krzhizhanovskiy propose d'investiguer « si tout va bien dans la pensée philosophique [des physiciens] »¹. Pour Deborin, toujours actif malgré la défaite philosophique des dialecticiens en 1931² : « There is no doubt [...] that many of our [Soviet] physicists remain up to this day under the influence of what is called Machism or neo-Machism [...] »³. Deborin ne s'explique, entre autres, la « nocivité philosophique » des physiciens soviétiques et leur enthousiasme pour l'indétermination de la mécanique quantique que par rien d'autre que du fascisme. Il conclut son intervention durant la réunion par l'interrogation suivante : « Isn't it high time we made a decisive break with idealism and turned to dialectical materialism ? »⁴.

Le parti pris virulent de Deborin ne marque pas forcément une démarcation claire entre le camp des philosophes marxistes et celui des physiciens. Chez ces derniers, on retrouve différentes sensibilités. Prenons pour exemple, Bentsion M. Vul, jeune physicien de l'Institut de physique Lebedev de Moscou, également membre du Parti communiste, qui réagit favorablement à l'intervention de Deborin :

I agree with Deborin that our theoretical physics is not always approached from the point of view of dialectical materialism [...] some physicists are frankly hostile to dialectical materialism [...] It is also a fact that some young physicists like, for instance, Bronstein and some others deny regularity. That they are social outsiders and politically hostile to us is also a fact⁵.

¹ Vizgin V. P., « Martovskaya (1936 g.) sessiya AN SSSR: Sovetskaya fizika v fokuse » (Session Martov (1936) de l'Académie des sciences : focus sur la physique soviétique), *Voprosy Istorii Estestvoznaniya Tekh.*, Vol. 3, N°36, 1991, p. 43. Cité en version anglaise dans Vizgin [Vizg 1999, p. 1263].

² Voir nos développements du chapitre précédent (V.3.2).

³ Vizgin V. P., *op. cit.*, 1991, p. 44. Cité en version anglaise dans Vizgin [Vizg 1999, p. 1263].

⁴ *Ibid.*

⁵ *Ibid* [p. 45].

On l'observe alors, très clairement l'attaque philosophique s'accompagne d'une attaque politique, comme si les deux catégories se trouvaient être totalement interchangeables aux yeux de Vul.

Quoi qu'il en soit, Ioffé, Frenkel, Fock et Tamm qui sont parmi d'autres l'objet des principales attaques, se montrent suffisamment soudés et utilisent leur autorité scientifique pour obtenir durant la réunion de préparation de la session de Mars que cette dernière ne soit pas transformée en une grande remise en ordre « philosophique ». Si Fock n'exclut pas l'intérêt d'un tel débat, lui et ses collègues doutent de la capacité des philosophes d'aborder des sujets relatifs aux théories modernes de la physique, mais aussi de sa pertinence dans un tel cadre : « These [philosophical] matters are all very interesting, but they will not do for a general meeting because this kind of discussion can hardly be expected to yield anything worthwhile [...] It would be better to hold a smaller meeting to discuss them »¹. Malgré tout, une semaine avant la Session, il est demandé à Mitin et Maksimov – qui n'étaient pas présents aux réunions de préparation –, d'écrire avec l'aide de Deborin et Hessen un paragraphe intitulé « Tendances modernes en physique jugées du point de vue de la philosophie » pour le projet de résolution de la session [Vizg 1999, p. 1263].

Cet exemple n'en est qu'un parmi d'autres manifestant la progressive collusion de facteurs politiques et idéologiques dans l'organisation de la science. Les représentants de l'autorité bolchévique reçoivent le renfort des idéologues marxistes et s'imposent comme des acteurs majeurs de l'organisation des sciences. Les questions philosophiques, en montrant du doigt des coupables désignés, viennent appuyer la mise en place de la machinerie autoritariste stalinienne. Les débats deviennent de plus en plus virulents dans les journaux scientifiques, et la communauté scientifique se trouve constamment mise sous pression. Si en 1936, Fock et ses collègues réussissent à préserver l'essentiel, la situation devient rapidement dramatique avec les événements de la Grande Terreur.

1.1.3. La Grande Terreur

La pression croissante du régime soviétique sur la société résulte en effet en l'un des épisodes les plus tragiques de l'histoire européenne, la Grande Terreur, un terrible massacre d'État. Les chiffres laissent sans voix :

¹ *Ibid* [p. 51].

[...] en seize mois, d'août 1937 à novembre 1938, environ 750 000 citoyens soviétiques furent exécutés après avoir été condamnés à mort par un tribunal d'exception à l'issue d'une parodie de jugement. Soit près de 50 000 exécutions par mois, 1 600 par jour. Durant la Grande Terreur, un Soviétique adulte sur cent fut exécuté d'une balle dans la nuque. Dans le même temps, plus de 800 000 Soviétiques étaient condamnés à une peine de dix ans de travaux forcés et envoyés au Goulag [Wert 2009, p. 16]¹.

Scientifiques, mais aussi philosophes, n'échappent pas à la dureté des événements. Parmi les physiciens c'est une avalanche de noms, exécutés ou plus simplement arrêtés, qui nous parvient : M. P. Bronstein, L. D. Landau, A. I. Leypunskiy, Yu. B. Rumer, S. P. Shubin, A. A. Vitt, L. V. Shubnikov, V. K. Frederiks, V. R. Bursian, P. I. Lukirskiy, I. V. Obreimov, L. V. Rozenkevich, et Yu. A. Krutkov pour ne citer qu'eux. Chez les philosophes des sciences citons B. M. Hessen, S. V. Vasilev ou encore T. N. Gornshtein².

Plusieurs des noms cités auparavant nous sont particulièrement familiers. Frederiks, Bursian (morts en prison) et Krutkov (condamné à 10 ans) en tant qu'enseignants de Fock, ou encore Landau (emprisonné) et Bronstein (exécuté) comme étudiants de ce dernier, témoignent de la proximité de notre acteur principal avec ces événements. Il faut en effet noter que la communauté scientifique de Leningrad, et à travers elle ses physiciens³, est particulièrement touchée au travers de l'affaire « Pulkovo ». Cette affaire pénale est intentée par le NKVD⁴ contre un groupe de soviétiques scientifiques sur des accusations de « participation à l'organisation terroriste fasciste Trotsky-Zinoviev⁵, [qui] a émergé en 1932 à

¹ Le livre de Werth, *L'ivrogne et la marchande de fleurs. Autopsie d'un meurtre de masse 1937-1938*, est une poignante étude, particulièrement bien documentée, de cette sombre période du régime soviétique [Wert 2009].

² Ces noms sont cités par Vizgin [Vizg 1999, p. 1264]. Mais nous invitons le lecteur à consulter le site internet de l'Institut d'histoire des sciences et techniques de l'Académie des sciences russe, qui dispose d'une exhaustive base de données consacrée aux répressions sur les scientifiques soviétiques :

<http://www.ihst.ru/projects/sohist/repress/>

³ Le suivi de la communauté des physiciens Leningrad durant les répressions politiques des années 1930 est effectué par Josephson [Jose 1991, pp. 276-317].

⁴ Narodnyy Komissariat Vnutrennikh Del (Commissariat du peuple aux Affaires intérieures), organisme chargé de combattre le crime et de maintenir l'ordre public en URSS de 1934 à 1946.

⁵ Ce supposé groupe terroriste est dénommé ainsi du nom de deux anciens membres du Politburo, l'organe suprême du Comité central du Parti communiste de l'Union soviétique, et opposants notoires de Staline. Il est

l'initiative des services de renseignement allemands, vise à renverser le régime soviétique et à mettre en place une dictature fasciste en URSS »¹. C'est l'observatoire de Pulkovo à proximité de Léninegrad qui donne *a posteriori* son nom à l'affaire, bien que des scientifiques de Moscou, Kiev, Kharkov, Dniepropetrovsk, Tachkent et d'autres villes encore soient concernés. L'acte d'accusation du NKVD place à la tête d'un groupe contre-révolutionnaire le directeur de l'Institut d'Astronomie de Léninegrad, B. B. Numerov, qui aurait profité en mars 1932 d'une conférence de géophysique tenue à Sverdlovsk pour ramifier son organisation à travers le pays. Il aurait aussi pris contact avec l'organisation Trotsky-Zinoviev de Léninegrad. Numerov et son groupe contre-révolutionnaire prépareraient des actes terroristes contre les dirigeants du Parti communiste et le gouvernement soviétique. Lors d'une ultime réunion en février 1936, une attaque concrète aurait été décidée, poussant le NKVD à intervenir et à opérer un vaste coup de filet dans le milieu scientifique. Les participants à cette « conspiration » sont également accusés de sabotage scientifique (sabotage d'observations d'éclipses solaires, de dissimulation de gisements minéraux, etc...).

Fock est lui-même directement concerné par cette affaire et arrêté par la police dans la nuit du 10 au 11 février 1937. Notons qu'il avait déjà fait l'objet d'une arrestation en mars 1935, pour un motif inconnu, et qu'il avait été relâché le jour même. En 1937, l'affaire prend une autre tournure, et est même qualifiée par certains de « miracle de Saint-Vladimir »². Le 11 février, Aleksey N. Krylov, un collègue de Fock, reçoit un appel de l'épouse de ce dernier lui annonçant qu'il ne se rendra pas chez lui pour dîner. Krylov comprend que Fock a été arrêté

désigné responsable de l'assassinat le 1^{er} décembre 1934 de Sergueï Kirov, alors membre très influent du Politburo, mais aussi de tentatives d'assassinat sur Staline et d'autres personnalités du gouvernement soviétique. En août 1936, les responsables désignés de cette organisation sont jugés durant les procès de Moscou, organisés par Staline pour éliminer ses rivaux politiques. Pour un compte-rendu historique complet de la question on peut consulter *Les Procès de Moscou : 1936-1938* de Werth [Wert 1987].

¹ Compte-rendu du KGB d'URSS sur le sort des astronomes de Pulkovo, daté du 17 mars 1989. Publié en ligne sur le site de l'Institut d'histoire des sciences et techniques de l'Académie des sciences russe : <http://www.ihst.ru/projects/sohist/document/pulkovo.htm>

Sur cette affaire nous invitons le lecteur à consulter Mccutcheon [Mccu 1991] ou encore Jukov [Juko 1999].

² Voir la fiche concernant Fock au sein de la base de données consacrée aux répressions sur les scientifiques soviétiques du site internet de l'Institut d'histoire des sciences et techniques de l'Académie des sciences russe : <http://www.ihst.ru/projects/sohist/repress/academy.htm>

On peut aussi consulter les mémoires de M. V. Fock, fils de V. A. Fock [Fock 1993].

et en informe Piotr L. Kapitsa¹ alors en sa compagnie. L'influent expérimentateur ne tarde pas à rédiger deux lettres à destination de Valeriy I. Mezhlauk, alors à la tête du Comité d'Etat pour la planification (Gosplan), et Staline en personne². Il y fait part de son incompréhension de voir « le plus remarquable théoricien d'Union soviétique » être arrêté, vante ses qualités et l'immense perte qu'il représenterait pour la physique soviétique. Quel que soit l'impact réel des lettres de Kapitsa, la suite des événements nous est racontée par un autre collègue de Fock, Sergey E. Frish :

Après plusieurs jours en détention provisoire dans une prison de Leningrad Vladimir Aleksandrovitch est envoyé sous escorte par train à Moscou. Là il est amené dans un grand bureau, où à la table est assis un petit homme avec un fin visage pâle, en uniforme militaire. Le petit homme a commencé à poser des questions sans véritable sens. Puis il a commencé à parler du fait que les scientifiques sont coupés de la vie générale, qu'ils ne savent pas qu'ils sont entourés des très nombreux ennemis de l'Union soviétique ; de combien de trahisons se produisent tous les jours ; de comment il faut être vigilant, de comment il est surprenant que des innocents soient parfois blessés accidentellement. Mais si l'erreur est constatée, elle est immédiatement corrigée. Après cela il annonce que Vladimir Aleksandrovitch est libéré³.

Fock vient d'être confronté ni plus ni moins qu'au chef suprême du NKVD (police politique), Nikolay I. Iejov, principal artisan de la mise en œuvre des Grandes Purges stalinienne. Ce dernier vient à demi-mots d'admettre devant Fock qu'une erreur a été commise. Le physicien rentre sain et sauf à Leningrad, mais comme nous l'avons évoqué, tous ne pourront malheureusement pas en dire autant.

1.2. Fock, physicien philosophe en action

Nous avons constaté au cours des chapitres deux et trois que l'intérêt de Fock pour les questions d'interprétation des théories est avant tout motivé par les questions soulevées par

¹ Si nous n'avons jusqu'à présent que peu évoqué la personne de Kapitsa notons tout de même qu'il est un personnage clé de la physique soviétique et probablement l'expérimentateur le plus respecté à l'international. Son parcours et son influence peuvent être abordés par le lecteur au travers de la publication par Boag, Rubinin et Shoenberg d'une courte biographie accompagnée de l'essentiel de sa correspondance [BoRS 1990].

² Lettres de P. Kapitsa à V. I. Mezhlauk et Staline en date du 12 février 1937 [BoRS 1990, pp. 337-339].

³ Le récit de Frish est rapporté sur la fiche concernant Fock au sein de la base de données consacrée aux répressions sur les scientifiques soviétiques sur le site internet de l'Institut d'histoire des sciences et techniques de l'Académie des sciences russe : <http://www.ihst.ru/projects/sohist/repress/academy.htm>

les difficultés relatives à la théorie quantique. Cette vision quelque peu internaliste du problème se double toutefois d'une influence du contexte non négligeable qui à notre sens joue un rôle évident de catalyseur. En effet, la progressive dégradation de l'environnement scientifique soviétique dans le courant des années 1930 pousse Fock à s'engager de façon concrète dans le débat politique et idéologique. Nous souhaitons ainsi mettre ici en avant les principales caractéristiques qui dessinent chez le physicien russe une transition entre un statut de pur scientifique vers ce que nous considérons comme une position de physicien philosophe en action. En effet, débuté en 1935-1936 avec les premières publications de Fock dans le domaine de l'interprétation de la théorie quantique (voir III.3.1), l'intérêt de Fock pour les questions épistémologiques (philosophiques) se double très rapidement d'un véritable engagement politique dans la défense des théories modernes de la physique.

1.2.1. Une personnalité directement attaquée

Parmi les éléments déclencheurs de l'intervention de Fock dans le débat philosophique et politique en URSS on trouve notamment un échange, initialement scientifique, dans les colonnes de la principale revue de physique d'Union soviétique, *Uspekhi Fizicheskikh Nauk* (Les progrès des sciences physiques). Konstantin V. Nikol'skiy, professeur à l'Institut Lebedev de physique à Moscou, publie en 1936 un article où la mécanique quantique est approchée comme une pure théorie statistique [Niko 1936]¹. Nous reviendrons plus en détail sur les implications d'une approche statistique du problème dans le chapitre suivant (VII.2.2.2), mais signalons qu'elle appuie l'idée que la mécanique quantique ne peut pas traiter des objets quantiques individuellement. Fock, dans une démarche scientifique, mais aussi dans la continuité de son récent intérêt pour les questions d'interprétation, réagit à l'article de Nikol'skiy et fait publier dans cette même revue une critique soutenant un point de vue plus traditionnel sur la théorie :

A reader of Nikol'skiy's article might get an impression that quantum mechanics is merely a form of statistics. But the fundamental achievement of modern physics is that it learned to observe elementary physical processes, individual particles [...] The language of quantum mechanics allows the description of an individual measurement. Even though the predictions

¹¹ Plus sur Nikol'skiy et son interprétation, ainsi que des éléments sur son opposition à Fock, chez Kojevnikov [Koj 2012, pp. 216-218].

of quantum mechanics are usually statistical [...] it cannot be reduced to statistics [Fock 1937c, p. 554]¹.

Uspekhi fizicheskikh nauk fait alors directement accompagner le commentaire de Fock par une réponse de Nikol'skiy en personne [Niko 1937]. Alors que la critique du premier nommé respecte les usages du travail scientifique, le second utilise les méthodes des idéologues du Parti :

Au-delà du fait que la conception de la mécanique quantique, développée par Bohr, est totalement incompatible avec les orientations progressistes de la physique théorique, elle est constamment accompagnée d'idéalisme, à la façon de Mach. Cette conception est très persistante et systématiquement protégée ici par M. P. Bronstein (Leningrad), L. D. Landau (Kharkov), I. E. Tamm (Moscou) and V. A. Fock (Leningrad) [p. 555].

Nicol'skiy fait clairement le choix de déplacer le débat du terrain scientifique vers le terrain idéologique. Dans ses développements il valorise ainsi son point de vue comme étant le plus à même de donner une vision matérialiste et objective du monde, contestant dans le même temps la capacité de l'interprétation de Copenhague d'aller dans ce sens.

En contraste, nous savons qu'en dépit de l'influence que la philosophie du matérialisme dialectique ait pu avoir sur les développements de la pensée de Fock, et notamment sur ses articles dès 1935-1936, Fock n'y fait jusque-là aucune référence directe et se contente dans ses productions scientifiques d'exposer tout au plus quelques principes épistémologiques de base. La forme de la réponse de Nikol'skiy, qui l'attaque frontalement pour son prétendu positivisme, dans un journal aussi sérieux que *Uspekhi fizicheskikh nauk* semble alors totalement le surprendre. Dans une réponse publiée en 1938 [Fock 1938a] il explique qu'il ne peut admettre que Nikol'skiy déplace le débat sur le terrain idéologique et lui reproche de dévaloriser subitement une théorie qu'il utilisait pourtant jusque-là :

Cette substitution inattendue du sujet, couplée à une volte-face de sa position, peut difficilement être vue comme une réponse à la critique. Comme Nikol'skiy se contredit lui-même, il n'est pas possible d'argumenter avec lui sur ce point : un débat raisonnable n'est possible qu'entre des adversaires qui reconnaissent les règles normales de la logique [p. 139].

¹ Traduit du russe vers l'anglais par Kojevnikov. *Ibid* [p. 217].

Le physicien soviétique refuse donc dans un premier temps le débat car il fait face à une situation totalement inattendue. S'ajoute alors à celle-ci la multiplication des affaires de police, mais aussi des attaques pour une affaire vieille de trois ans. En effet, en 1934, Fock avait publié dans *Sorena* une recension intitulée « Za podlinno nauchnyu sovetskuyu knigu » (Pour un véritable livre scientifique soviétique) [Fock 1934b] critiquant le faible niveau scientifique d'ouvrages de Mitkevich et Timiryazev, personnage que nous avons évoqués dans nos développements sur le courant philosophique des « mécanistes » (V.3.2). Fock souhaite s'élever contre « la mise en œuvre de vues obsolètes et le déni des nouvelles conquêtes de la science dans des livres destinées à de larges cercles de lecteurs mal préparés, et surtout dans les manuels pour les écoles secondaires » [p. 133]. Il prend alors pour exemple *Fizicheskiye osnovy elektrotekhniki* (Fondements physiques de l'électrotechnique) de Mitkevich [Mitk 1933] et *Vvedeniye v teoreticheskuyu fiziku* (Introduction à la physique théorique) de Timiryazev [Timi 1933], deux scientifiques dont les positions réactionnaires vis-à-vis des théories de la relativité et de la mécanique quantique sont alors bien connues. Mais en avril 1937, le journaliste de *Noviy Mir* (Nouveau monde) V. E. Lvov revient sur cette recension, et prenant vraisemblablement appui sur l'arrestation de Fock au début de l'année attaque le physicien le qualifiant de « scientifique obscurantiste nostalgique des méthodes de Hitler ». L'attaque est extrêmement violente et Lvov condamne Fock pour son attitude « clairement fasciste » vis-à-vis de Mitkevich¹

1.2.2. Une confrontation directe avec les autorités

Le physicien de Léninegrad, pris sous plusieurs feux, ne semble plus avoir d'autre choix que de défendre sa personne et de s'engager concrètement dans le débat. En dépit de sa récente arrestation, il choisit la confrontation directe avec les autorités politiques afin de se défendre face à l'attaque de Lvov². C'est notamment le cas au travers d'une lettre adressée au procureur public de Léninegrad où il demande des poursuites contre Lvov pour calomnie et

¹ Cité par Gorelik [Gore 1990, p. 101]. L'article de Gorelik est une source précieuse pour saisir l'atmosphère particulière au sein de la communauté des physiciens soviétiques en 1937.

² Sur les points développés dans cette sous partie soulignons la pertinence des travaux de Gorelik [Gore 1990], Josephson [Jose 1991, pp. 250-263] Vizgin [Vizg 1999, pp. 1264-1266] et Sonin [Soni 2017, pp. 68-99] dont nous reprenons un certain nombre de points.

diffamation. Dans cette lettre Fock se montre relativement ironique face aux accusations d’être un sympathisant fasciste, s’appuyant directement sur sa mésaventure avec le NKVD :

Quant à savoir si je suis un fasciste ou non il semble préférable de se fier à un membre du Bureau politique, le camarade N. I. Iejov, qui m’a fait venir à lui à Moscou le 15 février 1937 pour une rencontre personnelle et qui dans un échange mémorable pour moi, m’a dit qu’il n’y avait aucune objection à mon élection à l’Académie des sciences comme membre à part entière¹.

Une seconde lettre est ensuite adressée au Comité central du Parti communiste en juillet 1937². Elle décrit les énormes dégâts faits à la science soviétique par les écrits ignorants et agressif en physique et philosophie de V. E. Lvov. Cependant cette lettre possède aussi une dimension nettement moins personnelle : « Lvov ose dire que le combat de l’Académicien Mitkevich contre la physique moderne se satisfait du soutien idéologique du Parti communiste ». Fock fait ici écho à de plus larges préoccupations concernant la physique soviétique et dont Mitkevich est une figure centrale. En effet, après l’échec de la Session de mars 1936, ce dernier souhaite organiser une nouvelle « session philosophique ». En janvier 1937 il écrit à N. P. Gorbunov et G. M. Krzhizhanovskiy, responsables de l’Académie des sciences, et argumente en faveur d’une session concernant « les principales idées naturo-philosophiques de la physique moderne »³ mais aussi « la lutte pour les fondations matérialistes de la physique et contre l’idéalisme physique »⁴. Tamm, Fock et Frenkel sont accusés de défendre l’idéalisme physique, alors que Ioffé et Vavilov conspirent avec eux.

Gorbunov accepte la requête et ordonne la préparation d’une session dont Mitkevich doit être le principal orateur et dont Maksimov est en charge du comité d’organisation. Dans sa correspondance avec Gorbunov, Mitkevich exige même de Ioffé et Vavilov des réponses explicites à ses propres questions sur les actions à longue et courte distance en physique moderne. Une nouvelle fois, Gorbunov accepte. Or la contre-attaque s’organise en parallèle, et la revue *Pod znamenem marksisma* devient le cœur d’une vaste dispute qui implique la majorité des acteurs suscités. Tour à tour les auteurs essaient de discréditer ou soutenir la

¹ Cité par Gorelik [Gore 1990, p. 101]. Voir aussi <http://www.ihst.ru/projects/sohist/repress/academy.htm>

² *Ibid.*

³ Cité par Vizgin [Vizg 1999, p. 1264].

⁴ Cité par Gorelik [Gore 1993, p. 312].

personnalité de Mitkevich¹. Dans le lot, un article de Maksimov en faveur de ce dernier reçoit l'approbation explicite de Krzhizhanovskiy, alors vice-président de l'Académie :

In general, I consider this article to be absolutely correct; had I been writing it myself, though, I would have further toned down the first part, where Mitkevich's mistakes are criticized, and enhanced the second, directed against Fock, Tamm, Frenkel and Company².

Cependant, malgré ce soutien de poids, la conférence n'aura pas lieu, et une nouvelle lettre de Fock en est potentiellement la cause³. Cette longue lettre du 13 février 1938 est adressée au Présidium de l'Académie des sciences⁴. Fock va droit au but, exprime ses doutes sur les efforts de Mitkevich et insiste sur la nécessité d'annuler la session philosophique de l'Académie dédiée à la physique. Certes, comme en 1936 il exprime son souhait de pouvoir participer à de bonnes discussions philosophiques sur la nouvelle physique avec pour base le matérialisme dialectique, mais en l'état des choses, avec des personnages comme Mitkevich et Maksimov, les conditions nécessaires à la tenue d'un débat de niveau respectable ne sont pas réunies. Les déclarations de Fock sont par ailleurs un véritable camouflet à leur rencontre :

En réalité, quand je prends connaissance des articles de ceux qui attaquent la physique moderne au nom de la philosophie soviétique je ne trouve rien correspondant aux véritables problèmes de la philosophie soviétique : le développement d'une conception cohérente matérialiste de nouvelle physique et la lutte contre la perversion idéaliste des théories physiques.

Au contraire, je suis convaincu qu'ils ne contiennent pas d'arguments de nature scientifique ou philosophique et se compose en partie de violence gratuite (lâcheté, mensonge etc...), et d'autre part une forme de surexposition de concepts substitués et autres méthodes qui n'ont rien à voir avec la controverse scientifique⁵.

¹ Voir Vizgin qui recense les différents points de vue [Vizg 1999, pp. 1264-1265].

² Lettre de Krzhizhanovskiy au comité de rédaction de *Pod znamenem marksizma*. Cité par Vizgin [Vizg 1999, p. 1265]

³ Vizgin est très affirmatif à ce sujet [Vizg 1999, p. 1265]. Mais pour Josephson, l'action est davantage collective : « More likely, the absence of complete support from philosophers, combined with nearly universal condemnation from the side of physicists, did the trick » [Jose 1991, p. 263].

⁴ Des morceaux choisis de cette lettre sont reproduit par Gorelik [Gore 1990, pp. 100-101] et Sonin [Soni 2017, p. 78].

⁵ *Ibid* [p. 100]

Les lettres de Fock aux autorités jusqu'ici présentées se caractérisent par une grande liberté de parole, et ce malgré son arrestation du début de l'année 1937. Le physicien manifeste une forme d'audace, un caractère sans peur, qui s'exprime au cœur même de la Grande Terreur, et on lui attribue même d'avoir conclu un exposé sur le thème des probabilités par les mots suivants : « La lâcheté n'affecte pas la probabilité d'être emprisonné »¹. Fock se montre par ailleurs actif en ce qui concerne la défense de certains de ses collègues alors réprimés à cette époque. Aussitôt informé de l'arrestation de Bronstein en août 1937, Fock se rend personnellement chez son jeune collègue pour s'informer de la situation actuelle. Plus tard, en mars 1939, avec le soutien de Vavilov, Mandelstam et Tamm, il envoie une lettre à A. Vyshinsky, procureur général d'Union soviétique, soutenant la demande de l'épouse de Bronstein en vue de la révision du cas judiciaire de son époux. Malheureusement, nul ne sait alors que Bronstein, prétendument condamné à dix ans de travaux forcés, a été exécuté le 18 février 1938².

Ce sont en réalité plusieurs lettres manuscrites de la main de Fock, destinées aux autorités compétentes, et ayant pour objet la réhabilitation de différents collègues, qui se trouvent dans les archives personnelles du physicien russe³. C'est le cas d'une lettre du 28 février 1939⁴ à destination du président de la Cour suprême, I. T. Golyakov, demandant la révision des cas de Frederiks et Krutkov, arrêtés à la fin de l'année 1936, mais aussi de P. I. Lukirskiy, professeur à l'Université de Leningrad, arrêté au début de l'année 1938. Le 9 juin 1946, un brouillon de lettre dont le destinataire est inconnu, écrite par Fock et co-signée par l'académicien V. Smirnov, appelle à la réhabilitation de Krutkov, toujours sous le coup d'une condamnation à 10 ans de travaux forcés. Plus tard, le 16 février 1947, dans un manuscrit qui lui aussi n'a pas

¹ Cité dans le compte-rendu concernant Fock relatif à la répression scientifique au cours de la Grande Terreur. Projet conduit par l'Institut d'histoire des sciences et techniques de l'Académie des sciences russe et publié en ligne sur leur site :

<http://www.ihst.ru/projects/sohist/repress/academy.htm>

² Sur l'arrestation de Bronstein, le combat de son épouse, et la lettre de Fock voir Gorelik et Frenkel [GoFr 1994, pp. 140-141].

³ ARAN SPb, 1034-2-123.

⁴ Le manuscrit, écrit de la main de Fock, est daté du 28 février 1939 et fait mention comme signataires de N. Muskhelishvili, Vavilov, Krylov, Fock, Kapitza et Ioffé. En revanche une version dactylographiée ne laisse plus apparaître que les noms de Muskhelishvili, Fock et V. Pavlov.

de destinataire clairement identifiable, Fock appelle à ce que Kapitsa, qui a été démis de ses fonctions de directeur de l'Institut des problèmes physiques de Moscou¹, reprenne son poste. Le 29 juin 1954, auprès de Malenkov en personne – président du Conseil des ministres – il s'étonne de la mauvaise gestion de ce même Institut, valorisant *a contrario* l'inestimable travail de Kapitsa qui est alors toujours écarté de sa direction.

L'engagement de Fock dans le débat politique passe donc par une claire confrontation avec les autorités politiques dans le but de préserver ses intérêts et ceux de ses collègues. Cependant, comme nous allons le discuter maintenant, il n'en oublie pas pour autant l'importance du débat public et la nécessité croissante de défendre les théories de la physique modernes face aux incessantes attaques qu'elle subissent d'un point de vue philosophique. Il va alors accepter de faire une concession importante par rapport à ses habitudes de physicien. Alors qu'il procédait jusqu'à présent en s'appuyant sur des concepts épistémologiques idéologiquement neutres, Fock va enfin se revendiquer clairement du matérialisme dialectique.

1.2.3. Compatibilité des théories modernes avec le matérialisme dialectique

Nous l'avons discuté au chapitre précédent (V.2), Fock adhère au matérialisme dialectique, et ce cadre philosophique joue un rôle dans son interprétation de la mécanique quantique et de la relativité générale. En effet, il conditionne les principes épistémologiques qu'il applique dans sa pratique scientifique et qui l'aident à prendre du recul sur sa discipline. Si le matérialisme dialectique est avant tout un outil utile « pour approcher critiquelement » les interprétations jugées orthodoxes et « comprendre correctement, et interpréter les nouveaux résultats [qu'il a] obtenus », comme l'indique sa monographie sur la relativité [Fock 1955a', p. 8], nous le savons, Fock ne remet jamais en question le formalisme mathématique des théories. Il n'est ainsi pas étonnant qu'il estime que les avancées les plus essentielles des « physiciens bourgeois » peuvent se distinguer de leurs points de vue philosophiques [Fock 1938b, p. 155]. Et à son sens, pour empêcher les croyances idéalistes de faire croire que les théories modernes sont incompatibles avec le matérialisme dialectique, il faut simplement se tourner vers l'éclairage apporté par les écrits de Lénine. Car si l'idéalisme doit être combattu, Fock croit aussi à la fin des années 1930 qu'il est de sa responsabilité de mettre en évidence la compatibilité des théories modernes de la physique avec le matérialisme dialectique. En

¹ Sur le parcours de Kapitsa voir Boag, Rubinin et Shoenberg [BoRS 1990].

effet, il pense que « les physiciens doivent eux-mêmes prendre l'initiative » [Fock 1938b, p. 155] face à des philosophes qui font preuve d'une incapacité certaine dans ce domaine. Dans les mots de Graham : « Fock expressed the hope that Soviet philosophers would defend modern physics from the standpoint of Marxism, but he knew that by 1938 most of the Marxist philosophers had been replaced by Stalinists who did not understand science » [Graham 1982, p. 121].

Dans ce but, alors que Fock n'avait jusque-là publié que dans des revues scientifiques plus ou moins généralistes, l'atmosphère de la fin des années 1930 le contraint à reconsidérer sa stratégie de publication et à se tourner vers des journaux touchant un public plus large. Une lettre de Maksimov à Fock du 1^{er} juillet 1937 nous donne des indications à ce propos¹. Maksimov est alors éditeur en chef de la revue *Pod Znamenem Marksisma*, et il commente ici un article intitulé « Fizika u nas i na zapade » (La physique chez nous et à l'ouest) que Fock semble vouloir soumettre à la *Pravda*, le principal quotidien soviétique. On observe que dans sa réponse Maksimov encourage Fock à publier dans la presse généraliste ou dans *Pod Znamenem Marksisma*, afin de dénoncer les « vues idéalistes que prônent d'éminents scientifiques » ou pour parler « des principaux problèmes théoriques de la physique moderne ». Une lettre officielle de la revue philosophique renforce cette invitation et sollicite auprès de Fock l'écriture d'une étude sur les « problèmes de mécanique quantique ». Ce dernier accepte en proposant un article intitulé « Protivorechit li kvantovaya mekhanika materyalizmu? » (La mécanique quantique contredit elle le matérialisme ?)². La correspondance avec le comité de rédaction nous renseigne de façon plus spécifique sur la nature du débat auquel Fock souhaite participer. Dans une lettre du 21 octobre 1937 le journal explique :

En réponse à votre lettre ; dans laquelle vous vous engagez à écrire un article pour *Pod znamenem Marksisma*, la rédaction indique qu'elle accepte votre proposition.

Quoi que concerne le titre et le contenu de l'article, il vous est demandé d'honorer ce qui suit :
Dans le journal Sous la bannière du marxisme nous ne nous posons pas la question de savoir si la mécanique quantique contredit le matérialisme mais si le matérialisme est contredit par

¹ Lettre de Maksimov à Fock en date du 1^{er} juillet 1937 - ARAN SPb 1034-3-532.

² Lettre de Fock à la rédaction de *Pod znamenem Marksisma*, datée du 17 octobre 1937 - ARAN SPb 1034-2-216.

les conclusions philosophiques, données pour la mécanique quantique par les physiciens soviétiques et étrangers, visés par A. A. Maksimov dans son article du numéro 7 du journal, c'est le premier point. Deuxièmement – la rédaction attendait que vous donniez une réponse à l'argument développé par K. V. Nikol'skiy dans le N°4 de la revue *Uspekhi fizicheskikh nauk* de l'année 1937¹.

Dans sa réponse, Fock affine alors son idée de départ :

1. Au sujet de la mécanique quantique je veux dire mécanique quantique dans sa compréhension bohrienne. Il me semble, que nous parlons de savoir si la compréhension bohrienne de la mécanique quantique est en contradiction avec le matérialisme. Quoiqu'il en soit, je vais écrire exactement sur ce sujet.
2. Une réponse à Nikol'skiy sur ses propos dans le N°4 de *Uspekhi fizicheskikh nauk* a été envoyée en août 1937 à la rédaction de « Uspekhi » pour publication. Au sujet de la polémique avec Nikol'skiy je la refuse pour raisons personnelles dans cette réponse. Etant donnée toutefois que Nikol'skiy attaque Bohr, une réponse indirecte se trouvera dans mon article².

Cette réponse nous invite à un commentaire sur la nature des débats soviétiques concernant la mécanique quantique. Car en dépit d'une certaine forme de virulence, chez les mécanistes comme Mitkevich et Timiryazev par exemple, ce n'est pas tant le statut de la mécanique quantique en elle-même qui fait l'objet de la majorité des disputes, que celui de son interprétation. Comme le souligne Kojevnikov dans son investigation sur les approches statistiques de la théorie en URSS, le constat que nous avons énoncé à propos de Fock faisant la part des choses entre le formalisme d'une théorie et son interprétation est ici généralisé : « the Soviet ideological discourse insisted on distinguishing between physical theory and its philosophical interpretations: it strongly supported quantum mechanics, while encouraging the critique of its non-Marxist interpretations » [Kojevnikov 2012]. Car comme en témoigne la carrière de Fock, mais aussi les travaux de ses collègues théoriciens comme Landau, Tamm ou encore Frenkel, la mécanique quantique est une théorie bien acceptée dans le paysage scientifique soviétique, un outil tout aussi largement employé qu'enseigné. Ainsi, comme

¹ Lettre de la rédaction de *Pod znamenem Marksizma* à Fock, datée du 21 octobre 1937 - ARAN SPb 1034-2-216.

² Lettre de Fock à la rédaction de *Pod znamenem Marksizma*, datée du 24 octobre 1937. ARAN SPb 1034-2-216.

l'illustre la dispute de Fock avec Nikol'skiy, mais aussi comme nous le discuterons plus tard avec Blokhintsev (VII.2.2.2) , le cœur du débat porte bien sur l'interprétation de la théorie. C'est pourquoi en 1937 Fock cherche inévitablement à établir pourquoi la « compréhension bohrienne » de la mécanique quantique, et non pas la théorie elle-même, est en accord avec le matérialisme. À cette époque, répondre de façon méthodique aux attaques des mécanistes ne fait pas sens pour lui, et il juge nécessaire d'élever le niveau du débat.

Le manuscrit de son article, daté de novembre 1937, est découpé en cinq parties plus une conclusion¹. Le thème général y est bien évidemment celui affirmé à la rédaction du journal dans sa lettre du 24 octobre, à savoir la défense d'une possible approche matérialiste de l'interprétation de Copenhague de la théorie quantique. Les quatre premières parties s'intitulent « Nécessité de la mise en scène de la question donnée »², « Lenteur du processus de reconnaissance de la mécanique quantique », « Contenu physique du principe de complémentarité et son lien indéfectible avec la mécanique quantique » et enfin « Nécessité de la lutte contre la thèse idéaliste d'une contradiction entre le principe de complémentarité et le matérialisme ». Notons que dans cette dernière partie Fock développe l'opposition conceptuelle existant entre Bohr et Einstein.

Mais dans le contexte politique soviétique, c'est la cinquième et dernière partie qui nous intéresse particulièrement. Celle-ci est intitulée « Sur l'article d'A. A. Maksimov et sur les applications de ses méthodes polémiques ». De façon assez inattendue, Fock attaque frontalement le rédacteur en chef de la revue dans laquelle il s'apprête à publier, celui-là même qui l'avait incité à composer un article sur la physique moderne quelques mois plus tôt. L'article de Maksimov attaqué par Fock n'est autre que celui en soutien de Mitkevich, valorisé par Krzhizhanovskiy, et dont nous avons juste auparavant discuté l'intérêt dans l'optique de l'organisation d'une session philosophique par l'Académie des sciences en 1938³. Fock argumente alors sur l'incapacité de Maksimov à traiter des questions de la physique moderne. Mais ce dernier n'est pas l'unique personnage concerné par la critique de Fock, et sur un domaine qui inclut maintenant largement la relativité générale, Lvov, Mitkevich, Kasterin mais

¹ ARAN SPb, 1034-1-361 – La structure reste identique dans la version publiée.

² Cette partie devient « La mécanique quantique contredit elle le matérialisme ? » dans la version publiée.

³ L'article de Maksimov s'intitule « O filosofskikh vozzreniyakh akad. Mitkevicha i o putyakh razvitiya sovetskoy fiziki » (Sur les vues philosophiques de l'Académicien Mitkevich et sur les moyens de développements de la physique soviétique) et est publié dans le N°7 de l'année 1937 de *Pod znamenem marksizma*.

aussi Timiryazev sont directement attaqués. Ces trois derniers se voient même comparés dans leur approche à celle des leaders de la physique « arienne », J. Stark, P. Lenard et E. Gehrcke¹. Fock dépasse le cadre du pur débat sur l'interprétation de la mécanique quantique, et donne à son article une signification toute particulière dans le contexte qui est le sien.

Dans ces conditions, on pourrait s'attendre à ce que le comité d'édition de *Pod znamenem marksizma* le rejette. Et pourtant, il est publié en 1938 sous le titre « K diskussii po voprosam fiziki » (Au sujet des discussions sur les problèmes de la physique) [Fock 1938b]. C'est un véritable succès pour le physicien car il marque concrètement la poursuite du combat politique qu'il a entamé auprès des autorités, et en conservant sa liberté de parole, il le transpose avec succès à l'espace public. Indéniablement son autorité scientifique en ressort grandie et l'article dédouble l'impact de sa lettre du 13 février 1938 adressée au Présidium de l'Académie des sciences² pour contrer les initiatives de Mitkevich. Plus encore, en développant une réponse explicite aux débats sur l'interprétation de la mécanique quantique, Fock renforce son argumentaire face à ses opposants politiques, car il peut se targuer d'être le plus à même à démontrer que les théories modernes de la physique ne contredisent pas le matérialisme dialectique et qu'elles en sont même des confirmations. Alors, si l'idéalisme doit être combattu il en va de même de l'ignorance de nombre de philosophes marxistes et physiciens réactionnaires qui se montrent incapables de saisir le sens véritable de la nouvelle physique. Fock vient ainsi de signer un remarquable article où sa pensée philosophique rejoint ses intérêts politiques dans un but commun, celui de perpétuer la pratique d'une physique théorique de haut niveau en URSS. On constate alors qu'à l'avenir les publications dans *Pod znamenem marksizma* – qui deviendra *Voprosy filosofii* après-guerre –, vont se faire assez régulières chez Fock, ce dernier ayant saisi la nécessité de diversifier la nature de son discours.

¹ Pendant le régime nazi, ils essaient de promouvoir une « physique aryenne » en opposition avec une « physique juive ». Einstein incarnant à leurs yeux cette dernière ils se montrent particulièrement critiques des théories modernes de la physique dont il est un contributeur de premier plan. Pour plus d'informations voir Walker [Walk 2001].

² Des morceaux choisis de cette lettre sont reproduit par Gorelik [Gore 1990, pp. 100-101] et Sonin [Soni 2017, p. 78].

1.3. Conclusion intermédiaire

La défaite de Mitkevich en 1938 ne marque pas pour autant la fin des tensions. Entre 1938 et 1940, les mêmes groupes continuent de s'attaquer par publications interposées¹ et le fossé entre les physiciens théoriciens et le reste de la communauté, soutenu par les philosophes, ne cesse de se creuser. Une partition qui est déjà fortement marquée par Maksimov en 1938 :

As a rule, the proclivity for Machism, typical of a certain stratum of Soviet physicists, leads to loss of touch between theory and practice. While the majority of Soviet physicists work hard and do their best to fulfil Stalin's five-year plans, some 'theoretical' physicists train personnel who prove unable to handle practical issues since they do not have proper knowledge of classical mechanics and electrodynamics; they were taught to scorn practical work and practical physicists².

Mais en dépit du front tant philosophique que politique qui s'est élevé face à la communauté des théoriciens durant les années 1930, ces derniers se sont montrés capables de faire preuve de suffisamment de solidarité pour gérer toutes situations de crise et perpétuer la pratique d'une physique théorique et d'un enseignement de haut-niveau en Union soviétique.

La popularité des divers acteurs ici en jeu, ayant une bonne compréhension de la physique moderne, faisant un travail de classe internationale et se trouvant à la tête des principales institutions et écoles scientifiques d'URSS, comme Ioffé, Rozhdestvenskiy, Mandelstam ou encore Vavilov, accompagnés d'une brillante jeune génération menée par Fock, Tamm ou Frenkel, leur permet de garder une certaine influence sur les autorités. De plus, lorsqu'ils s'unissent pour soutenir la mécanique quantique et la relativité générale ils n'hésitent pas à le faire du point de vue du matérialisme dialectique. Comme avancé par Vizgin, notons que cette stratégie n'est pas le propre de Fock ; elle est aussi utilisée par des personnalités comme

¹ Vizgin nous donne quelques titres évocateurs des attaques contre la physique moderne publiés dans *Pod znamenem marksizma* comme « La renaissance de la mode pythagoricienne en physique moderne » (Kolman, 1938), « Vues modernes de la physique sur la matière et le mouvement dans le matérialisme dialectique » (Maksimov, 1939), « Sur l'actuel combat du matérialisme contre l'idéalisme » (Mitkevich, 1938) ou encore « Encore une fois sur la vague de l'idéalisme dans la physique contemporaine » (Timiryazev, 1938) [Vizg 1999, note 13, p. 1266].

² Maksimov dans les colonnes de *Pod znamenem marksizma* en 1938. Cité et traduit dans Vizgin [Vizg 1999, p. 1266].

loffé, Vavilov et même Frenkel, pour épargner les théories de toutes contestations philosophiques [Vizg 1999, p. 1265].

Mais dans ce contexte général, Fock joue tout de même un rôle tout particulier, car en vertu du constat que nous avons dressé dans le précédent chapitre, il apparaît comme le plus à même, par sa grande maîtrise des théories modernes de la physique combinée à sa connaissance des tenants et aboutissants épistémologiques de la philosophie marxiste, à défendre ce qu'il estime être une véritable interprétation matérialiste dialectique des théories modernes de la physique. Ainsi, la stratégie, au sens de Vizgin, employée par Fock, n'est pas un artifice et c'est cette double compétence scientifique et philosophique qui lui donne aussi la légitimité pour s'adresser aux autorités et attaquer directement l'incompétence des philosophes marxistes et physiciens réactionnaires. Nous l'avons constaté, incité initialement par des questionnements intrinsèques à sa discipline, en particulier en mécanique quantique, Fock saisit au milieu des années 1930 l'intérêt d'une approche épistémologique de la physique moderne. Mais lorsque le débat philosophique dépasse ce cadre strictement scientifique et devient un enjeu politique, il devient un physicien philosophe engagé qui n'hésite pas à s'investir dans le débat public. Bien évidemment, il conservera cette attitude après-guerre lorsqu'il sera à nouveau nécessaire d'intervenir.

2. Défense des théories modernes - Après-guerre

Durant la Seconde Guerre mondiale, lorsque débute le blocus de Leningrad le 8 septembre 1941, Fock est toujours en ville après avoir refusé de prendre part aux premières vagues d'évacuation des scientifiques en juillet et en août¹. Il organise à l'aide de collaborateurs, dont Veselov et Petrashen, le calcul de tables de tir pour l'artillerie et participe à diverses activités en lien avec la défense. Ce n'est que dans le courant de l'automne qu'il est évacué par les airs avec sa famille suite à une résolution gouvernementale. Ces activités lui vaudront alors d'être décoré en 1944 de la médaille « Za oboronu Leningrada » (Pour la défense de Leningrad). Par la suite, jusqu'à l'automne 1943 il travaille au sein d'une filiale de l'Université de Leningrad à Ielabouga, petite ville du Tatarstan, avant de rejoindre Moscou.

¹ Pour plus d'informations sur le parcours et les activités de Fock pendant la guerre on peut consulter Smirnov & Vreden-Kovetskoj [SmVr 1956, p.7], et surtout Vladimirova [Vlad 2012, p. 146-166].

Les travaux de Fock durant cette période quittent le domaine des théories modernes de la physique pour se tourner vers celui l'appliqué avec la théorie de la diffraction, la réfraction et la réflexion des ondes radio¹. La nature de ces travaux témoigne de la mobilisation des forces scientifiques durant la Seconde Guerre mondiale en vue du combat mené contre l'Allemagne nazie. Dans le même temps les tensions politiques et débats philosophiques s'estompent naturellement ; les préoccupations principales sont ailleurs. La communauté scientifique sort par ailleurs grandie de cette guerre pour laquelle la bureaucratie soviétique a reconnu l'importance vitale de la science, donnant aux scientifiques de nouvelles responsabilités². Le mouvement se poursuit après-guerre et la physique prend une place privilégiée, en particulier avec la nouvelle problématique des armes atomiques. Comme nous allons l'observer, lorsque les tensions d'avant-guerre dans la communauté scientifique refont leur apparition après 1945, ce nouveau rapport de force se met en place. La présente partie se propose ainsi de questionner la place de Fock au cœur des attaques politiques et philosophiques d'après-guerre, qui ont la particularité de voir s'affirmer une forme de division du monde en deux camps avec la Guerre Froide. Notons alors pour mieux saisir le rôle du physicien dans son contexte que Fock poursuit son engagement de la fin des années 1930 en vue de la correcte formulation des théories de la physique moderne et que cette activité devient en réalité son occupation principale jusqu'à la fin de sa vie.

2.1. La science en danger : la doctrine Jdanov

Les querelles entre scientifiques et idéologues du Parti reprennent dès 1946, au travers d'une série de campagnes idéologiques menées dans divers domaines³. Les mots suivants du Comité central du Parti communiste, utilisés en aphorisme par Kremmentsov dans *Stalinist Science*, résument la situation : « The most important task of the party is the reeducation of the Soviet intelligentsia in a spirit of Soviet patriotism and devotion to the interest of the

¹ Une large partie de ces travaux, publié en russe dans les années après-guerre, ont été traduits et publiés en 1987 en anglais [Fock 1987].

² Voir les développements de Kremmentsov sur la période de la Grande Guerre patriotique dans *Stalinist Science* [Krem 1997, pp. 96-128].

³ Pour un point de vue général sur ces campagnes idéologiques et leur impact, nous invitons le lecteur à consulter Pollock [Poll 2006], Kremmentsov [Krem 1997, pp. 129-190] mais aussi Kojevnikov [Koj 2004, pp. 186-216]. Ce sont les principales sources qui nous accompagnent dans cette sous-partie.

Soviet state »¹. L'un des personnages clés de ce processus est Andrei Jdanov, troisième secrétaire du Parti communiste. Il donne son nom à la doctrine, le jdanovisme, qui en réaction à celle de Truman aux Etats-Unis affirme la division du monde en deux camps². Les campagnes idéologiques et nationalistes soviétiques poursuivent le but d'affirmer l'existence d'une science dite marxiste-léniniste, ou plus simplement soviétique, en opposition à une science dite de l'Ouest. Dès l'été 1946, Jdanov est l'auteur de différents décrets qui dénoncent l'influence de la culture « bourgeoise » sur le monde soviétique. À l'automne, des activistes s'emparent du sujet et organisent des réunions pour discuter les conclusions à tirer de ses résolutions. Le jdanovisme se répand alors, marquant une rupture avec l'internationalisme connu durant la guerre, et un retour à l'isolationnisme des années 1930.

La doctrine Jdanov fait son irruption dans le monde de la philosophie au printemps 1947, lorsque le Comité central du Parti communiste organise une série de discussions au sujet de l'ouvrage de l'Académicien Georgiy F. Aleksandrov, *Istoriya zapadnoyevropeyskoy filosofii* (Histoire de la philosophie d'Europe de l'ouest)³. Bien qu'Aleksandrov soit à la tête du principal organe de diffusion des idées du marxisme-léninisme en URSS, l'Agitprop (département pour l'agitation et la propagande), il est accusé dans ce livre de traiter la philosophie ouest-européenne de façon trop apolitique et non-idéologique. Le 24 juin 1947, Jdanov en personne prononce alors un discours qui au-delà de la critique d'Aleksandrov réaffirme pour la philosophie les exigences du jdanovisme, et notamment celle d'une pratique militante face à l'idéalisme de l'Ouest. Mais plus encore, c'est la perspective politique des débats philosophiques entrevue durant l'entre-deux-guerres qui se poursuit. Face à la science qui voit son importance politique croître après-guerre et en prétextant une confrontation avec l'Ouest, l'objectif premier de la campagne en philosophie est le suivant : « to reestablish the ideological primacy and authority of the party apparatus that had loosened during the war » [Krem 1997, p. 130]⁴.

¹ Comité central du Parti communiste - 16 juillet 1947. Cité et traduit en anglais par Kremensov [Krem 1997, p. 129].

² Sur le jdanovisme on peut consulter Ra'anani [Ra'a 1983] ou encore Fitzpatrick [Fitz 1992].

³ Les événements de la campagne idéologique en philosophie sont particulièrement bien détaillés par Pollock [Poll 2006, pp. 15-40].

⁴ Kojevnikov met aussi l'accent sur cette dimension politique des débats [Koj 2004, pp. 214-216].

Dans la foulée, les campagnes idéologiques s'étendent à d'autres domaines, et lorsqu'il s'agit de lister leurs victoires, les communistes en comptent cinq majeures : en philosophie (1947), en biologie (1948), en linguistique (1950), en physiologie (1950) et en économie (1951)¹. L'épisode en biologie est probablement l'un des plus connus de la science soviétique, notamment au travers du personnage de Lyssenko et la mainmise de celui-ci sur son domaine dans la foulée de la session d'août 1948 de l'Académie des sciences agronomiques². Celle-ci consacre une vision de la biologie qui condamne fermement la traditionnelle génétique mendélienne jugée idéaliste. Dans les mois qui suivent, l'enseignement et la recherche menés de façon officielle sur cette dernière disparaissent totalement d'URSS. Les adversaires sont écartés et si nécessaire réprimés. Sous le nom de lyssenkisme se profile alors une caricature bien réelle de tous les excès dogmatiques et politiques du système scientifique stalinien.

2.2. Physique et biologie, même combat ?

Les conséquences pour la biologie des campagnes idéologiques du jdanovisme sont dramatiques. Mais pour la discipline qui nous intéresse, comme nous l'avons vu, dans la liste des victoires obtenues par les autorités communistes nulle mention de la physique n'est faite. Pour autant cela ne signifie pas qu'elle n'est pas menacée. Elle connaît seulement une issue différente dont nous allons maintenant décrire la trajectoire³ en mettant en avant le rôle joué par Fock dans la protection de sa discipline. Tout débute avec le discours du 24 juin 1947 de Jdanov qui fait juste assez allusion à la physique pour conditionner l'organisation d'une possible campagne idéologique à son encontre. En effet, l'homme politique déclare :

Not understanding the dialectical path of cognition, the mutual relation of absolute and relative truth, many followers of Einstein, transferring the results of research on the laws of movement of a finite, bounded part of the universe to the whole infinite universe, have begun

¹ *Ibid* [p. 188] Kojevnikov se base sur des communications officielles du Parti communiste pour dresser cette liste.

² Kremontsov [Krem 1997, pp. 129-190], Kojevnikov [Koje 2004, pp. 186-216] et Pollock [Poll 2006, pp. 41-71] sont trois sources qui mettent notamment l'accent sur la situation en biologie. La question est aussi traitée par Graham dans *Science and Philosophy in the Soviet Union* [Grah 1987, pp. 102-156]. Il existe de plus des références françaises spécifiquement dédiées à la question : Lecourt [Leco 1976] et Kotek K. et Kotek D. [KoKo 1986].

³ Vizgin [Vizg 1999], Kojevnikov [Koje 2004, pp. 217-244] et Pollock [Poll 2006, pp. 72-103] sont des sources particulièrement utiles dans cette direction.

speaking about a finite world, about its temporal and spatial boundaries; the astronomer Milne even “calculated” that the world was created two billion years ago [Jdan 1947, p. 43]¹.

Et il ajoute :

The Kantian vagaries of modern bourgeois atomic physicists lead them to inferences about the electron’s possessing “free will”, to attempts to describe matter as a certain conjunction of waves and to other devilish tricks [Jdan 1947, p. 43]².

Très clairement, Jdanov fait successivement référence aux théories de la relativité et quantique et par conséquent, dans les débats à venir, elles feront l’objet des principales attaques.

2.2.1. L’affaire Markov

Certaines personnalités sont alors désireuses de poursuivre en physique l’œuvre initiée par Jdanov en philosophie, notamment Maksimov, mais aussi Timiryazev qui dès les discussions sur le livre d’Aleksandrov déclare que : « Modern theoretical physics is undated with adverse philosophical trends that hinder its development ; these adverse trends do not meet with due resistance. This is why the lag in our philosophical activities leads to a lag in physics and other natural sciences »³. Cependant, c’est surtout la publication peu de temps après d’un article défendant l’interprétation de Copenhague et la complémentarité qui relance de façon assez virulente les débats en physique théorique. Celui-ci, du physicien Moisey Markov de l’Institut de physique Lebedev à Moscou, intitulé « O prirode fizicheskogo znaniia » (Sur la nature de la connaissance physique), est publié en février 1948 dans le journal *Voprosy Filosofii* (Questions de philosophie) [Mark 1948]. L’« affaire Markov » qui en suit esquisse la campagne idéologique à venir en physique⁴.

Dans sa démarche, Markov, alors intéressé par la théorie quantique mais aussi par la philosophie marxiste, est soutenu par S. I. Vavilov, président de l’Académie des sciences d’URSS qui l’encourage à publier ses vues sur la philosophie de la physique. Vavilov en écrit

¹ Traduction anglaise tirée de Graham [Grah 1987, p. 357]

² *Ibid* [p. 325].

³ Cité et traduit en anglais chez Vizgin [Vizg 1999, p. 1267, note 15]

⁴ Sur l’« affaire Markov », qui est un classique dans la littérature sur la physique en Union soviétique, le lecteur peut se tourner vers Graham [Grah 1972, pp. 75-81], Vizgin [Vizg 1999, pp. 1266-1268], Kojevnikov [Koje 2004, pp. 225-226], Pollock [Poll 2006, pp. 79-83] et Sonin [Soni 2017, pp. 139-147].

même une introduction, se montrant très positif sur les idées nouvelles de l'auteur et sa profonde analyse méthodologique de la mécanique quantique basée sur le matérialisme dialectique. Auparavant, il avait même discuté de la pertinence d'une telle publication avec des officiels de l'Agitprop, desquels il avait reçu des signes encourageants¹. En effet, Markov se montrait jusque-là relativement prudent en raison de la récurrente critique de la complémentarité de Bohr vue comme une interprétation idéaliste de la mécanique quantique. Quoi qu'il en soit, l'article est publié par B. M. Kedrov, directeur en chef de *Voprosy Filosofii*, dans le second numéro de ce journal philosophique venu remplacer *Pod Znamenem Marksisma* en 1947.

Les réactions ne se font pas attendre. Le séminaire méthodologique du département de physique de l'Université d'Etat de Moscou juge l'article négativement, et Markov, qui enseigne la physique nucléaire dans cet établissement, est rapidement démis de ses fonctions. Mais l'offensive est avant tout menée par Maksimov qui publie le 10 avril dans *Literaturnaya Gazeta*, sous le titre « Ob odnom filosofskom kentavre » (Sur un centaure philosophique) [Maks 1948], un article critiquant l'idéalisme de Markov mais aussi la responsabilité de Kedrov dans cette publication. Ce dernier lui répond en publiant en juin une collection de lettres polémiques prenant le parti de Markov et dénonçant l'attitude de Maksimov comme dogmatique [Dive 1948]. Alors, c'est surtout dans la foulée de la session d'août 1948 de l'Académie des sciences agronomiques qui voit le triomphe de Lyssenko, que Maksimov pense avoir une véritable opportunité de mettre au pas ses opposants philosophiques. Comme en témoigne Markov :

At one of the USSR Academy of Sciences Presidium sessions that condemned modern biology, Maksimov, according to Vavilov, suggested that the same should be done for quantum theory, i. e. one should discuss the "ideological perversions" that are manifested in this field. "Maksimov named you as the leader of the perversions", - the President of the Academy told me [Mark 1993]².

Cette suggestion va alors rapidement prendre un tournant assez réaliste. La situation en physique devient critique à la fin de l'année 1948 et début de 1949, au travers d'un événement, ou devrait-on dire non-événement, parfois présenté dans la littérature

¹ Sur ce point voir le témoignage de Markov en 1990 dans *Priroda* (Nature) [Mark 1990].

² Traduction en anglais publiée par Vizgin [Vizg 1999, p. 1267].

anglophone sous le nom de « conference that failed to happen »¹. Si elle n'a jamais lieu, les réunions en vue de son organisation témoignent grandement de vives tensions qui ne se concentrent cependant pas que sur des aspects idéologiques.

2.2.2. Différents académiques

La lutte contre l'idéalisme se double en effet à cette époque d'une véritable fracture au sein de la communauté scientifique entre le monde universitaire – des Professeurs – et celui des Académiciens². L'Université d'Etat de Moscou en est l'expression majeure, surtout avec la disparition en 1944 de Léonid Mandelstam, jusqu'alors le garant d'une physique théorique de qualité dans l'institution³. Suite à son décès, nombre de ses étudiants quittent l'Université pour l'Institut de physique Lebedev de l'Académie des sciences en raison de diverses tensions internes. Aucun des physiciens restants n'est alors coopté au sein de l'Académie, bien plus prestigieuse que le monde universitaire, et il en résulte une démarcation entre les deux camps : les Professeurs accusent les Académiciens de monopoliser les journaux, les privilèges et les ressources. En retour ils sont accusés de faire le jeu d'une science de faible niveau, voire même d'une « anti-science ». Alors, pour Kojevnikov :

[T]he dominant controversy [in physics] was institutional rather than conceptual. Scientific disagreements, as well as various philosophical and political issues, played a subsidiary role in the main conflict, at the core of which was the opposition between Moscow University and the Academy of Sciences [Koje 2004, p. 226].

Notons que si nos propres investigations, centrées sur un unique acteur de cette période, ne nous permettent pas d'illustrer de façon effective ce constat, c'est qu'en réalité nous sommes forcés de reconnaître que Fock est un parfait exemple de la collusion de l'ensemble des différents facteurs à la source de la controverse en physique. En effet, non seulement il

¹ C'est notamment la dénomination employée par Vizgin [Vizg 1999, pp. 1268-1270].

² Sur cette division de la communauté des physiciens voir Kojevnikov [Koje 2004, pp. 226-229]. Vizgin [Vizg 1999, pp. 1267-1268] et Pollock [Poll 2006, pp. 81-83] y ajoutent aussi une dimension en lien avec le « cosmopolitisme » ambiant en URSS, à savoir des attaques, principalement contre les intellectuels juifs (mais pas seulement), les accusants d'un manque de patriotisme. Ajoutons ici en préambule que la majorité des archives sur lesquels s'appuient les historiens pour décrire les épisodes ici discutés se trouvent au GARF à Moscou et se composent des comptes rendus complets de chacune des réunions préparatoires à la conférence.

³ Sur Mandelstam et son rôle pour la physique théorique à Moscou voir sa biographie par Pechenkin, *Leonid Isaakovich Mandelstam. Research, Teaching, Life* [Pech 2014].

incarne avec d'autres collègues comme Ioffé, Frenkel, Landau, Tamm, Leontovich ou encore Ginzburg – pour ne citer qu'eux –, le camp des Académiciens, mais comme nous le verrons il intervient aussi directement auprès des autorités politiques et se présente avant tout comme l'un des physiciens les plus aptes à prendre part au débat pour son aspect philosophique.

2.2.3. La conférence qui n'a jamais eu lieu ¹

C'est donc dans le contexte général que nous venons de dresser que se dessine de façon concrète le projet d'une conférence majeure en physique au travers d'une lettre à l'automne 1948. Rédigée par le Ministre des études supérieures, S. V. Kaftanov et le Président de l'Académie des sciences, S. I. Vavilov, elle est destinée au secrétaire du Comité central du Parti communiste, G. M. Malenkov², qui de toute évidence appuie l'initiative. En effet, très rapidement, pas moins de quarante-deux sessions du Comité d'organisation, dirigé par A. V. Topchiev³, avec pour chacune des dizaines de physiciens et philosophes invités – pour un total d'une centaine d'individus –, sont réunies sur une période de trois mois, du 20 décembre 1948 au 16 mars 1949. La conférence est planifiée du 21 au 26 mars⁴, avec pour sujet un choix relativement neutre : « the present state of physical science the USSR and improvements in the teaching of specialists in physics »⁵.

Très clairement, cet intitulé met l'accent sur l'aspect institutionnel des débats en physique. On manifeste effectivement une volonté d'apporter du changement dans la façon d'enseigner, mais aussi de former les scientifiques, notamment au travers d'une nouvelle répartition des responsabilités : « This meant that the “patriotic materialist physicists” were to occupy leading positions in universities, publishing houses, journals, academic councils, etc » [Vizg 1999, p. 1268]. Mais les réunions d'organisations témoignent concrètement de tendances plus politiques et idéologiques, que l'on retrouve au travers des objectifs fixés par

¹ Sur cette conférence voir Vizgin [Vizg 1999, pp. 1268-1270] mais aussi Kojevnikov [Koje 2004, pp. 229-235], Pollock [Poll 2006, pp. 83-90] et Sonin [Soni 2017, pp. 147-209] qui en propose en russe l'exposé le plus complet.

² *Ibid.* Kojevnikov mentionne un brouillon de lettre en novembre, alors que Vizgin et Pollock se penchent sur une version de la lettre du 3 décembre 1948.

³ Topchiev est un chimiste, Académicien depuis 1949, qui joue aussi depuis cette date le rôle de secrétaire scientifique principal du Présidium de l'Académie des sciences de l'URSS.

⁴ La date est repoussée à plusieurs reprises. Initialement prévue au 24 janvier 1949, on envisage aussi à un moment de la faire débiter le 3, puis le 11 février [Soni 2017, p. 150]

⁵ Voir Kojevnikov [Koje 2004, pp. 229-230].

Kaftanov dans le projet de résolution et rapport introductif de la conférence. Le premier but à atteindre est le suivant : « the complete rooting out of cosmopolitanism¹, which is the theoretical basis of all ideological perversions in our physics ». Le second, sur la base de *Matérialisme et empiriocriticisme* de Lénine : « reinforcing the joint work of physicists and philosophers on the methodological problems of physics » [p. 1268].

Comme le souligne Kojevnikov, la division entre Académiciens et Professeurs se manifeste avant tout au travers d'attaques individuelles, dont les principales cibles sont des physiciens de renom spécialistes de la relativité ou de la théorie quantique [Koj 2004, p. 231]. Parmi eux, Ioffé, Frenkel, Tamm, Landau, Ginzburg, ou encore Fock en personne². Inévitablement, Markov et son article de l'année précédente [Mark 1948] sont montrés du doigt comme l'un des plus clairs symptômes de « l'idéalisme physique ». Mais on observe aussi nombre d'attaques directement à destination du président de l'Académie des sciences en personne, S. I. Vavilov. Ce dernier est en charge de préparer un discours d'ouverture qu'il intitule « *Filosofskie problemy sovremennoi fiziki i zadachi sovetskikh fizikov* » (Problèmes philosophiques de la physique moderne et les tâches du physicien soviétique)³. Malgré sa critique des propos idéalistes de quelques classiques de la science à l'ouest, ou encore du manque d'implication d'un point de vue philosophique de quelques physiciens soviétiques comme Landau et Frenkel, de nombreuses voix parmi les physiciens et philosophes se présentant comme les gardiens de l'idéologie soviétique lui reprochent d'être trop favorable aux physiciens idéalistes tels que ce même Frenkel, Markov, Tamm, Fock ou encore Leontovich, et par conséquent de manquer d'« acuité politique »⁴. Vavilov se voit ainsi graduellement contraint de modifier son manuscrit pour prendre en compte les diverses critiques⁵.

¹ Voir note 532 p. 321.

² Ces noms figurent directement dans le projet de résolution de Kaftanov, et sont associés sans concessions aux labels « cosmopolite » et « idéaliste » [Vizg 1999, p. 1268].

³ « *Filosofskie problemy sovremennoi fiziki i zadachi sovetskikh fizikov* » – ARAN, 596-1-80. Voir les développements de Sonin consacrés spécifiquement à la présentation de Vavilov [Soni 2017, pp. 150-156].

⁴ Mentionné par Vizgin [Vizg 1999, p. 1270].

⁵ *Ibid* [pp. 1269-1270]. Voir aussi Kojevnikov [Koj 2004, pp. 232-233]. Sonin discute lui directement le contenu des deux nouvelles versions du texte que Vavilov présente suite aux différentes critiques [Soni 2017, pp. 150-156].

Au cours des différentes sessions du Comité d'organisation les exemples de ce type se multiplient¹ et les « patriotes matérialistes » essaient de condamner la relativité et la mécanique quantique comme des symptômes du cosmopolitisme et de l'idéalisme. Un texte de A. K. Timiryazev ouvertement dirigé contre ces deux théories est notamment accepté. Cette présentation se concentre sur une « preuve » que les théories de la relativité et de la mécanique quantique sont basées sur une « philosophie idéaliste », sont « inventées par des étrangers » et « entravent les progrès de la physique soviétique »². A l'opposé, les critiques fusent à l'encontre des Académiciens, tels G. S. Landsberg et A. A. Andronov qui se déclarent en faveur des théories modernes et doivent se défendre contre diverses accusations de cosmopolitisme et d'idéalisme. Il est demandé à Markov de restructurer totalement sa présentation ainsi que de faire son autocritique de façon plus approfondie. Pour sa part, Tamm donne des signes de bonne volonté et se montre prêt à critiquer des propos particulièrement idéalistes de physiciens comme Schrödinger, Jordan ou encore Eddington. Il insiste de plus sur la nécessité de se féliciter des grandes découvertes faites en URSS telle que la superfluidité par Landau et Kapitsa. Dans le même temps, il souligne la nécessité de garder à l'esprit que les théories de la physique moderne, avec leur interprétation, sont la clé pour saisir la physique du monde microscopique, comprendre sa philosophie et son utilisation pratique. Il met particulièrement l'accent sur le fait que les dernières découvertes majeures de la physique des particules sont un résultat direct des théories de la relativité et de la mécanique quantique. L'ensemble est toutefois jugé insuffisant et on lui demande de réorganiser sa présentation afin de se montrer plus critique encore de l'opposition.

Fock est présent à plusieurs de ces réunions. Il intervient de façon assez franche le 15 janvier pour critiquer le projet de présentation de Maksimov, qui se propose de questionner « l'idéalisme physique, comme frein au développement de la science et source de perversion anti-scientifique dans le domaine de la science »³. Fock est le premier à s'exprimer et il est

¹ *Ibid.* Sonin aborde dans les détails de très nombreuses propositions de texte pour la conférence [pp. 156-203].

² Mentionné par Vizgin [Vizg 1999, p. 1270].

³ Stenogrammy zasedaniy Orgkomiteta Vsesoyuznogo soveshchaniya fizikov. 11, 12, 13 i 15 yanvarya 1949 (Transcriptions des réunions du Comité d'organisation d'URSS de la rencontre des physiciens. 11, 12, 13 et 15 janvier 1949) – GARF, 9396-1-246. Voir aussi les commentaires de Pollock sur la présentation de Maksimov [Poll 2006, pp. 87-88].

d'emblée explicite : l'exposé de Maksimov lui semble « insatisfaisant ». Le physicien ne conteste pas la thèse de départ du philosophe selon laquelle l'idéalisme est une philosophie inadaptée à la description de la réalité, mais il est en totale opposition avec l'application concrète de ce point de vue. Fock met en avant la faiblesse scientifique de Maksimov sur des questions aussi essentielles que les concepts de trajectoire ou de simultanéité en théorie de la relativité, mais surtout sur le complet désintérêt exprimé dans l'exposé pour la probité des énoncés physiques : « pourquoi donc séparer la vérité physique de la philosophie ? ». Fock réaffirme ainsi que c'est uniquement l'interprétation de la théorie de la relativité qui est erronée et doit être révisée à l'aide du matérialisme dialectique, et non pas ses fondements mathématiques et physiques.

Le physicien de Leningrad considère ici aussi que la validité de la théorie de la mécanique quantique est « tout à fait indéniable » et Maksimov est critiqué pour son traitement du principe d'incertitude de Heisenberg. Le philosophe n'est en effet pas en mesure de rendre compte de ses véritables conséquences physiques, se bornant à une interprétation en termes classiques. Par ce biais Fock critique aussi l'incapacité de Maksimov à rendre compte du fait que les théories modernes de la physique confortent l'un des principes élémentaires du matérialisme dialectique, à savoir l'idée d'un développement constant de la discipline. Car il estime que cela se manifeste par la capacité de la théorie quantique de répondre aux nouvelles questions de la physique moderne, notamment en physique des particules élémentaires, et qu'ainsi elle conforte l'un des principes élémentaires du matérialisme dialectique, à savoir l'idée d'un changement perpétuel. Ainsi, pour Fock, l'exposé de Maksimov n'est pas convaincant car il échoue non seulement à traiter de la physique avec un niveau raisonnable, mais aussi à montrer comment le matérialisme dialectique est « un élément constructif » des théories modernes.

Il faut alors souligner que c'est toujours dans l'optique qui l'a vue s'engager frontalement dans les débats à la fin des années 1930 que Fock aborde les réunions de préparations de la conférence. Bien qu'il ait conscience de la dimension politique qui se joue ici, il estime que le rôle qu'il est le plus à même de remplir est celui de pouvoir démontrer la compatibilité entre le matérialisme dialectique et les théories modernes de la physique. Son propre projet de communication, intitulé « Osnovnyye zakony fiziki v svete dialekticheskogo materializma » (Lois fondamentales de la physique à la lumière du matérialisme dialectique) va directement

dans ce sens¹. Il est discuté en réunion le 28 février², en présence de Ioffé, Tamm, Lifshitz, Andropov, Ivanenko, Vul, Terletskiy, Topchiev ou encore N. S. Akulov de l'Université d'Etat de Moscou. C'est ce dernier qui met le feu aux poudres en attaquant Fock au cours d'un long développement sur la loi de conservation de l'énergie. Il rejette tout simplement l'un des principes les plus fondamentaux de la physique moderne, l'équivalence de la masse et de l'énergie. Pour lui : « l'énergie a été, et reste, elle est redistribuée, la masse a été, et reste, elle est redistribuée ». Ne tenant plus Ioffé finit par s'exclamer : « Quelle sottise ! ». Vexé, Akulov réplique : « Vous avez dit beaucoup de sottises dans votre vie... »³. Or Ioffé est un personnage immensément respecté par une large frange de la communauté scientifique soviétique et immédiatement Andropov, Lifshitz et Fock prennent sa défense. Ce dernier, avec Tamm, quitte même la réunion. Topchiev, qui est en charge du Comité d'organisation exige d'Akulov de présenter des excuses. Il refuse et est alors exclu de la réunion.

En se montrant soudés face aux attaques d'Akulov à l'encontre du texte de Fock, et plus concrètement contre les attaques à l'encontre des théories de la physique moderne, le clan des Académiciens réussit à préserver le contenu scientifique de la présentation de Fock, et à défendre correctement la relativité générale et la mécanique quantique. Malgré tout, dans l'atmosphère générale qui est celle des réunions de préparations, Fock n'échappe pas à quelques recommandations formulées par Topchiev en conclusion :

[...] nous attendons de Vladimir Aleksandrovich, comme des plus grands théoriciens de la physique, une critique des vues idéalistes des physiciens étrangers. De sa bouche, une telle

¹ Il existe dans les archives deux versions de la présentation qui sont cependant impossible à dater avec précision. Il fait cependant sens, et nous discuterons notamment ce point au chapitre suivant (VII.1.2), que la première version est antérieure à la réunion du 28 février où il est discuté, et la seconde version postérieure à celle-ci. *Tezisy vystupleniy po dokladam na Vsesoyuznogo soveshchaniy fizikov (1949)* (Textes des interventions pour communication à la réunion des physiciens de l'URSS) - GARF, 9396-1-259. L'exposé de Fock, avec quelques modifications mineures par rapport à la seconde version, a aussi été publié dans le *Vestnik leningradskogo universiteta* (Bulletin de l'Université de Leningrad) la même année [Fock 1949].

² *Stenogrammy zasedaniy Orgkomiteta Vsesoyuznogo soveshchaniya fizikov. 18, 21, 22, 23, 25 i 28 fevralya 1949* (Transcriptions des réunions du Comité d'organisation d'URSS de la rencontre des physiciens. 18, 21, 22, 23, 25 et 28 février 1949) - GARF, 9396-1-250.

³ Les points de suspensions sont présents dans la transcription, laissant penser qu'Akulov va plus loin encore.

critique sera particulièrement solide pour tous les participants. [... *S'adressant directement à Fock*] Cela rendra votre présentation plus complète, plus incisive politiquement, et c'est ce dont nous avons besoin.

S'il est demandé à Fock d'être plus critique dans sa présentation, on observe surtout que sa volonté de conciliation avec le matérialisme dialectique et son aura en tant que théoricien reconnu sont aussi perçus comme des atouts en vue de la conférence.

Le 7 mars 1949 les « patriotes matérialistes » tentent le tout pour le tout avec V. F. Nozdrev qui s'en prend sévèrement aux « cosmopolites » – Ioffé, Frenkel, Kapitsa, Landau, et Markov entre autres – en insistant sur le fait qu' « adopter des points de vue cosmopolites conduit inévitablement [...] à des attitudes hostiles à Marx »¹. Mais cette position est tout de même prise à défaut, et les Académiciens continuent de se mobiliser face à ces attaques. La tendance finale est exprimée par le ministre aux études supérieures, S. V. Kaftanov, dont la présentation est discutée le 16 mars, dernier jour des réunions de préparations. Si Kaftanov met l'accent sur la nécessité d'une adhésion de la physique aux principes du Parti communiste et du matérialisme dialectique, les vues « idéalistes » et « cosmopolites » de quelques scientifiques soviétiques sont aussi critiquées mais dans un style relativement léger : Frenkel, Fock ou encore Landau sont mentionnés comme opposants, mais à l'appui de phrases respectueuses du genre « notre théoricien le plus éminent », « notre scientifique majeur », etc...² Surtout, le texte se termine sur une fin de non-recevoir pour ceux qui souhaitent condamner les théories modernes de la physique : « It would be a gross error bordering on ignorance to fully deny the positive role of many new achievements in physics that build up the foundation of modern science only because footmen of the bourgeoisie draw idealistic conclusions from the most up-to-date physical theories »³.

La conférence est alors supposée débiter le 21 mars. Mais il n'en est rien. De même le 10 mai malgré une demande de report à cette date formulée le 2 avril par Kaftanov auprès de Malenkov⁴. Une note de D. T. Shepilov, directeur du Département de la Propagande et de

¹ Voir Vizgin [Vizg 1999, p. 1270]. Sur Nozdrev voir aussi Sonin [Soni 2017, pp. 167-169].

² *Ibid.*

³ *Ibid.*

⁴ Sur les tractations en vue du changement de date de la conférence, et finalement son annulation voir Vizgin [Vizg 1999, pp. 1270-1271], Kojevnikov [Koj 2004, pp. 233-234], Pollock [Poll 2006, pp. 90-93] et Sonin [Soni 2017, pp. 209-2013].

l'Agitation au Comité Central du Parti communiste de l'URSS, adressée à Malenkov et datée du 9 avril propose de décaler la conférence à une date ultérieure, sans que celle-ci ne soit déterminée, pour le motif suivant : « the inadequate preparation of the conference and an imperative need to conduct a more profound study of problems and proposals in the field of physics »¹. Mais cela n'aura jamais lieu. En octobre, l'Agitprop archive une proposition de Kaftanov datée du 5 avril. Largement basée sur le projet de résolution de la conférence elle est intitulée « On serious shortcomings in the Preparations of New Cadres of Physicists and on Measures to Overcome Them »². En addition, une note mentionne l'annulation de la conférence.

L'abandon d'une conférence ayant mobilisé autant de moyens pour son organisation est un fait majeur de l'histoire de la physique soviétique, d'autant plus que celle-ci était pensée par certains comme une prolongation du mouvement entrevu avec Lyssenko en biologie³. Plusieurs hypothèses existent quant aux raisons de cette annulation, certains mettant en avant le rôle joué par Vavilov en personne, usant de sa position d'autorité à la tête de l'Académie des Sciences⁴. Vizgin met en avant l'hypothèse selon laquelle I. V. Kourtchatov et son équipe, en charge du projet de bombe atomique, ont rendu clair aux autorités que la conférence pourrait nuire à leurs ambitions [Vizg 1999, pp. 1270-1274]⁵. Cette hypothèse, relativement bien documentée, favorise l'idée d'un « bouclier nucléaire » venant en aide aux physiciens théoriciens face aux différentes attaques à leur encontre durant la période stalinienne. Ce « bouclier nucléaire », quelle que soit son degré de responsabilité dans l'annulation de la conférence en 1949, est assurément primordial dans la suite des événements, pour lesquels Fock est un acteur de premier plan.

¹ Cité et traduit chez Vizgin [Vizg 1999, p. 1270]

² Voir Kojevnikov [Koje 2004, p. 234].

³ Rappelons toutefois que l'historiographie ayant permis de mettre avant tout en lumière les aspects institutionnels des débats en physique en URSS après-guerre, il est présomptueux de penser que la tenue de la conférence aurait forcément débouché sur un bannissement de la théorie de la relativité ou de la mécanique quantique à l'image de la génétique en biologie. Kojevnikov est même catégorique, dans la négative, à ce sujet : « Had the carefully rehearsed performance been played publicly, it would have resulted not in the ban of a certain theory but in personal promotions and demotions, shifting the balance in the existing hierarchy of the physics community » [Koje 2004, p. 235].

⁴ Sur les différentes hypothèses voir Vizgin [Vizg 1999, pp. 1270-1271]

⁵ Cette hypothèse est largement partagée par Pollock [Poll 2006, pp. 90-93].

2.3. Fock et la critique ignorante de la physique moderne

2.3.1. Poursuite des attaques contre les sciences modernes

Ce qui était perçu par beaucoup de physiciens comme un simple report de la conférence, et qui signifiait en réalité son annulation, ne marque cependant en rien une diminution de la pression sur les scientifiques, comme en témoigne notamment le parcours de Ioffé. À l'automne 1950 il est démis de son poste de directeur de l'Institut physico-technique de Leningrad sous le prétexte de son âge. Il a alors 70 ans et la décision est prise par les plus hautes autorités de l'Etat¹. Très rapidement Ioffé est l'objet d'intenses critiques à l'encontre de son ouvrage *Osnovnye predstavleniya sovremennoy fiziki* (Concepts fondamentaux de la physique moderne) [Ioff 1949] publié l'année précédente. Le dernier chapitre, dans la lignée de la position adoptée par Fock à la fin des années 1930, est une défense de la physique moderne comme expression de la gloire du matérialisme dialectique, seule philosophie apte à donner une correcte compréhension des nouveaux faits, mais on lui reproche l'aspect subjectif de ses interprétations de la relativité et de la mécanique quantique². L'ouvrage, initialement approuvé en avril 1950 par le Conseil scientifique de l'Institut physico-technique de Leningrad, est à nouveau discuté par l'institution en mars 1952 et Ioffé est alors contraint dans une certaine mesure de faire amende honorable³.

Les théories modernes de la physique sont particulièrement attaquées dans un ouvrage connu sous le nom de « volume vert » ou « poison vert » en raison de la couleur de sa couverture, publié à l'automne 1952 sous le titre *Filosofskiye voprosy sovremennoy fiziki* (Problèmes philosophiques de la physique moderne) [MKTO 1952]⁴. L'ouvrage est co-édité par les philosophes Maksimov, Kuznetsov et Ovchinnikov ainsi que le physicien Terletskiy. Son

¹ Voir Vizgin [Vizg 1999, p. 1275].

² *Ibid.* Vizgin mentionne des critiques des philosophes I. V. Kuznetsov et N. F. Ovchinnikov dans *Uspehki fizicheskikh nauk* et M. E. Omel'yanovskiy dans *Voprosy filosofii*.

³ *Ibid.*

⁴ Sur l'épisode débutant ici avec la publication de cet ouvrage et qui continue dans la sous-section suivante le lecteur peut consulter Sonin [Soni 1991] Vizgin [Vizg 1999, pp. 1276-1279] ou encore Kojevnikov [Koj 2004, pp. 240-244]. Les événements sont aussi discutés par Pollock [Poll 2006, pp. 95-97] mais étant donné qu'il traite l'article de Fock que nous discuterons ici comme mettant l'emphase sur le débat en mécanique quantique alors qu'il y est avant tout question de théorie de la relativité, nous préférons rester prudents avec cette source qui nous apparaît comme trompeuse.

introduction n'est autre qu'une version abrégée de l'allocution d'ouverture que Vavilov, alors décédé, devait donner à la « conférence qui n'eut jamais lieu »¹. Si de nombreux articles se montrent académiques et modérés dans le style et le phrasé, l'ouvrage compile le sentiment anti-relativiste et anti-quantique des réunions de préparation de la conférence de 1949. L'effet est immédiat : le 17 novembre 1952 le journal *Pravda* condamne l'ouvrage pour « critique indécise » et argumente ainsi : « recent papers, full of idealistic fallacies, are not subjected to profound scientific analysis and criticism »². Le même jour, une réunion du conseil scientifique de l'Institut de physique Lebedev voit Fock, Landsberg et Vul exprimer leurs inquiétudes face à cet ouvrage. Le 27 janvier 1953, au séminaire philosophique de cette même institution Fock déclare : « not a single article in the volume contains full recognition of the fact that relativity and quantum mechanics are correct [...] The general approach of this collection of papers is definitely antiscience [...] The low general level both in scientific and in philosophical passages in most papers, and rabidly antiscience attitude in some of them makes me consider the volume as wicked and potentially harmful »³. I. V. Kuznetsov et R. Ya. Shteynman, alors présents et directement concernés, essaient de se défendre mais sans succès.

Mais c'est en réalité tout au long de l'année que Maksimov se démène pour diffuser sa pensée. Le 13 juin 1952, dans le journal *Krasnyy Flot*⁴ il publie un article intitulé « Protiv reaktsionnogo eynshteynianstva v fizike » (Contre l'einsteinisme réactionnaire en physique) [Maks 1952]. Ses accusations contre la théorie de la relativité y sont particulièrement explicites :

La théorie de la relativité d'Einstein propage sans aucun doute des vues non scientifiques sur des questions fondamentales de la physique moderne et la science en général. Le point de vue d'Einstein conduit la physique non pas en avant mais en arrière en ce qui concerne la théorie de la connaissance, mais aussi comme méthode. Déjà beaucoup de physiciens se rendent

¹ Il faut noter qu'il n'est jamais fait mention de l'origine du texte.

² Cité et traduit chez Vizgin [Vizg 1999, p. 1275].

³ *Ibid* [pp. 1275 et 1277].

⁴ Ce journal, appartenant à la Marine militaire, est un lieu inhabituel pour ce genre de publications et témoigne tout de même des difficultés éprouvées par Maksimov pour faire publier son article.

compte que la théorie de la relativité d'Einstein est une impasse de la physique moderne [Maks 1952].

Nous avons précédemment (VI.1.2.3) évoqué la nature des débats en mécanique quantique, soulignant que la théorie est bien établie dans le paysage scientifique soviétique et qu'un véritable débat d'idée de bon niveau a aussi lieu au sein de la communauté, diluant l'impact réel des attaques des physiciens et philosophes réactionnaires. La situation est quelque peu différente en relativité générale. La théorie est à l'étiage¹ et ne fait l'objet que de très peu d'investigations scientifiques, Fock faisant office d'exception. Le débat est quasi-uniquement de nature idéologique, d'un niveau physique relativement médiocre, et dans ce cadre la théorie de la relativité doit faire face à de très violentes attaques de la part des acteurs les plus réactionnaires du débat², qui mènent une véritable « croisade » [Vuci 2001, p. 95]³. Bien que ces acteurs représentent tout de même un point de vue marginal au sein de la communauté scientifique soviétique – ce point mérite d'être souligné⁴ – ils n'en restent pas moins de véritables agitateurs et Fock ne peut alors laisser passer de telles attaques sans réagir de façon concrète.

2.3.2. 1953 : le « bouclier nucléaire » au soutien de Fock

La vive réaction du 27 janvier 1953 à l'Institut Lebedev du physicien de Leningrad n'est que le bouquet final d'un processus entamé six mois plus tôt. Dès le 18 juillet, dans le style caractéristique de ses rapports aux autorités, il écrit au secrétaire du Comité central du Parti communiste, Malenkov, et l'informe des dégâts engendrés par une publication du genre de celle de Maksimov. Il requiert de l'aide pour publier sa réponse, intitulée « Protiv nevezhestvennoy kritiki sovremennykh fizicheskikh teoriy » (Contre la critique ignorante des théories physiques modernes), « dans l'un des magazines officiels des médias soviétiques »⁵. La correspondance est transmise à Yu. A. Zhdanov, alors chef du département des sciences et

¹ Voir Eisenstaedt [Eise 1986].

² Voir Graham sur ce point [Grah 1987, pp. 357-363].

³ Vucinich est une référence utile pour discuter des attaques à l'encontre de la théorie de la relativité [Vuci 2001, pp. 89-119]. Mais nous sommes en désaccord avec le traitement qui y est fait de Fock, à qui Vucinich attribue systématiquement des intentions d'ordre idéologiques, balayant l'idée que son interprétation de la théorie puisse avoir de profondes implications physiques.

⁴ Voir la recension par Kojevnikov de l'ouvrage de Vucinich mentionné dans la note précédente [Koj 2002b].

⁵ Cité et traduit en anglais chez Vizgin [Vizg 1999, p. 1276].

instituts d'éducation du Parti communiste, qui malgré ce qu'il considère comme des « arguments faibles dans les objections scientifiques »¹ recommande la publication de l'article de Fock dans *Voprosy filosofii*. L'ensemble est alors transmis à Malenkov puis à un membre du bureau politique, M. A. Suslov, qui le 6 août annote : « Archive. Discussed at a meeting of the secretariat »². Nulles traces cependant des conclusions de cette discussion, et quoi qu'il en soit l'article de Fock n'est pas publié dans la foulée. De plus, une note de Zhdanov du 14 août 1952 exprime un souhait « [to] reconsider the situation in the methodology of modern physics and [...] have the conclusions and suggestions reported to the All-Union Communist Party Central Committee, that is, to resume the preparation of the final reckoning with the physicists, delayed in 1949 »³.

La situation semble donc se dégrader précipitamment, mais Fock ne va pas tarder à recevoir le soutien du « bouclier nucléaire ». La suite des événements nous est particulièrement claire grâce à une série de lettres, publiées en 1994 par Ilizarov et Pushkareva [IlPu 1994]. En décembre 1952 – au plus tard le 24 –, Beria, chef du projet atomique et député en chef du Conseil des ministres de l'URSS, reçoit une requête signée d'une majorité d'académiciens⁴ accompagnée d'une lettre de soutien de Kourtchatov, ainsi qu'un rapport écrit par Blokhintsev sur l'article de Fock. Ces documents sont rapidement estampillés « secret ». La lettre des académiciens est une requête en faveur de la publication de l'article de Fock, réaction jugée nécessaire face à des articles qui « orientent incorrectement les collaborateurs de recherche, et conduisent à une baisse inacceptable du niveau de l'enseignement ». De plus, « ils détournent l'attention et les efforts des scientifiques de la tâche urgente du développement de la physique moderne dans ses secteurs décisifs ». L'objectif affiché par les physiciens alors en charge du projet nucléaire est clair, signifier une bonne fois pour toutes aux autorités que la théorie de la relativité et la mécanique quantique constituent les fondations théoriques de la physique moderne comme un ensemble et de la physique atomique en particulier. Par conséquent, si les objectifs attendus doivent être

¹ *Ibid.*

² *Ibid.*

³ *Ibid.* Vizgin cite et traduit ici A. Blokh qui retrace la suite d'événement que nous venons de décrire dans un article publié en 1997 dans le journal *Nezavisimaya Gazeta* [Blok 1997].

⁴ Il s'agit de Tamm, Artsimovich, Kikoin, Golovin, Leontovich, Sakharov, Flerov, Landau, Aleksandrov, Alikhanov et Meshcheryakov.

remplis, les attaques contre ses théories ne sont plus acceptables. Les académiciens ajoutent qu'en réalité ces théories sont « profondément matérialistes » et « sont confirmées avec une spectaculaire précision par une énorme richesse de données expérimentales ». Les quatorze physiciens concernés par cette démarche sont tous concernés par le projet atomique. Kourtchatov en personne bien sûr, mais aussi Artsimovich, Kikoin et Sobolev en charge de la séparation des isotopes d'uranium ou encore les futurs prix Nobel Landau, Tamm et Sakharov. Douze d'entre eux sont académiciens, ou membres correspondants. Beria les connaît bien, surtout après le succès des essais nucléaires de 1949 et 1951 et alors que la bombe H est en préparation [Vizg 1999, p. 1276]. Le rapport de Blokhintsev souligne lui le préjudice fait par l'article de Maksimov dans *Krasniy flot* à la physique et à la philosophie, et souligne l'importance de l'article de Fock. S'il mentionne quelques insuffisances de ce dernier, elles se limitent au souhait de voir être mieux explicités quelles sont les limitations d'application de la théorie de la relativité restreinte, mais aussi au fait que Fock ne souligne pas suffisamment les contributions des acteurs soviétiques aux développements de celle-ci¹.

Le 24 décembre, Beria demande à Malenkov de prendre en considération la lettre des académiciens et l'article de Fock : « les physiciens que vous connaissez, camarades Kourtchatov, Alikhanov, Landau, Tamm et d'autres [...] requièrent que nous aidions à publier l'article ». Pas plus tard que le 31 décembre, N. A. Mikhailov, secrétaire du comité central du CPSU, et Zhdanov réitèrent auprès de Malenkov le souhait de voir la publication de l'article dans *Voprosy filosofii*. En plus de cela, ils réprimandent l'éditeur en chef de *Krasnyi Flot*, S. S. Zenushkin, mettant en avant une « inacceptable pratique de publications de matériels qui sont au-delà des compétences du bureau éditorial du journal ». « Protiv nevezhestvennoy kritiki sovremennykh fizicheskikh teoriy » (Contre la critique ignorante des théories physiques modernes) est alors publié dans le premier numéro de l'année 1953 de *Voprosy filosofii* [Fock 1953a].

¹ Notons à cette occasion que Blokhintsev est plutôt élogieux envers le point de vue de Fock sur la théorie de la relativité générale dont il regrette qu'il ne soit pas davantage développé dans son article à l'encontre de Maksimov : « Fock ne souligne également pas assez que la théorie de la relativité est inapplicable à l'accélération du mouvement. Un examen du mouvement accéléré conduit à la théorie de la gravitation, dont les développements pour la plupart réussis par Fock apportent une contribution fondamentale ». Voir Ilizarov et Pushkareva [IIPu 1994].

L'article s'ouvre sur la double affirmation du rôle majeur des théories de la mécanique quantique et de la relativité pour les développements de la physique et de leur compatibilité avec le matérialisme dialectique : « la théorie de la relativité et la théorie quantique reflètent correctement la réalité objective et sont une merveilleuse confirmation des principes de base du matérialisme dialectique » [p. 168]. Très rapidement les développements glissent sur la critique de l'aspect idéaliste de ces théories, mais Fock s'applique à détacher ce qui est de l'objet de la physique pure et ce qui est relatif à l'interprétation. Car il affirme que c'est bien cette seconde partie qui peut être sujette à l'influence de l'idéalisme, et que les philosophes se doivent d'analyser au spectre du matérialisme dialectique :

Devant nos philosophes se dresse une tâche d'une importance primordiale - l'analyse correcte et l'interprétation des théories physiques modernes avec point de vue scientifique unique du matérialisme dialectique.

Il faut effacer de la théorie physique correcte, la phraséologie idéaliste, les perversions philosophiques et ouvrir ainsi le chemin à la poursuite du développement de la science.

Pour cela, afin de procéder à l'analyse philosophique des théories modernes de la physique, et en donner une compréhension matérialiste correcte, il faut, bien entendu, avant tout connaître et comprendre les bases de son contenu [p. 169].

Ainsi, toujours dans la dynamique qui était la sienne en 1938, Fock affirme qu'en rien les théories modernes de la physique ne doivent être mises au ban en Union soviétique et que seule la question de leur interprétation peut être sujette à débat. Fock joue alors lui-même le rôle de critique philosophique, en particulier à l'encontre de ce qu'il considère comme une forme d'inconsistance philosophique d'Einstein dans l'approche de sa théorie de la relativité. Mais à l'image de son article d'avant-guerre défendant la compatibilité de la mécanique quantique avec le matérialisme dialectique [Fock 1938b], le physicien soviétique défend point par point la possibilité une conception matérialiste de la théorie d'Einstein.

La comparaison avec l'article de 1938 ne s'arrête pas là, car Fock amorce une véritable critique des philosophes marxistes, trop ignorants pour se saisir des questions de physique théorique. Il prend explicitement à parti Maksimov suite à son article dans *Krasniy flot* [Maks 1952], dont la démarche est à son sens des plus risibles : « Il se réfère à une théorie [la relativité] dont l'exactitude est si fortement réglée, que la remettre en question est aussi absurde que de remettre en question la sphéricité de la Terre » [Fock 1953a, p. 172]. En deux

pages Fock déconstruit point par point l'argumentation de Maksimov à l'encontre de la théorie de la relativité et ridiculise le philosophe. Kuznestov est aussi critiqué. En conclusion Fock résume son sentiment général et le combat qu'il conduit depuis la fin des années 1930 pour les théories modernes et le matérialisme dialectique contre l'idéalisme et la critique ignorante :

Les scientifiques soviétiques doivent développer de façon créative les théories physiques modernes, en les considérant à la lumière des enseignements du matérialisme dialectique et en les dégagant des sédiments idéalistes qui en obscurcissent seulement le sens. Mais rien est plus étranger à l'avancée des tâches de la science soviétique que la critique ignorante de ces théories, conduisant à leur insensée et dangereuse négation [p. 174].

Le 5 février 1953, Maksimov envoie une ultime lettre à Beria¹. Il y déclare que Fock n'est autre qu'une personne qui « ressuscite des tendances, quasiment détruites en URSS qui peuvent être remontées jusqu'au physiciens idéalistes des pays capitalistes ». Le philosophe accuse le physicien de se vanter partout que son article a été approuvé par Beria en personne. Face au ridicule de la situation, la plainte est transmise à Mikhaylov et Zhdanov, puis classée sans suite car simplement considérée comme injustifiée. Maksimov vient de subir son ultime défaite et il disparaît alors progressivement du paysage de la philosophie des sciences soviétiques.

2.4. Une lente normalisation de la situation

Suite à cet effort commun pour faire taire Maksimov, qui de plus coïncide avec le décès de Staline, la situation en physique se normalise progressivement. Comme mis en évidence par Vizgin, le « bouclier nucléaire » continue de jouer un rôle effectif, en particulier dans le cadre de réorganisations institutionnelles qui visent à apaiser les tensions entre universitaires et Académiciens [Vizg 1999, pp. 1277-1281]. Dans la foulée, les débats philosophiques gagnent en qualité, l'implication du politique se trouvant être nettement diminuée. Faire ce rapide constat est maintenant essentiel pour certaines considérations de nos chapitres suivants.

¹ Voir Ilizarov et Pushkareva [IIPu 1994].

2.4.1. L'exemple de l'Université d'Etat de Moscou

La tension au sein de la plus grande institution universitaire moscovite atteint son paroxysme à la fin de l'année 1953 avec la création par le Présidium du Comité central du Parti communiste d'URSS d'une commission chargée d'enquêter sur les conditions d'enseignement au sein du département de physique, dirigé par A. A. Sokolov¹. Celle-ci est dirigée par V. A. Malyshev, alors à la tête du ministère de la construction mécanique moyenne, office central en charge de l'industrie nucléaire soviétique. La mise en place de cette commission est motivée par une succession de facteurs qui témoignent d'une situation précaire. On trouve notamment une série de plaintes, dénonçant une forme de persécution envers les physiciens et mettant en avant différentes difficultés, formulées par divers membres du personnel qui se sont déjà manifestés auparavant pour une grande partie comme des « patriotes » et gardiens de la philosophie marxiste face au groupe représenté par les académiciens². Mais ces derniers remettent aussi en question la nature du travail fourni au sein de l'institution moscovite. Le laboratoire N°15 créé en septembre 1949, avec pour vocation de travailler sur des problèmes de physique nucléaire, est l'objet de beaucoup d'attention. Pour exemple, M. G. Meshcheryakov, membre du groupe de recherche nucléaire de Kourtchatov, en donne une évaluation négative en décembre 1952³.

Les « académiciens » se mobilisent alors progressivement, comme en témoigne une lettre de la fin de l'année 1953 signée par V. A. Malyshev, le ministre de la culture P. K. Ponomarenko, le président de l'Académie des sciences A. N. Nesmeyanov⁴ et le secrétaire du département de physique et mathématiques de l'Académie des sciences M. V. Keldysh. Destinée au Présidium du Comité central du Parti communiste, mais aussi de façon personnelle à G. M. Malenkov président du conseil des ministres et N. S. Khrouchtchev, nouveau premier secrétaire du Comité central du Parti communiste, elle explique :

¹ Sur cet épisode voir Vizgin [Vizg 1999, pp. 1277-1279], Pollock [Poll 2006, pp. 97-101] et Sonin [Soni 2017, pp. 290-294].

² Vizgin nous donne la liste de noms suivants pour les auteurs de plaintes auprès des autorités : A. A. Sokolov, A. S. Predvotitelev, N. S. Akulov, D. D. Ivanenko, S. N. Rzhevkin, V. K. Semenchenko, F. A. Korolev ou encore V. F. Nozdrev [Vizg 1999, p. 1277].

³ *Ibid.*

⁴ Celui-ci remplace Vavilov suite à son décès en 1951.

A group of scientists: Academicians Kurchatov I. V., Leontovich M. A., Sobolev S. L., Lavrent'ev M. A., Fock V. A., Tamm I. E., Artsimovich L. A., Petrovskiy I. G., Corresponding Member Meshcheryakov M. G., and professor Blokhintsev D. I. informed us of the unhealthy, as they believe, situation that reigns at the Physics Department of Moscow State University¹.

Le constat dressé par la suite est dévastateur pour l'institution, dont la qualité est largement remise en question. Il s'attaque directement aux individus, leur reprochant de n'avoir aucune valeur scientifique ou pédagogique mais aussi d'avoir réussi « à un moment donné à chasser un certain nombre de physiciens exceptionnels de l'université », parmi lesquels Fock, Tamm et Leontovich. La dimension idéologique est aussi soulignée : « this group pretending to lead a struggle against idealistic notions, tries to sully the names of the outstanding physicists of the country [... and] have been resisting for the fundamental part of physics (theory of relativity, quantum mechanics, etc.) over a period of years »².

De cette lettre, qui propose le remplacement des représentants administratifs du département de physique, l'emploi pour l'enseignement d'académiciens, mais aussi une meilleure préparation des étudiants aux questions philosophiques, résulte donc en la création le 7 décembre de la commission d'enquête signalée précédemment. Le compte-rendu dressé par celle-ci confirme les problématiques soulevées dans la lettre à destination de Malenkov et Khrouchtchev, et suggère de renforcer la direction du département pour améliorer le niveau académique et de l'enseignement. Mais comme le rapporte Vizgin les conclusions appellent surtout à une complète réorganisation :

The recommendation was to “widely use the expertise of the scientists of the Physics Department of Moscow State University in research programs in the forefront of modern physics”, to eliminate “the currently existing alienation of the scientists of the Academy of Science of the USSR and Moscow State University”, to involve students, post-graduates and postdocs of the physics department in the research within academic and SredMash³ institutes. There was also a suggestion to close Laboratory No. 15 [Vizg 1999, p. 1278]⁴.

¹ Cité et traduit chez Vizgin [Vizg 1999, p. 1278]. Ce dernier note que seuls Petrovskiy et Fock ne sont pas impliqués dans la recherche nucléaire. La lettre est aussi largement commentée par Pollock [Poll 2006, p. 98].

² *Ibid.*

³ SredMash est une abréviation servant à désigner le ministère de la construction mécanique moyenne.

⁴ Les parties entre parenthèses sont issues du compte-rendu de la commission d'enquête.

Par conséquent ce rapport pose très clairement les fondations d'un compromis entre les deux catégories institutionnelles qui s'opposaient jusqu'à présent. Sur cette base, une résolution est adoptée par le Comité central du Parti communiste le 5 août 1954. Aux recommandations de la commission d'enquête, s'ajoute l'éviction de Akulov et Nozdrev ainsi qu'un avertissement envoyé à Sokolov et Korolev concernant leur attitude vis à vis de « l'inclusion de scientifiques de premier plan originaires de l'Académie des Sciences de l'URSS dans le processus d'enseignement du département »¹. V. S. Fursov, un fidèle de Kourtchatov est placé à sa tête. Il rapporte en décembre 1954 que les Académiciens Tamm, Leontovich, Artsimovich, Kikoin, Landau et le professeur Lukyanov ont débuté des cours, mais aussi que Sokolov et Ivanenko ont rejoint des programmes de recherche du ministère de la construction mécanique moyenne.

Une fois encore, les physiciens au cœur du « bouclier nucléaire » ont mobilisé leurs ressources afin de mettre fin à une situation instable causée par la branche la plus réactionnaire de la physique soviétique qui essayait de s'arroger un contrôle complet du département de physique de l'Université d'Etat de Moscou. Notons que Fock, bien que non actif en recherche atomique continue constamment d'être associé par ses actions politiques à cette branche de la physique devenue influente en URSS.

2.4.2. Des débats philosophiques pacifiés

Si plusieurs épisodes continuent au cours des années qui suivent à incarner les tensions jusqu'ici mentionnées², on observe de façon générale dans le courant des années 1950 que la solidarité des physiciens du « bouclier nucléaire », après avoir gagné progressivement la confiance des instances dirigeantes, contribue à stabiliser la pratique de la discipline en URSS. Alors que dans le cas de l'Université de Moscou nous avons pu constater que les aspects

¹ Cité et traduit en anglais chez Vizgin [Vizg 1999, p. 1278].

² Pour exemple l'urgence de mettre au point de nouvelles sources d'énergie, mise en avant au cours du vingtième Congrès du Parti en 1956, cumulée aux événements politique de l'insurrection de Budapest, conduit à certaines tensions entre les scientifiques et leur pouvoir [Vizg 1999, p. 1279]. Vizgin met aussi en avant diverses tensions relatives aux élections des membres de l'Académie des sciences de l'URSS, en particulier en 1958, où un rapport initial de l'instructeur du Département des sciences du Comité central du Parti communiste, A. S. Monin, procède à une classification des physiciens entre membres du parti et non-membres. Les premiers sont jugés « bons, dociles, russes ethniquement, et philosophiquement complaisants ». Les seconds sont « têtus, souvent juifs et philosophiquement suspects » [p. 1280].

institutionnels sont déterminants, soulignons maintenant que la situation se normalise aussi du point de vue des attaques philosophiques.

Cela se traduit notamment par l'organisation de conférences de philosophie des sciences qui témoignent d'une véritable élévation du niveau intellectuel en comparaison aux débats jusqu'ici mentionnés. C'est le cas en mars 1954 à Kiev pour une conférence sur la philosophie de la physique moderne, mais aussi en 1958 à Moscou lors d'un grand rassemblement soviétique sur les aspects philosophiques des sciences naturelles¹. Au cours de la première nommée les physiciens sont notamment représentés par K. D. Sinel'nikov, I. M. Lifshitz, A. I. Akhiezer, A. S. Davydov ou encore S. I. Pekar². Pour les philosophes on trouve entre autres Kuznetsov et Omel'yanovskiy. Ce dernier, membre de l'Académie des sciences ukrainienne va par la suite représenter une nouvelle génération de philosophes marxistes qui manifestent de véritables compétences du point de vue scientifique lorsqu'il s'agit de discuter de sciences naturelles, et qui contribuent par conséquent à rétablir des contacts sains entre philosophes et scientifiques³. En particulier, en gardant à l'esprit la nécessité de traiter dans les sciences physiques de la réalité objective, Omel'yanovskiy discute de la question de l'observabilité en physique, de la dialectique dans la complémentarité de Bohr ou encore des relations entre espace, temps et matière. Des tensions restent toutefois perceptibles en 1954, en particulier avec Kuznetsov qui continue dans un exposé sur la théorie de la relativité de critiquer Fock, Mandelstam ou encore Aleksandrov, et de les présenter comme des leaders de l'idéalisme. Il appelle ainsi à une reformulation de la théorie en une théorie des « mouvements rapides »⁴.

En 1958 à Moscou, on ne constate plus d'attaques du même genre. Omel'yanovsky rappelle même à l'audience les sérieuses erreurs commises par le passé par les anti-relativistes Mitkevich et Timiryazev et souligne aussi que « Lénine a fait référence à Einstein

¹ Sur ces conférences voir Vizgin [Vizg 1999, p. 1279]. Les présentations de la conférence de Moscou en 1958 ont été publiés en 1959 sous la direction de P. N. Fedoseev [Fedo 1959].

² Sinel'nikov est un physicien nucléaire de renom. Ilya. M Lifshitz est le frère Evgueni M. Lishfitz, co-auteur avec Landau du *Cours de physique théorique*. Akhiezer est un ancien élève de Landau, reconnu en physique théorique. Davydov est notamment connu pour ses travaux en physique du solide, et enfin Pekar en physique de la matière condensée.

³ Sur Omel'yanovsky voir la section qui lui est consacrée par Graham dans son chapitre sur la mécanique quantique [Grah 1987, pp. 343-348].

⁴ Mentionné par voir Vizgin [Vizg 1999, p. 1279].

comme le grand transformateur des sciences naturelles »¹. Du côté des philosophes il est notamment accompagné par Ovchinnikov et Kolman. Chez les scientifiques, le mathématicien Aleksandrov, mais aussi les physiciens Fock, Ivanenko, Markov ou encore Blokhintsev contribuent à faire de cet événement un véritable succès, que Vizgin et Gorelik n'hésitent pas à désigner comme la fin des luttes idéologiques sur la relativité générale [ViGo 1987, p. 294]. La situation se normalise aussi en mécanique quantique, l'ensemble des débats prenant une connotation largement moins politique².

Par exemple, Fock en personne y fait une présentation intitulée « Ob interpretatsii kvantovoy mekhaniki » (Sur l'interprétation de la mécanique quantique), en réalité issue d'une publication l'année précédente dans *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Fock 1957a]. Ce long exposé est un vaste compte-rendu de son interprétation de la mécanique quantique³ qui combine à la fois la défense du caractère probabiliste de la théorie, la défense de la complémentarité – même si les différents points de discorde entre Fock et Bohr sont avancés –, mais aussi des attaques générales contre l'idéalisme et une mise en avant du rôle essentiel joué par le matérialisme dialectique. L'approche du problème par Fock n'a pas changé et elle suscite de nombreuses réactions, notamment de D. D. Ivanenko, D. I. Blokhintsev mais aussi Ya. P. Terletskiy. Cependant, si de véritables divergences scientifiques se manifestent, les échanges sont cordiaux, de bon niveau scientifique, et surtout les attaques *ad hominem* à caractère idéologique ou politique sont absentes des débats.

3. Conclusion

Dans la foulée de la Seconde Guerre mondiale, le jdanovisme devient un véritable exutoire des rivalités politiques du monde des sciences, et spécialement de la physique. La fracture entre le camp des Académiciens théoriciens et le reste de la communauté, déjà entamée,

¹ *Ibid.*

² Nous reviendrons au chapitre sept (VII.2.2.2) et au chapitre huit (VIII.1.2.2) sur les débats en mécanique quantique lors de cette conférence. Différents courants d'opposition s'y manifestent mais la tonalité des débats est nettement apaisée en comparaison des années précédentes. Sur ce point voir aussi les commentaires de Kojevnikov sur les débats en mécanique quantique à la fin des années 1950 [Koje 2012, pp. 234-235].

³ Il est utilisé par Graham comme base de travail pour présenter l'interprétation de la théorie par Fock dans son ouvrage de 1987 [Grah 1987, p. 340].

s'aggrave. Une nouvelle fois les questions philosophiques sont invoquées pour affaiblir le premier groupe, dont l'influence, compte-tenu des enjeux scientifiques de l'après-guerre est croissante. Le « bouclier nucléaire », manifestation directe de ces enjeux, contribue alors largement à contrer les différentes attaques contre la relativité générale et la mécanique quantique, deux théories devenues essentielles à la bonne conduite de ses travaux. Fock, bien que jamais impliqué dans le projet nucléaire, devient une sorte de porte-parole pour ce groupe qui, soumis à la réserve en raison de la nature de ses travaux, voit en lui un allié de choix ayant par le passé prouvé sa capacité à faire face aux attaques philosophiques. Car c'est bien là l'une des particularités de la carrière scientifique du physicien de Leningrad : sa capacité à répondre de façon efficace aux attaques politiques et philosophiques qu'il subit personnellement, que subissent ses collègues, et qui vont à l'encontre du développement en URSS des théories de la mécanique quantique et de la relativité générale. Il se forge ainsi une véritable réputation de défenseur des théories modernes de la physique en Union soviétique¹.

Nous l'avons constaté, avant et après-guerre, la stratégie employée par Fock en vue de la défense de ses collègues et de la physique moderne est extrêmement similaire, et se caractérise par deux composantes principales. D'une part le physicien se confronte aux autorités de façon relativement directe, et d'autre part il s'engage concrètement dans le débat philosophique, prenant la responsabilité de démontrer la compatibilité des théories de la mécanique quantique et de la relativité avec le matérialisme dialectique. Dans son rapport aux autorités, Fock fait preuve d'une forme de courage, si ce n'est d'inconscience, d'autant plus qu'il est directement touché au travers du destin de ses proches, par les atrocités de la Grande Terreur. Mais à titre personnel, il semble que sa confrontation moscovite avec le *jeov* en 1937 signe pour lui la garantie qu'il est une personnalité hors d'atteinte². Fock en retire une grande liberté de parole avec les autorités et la conviction qu'il est possible de traiter directement avec elles, y compris des sujets les plus sensibles.

¹ Pour Gorelik : « Besides, in Stalin's time, Fock was the main defender of quantum and relativistic physics in the USSR » [Gore 1993, p. 308]. Pour Graham : « [...] in the last years of Stalin's life, when ideological pressures in science were particularly strong in Soviet Union, he castigated what he called "ignorant criticism" ("nevezhestvennaia kritika") of relativity theory and quantum mechanics » [Grah 1982, p. 120].

² Dans le sens de nos développements, voir aussi les considérations de Gorelik sur la personnalité de Fock [Gore 1993, pp. 325-326].

Pour ce qui est de sa responsabilité de démontrer la compatibilité des théories de la mécanique quantique et de la relativité avec le matérialisme dialectique, l'engagement du physicien de Leningrad dans le débat philosophique résulte avant tout en l'expression concrète que ses convictions épistémologiques sont le reflet de son adhésion à la philosophie marxiste. En effet, Fock se positionne de façon quelque peu singulière comme le principal physicien théoricien soviétique de stature internationale qui fait preuve d'une véritable connaissance du matérialisme dialectique. Mais surtout, cette philosophie ayant un impact réel sur son approche des théories modernes de la physique, Fock a l'avantage de voir son point de vue non orthodoxe sur l'interprétation de la mécanique quantique et de la relativité générale devenir un atout face à l'exigence idéologique d'une approche matérialiste des théories.

Mais malgré lui, le physicien représente aussi une forme d'opposition à la bureaucratie soviétique qui pour sa part conduit au dévoiement de la philosophie du matérialisme dialectique et à une pression accrue exercée sur la communauté scientifique. Le combat qui aurait naturellement dû se limiter à un simple éclaircissement de l'interprétation des théories devient fondamentalement politique, et la jeune garde stalinienne proclamant l'esprit du Parti comme cœur de la philosophie marxiste appauvrit le débat scientifique, le rendant particulièrement virulent d'un point de vue idéologique et appelant parfois au renoncement de la mécanique quantique et de la relativité générale. Or Fock s'attache à séparer la formulation des théories de leur interprétation. Il est alors possible de donner une compréhension de ces dernières au prisme du matérialisme dialectique, ainsi que d'en fustiger une possible analyse idéaliste. Fock s'appuie ainsi sur sa double compétence en tant que physicien de haut niveau et véritable connaisseur des tenants et aboutissants du contenu épistémologique de la philosophie marxiste pour prendre officiellement la relève des philosophes soviétiques, trop ignorant à ses yeux des problématiques de la physique moderne. Ainsi, le combat politique se double concrètement d'une réponse claire sur le plan idéologique, et au fil du temps, Fock gagne la confiance des autorités en contribuant à estomper l'influence de philosophes maintenant jugés incompetents.

D'un point de vue chronologique, nous avons observé qu'en 1935-1936, alors qu'il commence à s'intéresser aux questions d'interprétation de la mécanique quantique, Fock ne faisait aucune référence à l'idéologie soviétique. Nous avons ainsi mis en évidence que c'est en 1937-1938, alors qu'il est l'objet d'attaques individuelles, que Fock est contraint de

s'engager dans le débat et d'explicitier son rapport au matérialisme dialectique, devenant ainsi ce que nous avons appelé un physicien philosophe engagé. Précédemment, il ne nous avait pas été possible d'établir concrètement les véritables raisons qui poussent Fock à se tourner en 1938 vers la théorie de la relativité générale (IV.2.2.1). Ajoutons alors ici une nouvelle explication possible : la nécessité de se pencher concrètement sur la théorie pour pouvoir la défendre face aux attaques idéologiques. Mais cela reste au stade de la spéculation, et nous préférons penser qu'une combinaison de facteurs est à l'origine de l'intérêt grandissant de Fock pour la théorie d'Einstein. Quoi qu'il en soit, les questions d'interprétations prennent à la fin des années 1930 une nouvelle dimension pour Fock et elles deviennent après-guerre l'essentiel de sa contribution scientifique.

Mais cette transition chez le Russe entre un pur physicien théoricien et un physicien philosophe engagé sera particulièrement intéressante dans nos développements à venir sur son discours scientifique, dimension laissée de côté dans le présent chapitre au profit d'une approche factuelle des événements. En effet, il est indispensable de se poser la question de savoir si la pression politique et idéologique subie par Fock durant ces années staliniennes a un impact réel sur le fond et la forme de sa pensée – mis à part sa reconnaissance explicite de l'influence du matérialisme dialectique. Ainsi, le prochain chapitre, qui portera plus spécifiquement sur cette question, va nous permettre d'évaluer plus précisément comment se manifestent dans la production écrite de Fock les différentes facettes contextuelles – scientifique, idéologique, politique – jusqu'ici évoquées.

Chapitre septième – Discours scientifique

Le chapitre précédent s'est présenté comme une analyse principalement politique des faits de répression à l'encontre des physiciens théoriciens en Union soviétique et des menaces qui, durant la période stalinienne, ont pu peser sur les théories de la mécanique quantique et de la relativité générale. En suivant le parcours de Fock en vue de la défense à la fois de ses collègues et de la physique théorique moderne, nous avons pu observer les différentes caractéristiques de sa position et constater qu'il a dû procéder au difficile exercice de la critique des aspects idéalistes des théories en vue de leur compréhension matérialiste. Cependant, nous nous sommes penchés sur le contenu des écrits de Fock que de façon superficielle et c'est pourquoi dans le présent chapitre nous souhaitons aborder plus concrètement son discours scientifique. Nous entendons ici la notion de « discours scientifique » dans son sens large, comprise comme « le discours tenu par un spécialiste des sciences exactes ou expérimentales portant sur des objets de connaissance relevant de sa discipline » [Math 1997 , p. 159]. Quelles qu'elles soient, les publications de Fock répondent à cette définition, y compris ses textes les plus philosophiques et politiques comme ses réponses à Maksimov en 1938 et 1953, qui en dépit de leur caractère polémique développent de véritables considérations sur la compréhension des théories modernes de la physique. Ainsi, c'est l'ensemble du corpus publié par Fock qui est concerné par l'idée de « discours scientifique » et non ses œuvres visant exclusivement à la production de connaissance.

Les différentes études¹ de la fin du siècle dernier sur le thème du discours scientifique ont permis de faire apparaître une forme de consensus entre les scientifiques et leurs collègues qui s'occupent de l'étude des sciences et technologies – historiens, philosophes, sociologues des sciences. En effet, on convient aujourd'hui sans difficulté que l'on trouve dans le discours scientifique bien plus que la logique formelle et les règles strictes de la « méthode scientifique »². Une enquête sur les modalités discursives de la production scientifique permet notamment de « distinguer (et de connecter) l'apparence cognitive et la réalité cognitive dans

¹ Mentionnons ici en particulier les recueils publiés par Martin, Halliday et Veal qui offrent une vaste synthèse des problématiques liées au discours dans la pratique scientifique [HaMa 1994 ; MaVe 1998].

² Voir Finocchiaro sur qui nous prenons ici appui pour nos développements [Fino 1991].

le discours scientifique » [Fino 1991, p.169], en d'autres termes de mesurer la différence entre les paroles et les actes. En particulier, une étude de ce genre permet de révéler le rôle et la nature de l'argumentation persuasive chez le scientifique, d'observer qu'elle opère au travers de notions telles que « la persuasion, l'argumentation, le raisonnement, l'acceptation et l'acceptabilité, et donc [que] le résultat est une rhétorique de la science au sens d'une logique informelle plutôt que d'une logique formelle de la science » [p. 170]. Or, nous l'avons observé au chapitre précédent, durant la période stalinienne Fock est ouvertement dans une logique d'argumentation persuasive visant à démontrer la compatibilité des théories modernes de la physique avec le matérialisme dialectique.

C'est sur ce point particulier que nous souhaitons dans ce chapitre nous pencher, afin d'évaluer dans quelle mesure la pression politique et idéologique du contexte soviétique a une influence sur le discours scientifique de Fock. Nous observerons alors que le physicien est dans une optique de conciliation tel que le manifeste sa volonté à partir de 1938 de parler explicitement de matérialisme dialectique. Il sera alors particulièrement intéressant d'observer comment Fock articule un discours qui vise à remplir de multiples objectifs – la critique de l'idéalisme, la défense du matérialisme et des théories modernes de la physique ainsi que la diffusion de sa propre pensée –, comment il se justifie face à ceux qui y voient des contradictions, mais surtout si cela implique un véritable compromis du point de vue scientifique. Car c'est uniquement à ce prix que nous pourrions saisir qu'en dépit de toutes les concessions faites à l'autoritarisme soviétique, la rigueur physique à laquelle s'astreint Fock dans son approche des problèmes scientifiques a une contrepartie dans la façon dont il diffuse sa pensée, à savoir une forme de rigueur – de systématique – à énoncer de façon pointilleuse l'unique point de vue qu'il juge correct.

Dans ce but, il nous est tout d'abord nécessaire de mettre en avant certaines spécificités propres à la rhétorique et au discours soviétique. En effet, nous observerons que l'imposition du matérialisme dialectique de façon dogmatique dans toutes les strates de la société soviétique, et particulièrement en science, se traduit aussi par une influence directe sur les modalités discursives de la diffusion de la connaissance, et ce en vue de démontrer son adhésion à la politique du régime. Nous verrons que ces spécificités ont tendance, au premier abord, à jeter le trouble sur la cohérence de l'argumentation de Vladimir Fock en vue de la défense des théories modernes de la physique. Dans un second temps, pour reconsidérer ce point, nous nous pencherons plus concrètement sur la réalisation par Fock de l'un des aspects

essentiels du discours scientifique soviétique : la critique. Dans les années 1950, le physicien russe se tourne en effet vers la pratique d'une critique frontale de différents collègues, tant en URSS qu'à l'étranger. Nous étudierons quatre cas bien particuliers, Einstein et Bohr pour les figures internationales, Mandelstam et Blokhintsev pour les soviétiques, et nous montrerons comment ces critiques, en plus de répondre aux exigences de la rhétorique soviétique, sont justifiées par Fock comme des formes de défense des théories de la mécanique quantique et de la relativité. Enfin, dans un dernier temps, en continuant de nous appuyer sur l'analyse de certaines caractéristiques du discours scientifique soviétique, nous discuterons concrètement ce qui chez Fock est de l'ordre du politique, du philosophique et du scientifique dans ses écrits. Nous montrerons que le physicien fait preuve d'une remarquable adaptation à son environnement dans le sens où l'inclusion dans son discours de composantes spécifiques au contexte ne se fait jamais au prix d'une altération du contenu scientifique. La sincérité de son argumentaire et sa finalité strictement scientifique nous sera alors manifeste.

Sources :

Étant donné que nous poursuivons ici le développement de nos considérations sur le contexte stalinien, les sources que nous avons mises en avant pour le chapitre précédent continuent de conserver tout leur intérêt. Notons cependant que pour ce qui est du sujet plus spécifique des aspects rituels et rhétoriques du discours scientifique, nous nous appuyons avant tout sur Kremmentsov avec *Stalinist Science* [Krem 1997] et Kojevnikov avec *Stalin's Great Science* [Koje 2004], qui prennent en considération ces éléments souvent oubliés dans la littérature.

Concernant la production scientifique de Fock, le corpus de textes à notre disposition est d'apparence assez vaste, le physicien dédiant largement sa carrière aux questions d'interprétation après-guerre. Mais il faut noter que pour la période qui nous intéresse, il est avant tout riche pour ce qui est de la relativité générale. Malgré tout, nous avons la chance que Fock publie coup sur coup au tout début des années 1950 deux textes sur la mécanique quantique qui sont des critiques explicites d'une part d'une figure internationale, Bohr [Fock 1951a], et d'autre part d'un physicien soviétique, Blokhintsev [Fock 1952]. Ce sont ces deux articles qui nous permettent d'équilibrer nos considérations entre mécanique quantique et relativité générale, et de dégager chez Fock certaines régularités de son discours. Pour ce qui est de la relativité générale, notons que le corpus s'avère divers sur la forme mais assez

redondant sur le fond. C'est cette particularité qui nous permet la réflexion menée sur l' « argument Mach » (VII.3.1.2).

Les commentaires sur les archives du chapitre précédent restent valables. Bien que nous nous penchions principalement sur la production écrite de Fock elles jouent un rôle essentiel en contextualisant cette dernière et en permettant de mieux saisir ses enjeux. Certains documents, comme les comptes-rendus des réunions de préparations de « la conférence qui n'a pas eu lieu » (GARF) ainsi que la correspondance entre Fock et Tamm (ARAN SPb) sont déterminants. Les premiers légitiment la nécessité de questionner l'idée d'une influence de la politique sur les écrits de Fock alors que les seconds apportent un éclairage majeur sur la stratégie employée par Fock dans son combat pour la défense des théories modernes de la physique.

1. Spécificités du discours scientifique en URSS

Nous avons pu constater précédemment que la mise en place du stalinisme marque une véritable révolution de l'organisation de la société soviétique. Au-delà de l'industrialisation forcée et la collectivisation des terres, la bureaucratisation de la société cristallise des tensions politiques qui se doublent d'une conversion dogmatique du matérialisme dialectique devenue unique idéologie d'État. Dans ce contexte particulier les tensions s'expriment bien évidemment de façon concrète dans le discours politique. Nous nous proposons donc de discuter brièvement de la façon dont certaines spécificités du discours politique soviétique se transposent aux sciences. Nous observerons qu'avec le jdanovisme et les campagnes idéologiques qui en découlent, cette tendance se manifeste de façon très concrète lors des réunions de préparation de « la conférence qui n'a jamais eu lieu ». En analysant avec plus d'attention la présentation de Fock à cette occasion nous constaterons qu'il n'échappe pas à la règle générale et qu'au premier abord semble se manifester dans son discours l'insoluble paradoxe de devoir défendre des théories en en critiquant les pères fondateurs.

1.1. Rhétorique et rituels staliniens

La question du discours scientifique en URSS, en particulier durant la période stalinienne, a été discutée par Nikolai Krementsov dans son remarquable ouvrage *Stalinist Science* [Krem 1997]. Dans cette étude, l'auteur prend en considération certains aspects souvent passés sous silence comme le rôle des rituels ou encore de la rhétorique. Il se concentre notamment sur

trois aspects : le langage, le comportement public et la critique. Ainsi, Kremontsov établit comment en URSS la culture professionnelle de la communauté scientifique reflète parfaitement la symbiose entre l'État et les scientifiques, comment ces derniers adoptent la rhétorique, les étiquettes, et le style critique de la bureaucratie d'État. Comme nous avons déjà pu l'évoquer au chapitre précédent, alors que les plus hautes instances soviétiques essaient d'imposer leur autorité et de garder le contrôle sur la communauté scientifique, les membres de cette dernière doivent en contrepartie se battre pour poursuivre des objectifs de carrière ou pour légitimer leurs intérêts scientifiques.

C'est initialement la révolution culturelle qui politise la culture professionnelle scientifique en URSS. En parallèle des campagnes politiques lancées contre « l'idéalisme menchévique » ou encore « la servilité envers l'Ouest », le rôle de la rhétorique est renforcé par la volonté affichée de la communauté de démontrer sa conformité avec la ligne idéologique du Parti. Les scientifiques généralisent l'usage de mots tels que « pratique » – par opposition à théorique – ou « marxiste ». Ils inventent aussi un nouvel outil rhétorique, le « père fondateur », qui leur permet de défendre une origine acceptable de leurs travaux. Dans la tradition de Marx et Lénine, la critique scientifique traditionnelle est aussi étendue vers une critique « sociale » pour dénoncer et exposer perversions et déviations scientifiques. Ainsi, progressivement, la critique traditionnelle du contenu scientifique perd de son importance au profit d'attaques individuelles et d'une critique philosophique. Pour résumer, l'adaptation des scientifiques aux événements de la révolution culturelle « politise le discours scientifique et polarise la communauté en deux camps opposés – “nous” et “eux” » [Krem 1997, p. 53]¹.

Suite à la Seconde Guerre mondiale, la doctrine Jdanov est une confirmation de cette tendance, mais aussi sa formulation à un niveau plus officiel. En affirmant la division du monde entre le camp « impérialiste » américain et « démocratique » soviétique, Jdanov souhaite réaffirmer la primauté idéologique du marxisme-léninisme et l'autorité du Parti communiste. Du point de vue de la rhétorique, une attention toute particulière est portée au langage « patriotique », la distinction entre deux camps faisant ici référence aux catégories de la science « soviétique » et de la science « de l'Ouest ». La critique est renforcée, réaffirmant « la primauté des valeurs politiques et idéologiques sur les valeurs scientifiques

¹ Pour plus de développements sur la « politisation de la culture professionnelle » durant les années trente voir les pages 45 à 53 de *Stalinist Science* [Krem 1997].

traditionnelles » [Krem 1997, p. 222]¹. Un nouveau style de qualificatifs fait son apparition, les noms de scientifiques étant transformé en différents « ismes » permettant de définir de façon univoque une position idéologique. L'utilisation du nom d'un « ennemi » permet ainsi de dénoncer la stérilité, la servilité ou l'idéalisme d'un opposant.

Dans *Stalin's Great Science*, Alexei Kojevnikov s'intéresse à des questions similaires, en particulier pour la période qui concerne l'établissement de la doctrine Jdanov et l'organisation à travers le pays des grandes campagnes idéologiques [Kojé 2004, pp. 186-244]. Ses conclusions sont proches de celles de Kremsentsov : « as an elite group, scientists came into a closer dialogue with politicians and accepted some of their values, languages and games » [p. 186]. L'auteur développe en particulier le dernier point, celui des « games », et met en avant la *diskussia* (dispute) et la *kritika i samokritika* (critique et autocritique). Nous nous bornerons en français à désigner « games » par le terme de « rituels » qui regroupe un ensemble plus large de pratiques propre à l'organisation politique soviétique, mais qui surtout prend une connotation plus sérieuse que « jeux ». Nous avons en réalité déjà observé ces pratiques en action au cours du chapitre précédent, en particulier pour la « conférence qui n'a jamais eu lieu ». Nous souhaitons ici les définir de façon plus formelle afin de considérer leur impact sur le discours scientifique de Fock.

Pour Kojevnikov : « These games originated and were usually played within party structures and belonged to the repertoire called "intraparty democracy" » [p. 197]. Ils sont dans ce cadre antérieurs à la Seconde Guerre mondiale et sont en réalité des pratiques déjà bien établies dès les années 1920. La *diskussia* peut se définir en ces termes : « a meeting [where] participants were invited to demonstrate polemical skills in a theoretical matter that had not been decided by the authorities. A *diskussia* allowed for temporary, public disagreement over important political questions » [p. 199]. De son côté, la *kritika i samokritika* est davantage l'objet d'affaires personnelles plutôt que théoriques. La première de ses fonctions est l'initiation et l'éducation des cadres du Parti : en subordonnant ses vues personnelles à celle du collectif et en acceptant la critique, chaque membre peut prouver qu'il a correctement assimilé les différentes valeurs de l'institution politique. Mais la critique et

¹ *Ibid.* Sur la « "Politically Correct" Science » et la doctrine Jdanov voir les pages 215 à 225.

l'autocritique sont aussi un moyen de mettre en œuvre la terreur. C'est un mécanisme de purge qui permet de révéler et d'accuser, de façon interne, les ennemis¹.

Avec les disputes philosophiques d'après-guerre, les différents membres du Parti impliqués dans les débats, qu'ils soient représentants des autorités ou encore « philosophes patriotes », permettent une mise en œuvre effective des différents rituels ici évoqués :

Party members learned most of their cultural rules not from such texts as party statutes but from watching and participating in actual performances; their behavior and discourse at a meeting depended in the most critical way on the announced type of ritual [Kojève 2004, p. 200].

Et nous avons ici bien affaire à des *diskussii*. En effet, il est question pour chaque discipline abordée de sceller le débat sur les orientations à prendre et la ligne idéologique à suivre. De plus, Jdanov en personne met *kritika i samokritika* à l'honneur dans son intervention du 24 juin 1947 contre l'ouvrage de G. F. Aleksandrov :

[...] the party has long ago found and put into the service of socialism this particular form of exposing and overcoming contradictions in socialist society (these contradictions exist, although philosophers are reluctant to write about them), this particular form of the struggle between old and new, between withering away and emerging in our Soviet society, which is called *kritika i samokritika*. [...] Development in our society occurs in the form of *kritika i samokritika*, which is the true moving force of our progressive development, a powerful tool in the party's hand [Jdanov 1947, p. 40]².

Par conséquent, il n'est pas étonnant de constater que les réunions de préparations de la « conférence qui n'a jamais eu lieu » reflètent tout à fait une application effective des rituels de *diskussia* et de *kritika i samokritika*. Il est bien question de trancher sur le statut de la physique en Union soviétique et le ton des débats engagé pour chaque texte invite

¹ Kojèvenikov s'appuie ici notamment sur les travaux plus spécifiques de Unfried [Unfried 1994]. Mais il souligne aussi que Getty [Getty 1985] met en évidence que la *kritika i samokritika* est aussi un moyen de critiquer certains patrons locaux du Parti communiste, renversant de façon occasionnelle leur pleine autorité. L'autocritique les contraint à ne pouvoir utiliser leur autorité pour faire taire la critique. La mise en place de la *kritika i samokritika* dans ce cadre précis émane généralement d'une autorité supérieure et n'a lieu qu'en des occasions spéciales, notamment lorsqu'un des responsables du Parti fait l'objet de divers soupçons.

² Traduction anglaise de Kojèvenikov [Kojèvenikov 2004, p. 202].

constamment à la critique et l'autocritique. C'est dans ce contexte particulier que le discours scientifique de Fock va être influencé.

1.2. 1949 – Fock est-il paradoxal ?

En vertu de nos développements précédents il est pertinent d'introduire la question plus spécifique du discours scientifique chez Fock en prenant comme point de référence le texte qu'il présente en 1949 aux réunions de préparation de la « conférence qui n'a jamais eu lieu ». En plus de s'inscrire parfaitement dans le cadre des rituels soviétiques susmentionnés, notons aussi que c'est l'exemple le plus concret d'une influence directe exercée par les autorités sur les écrits de Fock. En effet, rappelons les recommandations qui lui sont formulées par Topchiev, alors en charge du Comité d'organisation :

[...] nous attendons de Vladimir Aleksandrovich, comme des plus grands théoriciens de la physique, une critique des vues idéalistes des physiciens étrangers. De sa bouche, une telle critique sera particulièrement solide pour tous les participants. [... *S'adressant directement à Fock*] Cela rendra votre présentation plus complète, plus incisive politiquement, et c'est ce dont nous avons besoin¹.

Plus précisément, il même question dans cette direction d'écrire une « partie additionnelle ». Les deux versions de la présentation de Fock conservées dans les archives se présentent manifestement comme antérieure pour la première, et postérieure pour la seconde, à la réunion où le texte est discuté : on trouve dans ce dernier document une nouvelle partie intitulée « Kritika filosofskogo idealizma v sovremennoy fizike » (Critique de l'idéalisme physique dans la physique moderne)². Par le fond et la forme, Fock a totalement assimilé la critique et suivi les recommandations du Comité d'organisation de la conférence.

Avant de nous pencher sur le contenu du texte complet, sur sa forme et sur la rhétorique employée, signalons que des traces de sa conception remontent tout de même à l'année 1940. Soulignons alors qu'en ce temps Fock fait déjà l'expérience d'un exercice similaire à celui de la critique collective des réunions de préparation de la conférence de 1949. Il compose

¹ Stenogrammy zasedaniy Orgkomiteta Vsesoyuznogo soveshchaniya fizikov. 18, 21, 22, 23, 25 i 28 fevralya 1949 (Transcriptions des réunions du Comité d'organisation d'URSS de la rencontre des physiciens. 11, 12, 13 et 15 janvier 1949) – GARF, 9396-1-250.

² Tezisy vystupleniy po dokladam na Vsesoyuznogo soveshchaniy fizikov (1949) (Textes des interventions pour communication à la réunion des physiciens de l'URSS) – GARF, 9396-1-259.

un article intitulé « Tri osnovnyye zakona sovremennoy fiziki » (Trois lois fondamentales de la physique moderne) dans le cadre de la préparation d'un ouvrage collectif concernant les développements philosophiques des sciences à la lumière de *Matérialisme et empiriocriticisme* de Lénine¹. Alors, une réunion – dont nous avons pu consulter la transcription – est organisée pour discuter le texte de Fock le 10 mai 1940 en présence de personnalités telles que S. I. Vavilov, M. Markov, B. M. Vul, O. Schmidt², le biochimiste A. Oparin, mais aussi un certain nombre de philosophes comme A. M. Deborin, E. Kolman et A. A. Maksimov³. Si nous savons que le document ici discuté est probablement similaire à celui de 1949 c'est que le thème est identique, à savoir la perception dans un cadre matérialiste dialectique de trois lois fondamentales de la physique : la loi de conservation de l'énergie, la constance de la vitesse de la lumière dans le vide et le théorème d'indétermination de Heisenberg.

Le ton de la discussion de 1940 est nettement moins politisé et virulent que celui de 1949. Il est globalement demandé à Fock de procéder à diverses modifications mineures de terminologie mais surtout d'accentuer le caractère philosophique de l'article qui pour beaucoup n'aborde pas suffisamment les questions relatives au matérialisme dialectique. C'est Maksimov qui se montre le plus exigeant et sceptique notamment en ce qui concerne le traitement accordé par Fock à la loi de conservation de l'énergie. Mais son point de vue n'a que peu d'écho et il n'est pas explicitement demandé à Fock de changer son propos. Deborin suggère seulement la possibilité de voir l'éditeur apporter quelques modifications, ce à quoi Fock conclut que dans tous les cas « il ne souhaitait pas spécialement s'attarder dessus, mais simplement donner un point de vue général »⁴. Mais en 1949, on cherche à établir le cadre d'une véritable *diskussia* et les enjeux apparaissent comme beaucoup plus importants.

¹ Notons qu'il est aussi fort probable que ce texte soit celui qui a conduit Fock à la lecture de *l'Antidürhing* de Engels [Enge 1877] pour sa préparation. Voir nos commentaires du chapitre cinq sur le sujet (V.2.1).

² Astronome et géophysicien, Otto Schmidt est aussi homme d'Etat, siégeant comme député du Soviet suprême de l'Union soviétique de 1937 à 1946.

³ Stenogramma zasedaniya komissii po filosofskomu obobshcheniyu itogov razvitiya yestestvoznaniya so vremeni vykhoda v svet knigi lenina *Materializm i empiriokrititsizm* (Transcription de la réunion de la Commission sur la synthèse philosophique des résultats des sciences naturelles depuis la publication du livre de Lénine « Matérialisme et empiriocriticisme ») – ARAN SPb 1034-2-115.

⁴ *Ibid.*

Le paragraphe ajouté par Fock sur les recommandations de Topchiev est particulièrement intéressant pour nous car il marque, dans le contexte particulier que nous connaissons, le début de l'usage fréquent chez Fock de certaines des composantes rhétoriques et rituelles discutées précédemment. Afin de les mettre en évidence, plutôt que de prendre en considération la nouvelle version du texte contenue dans les archives, notre référence est une version finalisée et publiée par Fock dans le *Vestnik Leningradskiy Gosudarstvennyy Universitet* (Bulletin de l'Université d'Etat de Léningrad) [Fock 1949]. Cette publication, que Fock a vraisemblablement voulue suite à l'annulation de la conférence, ne possède que très peu de différences avec le manuscrit présent dans les archives du Comité d'organisation. Soulignons toutefois l'une d'entre elles qui ne semble pas si anodine compte-tenu du contexte : toutes références, jusqu'alors laudatives, à Markov sont supprimées.

La partie qui nous intéresse particulièrement, « *Kritika filosofskogo idealizma v sovremennoy fizike* » (Critique de l'idéalisme physique dans la physique moderne), marque très clairement une opposition entre les tenants d'une interprétation idéaliste des théories physiques face à ceux d'une interprétation matérialiste dialectique. Fock reprend les principales idées de son article de *Pod znamenem marksizma* de 1938 sur la compatibilité du matérialisme dialectique et des théories modernes de la physique [Fock 1938b]¹ et souligne l'importance d'une lutte contre l'idéalisme. Cependant, il formule tout de même ses critiques de façon beaucoup plus frontale et condensée. Ainsi il livre un jugement explicite de quatre physiciens étrangers – Jordan, Bohr, Heisenberg et Einstein – et les attaque pour leurs prises de position jugées parfois comme idéalistes. En cela, Fock pratique de façon effective la *kritika*, comme il le lui a été recommandé. Si l'aspect patriotique n'est pas explicitement mis en avant par le physicien de Léningrad on peut dénoter à plusieurs reprises l'usage du pronom personnel « nous » pour qualifier le camp des « matérialistes ». De plus, Fock n'échappe pas à la *samokritika* en déclarant au sujet du paradoxe EPR :

Nous ne devrions pas parler de la révision du concept de réalité physique, mais très exactement du passage d'une description classique absolue à une description quantique non-absolue. Malheureusement ce fait n'a pas été indiqué dans mon avant-propos aux travaux d'Einstein et Bohr, au sein duquel il y a aussi quelques formulations incorrectes [Fock 1949, p. 46].

¹ Voir nos développements du chapitre six (VI.1.2.3).

Notons alors que nous trouvons ici une des premières expressions de la transition dans l'approche générale de l'interprétation de la théorie quantique par Fock telle que nous l'avons exposée au chapitre quatre (IV.1).

La critique ici formulée à l'encontre des quatre physiciens étrangers susmentionnés se situe uniquement dans le cadre de la mécanique quantique et procède avant tout de l'assimilation de leurs pensées philosophiques à une forme d'idéalisme. Or, notons que les noms choisis sont parmi les principaux fondateurs des théories modernes de la physique, et que Fock, en présentant dans le même temps la constance de la vitesse de la lumière dans le vide et le théorème d'indétermination de Heisenberg comme des lois fondamentales de la physique a pour but premier de défendre ces théories. De plus, le contexte que nous avons jusque-là décrit jette un sérieux doute quant à la possibilité de pouvoir défendre une théorie en assimilant son fondateur à une position idéaliste. Fock semble tomber immédiatement sous le coup du paradoxe et donne l'apparence d'un scientifique qui subit totalement la machinerie totalitariste soviétique. De ce point de vue, son discours perd toute crédibilité.

Ce constat résulte d'une vision caricaturale du discours scientifique de Fock, une vision qui toutefois a pu être partagée à de nombreuses reprises. Il faut en effet souligner que l'utilisation du terme « paradoxal » se fait ici en prenant un point de vue extérieur, pour ne pas dire ignorant, sur les réalités du contexte soviétique. Car il n'est pas rare chez les contemporains et compatriotes de Fock, pour qui l'exercice de la critique est une pratique commune, de différencier pour celle-ci différents niveaux de lecture. Par conséquent, ce qui nous intéresse est d'observer les modalités propres de la critique chez le physicien de Leningrad et dans ce cadre l'idée de paradoxe nous permet en réalité de donner du relief à son articulation générale. Fock lui-même se retrouve parfois confronté à la nécessité de justifier son approche et pour montrer comment le paradoxe peut être levé il est nécessaire de se pencher précisément sur les différentes formes que prend chez lui la critique scientifique, mais aussi de montrer comment s'équilibrent au sein de son discours les différentes composantes scientifiques, philosophiques et politiques alors en jeu.

2. Fock et la critique scientifique

Dans la foulée des réunions de préparation de la « conférence qui n'a jamais eu lieu », au cours des années 1950, Fock va témoigner de la politisation de sa culture professionnelle en

ayant recours à de nombreuses reprises à l'exercice de la *kritika*. Au travers de celle-ci se manifestent divers objectifs :

- Affirmer l'impossible remise en question du corps théorique de la mécanique quantique et de la théorie de la relativité.
- Promouvoir ses propres interprétations des théories.
- Démontrer la compatibilité de ces théories avec le matérialisme dialectique.
- Combattre l'idéalisme.

Nous allons nous intéresser à quatre physiciens faisant l'objet de la critique de Fock, deux étrangers, Einstein et Bohr, et deux soviétiques, Mandelstam et Blokhintsev. Nous couvrirons ainsi tout aussi bien la relativité générale que la mécanique quantique et soulèverons quelques contraintes que la *kritika* pose spécifiquement à Fock lorsqu'elle est dirigée à l'encontre de l'un de ses compatriotes. Les personnalités ici choisies sont soit des figures internationales de premier plan considérées comme des fondateurs des théories modernes de la physique, soit des physiciens particulièrement influents en URSS. Nous tenterons ainsi de montrer comment Fock concilie l'ensemble des objectifs qu'il poursuit au travers de l'exercice de la critique mais aussi de quelle manière il lève le paradoxe que nous avons évoqué précédemment sur la défense des théories au travers d'attaques à l'encontre de leurs représentants.

2.1. Einstein et Bohr : deux figures internationales objets de la critique de Fock

2.1.1. Au-delà du jubilé : Einstein

Nous l'avons discuté au chapitre quatre (IV.2.2.2), Fock développe dès ses travaux de 1939 sur le problème du mouvement un point de vue non-orthodoxe sur la relativité générale. Cette interprétation, qu'il a aussi développée en vertu de nos discussions du chapitre cinq sous l'influence du matérialisme dialectique (V.2), va devenir après-guerre l'objet de nombre de ses travaux. Le physicien russe affirme dès 1950 son objectif de la diffuser à l'appui d'une critique d'Einstein, notamment dans un article préparé pour un recueil en hommage à Lobatchevski : « J'ai donné un compte-rendu détaillé de mon point de vue sur la théorie de la gravité d'Einstein car le point de vue d'Einstein, que je considère comme erroné, est dominant de nos jours » [Fock 1950b, p. 70].

La critique d'Einstein par Fock est donc l'objet d'un riche corpus qui s'étale jusqu'à ses dernières productions scientifiques du début des années 1970. Son expression la plus

concrète se retrouve surtout dans un court article du milieu des années 1950 qui traite de façon assez explicite d'Einstein en tant qu'individu. Publié en 1956 dans la *Pravda* il est intitulé « Polveka velikogo otkrytiya. O teorii otноситel'nosti Al'berta Eynshteyna » (Un demi-siècle d'une grande découverte. Sur la théorie de la relativité par Albert Einstein) [Fock 1956a]¹. Préparé quelques mois après la mort d'Einstein², l'article possède de façon très explicite le caractère ambivalent déjà souligné pour celui de 1949 sur les lois de la physique dans un cadre matérialiste dialectique [Fock 1949]. Le physicien de Léninegrad y souligne les succès de la théorie de la relativité, mais promeut sa propre interprétation de la théorie et critique par conséquent ce qu'il considère comme la profonde incompréhension de la signification de la relativité générale par Einstein. Parmi les considérations développées par Fock on retrouve une attention toute particulière aux vues philosophiques du fondateur de la théorie :

Au sujet des vues philosophiques d'Einstein toute sa vie il fut sous l'influence de la philosophie idéaliste de Mach. Il hésita entre positivisme et un matérialisme timidement exprimé. Dans le premier paragraphe de son livre Einstein formule son credo philosophique positiviste : « Le but de toute science, qu'elle soit naturelle ou psychologique, se trouve dans l'accord entre sensations (expériences) et sa réduction en un système logique ». Ensuite il parle de séquence et durée de sensations et de sensation du temps (« mon temps »). La compréhension du corps physique, en particulier du corps solide, est construite par Einstein sur la base de « perceptions sensorielles complexes relativement stables ». De cette façon Einstein s'approche des concepts d'espace et de temps. Tout cela est bien sûr, du plus pur idéalisme [Fock 1956a].

Les aspects idéalistes de la pensée d'Einstein sont ici mis en avant, mais notons que Fock s'applique bien à séparer ce qui est de l'ordre de la théorie physique et de son interprétation,

¹ Dans le même temps, une session ouverte de l'Académie des Sciences le 30 novembre 1955 est dédiée à la théorie de la relativité et, plus spécifiquement, au jubilé de ces 50 ans. Fock y délivre une présentation sur les équations du mouvement qui sera incluse par la suite dans un volume mémoriel intitulé *Einstein et la physique moderne* [Fock 1956b]. Mais ce volume contient aussi la traduction par Fock des « Notes autobiographiques » d'Einstein qui sont par ailleurs commentées par le physicien soviétique [Fock 1956d] (aussi publié peu de temps auparavant dans *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Fock 1956c]). Le message général y est identique, la stratégie similaire et le développement plus complet en raison de sa nature que pour l'article ici discuté. Mais ce dernier possède une dimension complémentaire indispensable à nos développements au travers des échanges qu'il provoque entre Tamm et Fock et c'est pourquoi nous l'abordons ici.

² Il décède le 18 avril 1955 à Princeton d'une rupture d'anévrisme.

car si « [t]out cela est bien sûr, du plus pur idéalisme, [...] heureusement ce n'est en rien pertinent pour la théorie de la relativité ». Plus loin, Fock appuie encore davantage sur cette distinction :

L'histoire de la physique démontre que pour les scientifiques qui ont fait de grandes découvertes [...] ils n'ont pas toujours bien compris la véritable signification de leurs découvertes. Dans de nombreux cas l'authentique signification de la découverte est faite dans une étape plus lointaine du développement. Ceci pour conclure que ce qui semblait convaincant pour l'auteur, cesse d'être convaincant pour la génération suivante de scientifiques et est remplacé par autre chose. Ceci s'est produit avec la découverte scientifique d'Einstein [Fock 1956a].

C'est sur cette base que le physicien russe fait le choix dans son article de développer son propre point de vue sur la relativité générale.

Le manuscrit est envoyé par la *Pravda* à Tamm pour information. Celui-ci est décontenancé par son contenu et fait part de son sentiment à son collègue de Léninegrad dans une lettre du 13 novembre 1955¹. Après avoir rappelé l'article de Fock contre Maksimov en 1953 [Fock 1953a], Tamm exprime très clairement ses doutes quant au caractère approprié d'une polémique avec Einstein et la discussion de ses erreurs philosophiques dans un article de quotidien publié à l'occasion d'un jubilé. Rappelons-le, Einstein vient de décéder et l'on fête en 1955 les 50 ans de la relativité restreinte. Fock répond à Tamm le 17 novembre 1955 par une longue et cordiale lettre qui expose point par point ses considérations sur le sujet². Comme il l'indique tout d'abord, ce n'est pas un article-jubilée qui lui a été demandé par la *Pravda*, mais une recension d'un ouvrage d'Einstein, à savoir la traduction russe de *The Meaning of Relativity* [Eins 1955]³. Tamm se serait laissé abuser par le titre de l'article, choisi par la rédaction de la *Pravda*, mais qui selon Fock possède tout de même le mérite de

¹ Lettre de Tamm à Fock datée du 13 novembre 1955 – ARAN SPb, 1034-3-691. Voir aussi les commentaires de Gorelik sur cet épisode [Gore 1993, pp. 318-320].

² Lettre de Fock à Tamm datée du 17 novembre 1955 – ARAN SPb, 1034-3-160.

³ Ce point est explicite dans la publication de Fock, une bonne partie de l'article traitant du contenu de l'ouvrage chapitre par chapitre. La demande est faite par la *Pravda* dans une lettre du 13 septembre 1955 – ARAN SPb, 1034-2-216.

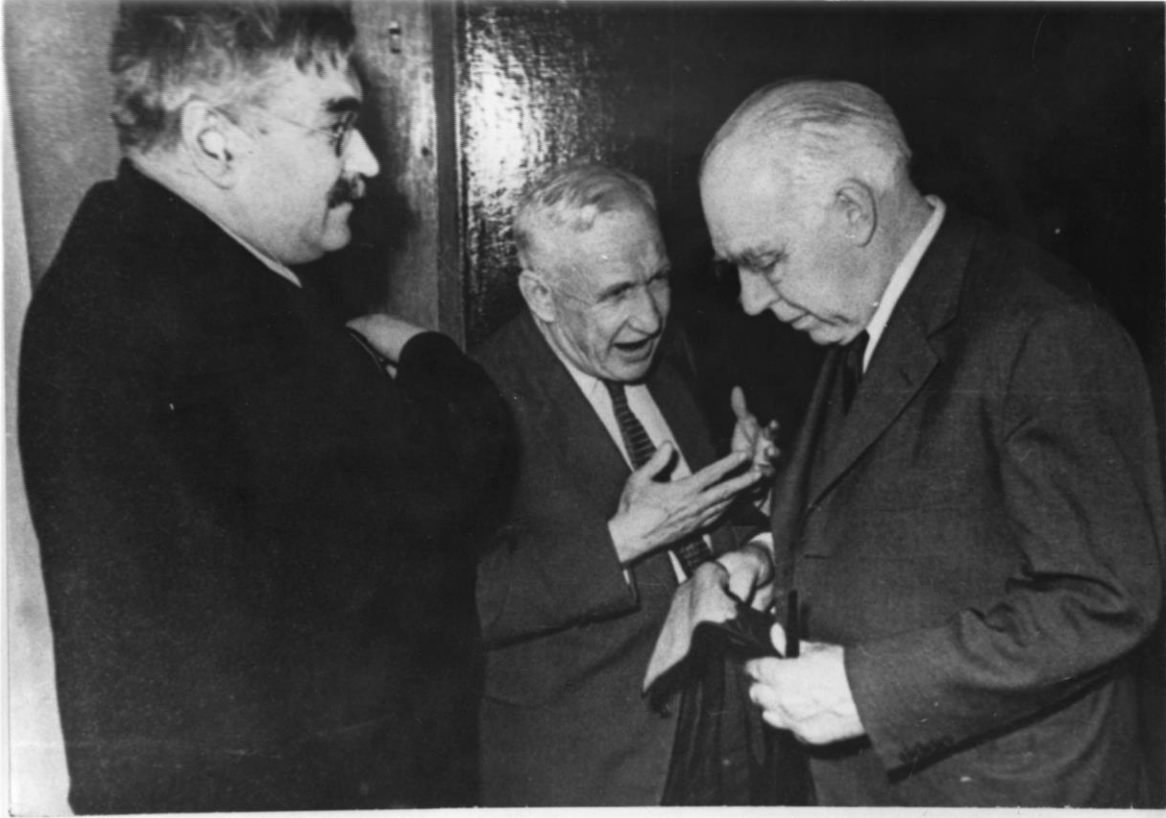


Figure 13. Vladimir Fock, Igor Tamm et Niels Bohr en discussion à Moscou en 1961 [Niels Bohr Archive].

présenter la théorie de la relativité comme une « grande découverte ». Fock continue en contestant l'idée selon laquelle les « grands personnages » ne pourraient pas faire l'objet de critiques. Pour lui, ces dernières peuvent se situer à différents degrés de lecture, et lorsqu'il est question de mathématiques il estime notamment avoir la légitimité suffisante pour critiquer l'auteur de la théorie de la relativité : « Einstein est un grand physicien, mais il n'est pas un très grand mathématicien, et sur les questions mathématiques en lien avec sa théorie je me sens plus fort que lui ». Pour Fock, les critiques formulées à l'encontre d'Einstein dans son article reposent sur des erreurs mathématiques qu'il « ne peut pas ne pas voir ». Plus intéressant encore, il détaille alors la véritable stratégie mise en jeu dans son article :

Ses erreurs mathématiques [d'Einstein] doivent être mises en évidence. Pour la réputation d'Einstein il est utile d'épurer sa théorie des propositions fausses. Ce serait une erreur tactique que de garder le silence sur les propositions philosophiques erronées d'Einstein. La seule façon pour les scientifiques d'obtenir l'immunité face aux attaques philosophiques est d'admettre les erreurs philosophiques par les physiciens eux-mêmes et de séparer ces erreurs de l'entité de la théorie.

De plus, il conclut :

La publication dans un grand quotidien d'un article sur Einstein signé par moi – indépendamment de son intelligibilité – je le considère comme très utile car :

- (a) cela contribue à la reconnaissance officielle dans notre pays de la théorie de la relativité comme d'une grande découverte et d'un grand accomplissement du génie humain,
- (b) cette reconnaissance est faite sans s'aplatir et avec une critique raisonnable,
- (c) les péchés philosophiques d'Einstein sont mentionnés mais ont été pardonnés¹.

Très clairement, c'est ici l'intégralité du statut social de la théorie de la relativité qui est discutée.

Ainsi, dans sa correspondance avec Tamm, Fock expose très clairement sa tactique : dans le contexte soviétique, pour éviter un affrontement frontal et stérile avec une opposition réactionnaire, la défense des théories modernes de la physique ne peut se passer d'une révision critique de certains de ses concepts, mais aussi d'interprétations et de développements alternatifs éventuels. De plus, ce qui compte réellement est que la publication d'un tel article dans un journal aussi influent que la *Pravda* témoigne d'une forme de reconnaissance officielle de la théorie. Que Fock soit en désaccord avec Einstein est une chose, qui a pour lui une profonde signification physique. Mais c'est autre chose que de protéger la théorie de la critique ignorante, et Fock estime clairement que de pouvoir mettre en avant sa propre interprétation, construite sous l'influence du matérialisme dialectique, peut avoir un effet conséquent dans ce sens. Le physicien est totalement conscient qu'il a besoin du soutien des autorités politiques et en critiquant ouvertement Einstein il accepte aussi, en adoptant le style polémique des autorités, la politisation de la culture professionnelle soviétique. Son discours devient plus acceptable et son point de vue, qui sépare systématiquement le contenu de la théorie pour le valoriser et son interprétation pour en montrer sa flexibilité, peut gagner en visibilité et en efficacité. Que la réputation d'Einstein soit écornée face aux exigences politiques n'a finalement que peu d'importance en comparaison de la valeur du contenu scientifique et de ses perspectives de développement.

2.1.2. L'idéalisme de Bohr

La critique que Fock peut faire de Bohr prend un tour particulier en 1951 dans un article que nous avons déjà discuté au chapitre quatre (IV.1.1.1) pour son contenu technique : « Kritikа vzyglyadov Bora na kvantovuyu mekhaniku » (Critique des vues de Bohr en mécanique

¹ Lettre de Fock à Tamm datée du 17 novembre 1955. ARAN SPb, 1034-3-160.

quantique) [Fock 1951a]. La *kritika* devient ici ciblée sur l'un des fondateurs de la mécanique quantique. Elle est aussi plus virulente que jamais : Fock est radical, les vues philosophiques de l'école de Copenhague, « qui dominent parmi les physiciens étrangers » et dont Bohr est le représentant, « ont été élaborées sur les bases de la philosophie idéaliste – aussi appelé positivisme, incompatible avec la philosophie marxiste-léniniste du matérialisme dialectique » [p. 3]. La mention de « physiciens étrangers » est explicite et Fock renforce par ce biais l'aspect patriotique de ses propos. Plus spécifiquement, l'exercice de la *kritika* cible Bohr au travers des propos de son article « On the notions of causality and complementarity » de 1948 [Bohr 1948] et très clairement on retrouve ici l'ambivalence soulignée pour la critique d'Einstein en 1956 [Fock 1956a]. Fock appuie l'importance fondamentale de la mécanique quantique mais promeut aussi sa propre interprétation de la théorie en discutant celle de Bohr. Ainsi, la stratégie que nous avons pu mettre en avant au sujet du fondateur de la théorie de la relativité n'a rien de spécifique, et elle est en réalité un procédé que Fock systématise dans les années 1950 lorsqu'il approche de façon critique la pensée de ses collègues.

En 1951 la question n'est plus de savoir « si la compréhension bohrienne de la mécanique quantique est en contradiction avec le matérialisme »¹ comme en 1938². Fock va plus loin :

C'est pourquoi il est particulièrement important d'analyser si les points de vue des représentants de l'école de Copenhague en mécanique quantique font mention de propos inacceptables, d'irrégularités qui pour le lecteur soviétique sont évidentes, mais aussi d'erreurs concrètes, conduisant à une interprétation incorrecte de la mécanique quantique [Fock 1951a, p. 3].

L'accent est clairement mis sur les erreurs dues à la philosophie idéaliste et l'article de Bohr est repris point par point par Fock, à l'appui de longues citations, dans le but de souligner tout propos jugé inconsistant. De façon globale, nous avons déjà énuméré l'essentiel des divergences au chapitre quatre, celles-ci se retranscrivant généralement d'un point de vue purement épistémologique. Mais l'ensemble se double véritablement d'une dimension idéologique, et le nom de Bohr est donc explicitement associé à une position philosophique idéaliste comme peut l'être celui d'Einstein. C'est le cas lorsqu'il est question de discuter la

¹ Lettre de Fock à la rédaction de *Pod znamenem Marksizma*, datée du 24 octobre 1937 - ARAN SPb 1034-2-216.

² Voir nos développements du chapitre six (VI.1.2.3).

définition d'un « phénomène »¹. Pour Fock, Bohr commet une double erreur, physique mais aussi philosophique en se laissant séduire par le positivisme :

L'erreur philosophique de Bohr est bien évidemment que pour plaire à la philosophie positiviste-idéaliste, il cherche à éviter de mentionner l'objet d'étude dans l'expérience donnée ; cela est nécessaire pour lui afin de traiter l'objet seulement comme une structure logique auxiliaire, uniquement nécessaire pour la coordination des résultats obtenus par les instruments. Si Bohr ne le dit pas directement, il ouvre en réalité la voie à une telle interprétation, et d'autres empruntent ce chemin, plus ouvertement, en tant que partisans de la philosophie idéaliste.

Mais nous voudrions ici souligner l'erreur physique de Bohr, qui, peut-être, est moins évidente, mais pas moins importante. Parce qu'en interprétant de façon incorrecte des faits physiques les physiciens idéalistes étrangers essaient de justifier leur philosophie [Fock 1951a, pp. 11-12].

La philosophie de Bohr est aussi mentionnée dans le débat sur le caractère symbolique du formalisme mathématique, celui-ci étant « sûrement inspiré à Bohr par sa position philosophique idéaliste » [p. 9]. Mais Fock mentionne surtout ce qu'il considère comme une forme d'incohérence dans la position philosophique du physicien Danois : « Bohr n'est pas un idéaliste tout à fait cohérent, car il reconnaît la réalité des phénomènes qui peuvent être décrits en langage de la mécanique classique » [p. 9], ce dernier étant en revanche considéré par lui d'un point de vue idéaliste. Bohr peut même glisser « vers un point de vue matérialiste [...] parl[ant] des propriétés objectives des atomes (stabilités), de régularités existantes objectivement » [p. 10]. Par conséquent, en proposant sa propre interprétation de la théorie Fock souhaite lever les contradictions du discours de Bohr.

Comme en relativité générale, à aucun moment le Russe ne dévalorise la portée scientifique de la mécanique quantique qu'il continue de présenter comme une théorie solide et en accord avec les principes du matérialisme dialectique. Mais sa défense de la théorie

¹ Voir nos développements du chapitre quatre (IV.1.1.1). Rappelons que Fock reproche à Bohr de ne pas faire de référence directe à l'objet à l'origine du phénomène pour définir ce dernier, mais aussi qu'il soulève une contradiction en raison de l'approche par le Danois de la relation entre l'objet étudié et l'appareil de mesure comme une « interaction incontrôlable ».

passé clairement par le discours d'apparence paradoxal que nous avons mis en avant précédemment, à savoir par une dévaluation de l'approche philosophique de l'un de ses principaux représentants et fondateurs. Plus encore, sa critique s'étend à la complémentarité, alors même qu'en raison des tensions en cours en Union soviétique nous nous trouvons au cœur de ce que Graham désigne comme « l'âge du bannissement de la complémentarité »¹. Pour l'historien américain, le texte que nous discutons ici est même la preuve qu'en raison de l'atmosphère ambiante et de la critique à son encontre, Fock doit « altérer sa terminologie et hésiter temporairement sur sa défense de la complémentarité ». Il est vrai que jamais le physicien soviétique ne se montre aussi critique au sujet de cette dernière, mais afin de mieux commenter les propos de Graham, reproduisons ici le passage incriminé dans lequel les parties essentielles sont soulignées par nous-même :

La partie essentielle de la mécanique quantique, permet une compréhension plus profonde de l'étude des propriétés des objets atomiques, formulée sans l'aide du principe d'indétermination mais à l'aide d'un formalisme mathématique, comprenant des opérateurs dans un espace de Hilbert, des équations d'onde, des fonctions d'ondes etc. [...]

La surévaluation de la relation d'incertitude conduit Bohr à une réévaluation de grande envergure de son principe de complémentarité. A l'origine le terme de complémentarité désignait la situation qui est directement issue des relations d'indétermination : la complémentarité concernait l'indétermination sur la mesure des coordonnées et de la quantité de mouvement (dans un sens inversement proportionnel) et le terme « principe de complémentarité » était compris comme un synonyme des relations de Heisenberg. Mais très rapidement cependant, Bohr a commencé à voir dans son principe de complémentarité un certain principe universel qui limite non seulement la possibilité de description dans l'esprit de la physique classique, mais aussi la possibilité d'une description scientifique applicable non seulement en physique mais aussi en biologie, psychologie, sociologie et dans toutes sciences. Un tel point de vue est tenu dans l'article analysé de Bohr (en dernière page).

Compte-tenu du caractère explicitement infondé d'une telle perspective, nous ne la traiterons pas ici. Toutefois comme l'expression « principe de complémentarité » a perdu sa signification originale et commence à être utilisée comme une désignation pour d'inexistantes limitations

¹ La période est délimitée de 1948 à approximativement 1960 par Graham [Grah 1987, p. 328]. Elle désigne suite à l'affaire Markov, une phase dans l'histoire des sciences soviétiques où la complémentarité disparaît globalement du débat philosophique, même si les travaux de Fock restent une exception.

de la connaissance, et autres idées fausses, il serait mieux de l'abandonner [Fock 1951a, pp. 11-13].

Ce passage rappelle à toutes fins utiles que Fock assimile largement la complémentarité aux relations d'indétermination de Heisenberg. Rappelons aussi qu'il souhaite avant tout, dans son approche de la question interprétative en mécanique quantique, mettre l'accent sur la partie active du processus expérimental en mécanique quantique, sur la fonction d'onde. Par conséquent, c'est en accentuant le contraste avec tout autre élément qu'il en vient à parler d'une « partie essentielle de la mécanique quantique [...] formulée sans l'aide du principe d'indétermination ». Toutefois, à aucun moment il ne remet en question dans son article sa validité scientifique et son utilité pour la compréhension du processus de mesure compris dans son ensemble. En revanche, il est évident qu'il estime que la propension de Bohr à vouloir étendre la complémentarité à d'autres domaines des sciences lui fait perdre son sens premier intimement lié aux relations de Heisenberg. C'est donc en raison de cette dénaturation, et uniquement celle-ci, qu'« il serait mieux de l'abandonner ».

L'approche générale du problème par Fock, l'accent mis sur la partie active du processus expérimental en mécanique quantique, mais aussi le fait de confronter directement Bohr à l'exercice de la *kritika* permettent à cet article de s'accorder concrètement aux exigences contextuelles de la doctrine Jdanov en URSS. Mais en procédant ainsi, il est évident que Fock prend le risque d'une lecture trop partielle et parfois dogmatique de sa pensée qui ne peut être compensée que par une approche attentive du contenu physique de l'article. Par conséquent, il est vrai qu'en raison du climat politique ambiant en Union soviétique, le discours de Fock, entre critique de Bohr d'un point de vue philosophique et défense de la théorie d'un point de vue épistémologique, peut laisser ses contemporains perplexes, à l'image de Tamm face à la critique d'Einstein. Pour autant, il est essentiel de souligner que le physicien de Léninegrad peut continuer de se targuer de présenter ses idées physiques avec cohérence.

2.2. Fock à l'assaut des physiciens soviétiques

2.2.1. Mandelstam et la relativité générale

Léonid Mandelstam¹ est un pionnier de la physique théorique moscovite et l'exemple de sa critique que nous allons maintenant développer avec la théorie de la relativité incarne nombre de spécificités du contexte de l'époque. Il décède en 1944, et la polémique qui nous occupe ici est relative à la publication par son étudiant, S. M. Rytov, de ses œuvres complètes [Mand 1947]. Le volume cinq, qui prévoit la publication de notes de cours de Mandelstam en mécanique quantique et relativité générale n'est publié qu'en 1950 avec le soutien du président de l'Académie des sciences, S. I. Vavilov, mais seulement au prix de quelques concessions. En effet, l'ouvrage est régulièrement attaqué, en particulier la partie dévolue à la théorie de la relativité, Mandelstam étant accusé de faire preuve de « positivisme », mais aussi d'« opérationnalisme » et de « conventionnalisme »².

Il faut noter qu'en vertu de nos développements sur l'épistémologie de Fock, à savoir le rôle qu'il accorde aux entités mathématiques mais aussi son adhésion à la critique par Lénine de la théorie des hiéroglyphes de Plekhanov et par extension du conventionnalisme, il n'est pas étonnant de voir le physicien de Lénine se joindre à la critique de Mandelstam. C'est le cas en 1951 avec la publication dans *Uspekhi fizicheskikh nauk* d'une recension du volume cinq de Mandelstam [Fock 1951b]. Précisons tout d'abord que lorsqu'il est question de relativité³ Fock se montre initialement positif sur l'intérêt scientifique et pédagogique des cours et lectures de son aîné, soulignant leur rôle dans la reconnaissance de la théorie : « L'aperçu [développé par Mandelstam] donne une image claire de ce qu'étaient les

¹ Pour une biographie complète de Mandelstam en anglais voir Pechenkin [Pech 2014].

² Ces critiques sont notamment formulées par le Comité du Parti de l'Institut de physique de l'Académie des sciences de l'URSS où travaillait Mandelstam. Pour un compte-rendu complet de la controverse ici en jeu sur le volume cinq des œuvres complètes de Mandelstam on peut consulter la partie qui lui est consacrée dans son ouvrage par Sonin [Soni 2017, pp. 226-239]. Voir aussi Vizgin [Vizg 1999, pp. 1275-1276]. La question de l'opérationnalisme chez Mandelstam est développée directement dans l'ouvrage de Pechenkin [Pech 2014, chapitre 13].

³ Notons que dans le même esprit que celui qui sera développé vis-à-vis de Blokhintsev dans la sous-section suivante, cette recension est aussi l'occasion pour Fock de critiquer l'approche statistique de la théorie de la mécanique quantique par Mandelstam. L'ouvrage dans son ensemble est lui considéré comme « extrêmement intéressant et mérit[ant] une étude avec le plus grand soin » [Fock 1951b, p. 163].

problèmes de la physique lors de la création de la théorie de la relativité et l'importance du rôle de cette théorie dans la résolution des contradictions accumulées » [p. 161]. De façon générale, pour Fock, « comme aperçu historique et comme analyse des concepts physiques de base de la théorie de la relativité [c'est] un écrit très vivant et passionnant » [p. 162]. Toutefois, ces commentaires laudatifs s'accompagnent d'une courte critique qui concerne la définition des concepts physiques quantitatifs de la théorie :

Sur la question de la définition des concepts physiques quantitatifs L. I. Mandelstam s'exprime ainsi : « La définition des concepts de base réside dans le fait que je propose un certain sujet, donne un certain processus, et ce sujet et processus définissent le concept ». Nous pensons que la présentation d'objets et de processus ne suffit pas ; en plus d'eux, et en premier lieu, on doit donner une théorie qui exprimerait non seulement le comportement du sujet donné dans ce processus donné, mais qui en reflète aussi les lois générales. Seulement dans cette condition, la définition ne serait pas artificielle mais s'adapterait naturellement à la précision pour laquelle la théorie physique donnée est vraie. A cet égard il convient de souligner que les définitions sont aussi peu arbitraires que la théorie physique sur laquelle elles se reposent [p. 161].

Fock est ici critique envers l'aspect opérationnel et conventionnel donné aux concepts physiques par Mandelstam, et il insiste en contrepartie sur la nécessité d'une approche réaliste des concepts, dépourvus d'arbitraire, et dotés d'une véritable signification physique. Notons alors que les développements de Fock dans cette recension, que ce soit en théorie de la relativité ou en mécanique quantique, ne font aucune référence explicite à la question de l'idéologie mise en œuvre. Si le matérialisme dialectique est présent, c'est uniquement au travers des principes épistémologiques qui lui correspondent.

Alors que cette critique de Fock, limitée à un contexte purement scientifique, ne semble pas avoir grand écho, une véritable polémique sur l'ouvrage de Mandelstam est lancée suite à une intervention de Aleksandr D. Aleksandrov à l'Institut de physique de l'Académie des sciences de Moscou le 28 janvier 1952¹. Mathématicien de Leningrad travaillant sur des problèmes méthodologiques de la physique théorique, Aleksandrov délivre une présentation qui traite des erreurs philosophiques de certains physiciens. Mandelstam en fait partie, comme le montre le volume cinq de ses œuvres complètes, la critique tournant à nouveau

¹ Sur cette intervention voir Sonin [Soni 2017, p. 226-228].

autour des aspects conventionnalistes de l'approche du physicien moscovite. Si à cette occasion Tamm, Landsberg, Feinberg, Rytov, Markov, Khaykin ou encore Ginzburg se lèvent pour défendre Mandelstam et argumenter avec Aleksandrov, le débat est clairement relancé à plus grande échelle.

Lorsque Maksimov publie son article de 1952 dans *Krasniy flot* il attaque aussi de façon frontale Mandelstam qu'il considère comme « l'un des promoteurs les plus importants des vues d'Einstein » [Maks 1952, p. 4]. De ces vues, Maksimov voit chez Mandelstam « une répétition complète des principes de base de la philosophie idéaliste moderne anglo-américaine – fabrication des nommées positivistes logiques ou empiristes logiques, physicalistes, opérationnalistes, sémantistes et autres magiciens dont le but est de remplir la tête des consommateurs crédules de bavardages pseudo-scientifiques » [p. 4]. Lorsque Fock répond à Maksimov avec « Contre la critique ignorante des théories de la physique moderne » [Fock 1953a], il revient sur cette attaque à l'encontre de Mandelstam :

Mandelstam était un matérialiste spontané, bien qu'il ne fût pas, à proprement parler, un matérialiste dialectique, de sorte que certaines de ses formulations pourraient être critiquées. En particulier, la question de la détermination des concepts physiques quantitatifs par Mandelstam présente pour nous des erreurs d'un point de vue philosophique. Cependant la critique de L. I. Mandelstam ne doit pas se conduire comme celle de A. A. Maksimov, qui n'est pas en mesure de comprendre le sujet, et décrie sans fondements notre remarquable scientifique, clamant faussement que Mandelstam rejetait l'idée d'une réalité existant au-delà de nous [p. 174].

La position adoptée par Fock est claire : si une critique des physiciens soviétiques doit avoir lieu, celle-ci ne peut être conduite par des philosophes ignorants des questions scientifiques en jeu. Car c'est systématiquement pour lui l'aspect scientifique qui prime et qui l'incite, afin de défendre avant tout ce qui est pour lui l'interprétation correcte de la théorie, à critiquer Mandelstam en retour. Cependant, cette critique ne peut pas être formulée de façon irraisonnée : Mandelstam peut tout au plus être accusé de n'avoir pas bien saisi le rôle de la dialectique pour la physique, mais en aucun cas de ne pas être un véritable matérialiste. Notons ainsi que jamais Fock, ni dans le cas présent, ni dans sa recension de 1951 [Fock 1951b] ne parle directement de « conventionnalisme » ou d' « opérationnalisme », deux « ismes » qui peuvent permettre une référence directe à l'idéalisme de la philosophie étrangère, comme le fait Maksimov, mais aussi Aleksandrov qui dans son exposé du 28 janvier 1952

associe Mandelstam aux idéalistes Philip Frank, membre du cercle de Vienne, et Percy Bridgman, père de l'opérationnalisme¹. Alors que dans le même temps Fock voit dans l'approche de Bohr du formalisme de la mécanique quantique – pur outil symbolique – l'influence directe de la philosophie idéaliste [Fock 1951a, p. 9], il ne peut pas se permettre, dans les temps troublés de l'Union soviétique, d'associer directement le nom d'un collègue hautement respecté et sous le coup d'attaques virulentes à un point de vue similaire. La critique se veut plus prudente que pour les physiciens étrangers, directement attaqués pour leur idéalisme. Fock se contente de la formuler le plus scientifiquement possible, concédant tout au plus quelques lacunes dans l'approche de la dialectique lorsqu'il faut directement répondre aux attaques philosophiques. Ainsi le physicien de Léninegrad, qui agit avant tout dans le sens d'une compréhension correcte de la théorie de la relativité en vertu de la stratégie énoncée à Tamm, parvient aussi à défendre publiquement la mémoire de Mandelstam.

Dans le même temps que la publication de la réponse de Fock à Maksimov, le physicien est membre avec Komar, Veksler, Khaykin, Kolomenskiy et Sushchinskiy d'une commission de l'Institut de physique de l'Académie des sciences, conduite par Vul pour obtenir « plus d'informations en vue de l'éclairage des questions méthodologiques dans les travaux de L. I. Mandelstam »². Cette commission présente son rapport le 9 février 1953, auquel est adjointe la note suivante de Fock : « Je serais prêt à signer le texte pour lequel je suis pleinement d'accord avec le contenu principal, mais je pense obligatoire de faire quelques corrections »³. Ces corrections – dont nous ne connaissons pas la teneur – n'étant pas faites, Fock s'abstient de signer le document. En l'état, le rapport propose un compromis : le volume cinq des œuvres complètes de Mandelstam doit être publié, mais ses « ismes », qui ne peuvent être évités, sont condamnés. La seule personne à vraiment s'opposer à ce constat est Leontovich, élève de Mandelstam, qui estime qu'une telle conclusion « pourrait être comprise comme une négation de la signification physique de la théorie de la relativité, comme une campagne contre le contenu physique de la théorie de la relativité, et, d'une certaine façon, pourrait

¹ Mentionné par Sonin [Soni 2017, p. 227].

² *Ibid* [p. 230].

³ *Ibid* [p. 234].

faire autant de mal que les incursions de certains de nos philosophes »¹. Nul ne sait si Fock, absent et non signataire du rapport, aurait adopté un point de vue similaire, mais on peut légitimement penser que son attitude et son attention précédemment constatée de limiter les attaques philosophiques à l'encontre de Mandelstam, signifient une certaine convergence de point de vue avec Leontovich.

2.2.2. Interprétations statistiques de la mécanique quantique : Blokhintsev

Dans une perspective nettement plus complète que celle entrevue jusqu'à présent avec Fock, la philosophie marxiste possède une vaste histoire commune avec la question de l'interprétation de la mécanique quantique. Et c'est notamment en 1991, dans un article intitulé « The Crisis in Physics: Dialectical Materialism and Quantum Theory » [Cros 1991] qu'Andrew Cross révèle les multiples ramifications de cette riche thématique aujourd'hui largement discutée dans la littérature². Sous différentes formes, en divers lieux, des scientifiques influencés par la philosophie marxiste ont discuté les diverses implications de la théorie quantique. Au cœur de cette multitude, le cas qui nous occupe ici directement est celui du développement d'interprétations statistiques de la mécanique quantique à partir des années 1930 en Union soviétique. Ce contexte spécifique est notamment développé et réévalué par rapport aux travaux de Cross dans un article de Kojevnikov publié en 2012 : « Probability, Marxism and Quantum Ensembles » [Koj 2012]. À l'appui de ces travaux, nous souhaitons maintenant discuter des modalités de la critique faite par Fock à ce courant d'interprétation de la mécanique quantique, et plus spécifiquement à l'une des figures majeures l'incarnant, Dmitrii Blokhintsev (1907-1979).

Les interprétations statistiques, ou dites « des ensembles », de la mécanique quantique reposent sur l'idée que compte-tenu du caractère probabiliste de la théorie celle-ci n'est applicable qu'à la description du comportement de larges « ensembles » et non de corps individuels. Les tenants de ce point de vue soutiennent en effet l'idée que dans toute situation expérimentale de la mécanique quantique on ne traite pas de particules individuelles mais de plusieurs systèmes atomiques préparés dans un état similaire, ou en procédant à la répétition

¹ *Ibid* [p. 235].

² Citons entre autres les travaux de Freire Jr. [Frei 1997 ; 2011 ; 2015], de Christian Forstner sur David Bohm [Fors 2008], de Skaar Jacobsen sur Rosenfeld [Skaa 2012] ou encore la thèse de doctorat actuellement conduite par Virgile Besson sur Jean-Pierre Vigier à l'Université Claude Bernard de Lyon [Bess 2018].

d'un processus expérimental identique sur plusieurs corps. Tout au long de sa carrière Fock va combattre les interprétations de ce type, car pour lui la mécanique quantique est strictement probabiliste, et la statistique, soit « l'étude des répartitions des différents cas dans les expériences souvent répétées, ne sert qu'à vérifier les hypothèses faites sur la probabilité » [Fock 1960, p. 11].

C'est cette opposition de point de vue qui conduit à la dispute de 1937-1938 entre Nikol'skiy et Fock que nous avons mentionnée au chapitre précédent (V.1.2.1) et qui débouche sur l'accusation envers le second, taxé d'être un « idéaliste » influencé par Mach [Niko 1937, p. 555]. Car il faut aussi saisir que les tenants d'une interprétation statistique de la mécanique quantique se revendiquent avant tout en URSS de la correcte interprétation matérialiste de la théorie. Comme mis en avant par Kojevnikov [Koj 2012, pp. 214-220], cette idée trouve en partie son origine dans les travaux du mathématicien Aleksandr Khintchine (1894-1959), fondateur de l'école moscovite de la théorie des probabilités. En effet, au sujet de cette dernière il s'oppose fortement à l'Autrichien Richard von Mises (1883-1953) qui propose une définition empirique des probabilités, « in the spirit of Mach's positivism, as the frequency of a particular outcome on a long series of experimental tests » [p. 214]¹. En réaction, la position tenue par Khintchine est clairement matérialiste, les probabilités étant considérées comme une discipline mathématique et non une science naturelle : « a natural science is distinguished by the specific class of material objects it studies, whereas mathematics can treat objects of heterogeneous material nature, because it abstracts and focuses on their common formal properties » [p. 215]. Dans ce cadre, la théorie des probabilités traite uniquement d'un collectif statistique dont elle désigne les proportions relatives de posséder une caractéristique commune. Il n'est ainsi pas possible de l'utiliser pour discuter d'un objet unique.

L'idée d'appliquer cette conception de la théorie des probabilités à la mécanique quantique est notamment motivée par les discussions sur le débat EPR et Einstein qui en 1936 suggère que le paradoxe pourrait être résolu si on acceptait que : « the ψ function does not, in any sense, describe the condition of *one* single system ; it relates rather to many systems, to 'an ensemble of systems' in the sense of statistical mechanics » [Eins 1936, p. 375]. Si Einstein ne poursuit pas ses développements dans cette direction – il se concentre sur la

¹ Sur l'opposition entre Khinchin et von Mises voir Siegmund-Schultze [Sieg 2004].

question de la complétude de la théorie – les physiciens soviétiques se saisissent eux de la question. C’est le cas de Nikol’skiy avant-guerre, mais aussi et surtout de Blokhintsev auquel Fock va aussi s’opposer après-guerre. Celui-ci, inspiré par Nikol’skiy et les milieux de physiciens proches de Khintchine, se positionne en effet rapidement comme le leader de l’interprétation statistique de la mécanique quantique en URSS¹.

Blokhintsev, un marxiste convaincu, publie en 1949 la seconde édition de son manuel de mécanique quantique, *Osnovy kvantovoy mekhaniki* (Les fondements de la mécanique quantique) [Blok 1949]². Cette édition fait suite à l’affaire Markov, et d’une certaine façon elle se présente comme une véritable réponse aux différentes exigences contextuelles qui s’imposent à cette époque : « He actively discussed quantum philosophy, criticized idealistic versions, and attempted to develop an interpretation compatible with dialectical materialism, which subsequently became known in quantum theory as the “ensemble interpretation” » [Kojé 2012, p. 224]. Blokhintsev critique l’idéalisme et le « machisme » de l’interprétation de Copenhague. Il écarte la complémentarité en lui reprochant une considération non-objective de la fonction d’onde.

Fock partage l’intérêt de Blokhintsev pour les questions philosophiques, la critique de l’idéalisme et la volonté de développer une interprétation compatible avec le matérialisme dialectique. Mais les deux hommes prennent des directions opposées, Fock restant proche de l’interprétation de Copenhague et rejetant l’approche statistique. Sa critique de Blokhintsev prend alors une forme effective dans un article à charge de 1952 intitulé « O tak nazyvayemykh ansamblyakh v kvantovoy mekhanike » (Sur les “ensembles” en mécanique quantique) [Fock 1952]³. La notion d’ensemble est directement discutée par Fock dans le cadre d’une opposition entre une conception de la mécanique quantique comme « théorie des micro-objets réels [ou] une théorie de certaines structures spéculatives – les ensembles quantiques » [p. 170]. En partant de ce constat initial, grâce à l’opposition marquée entre

¹ Parmi les influences de Blokhintsev se trouvent notamment les travaux de Leonid Mandelstam, qui côtoie Khintchine à l’Université de Moscou, et qui développe à la fin des années 1930 l’idée d’ensemble statistique en mécanique quantique. Voir les développements de Kojevnikov sur Mandelstam [Kojé 2012, pp. 218-220].

² Sur les idées de Blokhintsev voir la partie qui lui est consacrée dans l’ouvrage de 1987 de Graham [Grah 1987, pp. 329-336], mais aussi Kojevnikov pour une approche plus contextuelle [Kojé 2012].

³³ La question de la critique de Blokhintsev par Fock est notamment développée chez Graham [Grah 1987, pp. 332-333].

« réels » et « spéculatives », Fock souhaite s'affirmer comme celui qui traite véritablement du sujet dans un cadre matérialiste. Cela est d'autant plus nécessaire que, comme le constate le physicien de Léninegrad, à cette époque les idées de Blokhintsev reçoivent du soutien. C'est notamment le cas du philosophe Omel'ianovskiy qui considère que l'approche du physicien moscovite suit la procédure adéquate du matérialisme dialectique. Fock continue :

Dans ce travail, nous allons soumettre cette idée [les ensembles quantiques] à une analyse détaillée dont pour résultat nous espérons qu'il va devenir évident qu'elle est erronée. L'interprétation de la mécanique quantique dans l'esprit de cette idée conduit à la fois à des contradictions internes et à une contradiction avec les principes de base du matérialisme dialectique [p. 170].

Le physicien de Léninegrad propose donc une étude des idées de Blokhintsev qui en plus de révéler ses inconsistances d'un point de vue strictement scientifique, permettrait aussi de montrer les incohérences avec le matérialisme dialectique et de remplir par conséquent dans le contexte qui est le sien un double objectif particulièrement utile.

Fock se charge donc, un peu à la façon de sa critique de Bohr telle que nous l'avons développée au chapitre quatre (IV.1.1), de mettre en avant l'ensemble des erreurs contenues dans les développements du manuel de 1949 de Blokhintsev [Blok 1949]. La critique se concentre tout au long de son développement sur les contradictions et circularités auxquelles Blokhintsev a recours dans sa définition de la notion d'ensemble, mais aussi sur l'impossibilité de traiter les ensembles de la mécanique quantique comme des collectifs statistiques, au sens de Khintchine¹. Les aspects techniques recouvrent ainsi la grande majorité de la publication de Fock. Mais en vue de mieux remplir les objectifs du présent chapitre, à savoir de saisir les spécificités de la critique scientifique de Fock dans les années 1950, c'est le contenu de la dernière partie, qui revient sur des aspects philosophiques, qui nous intéresse. En effet, toujours comme avec Bohr, l'article aborde les lacunes philosophiques de l'interprétation statistique. En particulier on trouve le passage suivant :

En contradiction avec ce que le matérialisme dialectique nous enseigne, le point de vue statistique ne provient pas des objets de la nature, mais des observations, non pas des objets microscopiques et de leurs états, mais du collectif statistique qui résulte des observations. Cela

¹ Voir le développement de ses questions par Graham [Grah 1987, pp. 332].

le rapproche du point de vue positiviste de Bohr, qui nie aussi que la fonction d'onde concerne les micro-objets et lui donne une signification purement symbolique [...] Bien entendu, les défenseurs du point de vue statistique en URSS se considèrent subjectivement matérialistes, mais ils ne remarquent pas les contradictions auxquelles conduisent leur point de vue [p. 173].

Ici encore, à l'image de son attitude envers Mandelstam, il nous semble à présent nécessaire de souligner qu'à aucun moment Fock ne désire jeter l'opprobre sur Blokhintsev. Au fur et à mesure de l'article, et comme en témoigne cet extrait, la *kritika* perd son aspect personnel, pour se déplacer vers une critique générale d'une approche partagée par plusieurs physiciens de l'interprétation de la mécanique quantique. Même si un parallèle est fait avec Bohr, et que ce dernier est explicitement associé au positivisme, il ne s'agit pas d'en faire de même pour les physiciens soviétiques, mais simplement de montrer que dans leur approche qu'ils conçoivent comme résolument matérialiste, ils font des erreurs avant tout conceptuelles qui les empêchent d'atteindre leur but.

Le débat entre Blokhintsev et Fock, *a contrario* de l'attaque virulente que Nikol'skiy avait lancé à l'encontre du second en 1936, est d'un niveau particulièrement élevé et empreint d'un respect mutuel entre les deux hommes. Dans sa réponse parue dans *Voprosy filosofii* quelques mois plus tard [Blok 1952], Blokhintsev rend la pareille à Fock, soulignant que bien qu'il soit proche des idées de Bohr son travail représente une « tentative de concilier le concept de complémentarité avec le matérialisme » [p. 171]. Dans tous les cas, l'adversaire est présenté comme un marxiste convaincu. L'opposition entre les deux hommes perdure tout au long des années 1950 et est particulièrement marquée en 1958 lors de la grande conférence tenue à Moscou sur les aspects philosophiques des sciences naturelles [Fedo 1959]. Fock et Blokhintsev bien évidemment, mais aussi M. E. Omel'yanovskiy, M. B. Mitin, Ya. P. Terletskiy, T. A. Lebedev, E. Kolman ou encore D. D. Ivanenko discutent des différentes approches possibles de la mécanique quantique, à savoir comme une théorie des micro-objets, une théorie des ensembles quantiques, ou sous la forme d'une combinaison de ces idées avec une approche statistique des micro-objets. Cependant, il faut noter que l'attitude que Fock et Blokhintsev avaient jusqu'à présent adoptée l'un envers l'autre fait maintenant l'objet d'un consensus général et public. Malgré les divergences dans l'approche de la théorie, tout un chacun en URSS est reconnu comme un véritable physicien matérialiste :

In the lively discussions aroused by the statement, the speakers, D. I. Blokhintsev, Ya. P. Terletsky, T. A. Lebedev, E. Ya. Kolman, V. V. Perfiliev, and others, indicated that Soviet scientists are unanimous [*sic*] in their materialist approach to the solution of the philosophic problems of quantum mechanics¹.

3. Conclusion intermédiaire

Le contexte qui est celui de Fock, en particulier au début des années 1950, est complexe. La nécessité de défendre les théories modernes de la physique contre certaines attaques dogmatiques en URSS le conduit à des situations qui peuvent s'avérer paradoxales par rapport à sa propre conviction que leurs interprétations doivent être révisées. Le physicien soviétique fait alors le choix délibéré d'élaborer une stratégie qui puisse lui permettre à la fois de mettre en avant la théorie de la relativité et de la mécanique quantique comme de grands accomplissements de la physique, mais aussi de souligner les problèmes majeurs de leurs interprétations. Il s'agit pour lui de ne pas « s'aplatir »² et d'abandonner ses propres convictions épistémologiques dans une défense aveugle des théories.

Alors que la pression idéologique et politique qui pèse sur les physiciens fait de la *kritika* un véritable outil de répression, celle-ci est détournée par Fock en vue de devenir une tribune publique en faveur de la mécanique quantique et de la relativité générale. Si en appuyant avant tout sur leur caractère essentiel dans la physique moderne le physicien de Leningrad n'hésite pas à ouvrir dans le même temps la voie à leur critique du point de vue de l'interprétation, c'est avant tout car il est persuadé que le lecteur est apte à faire la différence entre ce qui est du domaine de la physique pure, nécessairement matérialiste à son sens, et ce qui est de l'interprétation, potentiellement sujette à l'influence du positivisme. Critiquer Bohr ou Einstein ne signifie pas renier leurs théories mais simplement améliorer leur compréhension. L'exercice de la critique n'est plus une simple assimilation d'un opposant à une position inacceptable, c'est une opportunité de le laver de ses erreurs.

Notons enfin que la distinction que nous avons volontairement tracée entre physiciens soviétiques et étrangers permet aussi de faire émerger une véritable différence d'attitude de Fock à l'encontre des deux catégories. Il a pris en compte les enseignements du jdanovisme

¹ « Brief review » par E. N. Chesnokov de la conférence de Moscou sur les problèmes philosophiques en sciences naturelles de 1958 [Fedotko 1959, pp. 655-656].

² *Ibid.*

du point de vue de la séparation du monde en deux camps opposés et semble soumettre les deux partis à des règles rhétoriques distinctes. Si Bohr est considéré comme idéaliste quant à son approche du formalisme mathématique, le terme aurait tout à fait pu être utilisé avec cohérence à l'encontre de l'opérationnalisme et du conventionnalisme de Mandelstam. Mais Fock est conscient que les conséquences politiques peuvent être bien différentes dans le second cas. S'il se voit encouragé à aiguïser sa critique, il ne peut se permettre sur la base de divergences quant à l'approche des théories d'exposer des collègues soviétiques ou leurs soutiens – dont il connaît la qualité scientifique – à la vindicte populaire et la répression politique.

3. Au travers du discours : la place de la science, de la politique et de la philosophie chez Fock

Nous venons d'observer comment Fock détourne la *kritika* pour promouvoir ses propres développements et dans le même temps défendre les théories modernes de la physique. Nous souhaitons maintenant élargir nos considérations afin de cerner dans le discours scientifique de Fock la véritable place allouée aux composantes scientifiques, politiques et philosophiques. Pour cela nous allons tout d'abord observer qu'au-delà de l'exercice de la critique, d'autres formes rituelles, comme les commémorations, ou de simples outils rhétoriques, sont aussi détournés par Fock dans le but de servir la stratégie décrite précédemment. Nous verrons alors que la politisation du discours scientifique de Fock peut-être simplement caractérisée comme l'abandon d'une forme de neutralité idéologique. En effet, il existe chez Fock une véritable tension entre la possibilité d'avoir recours à des énoncés que nous qualifions d'épistémologiques, formulés avec le plus haut niveau de scientificité possible, et des énoncés philosophiques, sujets à une interprétation idéologique et qui sortent du domaine strict de la science.

3.1. La primauté du contenu scientifique

3.1.1. Le recours à l'histoire des sciences

Dans son article de 1993 dédié à Fock et à la relativité générale, Gorelik s'interroge à juste titre sur l'unique incursion du physicien soviétique dans le domaine de l'histoire des sciences pour une période autre que le XX^e siècle [Gore 1993, p. 316]. Il est ici question d'un article intitulé « Sistema Kopernika i sistema Ptolomeya v svete obshchey teorii otnositel'nosti » (Le

système de Ptolémée et le système de Copernic à la lumière de la théorie générale de la relativité) [Fock 1947a], publié en 1947 dans un recueil en hommage à Nicolas Copernic, et auquel nous avons accès en français dans le premier numéro de *Questions scientifiques* publié en 1952 [Fock 1947a’].

Dans le contexte soviétique, rappelons alors l’usage rhétorique du « père fondateur », qui permet notamment de justifier l’origine de travaux ou d’idées. Copernic, en tant que glorieux personnage de la physique polonaise est rapidement assimilé par les soviétiques dès lors que les pratiques soviétiques s’étendent après-guerre au sein du bloc de l’est. L’astronome prend une place respectable au sein des héros de la science et il n’est pas étonnant de constater la préparation d’un recueil en son honneur. Alors, comme le rappelle Gorelik : « in Soviet ideology, the positive Copernicus was indissolubly connected with the negative Ptolemy ». L’historien cite notamment Idelson qui dans le premier article de l’ouvrage de 1947 mentionne « les sages mots du camarade I. V. Staline » qui ne se limitent pourtant qu’à la simple idée d’un « système détérioré de Ptolémée » [Gore 1993, p. 316]. Simplement, le recours à une dualité Copernic-Ptolémée est souvent employée par les philosophes marxistes qui, bien qu’ignorants de la physique, cherchent inlassablement les erreurs philosophiques dans les textes scientifique les plus populaires. Or, dans la littérature scientifique contemporaine, pour expliquer certaines idées de bases de la relativité générale, les points de vue de Ptolémée et de Copernic sont généralement présentés comme équivalents. C’est le cas chez Friedmann en 1923 [Fried 1923] mais aussi chez Einstein et Infeld en 1938 [Eiln 1938].

Fock prend lui le contrepied de cette dernière tendance, et favorise nettement le point de vue copernicien :

L’œuvre immortelle de Copernic – la théorie héliocentrique du système solaire – a reçu une base théorique solide avec la mécanique de Newton, base qui n’a nullement été ébranlée par le développement ultérieur de la science [Fock 1947a’, p. 154].

Il faut alors souligner que la défense du système de Copernic est avant tout pour Fock un moyen de faire entendre son point de vue sur la théorie de la relativité générale. En effet, le débat entre le système de Copernic et le système de Ptolémée peut se rapprocher « des points de vue contemporains et [être] considér[é] comme un débat sur la nature de l’accélération » [p. 149]. Comme nous l’avons évoqué au chapitre quatre (IV.2.3.5), Fock défend l’idée d’une conception absolue de l’espace-temps et de l’accélération, mais aussi de systèmes de

coordonnées privilégiés dans la relativité générale, ce qui revient alors à favoriser la position copernicienne :

Si l'accélération a un caractère *absolu*, c'est-à-dire s'il est possible de choisir un groupe de systèmes de référence privilégiés dans lesquels l'accélération d'un corps donné possède une même valeur, alors Copernic a raison, pour le système solaire il y a un système privilégié dont l'origine est au centre de gravité du soleil et des planètes et dont les axes sont dirigés vers trois étoiles fixes [p. 149].

Dans cette lignée, l'article de 1947 ne nous apprend en réalité rien sur Copernic, et il s'appuie simplement sur la défense du système héliocentrique pour développer l'ensemble des arguments de Fock en faveur de sa propre interprétation de la théorie de la relativité générale. Tour à tour, principe d'équivalence, covariance et principe de relativité générale sont dévalués au profit de l'exposition d'une théorie de la gravitation possédant des systèmes de coordonnées privilégiés.

Il n'est pas rare de trouver en Union soviétique ce genre d'œuvres communes commémorant un événement ou un scientifique. Elles répondent bien souvent à des impératifs politiques ou dogmatiques. Dans le cas de Copernic, le statut d'Académicien de Fock combiné à la légitimité scientifique de ses récents travaux en relativité générale ont probablement poussé l'éditeur à se tourner vers lui afin de donner un écho plus important à l'ouvrage en préparation. Mais il est alors remarquable d'observer comment Fock parvient à détourner la situation en faveur d'une exposition scrupuleuse de ses propres conceptions techniques sur l'interprétation de la théorie de la gravitation. Le débat historique entre partisans de Copernic et partisans de Ptolémée, devenu débat idéologique et politique en Union soviétique, devient pour Fock un argumentaire sur ce que doit être la correcte compréhension de la théorie de la relativité générale. Le cas ici présenté est par ailleurs similaire à celui d'un article de 1950 dans un volume hommage à Lobatchevski [Fock 1950b], mais aussi à l'article « jubilé » d'Einstein paru en 1956 dans la *Pravda* [Fock 1956a]. Face aux exigences rituelles de la société soviétique, Fock, comme au cœur de l'exercice de la *kritika*, s'efforce de mettre au premier plan le contenu scientifique de ses propres travaux.

3.1.2. La valeur des outils rhétoriques

Si l'on se penche de façon plus concrète sur le contenu du discours de Fock – sa formulation – dans le cadre de la relativité générale, un des exemples de son intégrité

scientifique en dépit de son usage de la rhétorique stalinienne nous est donnée par son emploi de références à Ernst Mach. Comme nous l'avons évoqué, « idéalisme » mais aussi « positivisme » sont des termes employés dans les milieux bolchéviques pour discréditer un adversaire. Dans la majorité des cas, en raison du caractère fortement connoté de ces mots, aucune explication supplémentaire n'est nécessaire et ils deviennent uniquement un objet rhétorique qui répond aux exigences du discours politique imposé par le régime soviétique. Dans la lignée des attaques de Lénine à l'encontre de Mach dans *Matérialisme et empiriocriticisme*, le nom du philosophe autrichien est alors utilisé de façon similaire pour discréditer une position philosophique, des théories, ou des individus, en raison de l'influence qu'il a pu avoir sur eux. C'est ce que nous appelons ici l'« argument Mach ».

Dans le cadre de sa critique d'Einstein, en particulier de ses vues philosophiques, Fock fait usage de l'« argument Mach ». Nul besoin ici de discuter de l'influence de Mach sur Einstein. Ce point a été largement développé dans la littérature et c'est un fait établi qu'à différentes étapes de l'élaboration de la théorie de la relativité Einstein s'est appuyé sur divers résultats de son prédécesseur¹. Nous souhaitons en revanche nous pencher précisément sur les modalités de l'emploi de l'« argument Mach » par Fock, pour mieux saisir comment ce dernier conjugue son adaptabilité aux exigences de la rhétorique stalinienne avec une intégrité sans faille sur les questions scientifiques. Ainsi, notons que le soviétique n'emploie cet argument que durant une période relativement courte, avec une première occurrence en 1953 et une dernière en 1956. Nous reviendrons plus tard sur les particularités de ce contexte, mais nous souhaitons tout d'abord discuter de la forme que prend l'argument et de sa signification scientifique pour le physicien soviétique. En effet, comme nous le détaillerons, il est essentiel de souligner que chez Fock l'argument dépasse le strict emploi rhétorique pour prendre un sens concret du point de vue technique.

Durant les quatre années ici mentionnées, Fock publie un total de dix-neuf articles originaux². Douze d'entre eux discutent de relativité générale. Le plus intéressant est de noter

¹ Sur cette question, le lecteur peut notamment consulter Stachel [Stac 1979] ou encore Vizgin [Vizg 1989]. Notons qu'Einstein lui-même a reconnu le rôle joué par Mach dans le développement de ses idées concernant la relativité générale, notamment dans ses notes autobiographiques [Eins 1949].

² Nous avons exclu de notre compte les révisions d'anciennes publications, et les simples publications de traductions.

qu'à une exception près¹, à chaque fois que Fock mentionne dans ses articles Einstein en tant qu'individu², il fait usage de l'argument de Mach pour le discréditer. Cela a lieu à six reprises. La diversité des documents où l'on retrouve l'« argument Mach » est aussi un point qui attire l'attention du commentateur. On retrouve en effet la monographie de Fock sur la relativité générale, un journal scientifique reconnu – *Uspekhi fizicheskikh nauk* –, un journal de vulgarisation scientifique – *Priroda* –, un journal philosophique – *Voprosy filosofii* –, mais aussi une publication officielle du Parti communiste – le quotidien *Pravda*. En d'autres termes, il est question d'un livre [Fock 1955a], de deux articles techniques où Fock expose ses vues sur la relativité générale [Fock 1953b, Fock 1955d], d'un commentaire des notes autobiographiques d'Einstein [Fock 1956c], de l'article politique de 1953 dénonçant la critique ignorante des philosophes soviétiques [Fock 1953a] et de l'article célébrant un demi-siècle de la théorie de la relativité discuté précédemment dans ce chapitre [Fock 1956a]. Fock systématise donc soudainement l'« argument Mach ».

En fonction des publications, ce dernier est présenté de façons différentes. Cela peut être purement rhétorique comme avec la phrase suivante, « Au sujet des vues philosophiques d'Einstein, tout sa vie il a été influencé par la philosophie idéaliste de Mach » [Fock 1956a], ou au cœur d'une argumentation plus développée :

On the question of the existence of privileged systems of coordinates Einstein, the founder of gravitational theory, maintained a point of view opposite to ours, denying their existence in all cases. This is connected with his aforementioned preference for the local method of discussing properties of space (which method is the basis of Riemannian geometry) and his underestimation of the importance of considering space as a whole. Undoubtedly the

¹ Cette exception peut facilement se justifier. Il s'agit de l'article « Otnositel'nosti teoriya » (Théorie de la relativité) de la *Bol'shaya sovetskaya entsiklopediya* (Grande encyclopédie soviétique) [Fock 1955b]. Fock s'occupe de la partie technique, mais même s'il décide d'y discuter brièvement de l'interprétation de la théorie par Einstein il ne peut rentrer dans les détails pour ce qui est d'une critique philosophique. En effet un second article, écrit par A. D. Aleksandrov, est dédié pour sa part à la « valeur épistémologique » de la théorie [Alek 1955].

² Les autres articles, qui ne font pas mention explicite d'Einstein, sont des simples résumés de points techniques présentés durant des conférences [Fock 1956b, Fock 1956f, Fock 1956g], et des articles critiquant un autre physicien soviétique, F. I. Frankl [Fock 1954b, Fock 1956e].

philosophical attitude of Einstein, influenced throughout his life by the ideas of Mach, played its part in this [Fock 1955a', p. 4].

De façon plus spécifique c'est avant tout sur la question de l'approche de la notion de d'espace et de temps que se manifeste la critique de Fock. Rappelons que pour ce dernier l'espace-temps – mais aussi l'accélération – possède des propriétés objectives, bien que celles-ci soient sujettes à l'influence des masses et leurs mouvements. Elles conservent un caractère absolu. Or Mach a une attitude totalement opposée en ce qui concerne ce que nous pouvons appeler l' « absolutisme géométrique »¹. C'est par le biais de son abandon qu'il est en mesure d'élaborer le dît principe de Mach. Ce dernier, conjugué aux discussions sur le seau de Newton et de façon générale à la critique de la mécanique classique, a un grand effet sur Einstein². Ainsi, Fock considère :

Einstein essaie d'introduire une conception du temps basée sur les sensations subjectives de durée et de séquence des événements, qui alors s'arithmétisent à l'aide d'horloges. De façon similaire, le concept d'espace est introduit (ou « expliqué ») sur la base des sensations de l'observateur conduisant des mesures avec l'aide d'une superposition de solides. Des arguments de ce type, dans l'esprit de la philosophie positiviste, dans l'esprit de Mach et Poincaré, non seulement ne sont pas nécessaires pour justifier la théorie de la relativité, mais son aussi directement un obstacle à une compréhension correcte de la théorie [Fock 1953b, p. 26].

Cette citation met en avant l'idée d'un abandon par Einstein de tout absolutisme géométrique. L'usage de l' « argument Mach » est donc pour Fock une façon de mettre en avant le rôle joué par l'homme de sciences autrichien dans cette direction. De plus, notons qu'Einstein souhaitait poursuivre un programme relativiste similaire à celui suivit plus tôt par Mach³. Dans sa progression vers la relativité générale il était motivé par le désir d'élargir la classe des systèmes de références autorisés dans la théorie, en comparaison avec la relativité restreinte. En cela, il considérait le principe d'équivalence comme central, car comme Mach, il voulait conserver dans sa théorie la relativité de l'inertie. Rappelons que pour Fock c'est ici qu'Einstein commit l'une de ses plus grosses erreurs : le principe d'équivalence est un principe

¹ Sur Mach et l' « absolutisme géométrique » voir Vizgin [Vizg 1989, pp. 50-52]

² *Ibid* [pp. 54-58].

³ *Ibid* [pp. 65-70].

local qui ne peut être appliqué à l'univers considéré comme un ensemble. En somme, chaque référence de Fock à Mach véhicule un véritable contenu scientifique, même si celui-ci n'est pas explicite.

Le nom de Mach peut être érigé comme un symbole pour la physique de toutes les perversions du système scientifique stalinien. Cependant, dans ce cas précis, l'emploi de l'« argument Mach » nous aide à montrer que Fock n'a pas politisé sa culture professionnelle à n'importe quel prix, qu'en aucun cas il abandonne ses valeurs scientifiques traditionnelles et trahit ses propres principes. Le contenu scientifique véhiculé par l'« argument Mach » dans le cas d'Einstein est essentiel, et c'est probablement la raison pour laquelle il juge son usage légitime. Notons en effet que Fock ne fait pas usage de cet argument dans sa critique de Bohr, bien qu'il soit usité dans la littérature à l'encontre du physicien Danois¹. En effet, Fock ne peut identifier comme c'est le cas pour Einstein une claire connexion entre Mach et Bohr, et c'est pourquoi il se contente simplement de qualifier ce dernier d'« idéaliste ». En cela, pour avoir toujours favorisé en premier lieu l'exactitude de ses propos scientifiques y compris au travers de ses usages rhétoriques, l'adaptation de Fock au contexte soviétique est remarquable. Quelles que soient les tendances de ce dernier, quelle que soit la formulation employée, la signification profonde du contenu scientifique se doit pour lui d'être inébranlable.

3.2. Énoncés épistémologiques versus énoncés philosophiques

3.2.1. Un discours à neutralité idéologique variable

Dans nos considérations sur l'« argument Mach » nous avons cependant laissé une question en suspens. Pourquoi Fock l'abandonne-t-il en 1957 ? En effet, le nom de Mach continue d'être agité comme un épouvantail en URSS et une réponse ne peut être donnée sur la base d'une possible inflexion de Fock sur son interprétation de la théorie de la relativité générale ; d'un point de vue technique elle reste identique jusqu'à son décès en 1974. Les causes de l'abandon sont différentes et doivent nous semble-t-il rejoindre des considérations du chapitre précédent sur le contexte philosophique général (VI.2.4.2). Car rappelons-le, à la fin des années 1950 les philosophes marxistes les plus virulents ont perdu de leur influence, et le débat philosophique se normalise. Alors, les caractéristiques rhétoriques purement

¹ Nous l'avons déjà observé l'usage ce type d'argument à l'encontre de Bohr notamment chez Nikol'skiy en 1937 [Niko 1937]. Voir aussi Pollock sur les accusations de Timiryazev à l'encontre de Bohr [Poll 2006, p. 78-79].

soviétiques du discours scientifique de Fock se dissipent, tout simplement car elles n'ont plus d'utilité politique et que le physicien semble les juger superflues.

Afin d'appuyer nos propos il nous faut revenir sur la particularité essentielle du discours scientifique de Fock qu'est sa grande flexibilité aux exigences du contexte soviétique. Mais cet aspect doit maintenant être abordé d'un point de vue temporel. Dans ce cadre, il faut tout d'abord souligner que l'investigation que nous avons conduite pour reconstruire les principes épistémologiques à la base des interprétations des théories de la physique moderne par Fock, s'est faite à partir d'articles qui ne font absolument aucune mention explicite au matérialisme dialectique, ou à une quelconque philosophie. Tout au plus, une simple affirmation d'une position réaliste est énoncée. Ce fait n'exclut bien évidemment pas que le physicien soviétique, comme nous avons pu le mettre en avant au cours du chapitre cinq (V.2), fonde ses positions épistémologiques dans les années 1930 sur une lecture attentive de Lénine et une pleine acceptation des fondamentaux du matérialisme dialectique, mais néanmoins, à cette époque, il semble juger que toute référence explicite à cette philosophie est inutile.

Par la suite, au cours du chapitre précédent (VI.1.2), nous avons pu tracer avec clarté la frontière entre l'expression de cette apparente neutralité philosophique et une totale implication dans le débat idéologique et politique en Union soviétique. Elle se matérialise notamment au travers de l'opposition entre Fock et Nikol'skiy en 1937-1938 et des prises de position qui en résultent. Contraint dans le débat public soviétique de défendre le point de vue qu'il juge correct sur l'interprétation des théories modernes de la physique, voire les théories elles-mêmes, Fock module son discours dès la fin des années 1930 en y incluant l'idée explicite que la physique qu'il pratique est compatible avec le matérialisme dialectique. Alors, comme nous le suggérons ici avec l'abandon de l'« argument Mach », il existe en aval de cette période de tensions politiques un retour à la « normale » – soit l'expression de réflexions épistémologiques sans références au matérialisme dialectique ou l'emploi d'outil rhétoriques spécifiques à l'URSS – dans le discours scientifique de Fock. La frontière est ici moins nette que pour dans les années 1930, mais un aperçu de sa bibliographie abonde tout de même dans ce sens.

En effet, on observe dans les années 1960 la réémergence dans le corpus scientifique de Fock de textes qui ne font plus aucune mention explicite du matérialisme dialectique. C'est notamment le cas du fascicule de 1965 dédié à la théorie quantique, *Kvantovaya fizika i strojeniye materii* (Physique quantique et structure de la matière) [Fock 1965] ou encore celui

de 1967 consacré à la relativité *Teoriya Eynshteyna i fizicheskaya otnositel'nost'* (La théorie d'Einstein et la relativité physique) [Fock 1967]. Pourtant, ces productions scientifiques sont parmi les plus complètes du physicien russe sur leurs questionnements épistémologiques respectifs. Plus tard, en 1973, c'est aussi le cas lors de l'exposition d'un principe aussi fondamental pour Fock que le « principe de relativité par rapport aux moyens d'observation » [Fock 1973]. De façon générale, les textes détaillant la compréhension par Fock de la mécanique quantique et de la relativité générale s'affranchissent à nouveau de tout discours idéologique et dogmatique. Les différents principes épistémologiques invoqués se suffisent concrètement à eux-mêmes pour toute argumentation.

On peut toutefois estimer qu'il existe une certaine forme d'inertie dans les pratiques rhétoriques de Fock si l'on considère que dès 1953 – qui connaît le décès de Staline et la défaite de Maksimov – les scientifiques non seulement ne ressentent plus les effets de la doctrine Jadnov qui se dissipe graduellement mais ont aussi accru leur pouvoir avec les succès nucléaires. Cette idée se manifeste au travers de la réaction de Tamm en 1955 à l'article de Fock sur Einstein [Fock 1956a]. Pour le premier, nul besoin de continuer de procéder de la sorte, mais nous avons pu le constater (V.2.a.i), Fock est toujours concrètement dans un état d'esprit tourné vers la défense de la relativité. Selon lui, le combat qu'il s'est engagé à mener n'est pas terminé. On peut alors considérer qu'en 1957, l'abandon de l'« argument Mach » nous indique qu'il a enfin cessé la lutte. Un peu plus tard, à la toute fin des années 1950, il est vrai que la tonalité idéologique est aussi manifeste dans ses écrits sur la mécanique quantique, mais comme nous le verrons au chapitre suivant (VIII.1.2.2), Fock est en réalité engagé dans un nouveau combat de dimension internationale pour faire valoir son point de vue sur la théorie. Ses opposants ne sont alors ni plus ni moins que des physiciens se revendiquant eux aussi explicitement du matérialisme dialectique.

Bien sûr, on pourrait aussi nous objecter que plus tard certaines références persistent. Mais elles s'assimilent facilement à une forme de folklore soviétique plus qu'à une véritable volonté d'affirmer un positionnement idéologique ou politique. C'est notamment le cas en 1970 avec l'article « *Kvantovaya fizika i filosofskiye problemy* » (Physique quantique et problèmes philosophiques) qui est publié dans un recueil intitulé *Lenin i sovremennoye estestvoznaniye* (Lénine et la science moderne) [Fock 1970]. C'est bien le thème général de l'ouvrage qui pousse Fock en introduction à faire une référence explicite à Lénine et à expliciter clairement ses influences philosophiques : « in our analysis of these problems we

are to be led not only by the general doctrine of materialistic philosophy that consciousness presupposes the existence of matter, but also by the doctrine that all limits in nature are conditional and relative » [Fock 1970', p. 294]. Mais jamais dès la fin des années 1950 le caractère polémique des écrits du début de la décennie ne resurgit dans les développements de Fock et il prouve à nouveau sa capacité à formuler ses idées sans faire référence à l'idéologie soviétique.

Dans les années 1960, il revient donc, comme en 1936, à un discours scientifique qui bien que possédant une évidente dimension épistémologique est formulé selon un apparent principe de neutralité idéologique. *A contrario* des périodes où la communauté scientifique soviétique est mise à l'épreuve par le régime, Fock estime très clairement que le contenu scientifique et épistémologique se suffit à lui-même dans la diffusion de ses idées. Simplement, pour poursuivre cet objectif, Fock se montre apte tout au long de sa carrière à détourner – dès que nécessaire – éléments rituels et rhétoriques non seulement à son avantage mais aussi en vue de la protection des théories modernes de la physique. En cela, la neutralité idéologique de son discours est à géométrie variable.

3.2.2. Science et philosophie

Nous l'avons discuté tout au long du chapitre cinq, alors que l'intérêt de Fock pour les questions d'interprétation des théories est avant tout motivé par certaines difficultés rencontrées en théorie quantique, sa lecture des classiques du marxisme est, elle, davantage liée au contexte soviétique et favorisée par l'imposition du matérialisme dialectique durant la période stalinienne. Néanmoins la collusion des deux événements se traduit par le sentiment sincère du physicien russe que le matérialisme dialectique offre le cadre philosophique idéal à la bonne compréhension des théories modernes de la physique. Ainsi il convient de rappeler que la réduction que fait Fock du matérialisme dialectique à de simples principes épistémologiques ne signifie en rien une forme de désintérêt pour cette philosophie. Seulement, dès que possible, le physicien souhaite présenter son discours avec le niveau de scientificité le plus élevé possible.

Mais en dépit de cela, il faut noter qu'à différentes reprises Fock manifeste un profond intérêt pour la philosophie et le souhait de la voir jouer un rôle dans le processus de création scientifique. Rappelons son commentaire dès 1936 lors des réunions de préparation de la Session de mars de l'Académie des sciences de l'URSS : « These [philosophical] matters are all very interesting, but they will not do for a general meeting because this kind of discussion can

hardly be expected to yield anything worthwhile [...] It would be better to hold a smaller meeting to discuss them »¹. De plus, comme cela s'accorde avec sa propre démarche, il affirme régulièrement que le matérialisme dialectique peut jouer un rôle effectif pour la clarification et la compréhension des développements scientifiques. En 1938 il est clairement explicite sur sa conviction que « les philosophes matérialistes seront capables tôt ou tard, d'amener les nouvelles propriétés découvertes de la matière en accord avec les formulations de base du matérialisme. Mais [que] cela n'a jusqu'ici pas été réalisé » [Fock 1938b, p. 153]. Le message est à nouveau développé en 1958 :

Ainsi, il me semble que l'application du matérialisme dialectique dans le domaine de la physique atomique ne doit pas se limiter à une tentative de se réduire à un schéma ancien, mais à la compréhension avec un point de vue plus large de ces phénomènes « étranges » dans la nature, dont l'existence est prédite par Lénine [Fedo 1959, p. 557].

Les exemples ici choisis peuvent bien évidemment apparaître comme symptomatiques d'un contexte où l'on exige du physicien d'accommoder sa pratique scientifique à l'idéologie marxiste. Cependant, si après 1958 un retour à une politique et des débats philosophiques plus sains conduit Fock à reprendre une formulation de ses idées sur la base de principes épistémologiques et en vertu d'une forme de neutralité idéologique, il faut souligner qu'à aucun moment la philosophie ne disparaît de ses centres d'intérêt. Fock le manifeste clairement dans une courte publication de 1964 intitulée « Zhivyye kontakty mezhdu fizikami i filosofami sposobstvuyut razvitiyu nauki » (Des contacts vivants entre les physiciens et les philosophes promeuvent le développement de la science) [Fock 1964c]. Il y appelle à une collaboration avec les philosophes, car très clairement, il continue parmi les physiciens théoriciens soviétiques à être celui qui porte le flambeau des questions d'interprétation. Elles continuent de s'imposer au cœur de la majorité de ses publications et il n'est alors plus question de défendre les théories, de promouvoir ouvertement le matérialisme dialectique ou de combattre frontalement l'idéalisme, mais bien évidemment de développer et de diffuser en toute simplicité ce qu'il considère comme le point de vue correct sur la mécanique quantique et la relativité générale.

¹ *Ibid* [p. 51].

Mais si la philosophie se dissimule à nouveau derrière la scientificité du discours de Fock, sans contexte c'est le matérialisme dialectique qui reste un guide à sa pensée. C'est pourquoi il est intéressant de noter que durant cette période où le débat philosophique s'estompe, Fock noue des contacts relativement soutenus avec le philosophe Omel'yanovskiy qui devient dans le même temps une figure d'autorité en Union soviétique pour ce qui est de la philosophie de la physique. Leur correspondance¹, débutée dans les années 1950, mais particulièrement riche à partir de 1960, témoigne non seulement d'un véritable débat d'idées mais aussi d'une forme d'inclusion de Fock à la communauté des philosophes. Omel'yanovskiy manifeste à plusieurs reprises le désir d'obtenir de Fock une critique de ses propres travaux et il n'est ainsi pas étonnant d'observer au cours de ces années une forme de convergence des idées du philosophe, originellement soutient de Blokhintsev, vers celles du physicien².

En contrepartie, Fock, qui voit maintenant Omel'yanovskiy comme un soutien à ses propres idées, souhaite le voir publié à l'étranger comme en témoigne sa correspondance avec les éditeurs de *Foundations of physics*. Dans une lettre du 15 juin 1971 il donne un compte-rendu positif d'un article intitulé « On the principle of observability in modern physics » [Omel 1972] :

Mon opinion [sur l'article] est tout à fait positive. L'article contient une analyse détaillée et en profondeur, ainsi que raffinée des concepts d' « observabilité » et de « quantité observable », ainsi que des termes connexes [...] Ainsi le lecteur « sophistiqué » trouvera dans l'article de nouvelles et intéressantes idées³.

Plus tard, Fock propose aussi directement à la revue la publication d'un article d'Omel'yanovskiy intitulé « Axiomatics of Physics », mais celui-ci, probablement jugé trop philosophique pour la revue, n'est pas publié⁴.

¹ ARAN SPb 1034-3-126 et 1034-3-594.

² Notamment établie par Graham dans *Science, Philosophy, and Human Behavior in the Soviet Union* [Grah 1987, pp. 346-348] nous discuterons plus spécifiquement de la nature de cette convergence d'idées au cours du chapitre suivant (VIII.3.1)

³ Lettre de Fock à H. Margenau, éditeur de la revue *Foundations of physics*, en date du 15 juin 1971 - ARAN SPb 1034-2-217. Notons que cet article fait mention explicite des idées de Fock sur le principe de relativité par rapport aux moyens d'observation [Omel 1972, p. 227].

⁴ Lettre de Fock à W. Yougrau, éditeur de la revue *Foundations of physics*, en date du 28 mai 1974. Voir aussi la réponse du 3 juillet 1974. ARAN SPb 1034-2-217.

Fock, qui a dû durant un peu plus de deux décennies se substituer aux philosophes pour valider la compatibilité des théories de la mécanique quantique et de la relativité avec le matérialisme dialectique, reprend dans les années 1960 une simple position de pur théoricien tournée vers les questions d'interprétation. Mais il accepte de collaborer avec des philosophes qui se montrent bien moins ignorants que leurs prédécesseurs et leur laisse alors le soin de développer les questions relatives à la philosophie marxiste à proprement parler.

3.3. Conclusion intermédiaire

Nous l'avons déjà constaté avec la *kritika*, Fock accepte de suivre les différentes règles implicites mises en place dans contexte soviétique. En effet, sa pratique de la critique, sa contribution à différentes formes d'expression rituelles et mémorielles, mais aussi l'adoption d'un lexique qui met l'accent sur l'opposition entre « idéalisme » et « matérialisme » sont autant d'éléments qui montrent que Fock accepte la politisation de sa culture professionnelle. Mais nous avons pu constater que celle-ci ne se fait pas à tout prix et que le physicien russe fait preuve d'une remarquable adaptabilité qui lui permet, dans tous les cas qui se présentent à lui, de privilégier et de conserver le contenu scientifique de ses écrits. Tout autant que la critique de Bohr ou d'Einstein, les célébrations autour de Copernic et de Lobatchevski sont avant tout des occasions de diffuser sa propre interprétation des théories modernes de la physique, leur donnant à l'occasion une remarquable tribune populaire. Aussi, le recours à des outils rhétoriques comme l'« argument Mach », possédant une forte signification contextuelle, se fait au prix d'une judicieuse réflexion sur la signification physique qu'il peuvent véhiculer. Ainsi, la principale constante dans le discours de Fock tout au long de carrière, mais surtout sa priorité, est le contenu scientifique, qui ne doit en rien être altéré. La question de la philosophie est, elle, abordée de façon différente. Si selon Fock elle présente de façon constante un intérêt pour la démarche scientifique, elle peut se résumer en temps normal à une série de principes épistémologiques qui garantissent la scientificité du débat. En revanche, lorsque les questions politiques viennent altérer la bonne marche des échanges au sein de la communauté, Fock considère qu'il est toutefois possible de contrer leur impact en acceptant les règles fixées par le contexte, et en donnant au discours scientifique une touche teintée d'idéologie.

4. Conclusion

En 1999, Vizgin questionne la sincérité d'un physicien comme Ioffé dans le contexte soviétique :

It is not fully clear just how sincere Ioffe was when he glorified 'the might of the dialectical method'; he realized perfectly well, though, that the only way to shield modern science from the raids of ideological watchdogs was to compromise sensibly with the official philosophical doctrine [Vizg 1999, p. 1262].

La question est légitime compte tenu de la pression idéologique et politique exercée sur les physiciens durant la période stalinienne. Mais nous l'avons vu, un tel commentaire ne peut cependant pas s'utiliser de but en blanc pour décrire le comportement de Fock. Il a certes été question de façon plus ou moins implicite dans nos développements de « sincérité » et de « compromis », mais systématiquement dans des nuances différentes. Car la « sincérité » de Fock ne peut pas être mise en doute, la question de son acceptation du matérialisme dialectique et du rôle qu'il joue dans sa pratique scientifique ne pouvant souffrir d'aucune contestation. Le « compromis » que fait le physicien n'est donc pas à comprendre dans le sens d'une complaisance envers le matérialisme dialectique, mais d'une stricte adaptation aux exigences rhétoriques et rituelles de son époque, à une acceptation de la politisation de la culture scientifique soviétique. Fock a bien compris que c'est uniquement en acceptant de suivre cette démarche que les autorités peuvent devenir réceptives à sa défense des théories modernes de la physique. Nous l'avons donc vu, à cette fin, il accepte de suivre quelques règles implicites du contexte dans lequel il évolue. Sa pratique de la critique, ses références à Lénine dans ses publications, l'adoption d'un lexique qui met l'accent sur l'opposition entre « idéalisme » et « matérialisme » sont alors autant d'éléments qui témoignent de sa maîtrise des principaux rouages du discours scientifique soviétique, mais aussi que son discours ne s'adresse plus seulement à ses collègues mais aussi aux censeurs du Parti communiste.

Ce qui est particulièrement intéressant avec Fock, c'est que ce compromis n'a aucune conséquence sur le contenu scientifique de ses travaux, et plus précisément sur son interprétation des théories modernes de la physique. Celle-ci est même dans les années 1950 le véritable fil conducteur autour duquel le physicien développe l'ensemble de sa littérature, détournant la politisation de sa culture scientifique en vue de sa promotion. Fock croit avoir

perçu que les mécanismes de défense des théories, pour qu'ils soient pertinents dans leur contexte, doivent s'accommoder des attentes de ce dernier : en Union soviétique, une théorie ne peut être correctement protégée que si l'on part du principe que les erreurs d'interprétation qui lui sont relatives peuvent être corrigées. Et cette correction, Fock est en mesure de la proposer, car il estime avoir vu selon les principes épistémologiques qui guident sa pensée ce qui fait défaut dans l'interprétation de la mécanique quantique et de la relativité générale. Par chance, cette épistémologie est conciliable avec les textes fondateurs de l'idéologie soviétique. Car il faut bien le reconnaître, nul ne sait ce qu'il adviendrait du discours de Fock s'il était par exemple un positiviste et le physicien est en réalité en position quasi-idéale pour développer et diffuser sa pensée. Mais une thèse selon laquelle il aurait provoqué cette situation en se revendiquant matérialiste dialectique pour plaire au régime ne tient pas.

Car la constance et la cohérence de sa pensée dépassent celle de l'autoritarisme soviétique. Pour appuyer sur ce point complétons nos considérations sur la *kritika* à laquelle – pourrait-on nous objecter – Fock lui-même accorde une valeur heuristique dans son travail¹, et qui est donc à l'origine de quelque chose de fondamentalement nouveau dans sa pensée. Nos développements des chapitres trois et quatre nous ont montré que les composantes principales de l'interprétation de la mécanique quantique par le physicien soviétique sont en germes dans ses commentaires de 1936 au débat EPR [Fock 1936c], et pour la relativité générale dans sa résolution du problème du mouvement en 1939 [Fock 1939c]. La *kritika* n'apparaît qu'après chez Fock et n'est au fond qu'une mise en œuvre effective de l'approche des théories au prisme des principes épistémologiques à la base de sa rigueur physique, certes influencée par le matérialisme dialectique, mais déjà présente dans son discours avant qu'il ne soit l'objet de pressions politiques et idéologiques. Ainsi, s'il faut accorder un rôle concret à la *kritika*, dans sa signification politique, c'est celui de catalyseur d'une démarche déjà débutée par le physicien russe. Car comme pour ce qui est de l'acceptation du matérialisme dialectique chez Fock, il est vrai que le contexte joue un rôle en orientant Fock vers la philosophie marxiste, puis en décuplant son intérêt pour les questions d'interprétation, mais

¹ Rappelons que dans sa monographie sur la théorie de la relativité Fock dit : « the teachings of dialectical materialism helped [him] to approach critically Einstein's point of view concerning the theory created by him and to think it anew » [Fock 1955a', p. 8]. En 1965 sur la mécanique quantique il explique que « le point de vue adopté dans le présent article est le résultat de [ses] recherches et méditations ayant pour but d'approfondir, de préciser – et si nécessaire de critiquer et de corriger – les idées de Bohr » [Fock 1965b, p. 223].

il ne s'exprime jamais chez lui sous la forme d'une contrainte sur la pensée à adopter et sur le contenu scientifique.

Chez Fock, quel que soit le contexte, quel que soit l'objectif à remplir et la nature de son argumentation persuasive, c'est toujours la rigueur des énoncés physiques qui prime. Comme annoncé en introduction, très clairement, la rigueur physique à laquelle s'astreint Fock dans son approche des problèmes scientifiques a une contrepartie dans la façon dont il diffuse sa pensée, à savoir une forme de rigueur – de systématique – à énoncer de façon pointilleuse l'unique point de vue qu'il juge correct. C'est pour cette raison qu'il privilégie lorsqu'il le peut une formulation de ses idées sur la base de principes épistémologiques généraux qu'il considère probablement comme moins sujets à l'interprétation que des énoncés à caractère idéologique, qui s'avèrent d'autant plus significatifs dans le contexte qui est le sien. Fock est prêt, lorsque cela est nécessaire pour faire entendre sa voix, à céder du terrain sur ce point, mais il a probablement aussi conscience que ce qui est une nécessité – voire même un atout en URSS dans certains cas – colore son discours et le rend moins audible à toute une catégorie d'individus. Dans le prochain chapitre, nous nous poserons alors la question de la véritable diffusion et réception de ses idées.

Chapitre huitième – Diffusion des interprétations

Nous avons jusqu'à présent discuté du contenu des interprétations de la physique moderne par Fock (chapitres deux à quatre), du rôle joué par le matérialisme dialectique pour l'élaboration de celles-ci (chapitre 5), de l'utilisation qui en est faite dans son combat pour la défense de la mécanique quantique et de la relativité générale en URSS (chapitres 6 et 7), mais n'en savons cependant que très peu sur la diffusion véritable de ses idées au sein de la communauté scientifique. Nous l'avons détaillé (chapitre 1), Fock est physicien qui a acquis une renommée internationale certaine grâce à ses développements en mécanique quantique. Sa contribution à la relativité générale en 1939 (IV.2.2.2) vient alors sceller l'image d'un physicien de référence pour les deux théories majeures du début du siècle. Pour autant, Fock est-il considéré comme une référence mondiale lorsqu'il s'agit du débat concernant leurs interprétations ? Quelle place a-t-il laissé dans l'histoire de cette branche de sa discipline ?

Aux vues de nos développements précédents, répondre à ces questions générales implique de considérer différentes problématiques connexes quant aux modalités de la diffusion des idées de Fock au sein de la communauté. La première concerne sa capacité à faire connaître sa pensée au-delà des frontières de l'URSS. Nous observerons que sur ce point Fock va en réalité pouvoir prendre appui sur certaines caractéristiques du débat en Union soviétique pour se propulser sur le devant de la scène lorsqu'après vingt ans de protectionnisme le régime bolchévique va accepter le rétablissement des relations internationales à partir du milieu des années 1950. Se pose alors la question de la nature des relations internationales à cette époque, car les événements que nous allons maintenant discuter sont contemporains de la Guerre froide et Fock est assujéti dans certaines de ses initiatives au contexte international. Enfin, il est intéressant de se demander dans quelle mesure Fock parvient à rendre audible à une plus large audience un discours jusqu'à alors largement teinté d'idéologie. Certes nous savons qu'il est apte à transformer son discours afin de l'expurger de toute référence directe au matérialisme dialectique, mais nombre de ses textes qui jouent aussi un rôle politique en Union soviétique sont connus à l'étranger et orientent le débat vis-à-vis de ses idées. C'est en particulier le cas de sa critique de Bohr et d'Einstein du début des années 1950. Nous constaterons alors sur ce point que les conclusions

sur la mécanique quantique et la relativité générale divergent, les débats sur la première restant pour diverses raisons nettement plus influencés par les questions idéologiques.

Pour répondre à ces différentes problématiques et évaluer la diffusion des idées de Fock sur l'interprétation des théories de la physique moderne, ce chapitre se découpe en trois parties qui ne les recoupent pas précisément de façon thématique. Nous avons choisi un développement chronologique pour les deux premières avant de construire la dernière comme une forme de bilan sur la réception des idées de Fock. En effet, cette approche est particulièrement utile pour faire ressortir l'influence du contexte sur la diffusion des idées de Fock. Ainsi, la première partie discute tout d'abord de leur processus d'internationalisation. Nous observerons que c'est notamment en prolongement de son engagement en Union soviétique pour la sauvegarde des théories modernes de la physique, que Fock va se voir offrir la possibilité de discuter sa pensée à l'étranger. En effet, en dépit des tensions de la Guerre froide, la fin du stalinisme marque une nouvelle dynamique scientifique internationale au sein de laquelle Fock va s'engager. Sa légitimité en tant que physicien théoricien de premier plan, mais aussi la relation de confiance qu'il a pu instaurer avec les autorités vont lui donner l'opportunité d'engager des débats avec deux figures internationales, Infeld pour la relativité générale et Bohr pour la mécanique quantique. Ces deux disputes scientifiques vont alors lui servir de caisse de résonance pour diffuser son interprétation des théories modernes de la physique. Nous observerons cependant au travers de ces disputes que Fock, dans toutes ses initiatives, est inévitablement lié de façon très forte au contexte soviétique et que le dogmatisme de ce dernier interfère avec la perception commune de sa démarche scientifique.

Dans un second temps, en nous appuyant en particulier sur la trajectoire institutionnelle de Fock dans le domaine de la relativité générale nous discuterons de sa capacité à saisir les différentes opportunités qui s'offrent à lui, mais aussi à faire face aux nouvelles contraintes des rapports internationaux durant la Guerre froide. Inclus dans une dynamique d'établissement d'une communauté internationale bien identifiée de relativistes, Fock trouve une position des plus favorables pour la diffusion sans frontière de ses idées et multiplie les séjours à l'étranger. Mais il est aussi en charge de nouvelles responsabilités, notamment quant à la représentation internationale de l'Union soviétique. Organisateur d'une conférence majeure en théorie de la gravitation en 1968 sur le territoire soviétique, nous verrons que Fock est contraint de faire face aux impondérables tensions du contexte géopolitique de la

Guerre froide. Nous constaterons ainsi qu'il se heurte encore et encore à la bureaucratie de son État, qui continue tant bien que mal d'exercer un contrôle certain sur ses scientifiques.

Nous pourrions alors questionner de façon plus concrète ce qu'il en est de la réception des idées de Fock au sein de la communauté scientifique, tant en mécanique quantique qu'en relativité générale. Les deux théories sont nécessairement traitées indépendamment car comme nous le verrons elles poursuivent des trajectoires différentes. Dans le premier cas il sera mis en évidence que la proximité des idées de Fock avec celles de Bohr va grandement masquer l'originalité des premières, et qu'en fin de compte, malgré leur consistance, mais aussi leur influence, elles ne pourront jamais se faire une véritable place de premier plan dans le débat moderne sur l'interprétation de la théorie quantique à l'exception du contexte soviétique. Dans le cas de la relativité générale nous verrons au contraire que l'originalité de la position tenue par Fock crée une émulation conséquente, mais que malgré tout, celle-ci n'en devient jamais pour autant une véritable école de pensée et que le point de vue du physicien soviétique ne parvient jamais à s'imposer.

Sources :

La question de la diffusion de la pensée de Fock, en particulier à l'international, implique un important enrichissement des sources à notre disposition. Dans le cas des sources primaires publiées on peut notamment souligner l'intérêt des témoignages directs des contemporains de Fock, mais aussi des comptes-rendus des diverses conférences auxquelles il participe. Ces dernières sont caractéristiques de la dynamique internationale au sein de laquelle Fock est inclus et qui est globalement celle de la « renaissance » de la relativité générale. Pour celle-ci, l'aspect institutionnel joue dans nos développements un rôle essentiel et c'est pourquoi nous voulons souligner l'importance toute particulière pour nos travaux de la récente publication de Roberto Lalli, *Building the General Relativity and Gravitation Community During the Cold War* [Lall 2017]. Notons aussi que Graham pour la mécanique quantique et la relativité générale [Grah 1987], ainsi que Gorelik uniquement pour la seconde théorie [Gore 1993], sont les deux auteurs qui se sont le plus penchés sur la question de la réception des idées de Fock. Ils nous serviront ainsi de base de travail dans la troisième partie de ce chapitre.

Mais l'élément essentiel à commenter ici pour ce qui est des sources concerne le rôle central joué par les archives, bien plus important que dans n'importe quel autre chapitre.

Différents facteurs expliquent ce fait. D'une part, comme il est ici question de diffusion de la pensée de Fock et du parcours international de ce dernier, si l'on considère que les relations transfrontalières impliquent le recours à une vaste correspondance, il n'est pas étonnant d'en trouver une quantité conséquente dans les archives de Fock à Saint-Pétersbourg (ARAN SPb). Mais surtout le caractère international de nos développements implique aussi que les archives russes ne sont plus l'unique centre de documentation possible. Nous avons ainsi pu compléter notre étude avec des fonds relatifs à divers personnages, tels Bondi (Cambridge), Bohr, Rosenfeld et Møller (Copenhague) et dans une moindre mesure Mercier (Berne). Mais la profusion de documents que nous utilisons s'explique aussi par la temporalité des événements. Nous couvrons les deux dernières décennies de la carrière de Fock, et les archives sont ici mieux conservées qu'avant-guerre. Enfin, il faut souligner le rôle important joué par la nécessité pour tout scientifique soviétique séjournant à l'étranger de fournir à son retour un rapport à l'institution dont il dépend – ou qui organise le séjour. Dans la grande majorité des cas, ces rapports sont conservés dans les archives de Fock au cœur de dossiers rassemblant tous les documents relatifs aux voyages entrepris par le physicien. Ces dossiers ont été pour nous une inestimable source d'informations.

1. Disputes et diffusion à l'international

L'isolement progressif que la société scientifique soviétique connaît dans les années 1930, et qui a été souligné au chapitre premier (1.2.2.2), se poursuit en réalité tout au long de la période stalinienne. Cependant, dès 1953, suite au décès de Staline, la situation s'inverse sous l'impulsion du contexte de la Guerre froide¹. En particulier, compte-tenu de la menace nucléaire grandissante, Nikita Khrouchtchev rend officielle l'idée de « coexistence pacifique » entre deux systèmes économiques et politiques opposés au cours du 20^e Congrès du Parti communiste en 1956. Il ouvre ainsi la période du « dégel » soviétique. L'équilibre de la terreur favorise un apaisement des tensions et l'Union soviétique intègre peu à peu les instances internationales, donnant aux scientifiques le signal concret de la reprise des échanges avec leurs collègues étrangers.

¹ Sur la reprise des relations scientifiques suite au décès de Staline voir Richmond Yale [Rich 2004 ,pp. 65-76], Mastny [Mast 2010] ou encore Hollings [Holl 2016].

Dans ce contexte, l'autorité scientifique de Fock, sa connaissance antérieure du contexte international, mais aussi la relation de confiance qu'il a su instaurer avec les autorités politiques dans son combat contre la critique ignorante des théories de la physique moderne, vont rapidement le propulser sur le devant de la scène. Or le dernier facteur ici évoqué souligne en réalité que les relations scientifiques internationales que connaît Fock à partir de 1952 – date de son premier séjour d'après-guerre hors d'URSS¹ – restent largement dépendantes du contexte soviétique. De plus, notons qu'un des facteurs essentiels à la compréhension de la trajectoire internationale des idées de Fock est le rôle de catalyseur joué, pour chaque théorie, par les disputes qu'il engage avec de grandes figures internationales, Infeld pour la relativité et Bohr pour la mécanique quantique. En effet, leurs échanges donnent un second souffle à la *kiritika* initialement exercée localement par Fock à l'encontre du physicien danois et d'Einstein, dont la position est incarnée par Infeld. Comme nous l'observerons, les débats avec ce dernier prennent directement racine dans le contexte soviétique, avant de s'étendre à l'international et d'être à l'origine de façon indirecte de ceux avec Bohr. Quoi qu'il en soit, ils sont tous deux des facteurs essentiels de la diffusion à large échelle des idées de Fock. Dans la présente partie, nous souhaitons ainsi au travers de ces disputes faire le récit des premiers succès de Fock à l'international, mais aussi mettre en évidence l'intrication entre ces derniers et les spécificités du contexte d'origine du scientifique de Léninegrad.

1.1. Infeld : de Léninegrad à Berne

Léopold Infeld est un physicien théoricien polonais au parcours quelque peu atypique². Juif, il quitte la Pologne pour l'Angleterre en 1933, avant de s'installer à Princeton aux Etats-Unis en 1936 où il devient collaborateur d'Einstein. Nommé Professeur à l'Université de Toronto en 1938, il ne rentre en Pologne qu'en 1950 où il devient Professeur à l'Université de

¹ Comme nous allons le développer il se rend en Pologne.

² Voir son autobiographie publiée en 1978 [Infe 1978].



Figure 14. Léopold Infeld en 1960 [Domaine Public].

Varsovie¹. La collaboration d'Infeld avec Einstein, notamment sur le problème du mouvement en relativité générale discuté au chapitre quatre [EiIH 1938], est à la source d'un véritable partage d'idées, qui s'illustre notamment avec l'ouvrage de vulgarisation scientifique *The Evolution of Physics* [EiIn 1938]. Dans le domaine de la relativité, Infeld devient alors l'un des principaux défenseurs de la pensée d'Einstein et une véritable figure d'autorité. Cet ensemble donne une saveur particulière à ses échanges avec Fock. En effet, bien que la Pologne fasse maintenant

partie du domaine d'influence soviétique, il est rare pour les scientifiques soviétiques de pouvoir trouver en URSS au début des années 1950 un interlocuteur étranger possédant une telle stature internationale.

1.1.1. Un débat scientifique sur un support philosophique

Fock et Infeld se rencontrent pour la première fois à Spała, au cœur de la Pologne, à l'occasion d'une conférence organisée par le second nommé réunissant principalement des physiciens polonais. Une délégation soviétique est toutefois conviée à l'initiative du Ministère des sciences et de l'éducation supérieure². Choisie directement par l'Académie des sciences

¹ *Ibid.* Le retour d'Infeld en Pologne est notamment motivé par l'atmosphère anti-communiste en Amérique du Nord au début de la Guerre froide. Injustement perçu comme un potentiel traître au Canada, pouvant délivrer aux communistes des secrets nucléaires, il fait le choix de rentrer dans son pays natal avec pour objectif d'y contribuer au développement de la science, alors dans une situation désastreuse suite à la Seconde Guerre mondiale.

² *Ibid* [p. 77].

de l'URSS, elle réunit donc Fock, mais aussi N. V. Belov et R. A. Chentsov¹. Fock fait deux exposés durant la conférence, sur des travaux qu'il a déjà publiés en URSS, à savoir d'une part sa critique de Bohr de 1951, « Kritika vzglyadov Bora na kvantovuyu mekhaniku » (Critique des vues de Bohr sur la mécanique quantique) [Fock 1951a], mais aussi d'autre part sur la relativité générale avec « O probleme dvizheniya mass v teorii tyagoteniya Eynshteyna » (Sur le problème du mouvement des masses dans la théorie de la gravitation d'Einstein) [Fock 1950a]. Fock présente dans ce second exposé sa conception de la théorie de la relativité générale. Indubitablement, Infeld, garant du point de vue d'Einstein qui est ici attaqué, se lance dans un débat avec Fock qui, comme nous allons le voir, dure de longues années. L'atmosphère générale de leurs échanges durant ces dernières est résumé en 1978 par Infeld qui témoigne de la grande courtoisie des deux hommes, mais aussi de leur obstination :

He [Fock] was dogmatic and very much believed in his own convictions. I may say that, during this time, I became friendly with Fock. Ours relations were better than correct. I argued with him, tried to convince him that he was wrong, but of course without result [Infe 1978, p. 77].

Les échanges initialement oraux entre Fock et Infeld² se transposent rapidement sur le papier, en particulier suite à la publication par Fock en 1953 dans *Priroda* d'un article intitulé « Sovremennaya teoriya prostranstva i vremeni » (Théorie moderne de l'espace et du temps) [Fock 1953b]. Celui-ci est traduit en polonais dans la revue *Myśl Filozoficzna* [Fock 1953b'] et provoque une réaction quelque peu indignée de la part d'Infeld :

It [Fock's article] contained his own interpretation of relativity theory. From this work it would appear that he had invented the principles of motion in relativity theory and that we had committed plagiarism in publishing them a year later. Actually not a year, but nine years earlier we were supposed to have committed a double plagiarism! This was a bit too much. I wrote a short letter to the editor of *Philosophical Thought* [Myśl Filozoficzna], putting the matter straight. I heard later that the discussion in the editorial board lasted all night as to whether to include the letter, but in the end common sense prevailed and it was published. Then I wrote

¹ Il existe dans les archives un long rapport signé des trois hommes qui détaille l'ensemble de leurs activités durant leur séjour polonais – ARAN SPb, 1034-2-170.

² Fock se rend aussi en Pologne en 1953 pour les célébrations des 400 ans de la mort de Copernic (ce dernier disparaît en 1543, mais étant donné le contexte géopolitique en 1943, les célébrations ont lieu en 1953). Il n'est cependant pas clair s'il rencontre à nouveau Infeld à cette occasion [Infe 1978, p. 79].

an article in defense of Einstein and it, too, after some discussion, was printed in the same periodical¹ [Infe 1978, p. 80].

À la lecture du passage directement incriminé par Infeld dans l'édition russe de l'article de Fock [Fock 1953b, p. 24], on note effectivement la propension du physicien soviétique à mettre en avant ses propres contributions. De plus, il n'est pas précis sur les dates, omettant de mentionner clairement que les premiers travaux majeurs d'Einstein, Infeld et Hoffman à la question ici discutée sont de 1938 [EiIH 1938] et donc antérieurs aux siens [Fock 1939c]². Notons qu'Infeld lui-même n'est pas totalement explicite et précis dans le passage susmentionné, et il nous semble que la confusion puisse aussi provenir de la publication en 1949 de deux articles, respectivement par N. A. Petrova pour le premier [Petr 1949] et Einstein et Infeld pour le second [EiIn 1949]. En effet, il faut souligner que l'article de Fock de 1939 se limite à la première approximation (newtonienne) et qu'il annonce que des travaux de doctorat dans la seconde approximation³ sont menés dans le même temps par Petrova. Si cette dernière soutient sa thèse en 1940, ses résultats ne sont publiés qu'en 1949. Pour leur part, Einstein et Infeld ont dès 1938 avec Hoffmann abordé le problème du mouvement dans les deux approximations.

Or en 1953, Fock ne fait une référence directe qu'à leurs travaux complémentaires de 1949, qu'il accompagne du commentaire suivant : « Cependant, ces auteurs [Einstein et Infeld] ne donnent aucune explication pour [...] le fait curieux que leurs équations associées coïncident avec les équations de Fock-Petrova, écrites dans un système de coordonnées harmoniques » [Fock 1953b, p. 24]. Il est alors fort probable qu'Infeld ait vu dans cette remarque un soupçon de plagiat de la part de Fock. Mais, à notre sens, c'est sans compter sur la suite des développements qui redéfinissent l'aspect « curieux » de la question sur un plan strictement technique :

¹ « Kilka uwag o teorii względności » (Quelques remarques sur la théorie de la relativité) [Infe 1954a].

² Dans sa monographie de 1955, et notamment son « Critical Survey » des développements relatifs à la question du mouvement en relativité générale, Fock se montre bien plus prudent pour éviter toute confusion chronologique. Pour la seconde édition anglaise [Fock 1955a', pp. 392-399].

³ « C'est-à-dire celle qui permet de remplacer l'opérateur de d'Alembert généralisé par l'opérateur ordinaire » [Fock 1939c', p. 115].

L'explication doit, selon nous, être cherchée dans le fait que selon la méthode des fonctions arbitraires d'Einstein et Infeld, on a recours à de petites variations du système de coordonnées, qui, dans la première approximation, ne concernent pas les équations du mouvement, puisqu'elles peuvent être obtenus à partir du principe variationnel [p. 24].

La question qui se pose véritablement est de savoir pourquoi, en dépit de la différence des approches, les résultats sont similaires.

Mais il faut avant tout noter qu'Infeld dans son autobiographie souhaite mettre l'accent sur les spécificités du contexte communiste qui est le sien en Pologne, et non sur le contenu scientifique de son débat avec Fock¹. En effet, le physicien polonais doit faire face à une situation similaire à celle de son homologue soviétique. Il est l'objet d'attaques de la part de philosophes marxistes polonais, particulièrement pour son ouvrage avec Einstein, *The Evolution of Physics* [Eiln 1938], jugé « idéaliste »². Et au travers de ces critiques, c'est aussi la théorie de la relativité qui est attaquée et qu'Infeld entreprend de défendre, comme Fock en URSS. Il écrit notamment un article intitulé « Od Kopernika do Einsteina » (De Copernic à Einstein) [Infe 1955] pour répondre à ceux qui voient en la relativité une négation des résultats de Copernic³, ou encore l'article en défense d'Einstein qu'il mentionne dans sa réaction aux prétendues accusations de plagiat de Fock [Infe 1954a]. Ainsi, l'insistance dans son autobiographie sur cette idée de plagiat vient en réalité appuyer la description de l'atmosphère particulière vécue par le physicien polonais, objet d'attaques à caractère dogmatique. Or, il nous semble qu'elle ne fait pas honneur à ce que devient réellement la dispute qui l'oppose à Fock, à savoir un véritable débat d'idées.

Si nous avons malgré tout choisi de discuter de l'opposition entre les deux hommes, c'est justement qu'elle est intéressante en raison de ce double aspect, contextuel et scientifique. En effet, d'une part, en opposition à la faiblesse du niveau général des débats sur la relativité que nous avons jusqu'à présent décrits en Union soviétique avec la critique ignorante des philosophes marxistes, Infeld offre à Fock, jusqu'alors relativement isolé dans cette branche

¹ Dans les mots d'Infeld : « Some role in changing my position with officialdom was played by a discussion I had with Professor [Vladimir Alexandrovich] Fock » [Infe 1978, p. 75].

² Pour le combat d'Infeld contre les philosophes marxistes polonais, *Ibid* [pp. 69-73].

³ Voir nos commentaires du chapitre précédent (VII.3.1.1). Infeld répond aux critiques en distinguant la structure mathématique de la théorie, dont l'invariance impose l'équivalence des systèmes de coordonnées, et sa signification physique, représentative de la réalité, où le système copernicien est le plus usité.

de la physique en URSS, une occasion unique de relever le niveau technique de la discussion. Mais d'autre part, comme nous allons le constater, ce sont avant tout les spécificités du contexte de remise en question permanente des théories modernes de la physique en Union soviétique qui donnent un écho tout particulier à l'échange entre les deux physiciens.

Ce dernier point s'illustre en particulier par la traduction en russe de l'article d'Infeld en défense d'Einstein publié dans *Myśl Filozoficzna*. Et c'est *Voprosy filosofii* qui se charge de sa publication [Infe 1954a'], revue philosophique dont nous avons déjà pu remarquer l'implication dans les débats sur les théories modernes de la physique. La démarche du comité de rédaction y est par ailleurs très explicite en note de bas de page :

Puisque cet article présente un intérêt pour les lecteurs soviétiques en lien avec la discussion sur les questions philosophiques de la théorie de la relativité, la rédaction considère qu'il convient de la publier dans les pages du journal « Voprosy filosofii » [p. 173].

Car il faut bien considérer qu'Infeld suit ici une démarche qui vise clairement à démontrer la compatibilité de la compréhension de la théorie par Einstein avec le matérialisme dialectique, mais aussi qu'il manifeste clairement une adaptation aux exigences rhétoriques soviétiques en citant Lénine en aphorisme ou en démontrant qu'Einstein était aussi critique de la pensée de Mach.

Mentionnons que si Infeld profite de cet article pour critiquer directement Fock et sa défense des coordonnées harmoniques, les deux hommes se rejoignent en manifestant tout de même à cette époque un état d'esprit commun en vue de la défense de la théorie de la relativité. Infeld en témoigne en conclusion de son article : « Il faut, cependant, se rappeler qu'aucun physicien ne peut exposer la science moderne sans théorie de la relativité » [p. 178]. Et c'est aussi le premier constat que fait Fock dans la correspondance qu'il engage immédiatement avec le Polonais : « La publication de votre article dans des journaux polonais et soviétique suggère que nos pays ont défini le point de vue correct sur la théorie de la relativité »¹.

Malgré tout, « point de vue correct » s'entend ici dans un sens bien plus large que celui propre à l'interprétation de Fock. Il est bien évidemment avant tout question de la reconnaissance de la théorie en tant qu'objet scientifique. Car Fock, une fois ce constat

¹ Lettre de Fock à Infeld du 13 novembre 1954 [Fock 1955c, pp. 156-157].

effectué, engage immédiatement le débat sur le statut des coordonnées harmoniques. Ce sont trois lettres qui sont initialement échangées, puis le débat va se poursuivre de façon plus directe, lors d'une visite d'Infeld à Moscou au mois d'avril 1955 et enfin lors de conférences à l'étranger, élément que nous allons discuter dans la sous-partie suivante. Il faut alors souligner que les lettres entre Fock et Infeld sont publiées en 1955 par *Voprosy filosofii* [Fock 1955c]. Celles-ci, qui sont d'un niveau technique particulièrement élevé ne font pas référence à des questions idéologiques et témoignent à leur façon d'un véritable renouveau dans le débat sur l'interprétation de la relativité générale en Union soviétique après l'éviction de Maksimov, qui en menaçait tout simplement l'existence.

Nous avons rapidement évoqué dans le chapitre quatre (IV.2.2.1) la situation assez particulière de la relativité générale qui connaît depuis les années 1920 une période relativement creuse en termes d'intérêt auprès de la communauté des physiciens¹. Il est alors intéressant de souligner que le débat véritablement technique qui oppose Infeld et Fock émerge concrètement dans le contexte particulier des débats philosophiques sur la compatibilité de la théorie de la relativité avec le matérialisme dialectique. Pour le lecteur qui en douterait encore, on peut citer Infeld qui en 1954 dans un article en anglais publié dans les *Acta Physica Polonica* a un emploi qui pourrait paraître assez curieux du terme « idéologique » :

The comparison of Fock's and our method shows one essential similarity. In both methods the same approximation procedure is used. But the two methods also show essential differences. The first consists in the fact that whereas we use the field equations for empty space, regarding masses as singularities, Fock uses the gravitational equations with the energy-momentum tensor. This difference I regard as unimportant ideologically for the following reason. It is obvious that no charge or gravitational body can properly be described by a singularity. We can use the singularity picture only if we describe the field outside the particle, where the energy-momentum tensor vanishes. It is obvious from our derivation that it would have been almost unchanged had we used surfaces covering the regions in which the energy-momentum tensor does not vanish. Indeed Fock's method gives precisely the same result as ours though the mathematical technique is very different [Infe 1954b].

¹ Voir les travaux de Eisenstaedt [Eise 1986].

Si l'on peut observer dans un premier temps qu'Infeld reprend à son compte la « curiosité » soulevée par Fock quant à la convergence de leurs résultats, il est surtout intéressant de noter qu'il défend le choix effectué avec Einstein et Hoffman de procéder avec des singularités contre de potentielles critiques à caractère « idéologique ». C'est tout simplement que les singularités peuvent difficilement rendre compte de la matérialité du monde extérieur selon un point de vue réaliste. Ainsi, pour résumer, appuyons sur le fait que la confrontation directe entre Fock et Infeld naît dans un contexte de défense des théories modernes de la physique face à la critique ignorante des philosophes marxistes, puis prend de l'ampleur par le biais des revues philosophiques et n'en perd pas pour autant sa crédibilité scientifique. De ce bilan on peut conclure que sa transposition rapide dans un contexte scientifique international qui devient plus dynamique vis-à-vis de la relativité générale n'en sera que d'autant plus facile.

1.1.2. Le colloque de Berne

L'année 1955 coïncide avec l'anniversaire des cinquante ans de la formulation de la relativité restreinte. Pour célébrer l'événement est organisé à Berne, où Einstein était alors employé de l'Office des brevets, un grand colloque dédié à la théorie de la relativité comprise dans son ensemble. C'est André Mercier, directeur du département de physique théorique de l'Université de Berne, qui est à l'origine du projet¹. Il obtient dans ce but le soutien de Pauli, alors Professeur à l'Ecole polytechnique fédérale de Zurich, qui durant la conférence fait office de Président. L'événement ne se limite pas uniquement à un aspect commémoratif, car comme l'indique Mercier dans une lettre à Einstein de novembre 1953 la portée de l'événement est autre : « it was intended as a truly scientific event in which the status of the fields related to relativity theories was to be thoroughly discussed and analyzed by invited speakers » [Lall 2017, p. 42]. Comme mis en avant par Lalli dans ses travaux, la conférence prend rapidement une tournure élitiste en raison de différents critères avancés pour la sélection des participants : nombre limité, connaissance personnelle des organisateurs et autorité scientifique dans un domaine de recherche particulier lié à la relativité [p. 42]. Se constitue alors un panel de scientifiques reconnus et influents dans le domaine, parmi lesquels on retrouve le mathématicien André Lichnerowicz et la physicienne Marie-Antoinette

¹ Sur la conférence de Berne, l'historique de son organisation et notamment le rôle particulier joué par Mercier, voir Lalli [Lall 2017, pp. 35-47]. Les comptes-rendus de la conférence sont publiés en 1956 par Mercier et Kervaire [MeKe 1956]. Pour une courte biographie de Mercier voir Lacki [Lack 2000b].

Tonnelat pour la France, Pascual Jordan et l'astronome Walter Baade pour l'Allemagne, le suédois Oskar Klein, les américains Peter Bergmann, Howard Robertson et Eugène Wigner, qui donnent tous des conférences plénières. Des noms comme Born, Møller, Hoyle, Bondi, Papapetrou ou bien évidemment Infeld, pour des exposés plus courts, viennent alors compléter le tableau d'une conférence qui parvient pour la première fois à réunir un large panel des plus grands spécialistes de la relativité¹.

Dans certains cas, les personnalités invitées pour ces exposés « secondaires » le sont via leurs académies scientifiques respectives, auxquelles il est demandé d'envoyer à la Conférence de Berne leurs plus éminents scientifiques dans le domaine de la relativité². Dans le cas de l'URSS, les organisateurs n'ont pas leur mot à dire quant au choix des intervenants, ces derniers étant directement désignés à Moscou par l'Académie des sciences de l'URSS³. Comme mentionné en introduction, l'Union soviétique reprend tout juste part aux activités scientifiques internationales et Fock est alors l'un des premiers à en bénéficier. Comme nous avons pu l'observer plus tôt, il s'est affirmé au cours des années qui ont précédé comme l'un des principaux spécialistes soviétiques de la théorie de la relativité, mais surtout, au travers de son combat pour la défense de la théorie, comme le garant de son interprétation correcte dans un cadre matérialiste dialectique. La dispute avec Maksimov et la publication de son article contre la critique ignorante des philosophes marxistes en 1953 ont confirmé l'établissement d'un rapport de confiance avec les autorités soviétiques. Il n'est ainsi pas étonnant que le physicien de Léninegrad reçoive le 25 octobre 1954 une lettre du secrétariat du département physico-mathématique de l'Académie des Sciences lui demandant s'il souhaite participer aux célébrations du cinquantième anniversaire de la relativité à Berne en juin 1955. En procédant ainsi, l'Académie des sciences valide l'idée que Fock tient la position centrale dans le domaine en URSS. Celle-ci est d'autant plus renforcée qu'il lui est demandé de recommander pour cette conférence d'autres collègues soviétiques⁴.

¹ Nous serons plus explicites dans la partie suivante (VIII.2) sur le rôle joué par la conférence de Berne dans le processus de « renaissance » de la théorie de la relativité au sein de la communauté scientifique.

² Voir Lalli [Lall 2017, p. 44].

³ Dans une lettre à Møller du 1^{er} mars 1955, Pauli explique qu'il n'avait pas immédiatement réalisé que dans la délégation soviétique il était question de « *the famous Fock* ». Cette lettre témoigne ainsi que les organisateurs n'ont en rien influencé le choix de ce dernier. Cité par Lalli [Lall 2017, p. 45].

⁴ Lettre de L. M. Brekhovskikh et E. A. Koridalin à Fock en date du 25 octobre 1954 – ARAN SPb, 1034-2-111.

Dans sa réponse du 5 novembre 1954¹, Fock accepte l'invitation et propose deux noms : A. D. Aleksandrov et I. M. Gelfand. Le premier est mathématicien à Léninegrad, et bien que travaillant principalement sur la relativité restreinte il est l'un des principaux soutiens de Fock dans son interprétation de la relativité générale, se reposant lui aussi sur le caractère absolu de l'espace-temps². Gelfand est pour sa part professeur à l'Université d'État de Moscou. Lui aussi mathématicien, il n'est en revanche pas du tout spécialiste de relativité. Cependant Fock suggère sa présence en raison de ses travaux sur la théorie des groupes, et notamment la théorie du groupe de Lorentz, mathématiques sur lesquelles Fock s'appuie largement dans sa défense des coordonnées harmoniques. On observe ainsi que l'objectif du physicien de Léninegrad est avant tout de s'entourer de gens à même de soutenir sa propre interprétation de la théorie.

Car l'occasion est pour lui unique. À l'exception de ses séjours polonais de 1952 et 1953, ainsi que d'un séjour hongrois en 1954, Fock n'a plus franchi depuis le début des années 1930 la limite symbolique entre l'Est et l'Ouest alors nouvellement matérialisée par le rideau de fer. De plus, il n'a jusque-là eu l'occasion de diffuser sa pensée qu'en russe ou au travers de publications officielles en langue étrangère de l'Académie des sciences et de pays alliés³. Se rendre en Suisse, et bénéficier d'une audience aussi remarquable que celle réunie par Mercier et Pauli à Berne, est une opportunité inestimable pour Fock de faire entendre largement sa voix hors des limites de la zone d'influence soviétique. Et bien entendu, les communications qu'il suggère de faire dès sa réponse à l'Académie des sciences de l'URSS vont dans ce sens : la première porte sur les équations du mouvement de masses en rotations et la seconde sur les systèmes de coordonnées privilégiées.

¹ Lettre de Fock à L. M. Brekhovskikh en date du 5 novembre 1954 – ARAN SPb, 1034-2-111.

² Plus d'informations sur Aleksandrov, et notamment la proximité de ses idées avec celles de Fock chez Graham [Grah 1987, pp. 363-378].

³ Notons une unique exception avec la publication en 1952 en France de l'article « Le système de Ptolémée et le système de Copernic à la lumière de la théorie générale de la relativité », traduction d'un article russe de 1947 [Fock 1947a']. Mais il faut souligner que cet article est publié dans la nouvelle revue *Questions scientifiques* des Editions de La Nouvelle Critique, qui se revendiquent d'un « marxisme militant ».

Les suggestions de Fock sont entendues par l'Académie mais seul Aleksandrov se joint à lui pour la conférence de Berne qui se déroule finalement du 11 au 16 juillet¹. Le physicien joue le rôle de président de séance le 12 juillet et fait les 14 et 15 juillet, en français, les deux présentations mentionnées précédemment. Celles-ci sont publiées l'année suivante dans un numéro spécial de la revue *Helvetica Physica Acta* [Fock 1956f, 1956g], mais surtout, elles sont l'objet d'une vive reprise de la dispute entre Fock et Infeld. Dans sa biographie, John W. Moffat, présent à la conférence en 1955, nous donne une version quelque peu pittoresque des événements :

Infeld and Fock gave talks one after the other at the meeting. Fock, a large, stocky Russian who kept adjusting his hearing aids since he was completely deaf without them, gave the first talk, presenting his reasons for believing in the gravitational wave solutions in Einstein's theory. Infeld stood off to one side near the podium as Fock spoke. He was also a large man, a Polish physicist from the University of Warsaw. He was already beginning to bristle with indignation over Fock's talk. When Fock finished speaking, Infeld went to the podium. When he started speaking, presenting his reasons for not believing in the existence of gravitational waves, Fock ostentatiously removed his hearing aids, raising laughter in the auditorium. Even Hermann Weyl, the chair of the session, smiled with amusement [Moff 2010, pp. 101-102].

On est alors le 14 juillet au matin et l'après-midi est organisée une excursion sur le lac de Brienz, près d'Interlaken. Moffat ajoute :

As we sailed around the lake, I had the opportunity to stand next to Infeld and Fock, who continued to attack one another on the issue of gravitational waves. This time Fock did not remove his hearing aids [p. 103]

Moffat est globalement correct. Fock et Infeld se succèdent bien au cours d'une session animée par Weyl, le Russe est bien sourd et une sortie au lac de Brienz est bien organisée. Mais ce n'est pas directement d'ondes gravitationnelles dont il est question dans le différend entre le soviétique et le polonais, mais plus spécifiquement de coordonnées privilégiées en théorie de la relativité générale.

Alors que Fock fait une présentation relativement technique en s'appuyant sur les coordonnées harmoniques [Fock 1956f], Infeld propose lui une présentation historique des

¹ Il existe dans le fond Fock des archives de l'Académie des sciences de Russie un dossier dédié à la Conférence de Berne qui contient le rapport d'activités de Fock et Aleksandrov – ARAN SPb, 1034-2-174.

travaux récents sur le problème du mouvement en relativité générale [Infe 1956]. Ce dernier valorise bien entendu le point de vue qu'il partage avec Einstein, critique au nom du fondateur de la théorie celui de Fock¹, mais surtout retourne à nouveau contre ce dernier la « curiosité » qu'il avait soulignée auparavant [Fock 1953b, p. 24] quant à la similarité des équations obtenues respectivement avec sa méthode et celle d'Einstein, Infeld et Hoffman :

In our 1938 paper we [Einstein, Infeld, Hoffmann] used a different coordinate condition than Fock's, but from Petrova's calculations published eleven years later, it followed that in spite of the different coordinate conditions, the post-Newtonian approximation is exactly the same for coordinate conditions! [Infe 1956, p. 207].

Inévitablement le débat entre les deux hommes est relancé. La publication de la seconde intervention de Fock, « Sur les systèmes de coordonnées privilégiés dans la théorie de la gravitation d'Einstein », nous intéresse alors particulièrement car elle est suivie d'une discussion, bien plus longue que la présentation elle-même, qui témoigne du fait que la dispute entre les deux hommes éveille l'intérêt des autres physiciens présents à la conférence. En effet, suite à la défense par Fock des systèmes de coordonnées privilégiés dans la théorie de la relativité générale Infeld prend la parole :

For three years my friend Professor Fock and I have discussed this problem, and we cannot convince one another. I doubt if we shall succeed in doing so today. But since Professor Pauli insists, I shall make a few remarks about the difference between Professor Fock and the usual understanding of relativity [Fock 1956g, p. 240].

Hermann Bondi et Valentine Bargmann vont aussi prendre part aux échanges, qui se présentent avant tout comme une nouvelle tribune pour que Fock puisse exposer son point de vue. Car c'est là l'essentiel à retenir sur la conférence de Berne dans l'idée d'une diffusion des idées de Fock hors d'URSS : en transposant bien malgré lui sa dispute avec Infeld des revues philosophiques soviétiques à une conférence internationale réunissant les plus grands spécialistes de la relativité générale, Fock trouve un nouvel auditoire à sa pensée. Alors, la

¹ « As to the first difference [opposing Einstein, Infeld and Hoffman with Fock]: Einstein very much disliked the illegal marriage between the artificial energy-momentum tensor of matter and the curvature tensor » [Infe 1956, p. 207].

dynamique qui va s'en suivre et que nous discuterons dans la prochaine partie (VIII.2), sera particulièrement fructueuse pour lui.

1.2. La dispute avec Bohr

1.2.1. Voyage à Copenhague

En 1955, à Berne, Fock rencontre Christian Møller qui est un collaborateur de Bohr à l'Institut de physique théorique de l'Université de Copenhague – aujourd'hui connu sous le nom d'Institut Niels Bohr. Le Danois est visiblement intrigué par le travail du Russe et suggère que ce dernier fasse une visite à Copenhague. L'invitation de Møller, à laquelle s'associe Bohr, est renouvelée au début de l'année 1956 par L. A. Sliv de retour de Copenhague. Théoricien spécialiste de la physique nucléaire à Léningrad et ancien élève de Fock, Sliv est le premier physicien soviétique à se rendre à Copenhague après-guerre. Il amorce ainsi un renouveau des relations soviéto-danoises¹. Fock écrit alors le 8 mai 1956 à Møller, acceptant son invitation et l'encourageant à la formaliser en s'adressant directement à l'Académie des sciences de l'URSS². C'est ce que fait Bohr en personne³. À l'automne 1956, Aage Bohr, l'un des fils de Niels, est en visite en Union soviétique et rend visite à Fock, donnant ainsi l'opportunité à ce dernier de discuter plus concrètement de sa venue à Copenhague⁴.

Fock finit donc par se rendre dans la capitale danoise du 12 février au 16 mars 1957⁵ et dans la dynamique de la Conférence de Berne il fait, selon la requête de Møller, trois présentations en relativité générale, les 18, 20 et 22 février. Il y défend bien évidemment son point de vue sur la théorie mais selon une approche particulièrement technique faisant appel

¹ Sur ce point voir les travaux de Anja Skaar Jacobsen sur Rosenfeld qui discutent assez largement les relations de l'Institut Niels Bohr avec l'Union soviétique [Skaa 2012, pp. 290-294].

² Lettre de Fock à Møller du 8 mai 1956 – Niels Bohr Archives, Christian Møller papers, box 2, folder 34.

³ Il ne nous a pas été possible de consulter cette lettre, mais elle est indiquée par Skaar Jacobsen sous la référence « Bohr's general correspondance : Academy of Sciences, Moscow » [Skaa 2012, note 151, p. 297].

⁴ Voir la lettre de Fock à Aage Bohr en date du 31 décembre 1956 – Niels Bohr Archives, Aage Bohr papers, folder 172.

⁵ Sur cette visite on peut en consulter le compte-rendu publié en juillet 1957 dans une des publications officielles de l'Académie des sciences d'URSS [Fock 1957c]. Il en existe une traduction anglaise sous forme de microfilm dans les archives Niels Bohr - Niels Bohr Archives, Microfilm B. S. C. 1930-1945, N°28. Dans les archives de Fock à Saint-Pétersbourg on trouve aussi deux dossiers dédiés à ce séjour danois – ARAN SPb 1034-1-438 et 1034-2-178. Le premier contient notamment un bref journal relatant les activités de Fock à Copenhague.

à de précises applications, comme le mouvement de corps finis en rotation ou encore le problème des ondes gravitationnelles. Ces conférences sont publiées en juillet de cette même année dans les *Reviews of modern physics* [Fock 1957b]. Mais cette visite à Copenhague est bien plus qu'une simple vitrine pour l'exposition de la pensée du physicien russe en relativité générale. En effet, on attend aussi de lui de discuter de mécanique quantique¹. Avant de rentrer dans les détails sur ce point – qui constitue en réalité l'intérêt majeur du séjour danois de Fock – il est important de préciser, comme cela a été mis en avant par Skaar Jacobsen dans ses travaux sur Rosenfeld, que c'est ce dernier qui à Copenhague se charge des questions idéologiques et différentes attaques contre la mécanique quantique. Ainsi, de façon générale, comme le détaille l'historienne : « Bohr was probably relieved that Rosenfeld took affair [on ideological matters] so that he did not have to engage in these discussions which he considered trivial, not new, and a waste of time » [Skaa 2012, p. 256]².

Pour autant, avant la venue de Fock, Bohr est indubitablement au courant de la critique à son encontre formulée par le soviétique en URSS et de l'article de 1951 qui le vise directement [Fock 1951a]. Rosenfeld, qui rapporte probablement ce genre d'informations à Bohr, discute notamment dans sa correspondance en 1953 avec le logicien et philosophe des sciences est-allemand Martin Strauss de la critique soviétique à l'encontre de Bohr³. Et dans ses travaux le logicien fait référence à l'article de Fock de 1951⁴. Ce dernier est par ailleurs reproduit à plusieurs reprises, notamment dans un journal est-allemand en 1952 [Fock 1951a'] et un autre tchécoslovaque en 1955 avec quelques modifications mineures [Fock 1951a'']. On trouve de plus une copie de cette dernière version (en russe) dans les archives de l'Institut Niels Bohr ainsi qu'une traduction en danois⁵. Quoi qu'il en soit, Fock en personne attire l'attention de Rosenfeld sur cet article dans une lettre du 7 avril 1956. Mais lorsqu'il s'agit d'évoquer les

¹ Cette double attente de la part des physiciens de la communauté danoise est notamment rendue explicite dans une lettre de Møller à Fock du 13 juin 1956 (Niels Bohr Archives, Christian Møller papers, box 2, folder 34) et de Fock à Rosenfeld du 7 avril 1956 (Niels Bohr Archives, Léon Rosenfeld papers, Epistemology, box 4, folder 2).

² Dans les mots de Skaar Jacobsen, Rosenfeld est « Bohr's Cold Warrior » [Skaa 2012, chapitre 6].

³ Voir en particulier la lettre de Strauss à Rosenfeld du 30 mai 1953 – Niels Bohr Archives, Léon Rosenfeld papers, Correspondance particulière, box 2, folder 4.

⁴ Strauss M., « Einige Allgemeine Bemerkungen zur „Methodik“ der theoretischen physik in anwendung auf die quantentheorie » – Niels Bohr Archives, Léon Rosenfeld papers, Correspondance particulière, box 2, folder 4.

⁵ Niels Bohr Archives, « V. A. Fock 1955-1957 ».

différences de fond entre son interprétation de la mécanique quantique et celle de Bohr, telles que nous les avons présentées au chapitre quatre, il nous semble que le Russe, par souci de courtoisie, minimise ses désaccords potentiels avec le Danois :

Vous avez, peut-être, lu mon article où j'ai un peu attaqué la manière de formuler l'interprétation des phénomènes quantiques adoptée par M. Niels Bohr. Mais je suis convaincu que malgré son langage un peu positiviste M. Bohr croit aussi bien que nous à la réalité des phénomènes dont il parle, et alors la différence qui existe entre l'opinion de M. Bohr et la mienne est plutôt une différence de langage qu'une différence de fond. D'autre part j'ai critiqué les tentatives de M. Blokhintzev [sic] d'interpréter la mécanique quantique comme théorie des ensembles seulement. En somme, je crois que nous pourrions nous comprendre¹.

Ajoutons qu'entre 1951 et 1957 Fock est pleinement investi dans le développement de sa pensée en relativité générale. Sur le sujet sont publiés 19 articles et sa monographie. En revanche, depuis la rédaction de sa critique de Bohr en 1951, il ne produit que deux travaux originaux en mécanique quantique : sa critique de Blokhintsev en 1952 [Fock 1952] et un article sur l'atome d'Helium en 1954 [Fock 1954a]. Clairement, à l'aube de sa rencontre avec Bohr en février 1957 il est très peu investi dans le domaine de la théorie quantique. Le caractère fortuit de l'événement suite à la rencontre avec Møller à Berne, combiné à la légèreté de sa lettre à Rosenfeld en 1956 viennent appuyer l'idée que Fock ne se rend pas à Copenhague dans l'optique d'une véritable confrontation frontale avec Bohr sur des questions idéologiques. Pour ce qui est de ce dernier, notons son attitude, rapportée par Rosenfeld dans une interview donnée à Kuhn et Heilbron en 1963, face aux accusations de positivisme :

First of all, he asked, "Why are those Russians dissatisfied?" And I tried to explain, "They accuse you of being a positivist," and so on. Then he said, "Is that it? But those things are so trivial; they are not of interest to physicists. Physicists are beyond that point and that is not the thing that we are interested in. We are struggling with real problems, not with those trivial statements about our living in an external world." You see, he refused to look at those problems probably because there was no complementarity in them; they were such trivial things. He did not feel that there was a real thing for discussion [KuHe 1963].

¹ Lettre de Fock à Rosenfeld du 7 avril 1956 – Niels Bohr Archives, Léon Rosenfeld papers, Epistemology, box 4, folder 2.

Bohr n'est pas intéressé par le débat et lorsque Fock se rend à Copenhague, Rosenfeld, qui serait alors le plus à même de conduire les échanges sur le plan idéologique¹, est absent. Par conséquent, la nature des discussions qui vont s'engager semble incertaine.

Malgré tout, très rapidement, l'aspect relativité générale de la visite de Fock à Copenhague va être occulté par ses échanges avec Bohr sur l'interprétation de la mécanique quantique. Pour le physicien russe, son activité danoise est constituée « avant tout de conversations avec Niels Bohr sur les problèmes fondamentaux de la mécanique » qui s'avèrent alors être « la chose la plus intéressante »². Car contre toutes attentes Bohr se montre en effet favorable à ce que le débat avec Fock s'engage. On peut imaginer qu'il est motivé en ce sens du fait que le physicien soviétique, non seulement ne rejette pas la complémentarité, mais possède aussi une indéniable crédibilité scientifique. L'opposition idéologique frontale, positivisme versus matérialisme dialectique, bien que toujours présente au second plan au travers des différentes orientations épistémologiques des acteurs du débat, est par ailleurs rapidement évacuée par Bohr : « Bohr declared from the beginning that he is not a positivist and that he simply endeavors to consider nature as it is »³. C'est pourquoi, comme Fock nous y a déjà habitué, l'accent peut être mis sur les véritables divergences techniques et leurs conséquences dans la formulation de la pensée des deux hommes.

Plusieurs épisodes de la carrière de Bohr, que ce soit avec Schrödinger⁴ ou avec Landau et Peierls⁵, nous rappellent l'engagement très intense du physicien danois dans des débats où il

¹ Notons de plus que Rosenfeld se revendique comme un physicien marxiste, et possède par conséquent le bagage philosophique à un débat complet avec Fock.

² « The Journey to Copenhagen » – Niels Bohr Archives, Microfilm B. S. C. 1930-1945, N°28.

³ *Ibid.*

⁴ Voir la biographie de Heisenberg, *La partie et le tout*, dans laquelle il évoque les débats de Bohr et Schrödinger en 1926 à Copenhague, le premier lui faisant « presque l'effet d'un fanatique », l'intensité des débats poussant potentiellement l'autrichien à la maladie, le danois continuant d'essayer de le convaincre alors qu'il était alité [Heis 1969', pp. 107-111].

⁵ Voir le témoignage de Rosenfeld sur la dispute opposant Bohr à Landau et Peierls : « When I arrived at the Institute on the last day of February , 1931, for my annual stay, the first person I saw was Gamow. As I asked him about the news, he replied on his own picturesque way by showing me a neat pen drawing he just made. It represented Landau, tightly bound to a chair and gagged, while Bohr, standing before him with upraised forefinger, was saying "Bitte, bitte, Landau, muss ich nu rein Wort sagen!" I learned that Landau and Peierls had just come a few days before with some new paper of theirs which they wanted to show Bohr, "but" (Gamow

est en désaccord avec ses collègues. Dans un premier temps, Fock subit aussi les foudres de Bohr : « We were not able at once to fix the “procedure” for the discussion. Above all, there was the difficulty that Bohr became so engaged in the formulation of his thoughts that it was difficult for me to enter into the conversation »¹. Mais en fin de compte, cet état de fait est une chance pour l'historien, car elle va pousser Fock à formuler sa réponse à Bohr par écrit, ce qui nous permet donc d'accéder directement au contenu des arguments qu'il avance. Il existe dans les archives à Copenhague deux documents, intitulés « My reply to Professor Niels Bohr » et datés respectivement du 23 février² et du 1^{er} mars 1957³. Ils possèdent une partie commune et le second est agrémenté de commentaires complémentaires montrant les nouveaux points abordés dans le cours de la conversation. De façon générale les éléments discutés renvoient à l'article de Fock de 1951 critiquant Bohr [Fock 1951a] et dont nous avons déjà fait une analyse détaillée au cours du chapitre quatre (IV.1.1.1). C'est pourquoi nous ne rentrons pas ici dans les détails techniques et nous contentons d'énumérer les thèmes abordés.

Deux sujets principaux structurent le corps commun des réponses à Niels Bohr. On trouve tout d'abord l'idée de subdivision du processus expérimental afin de mettre en avant ce qui pour Fock est le corps de la théorie : l'étude des propriétés des corps atomiques au travers de la fonction d'onde. En effet il est pour lui nécessaire de dépasser la description classique, à laquelle Bohr se limite trop à son sens, afin de donner sens aux concepts purement quantiques. Le second thème, que Fock relie naturellement au premier, est la critique du danois concernant son approche du formalisme de la théorie comme possédant un caractère purement symbolique. Nous retrouvons ici deux points fondamentaux de la structuration de la pensée de Fock vis-à-vis de la mécanique quantique. Le Russe résume alors en quelques

added airily) “he does not seem to agree – and this is the kind of discussion which has been going on all the time”. Peiers had left the day before, “in state of complete exhaustion,” Gamow said. Landau stayed for a few weeks longer, and i had the opportunity of ascertaining that Gamow’s representation of the situation was only exaggerated to the the extent usually conceded to artistic fantasy » [Rose 1955, p. 70].

¹ « The Journey to Copenhagen » – Niels Bohr Archives, Microfilm B. S. C. 1930-1945, N°28.

² « My reply to Professor Niels Bohr », 23 février 1957 – Niels Bohr Archives, Microfilm B. S. C. 1930-1945, N°28.

³ « My reply to Professor Niels Bohr », 1er mars 1957 – Niels Bohr Archives, Niels Bohr Scientific Correspondence, Supplement, 1910-1962, folder 96.

mots sa critique de Bohr et valorise par la même occasion sa propre démarche dans ses travaux :

On the basis of your ideas [Bohr's], one may and must introduce quantum-mechanical concepts. They are not symbolic, but quite physical. There is no reason to avoid them in the description of nature¹.

Le document daté du 1^{er} mars possède trois commentaires complémentaires sur des thèmes bien spécifiques : la causalité, la complémentarité, et la notion d' « interaction incontrôlable ». Sur la causalité Fock réaffirme que la mécanique quantique ne conduit qu'à une stricte négation du déterminisme laplacien. Sur la complémentarité il l'associe à nouveau de façon très claire aux relations d'indétermination et rappelle qu'elle n'empêche pas une étude plus concrète des propriétés des objets atomiques au travers de l'usage de concepts quantiques. Par conséquent, il estime que : « it is necessary to stress that there is no limitation in our knowledge of the nature and properties of atomic objects »². Enfin, sur la notion d' « interaction incontrôlable », Fock discute à nouveau la limite entre quantique et classique, notant que s'il y a bien interaction elle n'est en rien incontrôlable et qu'en réalité la question doit être repensée à l'appui de concepts purement quantiques. Il conclut alors que cette façon de procéder dessine une nouvelle « frontière gnoséologique »³.

On observe donc très bien au travers des deux documents ici discutés que la dispute entre Fock et Bohr glisse de façon assez naturelle d'une opposition générale sur des aspects fondamentaux de l'approche de la théorie vers une discussion de points plus spécifiques qui rejoignent directement la question de la formulation de l'interprétation. Certes ces derniers se confondent avec les intérêts des premiers mais il nous semble que ceux-ci s'en trouvent clairement dilués. Au travers des questions terminologiques ici débattues, surtout si elles sont prises indépendamment, il est nettement moins facile de reconstruire ce qui fait la spécificité de la pensée de Fock. Notons alors pour conclure que celles-ci sont des expressions directes de ce qui selon l'étude de Graham compose l'ensemble des critiques soviétiques à l'encontre de Bohr [Grah 1988]. L'historien distingue deux phases dans cette critique : « The Early Dogmatic Phase » et « The Continuing Philosophical Critique ». Durant la première, qui

¹ *Ibid.*

² *Ibid.*

³ *Ibid.*

apparaît avec le stalinisme, Bohr est principalement attaqué sur les thèmes de la causalité et de la complémentarité [pp. 305-309]. À partir des années 1960, c'est l'« interaction incontrôlable » qui prend le relais et devient « le centre de critique continu le plus important » [pp. 309-315]. Soulignons que Fock reste lui constant dans sa critique, mais aussi que ce sont surtout les conséquences de sa rencontre avec Bohr qui poussent Graham à ce constat, le physicien russe donnant à cette occasion une valeur toute particulière à la question de l'« interaction incontrôlable ».

1.2.2. Échos de la dispute

En 1958, Bohr fait publier dans le recueil *La philosophie au milieu du vingtième siècle* un article intitulé « Quantum Physics and Philosophy. Causality and Complementarity » [Bohr 1958a]. On y retrouve plusieurs caractéristiques relatives à ses échanges avec Fock. En effet, le danois commence tout d'abord par expliciter que c'est bien une analyse « déterministe » – présentée comme une « forme idéale des relations causales » – des phénomènes physiques qui est en contradiction avec les évidences expérimentales concernant les particules atomiques [pp. 308-309]. Pour répondre indirectement aux critiques d'idéalisme il s'appuie sur des propos visant à établir l'objectivité scientifique de la théorie. Pour exemples : « The description of atomic phenomena has in these respects a perfectly objective character » [p. 310] ; « while in complementarity description all subjectivity is avoided by proper attention to the circumstances required for the well-defined use of elementary physical concepts » [p. 314]. Enfin, en ce qui la critique sur l'emploi de l'expression « interaction incontrôlable », Bohr semble la reconnaître et questionne même l'idée de la remplacer par une description logique de la situation :

Disregard of this point [the requirement of a reference to a complete experimental arrangement] has sometimes led to confusion, and in particular the use of phrases like “disturbance of phenomena by observation” or “creation of physical attributes of objects by measurements” is hardly compatible with common language and practical definition.

In this connection, the question has even been raised whether recourse to multivalued logics is needed for a more appropriate representation of the situation [pp. 312-313].

Si nous insistons sur ces points, c'est que Fock lui-même met en avant ces modifications apportées par Bohr¹. C'est notamment le cas dans un article en français publié en 1960 dans *La Pensée* [Fock 1960, pp. 13-14]. Alors, si nous reprenons en considération les réponses écrites de Fock à Bohr durant son séjour à Copenhague, on constate que les inflexions de Bohr dans son article de 1958 sont davantage de l'ordre des commentaires complémentaires apparues dans le second rapport du 1^{er} mars 1957. Assez nettement, elles sont tournées vers des questions de formulation de l'interprétation de la théorie. Difficile de voir chez Bohr de véritables changements en ce qui concerne les deux points essentiels de l'interprétation de Fock mis en avant de façon initiale à Copenhague : une étude plus concrète des propriétés atomiques et une approche réaliste du formalisme mathématique. Le physicien de Leningrad continue par ailleurs de critiquer Bohr sur ces deux points dans son article de *La Pensée* [p. 10-11]. Pour autant, il accueille très positivement l'article du Danois, comme en témoigne une lettre du 18 avril 1960 à destination de Rosenfeld :

1. Cet article m'est cher pour des raisons personnelles, car je le crois inspiré par mes discussions avec Bohr en février-mars 1957 ;
2. Cet article est très apprécié en Russie, car il contient des énoncés fort importants sur la causalité, l'objectivité, etc. qui rapprochent le point de vue de Bohr au point de vue du matérialisme dialectique dûment formulé².

¹ Il faut cependant noter que Fock est convaincu d'avoir influencé Bohr dans la bonne direction sur ces trois points bien avant que le Danois ne publie « Quantum Physics and Philosophy. Causality and Complementarity » [Bohr 1958a]. En effet, dès la fin de l'année 1957, il publie dans un article le commentaire suivant : « Personal conversations with Niels Bohr led me to the firm belief that in reality his position is much closer to a materialistic one than would seem from reading his papers on gnosiological questions of quantum mechanics. First and foremost, Bohr is of the opinion that nature must be taken as it is: what we are studying is nature and its laws. He decisively expresses his disagreement with the positivist point of view and fully admits the objectivity of the properties of atomic objects. As far as terminology is concerned, Bohr is prepared to renounce the use of the term "incontrollable interaction" which he considers as inadequate. Bohr also agrees with the fact that the general causality principle must be distinguished from Laplacian determinism, and that only the latter is in conflict with the laws of atomic physics » [Fock 1957a', p. 646]. Très clairement, un accord entre Fock et Bohr sur ces points a été trouvé à Copenhague.

² Lettre de Fock à Rosenfeld du 18 avril 1960 – Niels Bohr Archives, Léon Rosenfeld papers, Copenhague, box 8, folder 4.

Ce second point nous invite alors à prendre à nouveau du recul sur la situation soviétique relativement à la question de l'interprétation de la mécanique quantique. Car c'est sur cette base que nous pourrions mieux saisir la raison pour laquelle Fock est si enthousiaste au sujet de cet article de Bohr.

Comme évoqué aux deux chapitres précédents (VI.2.4.2 et VII.2.2.2), la grande conférence sur les aspects philosophiques des sciences naturelles organisée en 1958 à Moscou [Fedo 1959], à laquelle Fock participe, symbolise une véritable normalisation de la situation politique et philosophique dans la physique soviétique. Mais plus spécifiquement pour la mécanique quantique, elle scelle aussi une forme de consensus public sur la coexistence pacifique de différentes interprétations possibles de la théorie dans une perspective marxiste :

In the lively discussions aroused by the statement, the speakers, D. I. Blokhintsev, Ya. P. Terletsky, T. A. Lebedev, E. Ya. Kolman, V. V. Perfiliev, and others, indicated that Soviet scientists are unanimous [*sic*] in their materialist approach to the solution of the philosophic problems of quantum mechanics, and that even some bourgeois scientists are now abandoning their positivist view-point (Bohr, Heisenberg, and others)¹.

Notons que, sous l'impulsion par exemple de Blokhintsev en commentaire à la présentation de Fock [pp. 421-426] et comme le reprend Chesnokov en « Brief review » de la conférence [pp. 650-661], se dessine une catégorisation en trois types des approches marxistes de la mécanique quantique. Nous connaissons bien les deux premières approches, l'une étant incarnée par la figure de Fock et l'autre par celle de Blokhintsev, mais nous n'avons pas vraiment évoquée la troisième. Incarnée en URSS par Ya. P. Terletskiy elle se veut déterministe et est principalement développée par des physiciens marxistes étrangers comme l'américain David Bohm et le français Jean-Pierre Vigièr. Souvent, le nom de Louis de Broglie leur est associé, bien que ce dernier, en rien marxiste, revendique son indépendance. Ils développent une interprétation dite causale de la mécanique quantique. Son *credo* : « the possibility of

¹ « Brief review » par E. N. Chesnokov de la conférence de Moscou sur les problèmes philosophiques en sciences naturelles de 1958 [Fedo 1959, pp. 655-656].

constructing a co-ordinate theory of the micro-object which along with statistic description provides unique determinacy of the behaviour of an individual micro-object »¹.

Depuis le début des années 1950 déjà, Rosenfeld mène depuis Copenhague un combat contre l'interprétation causale de la mécanique quantique². Dans une lettre du 6 avril 1952 il en appelle notamment à Frédéric Joliot afin de trouver une solution pour « redresser la situation » face à de « jeunes gens³ [...] bien malades [qui] se sont mis en tête qu'il fallait mordicus abattre la complémentarité et sauver le déterminisme ». Il estime qu'ils sont « sous l'influence d'une scolastique qui emprunte les formes extérieures du marxisme, mais est aussi opposée à son véritable esprit que le plus noir catholicisme ». Dans cette lettre, Rosenfeld étend son constat à l'Union soviétique où « les meilleurs physiciens [...] sont en butte aux attaques de cette scolastique, qui fait encore plus de ravages à Moscou qu'à Paris »⁴. Lorsque Rosenfeld prend contact avec Fock en 1956, il attire probablement l'attention de ce dernier sur la popularité croissante de l'interprétation causale à l'étranger. C'est ainsi que le physicien soviétique lui répond : « Je voudrais aussi discuter avec vous les questions d'interprétation de la mécanique quantique et surtout les causes et effets de la "maladie Bohm-Vigier", assez répandue, hélas »⁵. Fock, qui est un homme de convictions profondes et qui est persuadé d'être le garant de la bonne interprétation de la mécanique quantique, ne peut pas se satisfaire du *statu quo* naissant en Union soviétique et qui est clairement établi lors du Congrès moscovite de philosophie des sciences de 1958. C'est pourquoi il s'engage aux côtés de Rosenfeld dans la lutte contre la diffusion des idées sur l'interprétation causale de la théorie quantique.

¹ *Ibid* [p. 655]. Sur l'interprétation causale de la mécanique quantique on peut consulter Olival Freire Jr. sur Bohm [Frei 2015, pp. 17-74] et la thèse de Virgile Besson en cours de préparation à l'Université Claude Bernard de Lyon qui traite de Jean-Pierre Vigier et de ses collaborateurs [Bess 2018].

² Sur l'opposition de Rosenfeld à Bohm et au groupe de Vigier voir Skaar Jacobsen [Skaa 2012 ,pp. 271-290]. La question est aussi abordée par Freire Junior [Frei 2015, pp. 35-42]. Voir aussi dans les archives à Copenhague sa correspondance avec divers acteurs de la controverse : Niels Bohr Archives, Léon Rosenfeld papers, Epistemology, box 4, folder 1.

³ Il fait notamment explicitement référence à Vigier, Schatzman et Vassails.

⁴ Lettre de Rosenfeld à Joliot du 6 avril 1952 – Niels Bohr Archives, Léon Rosenfeld papers, Epistemology, box 4, folder 1.

⁵ Lettre de Fock à Rosenfeld du 7 avril 1956 – Niels Bohr Archives, Léon Rosenfeld papers, Epistemology, box 4, folder 2.

Dès 1957, on voit donc apparaître dans les écrits de Fock une critique explicite des idées de de Broglie, Bohm et Vigier. C'est le cas dans une publication russe dans *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Fock 1957a], traduite en anglais dans le *Czechoslovakian Journal of Physics* [Fock 1957a'], où il est notamment énoncé que les idées de Vigier « ne sont pas soutenues par des arguments mathématiques convaincants » [p. 644]. C'est ce même texte qui est présenté l'année suivante lors de la conférence de philosophie des sciences à Moscou. La critique est renouvelée dans l'article publié en 1960 dans *La Pensée* au cours d'un paragraphe intitulé « Remarque sur les tentatives d'une interprétation dite déterministe de la mécanique quantique » [Fock 1960, pp. 14-15]. L'attaque peut sembler moins directe si l'on considère qu'elle est sobrement dirigée contre « certains savants de l'école de de Broglie » [p. 15], mais c'est sans compter sur le fait que cet article est issu d'une conférence donnée le 29 juin 1959 à Paris, à l'Institut Poincaré, là même où Vigier et ses collaborateurs travaillent¹.

Mais l'activité de Fock contre les interprétations causales de la mécanique quantique prend en réalité diverses formes. Probablement consulté au sujet de la possible publication d'un article dans *Uspekhi fizicheskikh nauk* Fock répond le 2 septembre 1958 à la rédaction :

La rédaction de UFN sait probablement tout autant que moi que la théorie de de Broglie-Bohm-Vigier est simplement absurde. C'est pourquoi je n'ai pas besoin de me concentrer sur les questions scientifiques et peut directement passer aux aspects pratiques. [...] nous avons besoin immédiatement de contre attaquer pour faire taire cette théorie. Si vous avez cela à l'esprit il est clair qu'il n'y a aucune raison de publier dans "Uspekhi" un article évidemment stupide².

¹ Voir la lettre de O. Costa de Beauregard à Fock du 10 mars 1959, la réponse de Fock du 22 mai, ainsi que les lettres de Fock à Vigier, Tonnelat et Costa de Beauregard du 8 septembre 1959 – ARAN SPb 1034-2-179. On y apprend qu'il y est initialement question d'une publication du texte de la conférence dans les *Annales de l'Institut Poincaré* ou dans la revue *Dialectica*. La façon dont il termine sa trajectoire dans *La Pensée* nous est inconnue.

² Lettre de Fock à la rédaction de *Uspekhi fizicheskikh nauk* en date du 2 septembre 1958 – ARAN SPb, 1034-2-219. L'article en question serait de Miora Mugur, connue aujourd'hui sous le nom de Mugur-Schächter. En 1958 elle est alors étudiante en Roumanie. Contactée par nos soins, elle nous a informé qu'elle n'est en rien personnellement responsable à cette époque d'une quelconque demande de publication dans un journal russe.

Autre exemple, en 1959, une traduction russe de la quatrième édition de *The Principles of Quantum Mechanics* [Dirac 1958] de Paul Dirac est en préparation¹. Fock et Dirac échangent alors plusieurs courriers au sujet de la préface de cette édition², dont Dirac en propose une version dans sa lettre du 19 septembre 1959. De ses propres mots, certaines remarques « sont plutôt spéculatives ». Le passage incriminé est le suivant :

The rules for the physical interpretation of the theory are, I believe, more likely to get changed in the future than the basic mathematical methods. For this reason one should not attach too much philosophical importance to the indeterminacy in the interpretation. Indeterminacy is a necessary ingredient of our atomic theory, but quite likely it will not survive in its present form when any substantial progress is made in the future. It will probably get replaced by something that we can have no idea until the progress is actually made, just as we had no idea about indeterminacy while we were working with Bohr's orbits³.

Dans sa réponse du 23 septembre, Fock souligne effectivement le caractère « purement spéculatif » de ce passage qu'il estime peu adapté à un potentiel public d'étudiants. Mais surtout il estime qu'il y reside une ambiguïté majeure : « the scepticism about indeterminacy⁴ [...] can be misinterpreted in the sense of Bohm and Vigier, and thus give rise to fruitless discussions ». Ainsi Fock propose directement à Dirac d'abandonner ce paragraphe de sa préface et de le remplacer par quelques formules de politesse à l'intention du public russe, ainsi qu'une approbation des quelques remarques ajoutées par l'éditeur. Le 15 octobre, Dirac se range à cet avis.

Malgré tout, pour renverser le *statu quo* soviétique sur la question de l'interprétation de la mécanique quantique dans une perspective matérialiste, Fock ne se contente pas de critiquer les tenants de l'interprétation causale. Il estime aussi que mettre en avant le

¹ Sur les différentes publications russes de *The Principles of Quantum Mechanics* voir Efremidze et Frenkel [EfFr 1990].

² Lettres de Fock à Dirac du 12 et 23 septembre 1959 – ARAN SPb, 1034-3-57. Lettres de Dirac à Fock du 19 septembre et du 15 octobre 1959 – ARAN SPb, 1034-3-371.

³ Préface pour la traduction russe de *The Principles of Quantum Mechanics* jointe à la lettre de Dirac à Fock du 19 septembre 1959 – ARAN SPb, 1034-3-371.

⁴ Pour expliquer la réaction de Fock il faut noter, comme il le souligne séparément, qu'il entend « indeterminacy » dans le sens de « the probabilistic formulation of laws of nature ». Lettre de Fock à Dirac du 23 septembre 1959 – ARAN SPb, 1034-3-57.

rapprochement des idées de Bohr avec les siennes est un argument indéniable en sa faveur. C'est pourquoi à l'approche des années 1960, l'idée qu'il ait pu pendant sa visite à Copenhague influencer directement Bohr est régulièrement avancé par Fock, avec une forme de fierté, dans ses publications¹. Plus encore, il commente :

Nous avons donc le droit de constater que les différences qui pourraient encore exister entre le point de vue de Bohr et le nôtre sont d'une nature tout à fait secondaire, car nous sommes d'accord dans la question principale, celle de la réalité et de l'objectivité du monde extérieur, des lois de la nature et des faits par lesquels ces lois se manifestent [Fock 1960].

Certes, Fock continue par souci d'intégrité scientifique à critiquer Bohr sur leurs désaccords respectifs – étude plus concrète des propriétés atomiques et une approche réaliste du formalisme mathématique –, mais il nous semble qu'en ayant recours à des énoncés de la sorte il masque volontairement les véritables et fondamentales divergences épistémologiques qui existent entre sa pensée et celle du Danois, celles que nous avons discutées aux chapitres trois et quatre (III.3.3 et IV.1.1). En procédant ainsi il prend le risque de voir son interprétation de la théorie être vidée de ses spécificités propres, en comparaison avec celle de Bohr. Mais en contrepartie, à chaque étape d'une réception plus positive des idées de Bohr en URSS, c'est Fock qui se hisse comme véritable autorité scientifique soviétique dans le domaine de la mécanique quantique.

Ainsi le physicien soviétique va être particulièrement actif dans la diffusion des idées du Danois et s'implique directement dans la publication des articles de ce dernier. En 1958 il rédige quelques remarques² [Fock 1958] sur l'article « Discussion with Einstein on epistemological problems in atomic physics » [Bohr 1949] qu'il traduit avec son épouse³ et fait publier dans *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Bohr 1949']. « Quantum Physics and Philosophy. Causality and Complementarity » est traduit par ses soins et publié l'année suivante dans le même journal [Bohr 1958a']. Cette même année il travaille aussi sur la version russe de *Atomic*

¹ C'est le cas dans les trois principales publications originales sur la question de l'interprétation de la mécanique quantique que fait Fock entre 1957 et 1960 [Fock 1957a, 1958, 1960].

² La traduction anglaise de cette introduction est envoyée à Bohr le 20 février 1959 – Niels Bohr Archives, Microfilm B. S. C. 1930-1945, N°28.

³ Voir la lettre de Fock à Bohr du 30 décembre 1958 – Niels Bohr Archives, Microfilm B. S. C. 1930-1945, N°28.



Figure 15. Obreimov I. V., Fock V. A., Bohr N. et Kapitsa P. L. en 1961 à Moscou [Niels Bohr Archive]

Physics and Human Knowledge, une compilation d'articles publiée par Bohr en 1958 [Bohr 1958b]. Publié en URSS en 1961 [Bohr 1958b'], l'ouvrage contient deux articles supplémentaires, « Quantum Physics and Philosophy » et « Quantum Physics and Biology ». L'ajout du premier est une requête explicite de Fock¹ et celle du second une suggestion de Bohr². Nous avons déjà évoqué l'appréciation de Fock relative au premier article qu'il croit inspiré de ses échanges avec Bohr en 1957³. Dénué pour lui de toute expression positiviste, il estime qu'il est la garantie de la bonne réception de l'ouvrage en Union soviétique.

La publication du recueil de Bohr en russe coïncide avec sa première visite en URSS depuis 1937. Celle-ci a lieu du 3 au 19 mai 1961 à Moscou. L'événement est important pour la communauté des physiciens théoriciens soviétiques et comme le commente Skaar Jacobsen : « The visit may be seen as symbolizing a small triumph for Bohr's idea of an open world as well as for complementarity in a Russian context. Following Fock's promotion of Bohr's

¹ Lettre de Fock à Bohr du 18 décembre 1959 – Niels Bohr Archives, Microfilm B. S. C. 1930-1945, N°28.

² Lettre de Rosenfeld à Fock du 30 décembre 1959 – Niels Bohr Archives, Microfilm B. S. C. 1930-1945, N°28.

³ Voir la lettre de Fock à Rosenfeld du 18 avril 1960 – Niels Bohr Archives, Léon Rosenfeld papers, Copenhague, box 8, folder 4.

complementarity and his translation into Russian of many Bohr's central papers, complementarity seems to have fared more easily in a Russian context during the 1960's » [Skaa 2012, p. 298]. Il nous semble que l'historienne a raison de mettre en avant que l'action de Fock pour réhabiliter la figure de Bohr résulte avant tout en un triomphe des idées et non, comme on pourrait aussi le penser, en une conséquence politique¹. En effet, depuis 1956, et donc avant sa rencontre avec Fock, Bohr est fréquemment invité de façon officielle à se rendre en Union soviétique, mais ne peut s'y rendre pour raisons personnelles².

1.3. Conclusion intermédiaire

Nous avons introduit dans notre récit des disputes de Fock avec Infeld et Bohr une forme de circularité géographique, l'aventure débutant à Léninegrad, se poursuivant à Berne puis Copenhague avant de terminer sa course à Moscou. Cette circularité n'est pas un hasard, elle souligne à quel point la question de la diffusion des idées de Fock à l'international est dépendante de son contexte d'origine. L'atmosphère des débats philosophiques du début des années 1950 en Union soviétique est un formidable catalyseur du débat d'idées entre Fock et Infeld, et celui-ci n'en est que plus mature lorsqu'il arrive en 1955 sur la scène internationale lors de la Conférence de Berne. L'effet est des plus efficaces, les idées de Fock suscitent immédiatement l'intérêt de la communauté. C'est par ricochet que Fock est propulsé à Copenhague pour discuter de ses idées avec Bohr au début de l'année 1957. Cet épisode est parmi les plus commentés de la carrière de Fock. Mais nous avons voulu volontairement nous affranchir de la littérature secondaire, afin de nous dégager notamment d'une approche axée sur les questions politiques et idéologiques³, dépendante de l'imaginaire collectif⁴, conçu

¹ C'est notamment la façon dont est introduite la visite de Bohr à Moscou par Olival Freire Jr. [Frei 1994, p. 74].

² Sur ce point voir Skaar Jacobsen [Skaa 2012, p. 298].

³ Olival Freire Jr. dans son article « Sobre o diálogo Fock-Bohr » voit en la dispute entre Bohr et Fock une expression directe des effets de la doctrine Jdanov [Frei 1994].

⁴ Peter Freund dans *A Passion for Discovery* se livre notamment en 2007 à des commentaires extrêmement caricaturaux sur Fock et la science soviétique : « Something was done, and the way the Copenhagen interpretation was reconciled with Marx very much resembles the way the Iranian ayatollahs ruled the Coran specifically allows temporary marriages and that therefore a male visitor to a "house of chastity", is there to enter into a temporary marriage [...] Marx was taken to the Copenhagen altar in much the same spirit. The only surprise was that the ayatollah officiating at Marx's house of chastity, was none other than V. A. Fock, one of the greatest Russian theoretical physicists of the twenties century » [Freu 2007, pp. 78-79].

avant tout comme unilatérale¹, visant des contextes plus larges² ou étant spécifiquement technique³, afin de poursuivre l'effort jusqu'alors incomplet d'une approche par les sources primaires uniquement. La première conclusion à tirer de cette enquête est que la rencontre entre Bohr et Fock possède un caractère fortuit qui conduit les deux hommes à un véritable débat de fond où Fock a l'opportunité d'exposer les spécificités propres de son interprétation de la mécanique quantique. Mais la seconde conclusion qui en découle est qu'en dépit de cela, il est inévitablement rattrapé par son contexte d'origine qui va le pousser d'une certaine façon et, potentiellement avec la convenance de Bohr lui-même⁴, à instrumentaliser cet échange d'idée. Inévitablement, le débat scientifique est alors graduellement masqué par les intérêts mis en jeu. Néanmoins, l'essentiel à retenir pour ce qui est de la diffusion des idées de Fock, c'est qu'il a saisi de la meilleure manière qui soit l'opportunité qui lui est donnée aux premières heures de la déstalinisation, et que dans le même temps le contexte international devient pour lui le plus à même d'exposer véritablement le fond de sa pensée. Tant à Berne avec Infeld, qu'avec Bohr à Copenhague, la caractéristique première du débat est sa qualité d'un point de vue scientifique, et Fock va pouvoir s'appuyer dessus pour continuer de propager ses idées.

2. Parcours institutionnel à l'étranger

Comme discuté au chapitre premier (1.2.2), Fock est un personnage particulièrement bien intégré du point de vue institutionnel dans le paysage de la physique soviétique. Il convient cependant, dans l'optique d'une analyse de la diffusion de sa pensée, de se pencher sur la question de son insertion dans le paysage international de sa discipline. Comme nous allons

¹ Chez Skaar Jacobsen la question est principalement abordée du point de vue de Copenhague et dépourvue de développements techniques [Skaa 2012, pp. 291-301]. Notons toutefois qu'afin de rééquilibrer le débat – nos sources donnant principalement le point de vue Fock – c'est la référence que nous avons le plus utilisée.

² Graham par exemple questionne en 1988 le rôle de la dispute mais dans le contexte plus général de la critique des idées de Bohr en Union soviétique [Grah 1988].

³ F. Selleri en 1989 dans *Quantum Paradoxes and Physical Reality* est celui qui développe de façon la plus complète les échanges entre Fock et Bohr d'un point de vue strictement scientifique [Sell 1989, pp. 104-107].

⁴ « From Bohr's (and Rosenfeld's) perspective, what was more important was that after their meeting Fock may have influenced the quantum epistemological discourse in the Soviet Union by his translations of Bohr's papers and by his own papers on the subject » [Skaa 2012, p. 297].

l'observer, Fock va en réalité profiter de la dynamique exceptionnelle de ce qui est considéré par les historiens comme la « renaissance » de la relativité générale¹. En effet, après une longue période à « l'étiage » suite à son établissement², la théorie de la gravitation d'Einstein redevient à partir du milieu des années 1950, et notamment dans la foulée de la conférence de Berne, un des courants dominants de la physique. En 2015, Blum, Lalli et Renn ont proposé dans leur article « The Reinvention of General Relativity: A Historiographical Framework for Assessing One Hundred Years of Curved Space-time », un nouveau cadre de travail pour étudier le processus de renaissance de la théorie [BLR 2015]. Ils mettent notamment en avant une importante collusion de facteurs épistémiques et sociaux au lendemain de la Seconde Guerre mondiale. Le contexte idéologique soviétique, qui donne vie à la dispute entre Fock et Infeld, est une illustration de leurs propos. Mais plus récemment encore, l'un de ces trois auteurs, Roberto Lalli, a prolongé cette réflexion en se livrant à une très complète étude du cadre institutionnel qui favorise l'émergence d'une communauté internationale bien identifiée de physiciens que nous pouvons dénommer, au sens physique du terme, comme relativistes. Son ouvrage, *Building the General Relativity and Gravitation Community during the Cold War* [Lall 2017], définit le contexte international précis dans le lequel évolue Fock à partir de 1955. C'est pourquoi la présente partie y fait très largement référence.

2.1. Comité international : séjours à l'étranger, multiplication des contacts

Mis à part la visite de Fock à Copenhague en 1957, la conférence de Berne offre aussi au physicien russe une opportunité unique de diffuser sa pensée à l'international en débutant un processus qui conduit à la publication en anglais de sa monographie en relativité générale. Fock et Pauli discutent à Berne de l'ouvrage en préparation à Leningrad et le second nommé prend alors l'initiative de contacter P. Rosbaud, directeur de la maison d'édition Pergamon Press Ltd. à Londres. Comme l'écrit Rosbaud à Rosenfeld : « Pauli thought that this book would be probably a very useful once and that it might be desirable to have an english translation »³. Le processus est assez rapide si l'on considère qu'au 6 octobre 1955 les contacts entre

¹ Le terme « renaissance » a été introduit par Clifford Will à la fin des années 1980 [Will 1986, 1989].

² Sur cette période voir les travaux de Eisenstaedt [Eise 1986].

³ Lettre de Rosbaud à Rosenfeld du 22 février 1956 – Niels Bohr Archives, Léon Rosenfeld papers, Manchester, box 7, folder 6. C'est cette lettre, où Rosbaud consulte Rosenfeld sur l'ouvrage de Fock, qui nous renseigne sur la démarche de Pauli.

Rosbaud et Fock sont déjà bien établis¹. L'édition russe étant pour sa part publiée en décembre 1955 [Fock 1955a], c'est au cours de l'année 1956 que le processus de traduction est engagé et conduit en concertation avec Fock par N. Kemmer de l'Université d'Edimbourg². Plus tard dans l'année, ce sont les éditions Akademie-Verlag, basées à Berlin-Est qui lancent une traduction en allemand. Elle aboutit en 1960 [Fock 1955All]³. En 1962, c'est aussi une version roumaine qui voit le jour [Fock 1955Ro].

La traduction anglaise de la monographie de Fock est finalement publiée en 1959 [Fock 1955An], une année qui s'avère tout particulièrement riche pour le soviétique. Il se rend pour la première fois aux Etats-Unis, du 14 avril au 1^{er} mai⁴, tant pour y discuter relativité générale que mécanique quantique. En très peu de temps, Fock a l'occasion de visiter un certain nombre de prestigieuses institutions américaines, à savoir l'Université Harvard et le Massachusetts Institute of Technology à Cambridge, l'Institute for Advanced Study à Princeton, mais aussi les universités de Columbia et de New-York dans la ville du même nom. Il y rencontre plusieurs personnages influents de la physique étatsunienne, comme Robert Oppenheimer, Eugene Wigner, Peter Bergmann, Abraham Pais, Julian Schwinger, Victor Weisskopf, John van Vleck ou encore John Slater.

C'est cependant au mois de juin 1959 qu'intervient l'événement qui va réellement sceller le sort de l'engagement international de Fock dans le domaine de la théorie de la gravitation. En effet, se tient à Royaumont, près de Paris, un « Colloque international sur les théories relativistes de la gravitation »⁵. Il est organisé par André Lichnerowicz et Marie-Antoinette Tonnelat, et se présente comme la troisième grande conférence internationale sur la relativité générale après Berne en 1955 et Chapel Hill aux Etats-Unis en 1957. Fock, accompagné du

¹ Voir la lettre de Fock à Rosbaud du 30 janvier 1956, qui en réponse à une lettre du 6 octobre 1955 mentionne déjà le processus de traduction, mais aussi des questions concrètes de rémunération – ARAN SPb, 1034-2-218.

² *Ibid.* Cette lettre est accompagnée de « instructions to the translator ». Une lettre du 7 mars 1957 au Dr. Gardner fait mention de corrections apportées par Fock à la traduction du second chapitre – ARAN SPb, 1034-2-218. Dans sa préface à l'ouvrage, Kemmer parle lui-même de « la facilité de collaborer avec le Professeur Fock » [Fock 1955a', p. ix].

³ Voir la correspondance de Fock avec la maison d'édition Akademie-Verlag – ARAN SPb, 1034-2-218.

⁴ Le rapport de ce séjour étatsunien se trouve dans les archives à Saint-Pétersbourg – ARAN SPb, 1034-2-181.

⁵ Les actes du colloque sont édités en 1962 par Lichnerowicz et Tonnelat [LiTo 1962].

moins de Aleksey Z. Petrov et Dmitri D. Ivanenko pour la délégation soviétique, fait à Royaumont deux présentations¹. Intitulées « Quelques remarques sur les équations du mouvement et les conditions pour les coordonnées » [Fock 1962b] et « Sur les ondes de gravitation émises par un système de masses en mouvement » [Fock 1962c], elles possèdent, comme à Berne, le caractère de développements techniques venant appuyer l'existence dans la théorie de la gravitation de systèmes de coordonnées privilégiés. Mais l'essentiel n'est pas là, car l'événement principal de la conférence française est en réalité institutionnel.

Le britannique Hermann Bondi suggère la création d'une structure en vue de stabiliser la tradition, qui a vu le jour avec la Conférence de Berne en 1955, d'échanges internationaux dans le domaine de la relativité. Ainsi naît le Comité international sur la relativité générale et la gravitation², dont l'activité peut ainsi être définie :

The Committee's task would be to coordinate collaboration in scientific work in the field of General Relativity, Gravitation and related subjects, especially to help towards the organization of international Conferences and of other meetings of minor importance throughout the World, and to promote mutual information useful to all interested in the field [MeSc 1962]³.

Parmi les décisions majeures prises à la création du Comité, l'organisation régulière, tous les trois ans, d'une conférence internationale en relativité générale et gravitation sur le modèle de celles de Berne et de Royaumont, afin notamment de faciliter la communication dans la communauté des relativistes. Une présidence tournante de trois ans est alors organisée, occupée par le responsable du comité d'organisation local de la conférence précédente. Lichnerowicz et Tonnelat deviennent donc en 1959 co-présidents de cette nouvelle institution. Mercier prend en charge le secrétariat en raison non seulement de sa situation centrale et politiquement neutre en Suisse, mais aussi comme forme de reconnaissance de

¹ Le rapport du séjour parisien de Fock en France se trouve dans les archives à Saint-Petersbourg – ARAN SPb, 1034-2-179.

² Sur la conférence de Royaumont, la création du Comité, son rôle et un récit complet de ses activités à venir voir Lalli [Lall 2017].

³ Voir aussi la lettre non datée de Tonnelat et Lichnerowicz (probablement écrite durant le Colloque de Royaumont), mentionnant la création du Comité et ses objectifs – ARAN SPb, 1034-2-179.

son rôle d'instigateur d'une nouvelle dynamique en théorie de la relativité avec la conférence de Berne¹.

Dans sa forme initiale le Comité international compte seize membres : Peter Bergmann (Université de Syracuse), Hermann Bondi (King's College de Londres), Carlo Cattaneo (Université de Rome), Bryce DeWitt (Université de Caroline du Nord), Paul Dirac (Université de Cambridge), Léopold Infeld (Université de Varsovie), André Lichnerowicz (Collège de France), André Mercier (Université de Berne), Christian Møller (Université de Copenhague), Nathan Rosen (Institut de Technologie d'Israël, Haïfa), Léon Rosenfeld (Nordita, Copenhague), John L. Synge (Dublin Institute for Advanced Studies), Marie-Antoinette Tonnelat (Université de la Sorbonne), John A. Wheeler (Université de Princeton), ainsi que deux soviétiques, Dmitri Ivanenko (Université d'État de Moscou) et bien sûr Vladimir Fock. Comme détaillé par Lalli [Lall 2017, pp. 52-53], les deux critères à la constitution du Comité sont d'une part une volonté de représentation des différentes sensibilités scientifiques mais aussi géographiques de la communauté, ainsi que l'autorité scientifique. La démarche semble confirmée par le rapport de Fock à l'Académie des sciences de l'URSS suite à son séjour français où il mentionne que « un groupe de participants [l']a invité à se joindre au Comité pour l'organisation de conférences similaires à l'avenir »². En effet, Fock représente à cet instant la plus éminente autorité soviétique dans le domaine, il défend un point de vue original et le Comité se doit d'inclure en son sein des représentants de la République socialiste.

Avec la publication en anglais de la monographie de Fock nous avons un premier indicateur important de la large diffusion de ses idées sur la relativité générale. Mais à Royaumont on constate de plus que du statut de figure d'autorité locale il s'impose aussi comme une véritable figure d'autorité internationale. En effet, il est inclus dans une dynamique qui le conduit à participer à certaines prises de décision majeures qui, dans le processus de renaissance de la relativité générale, concrétisent la structuration de la discipline comme une branche à part entière de la physique. Et en retour, comme en témoigne son rapport à l'Académie des sciences, c'est aussi l'occasion pour Fock de souligner la

¹ Sur ce point voir Lalli [Lall 2017, pp. 54].

² « Otchet o komandirovke akademika V. A. Foka vo Frantsiyu na kollokvium po relativistskoy teorii tyagoteniya » (Rapport sur la mission de l'académicien V. A. Fock en France pour un colloque sur les théories relativistes de la gravitation), 11 juillet 1959 – ARAN SPb, 1034-2-179.

reconnaissance de son travail et de son autorité scientifique auprès de ses collègues étrangers, et ainsi de légitimer encore davantage sa position privilégiée en URSS.

Par conséquent, les autorités soviétiques continuent de laisser au physicien de Leningrad une liberté de mouvement certaine et il peut bénéficier grandement de sa position au sein du Comité pour diffuser ses idées à l'international. Bien évidemment il participe aux conférences organisées par la nouvelle association des relativistes, en 1962 en Pologne à Varsovie et Jablonna¹, puis en 1965 à Londres². Mais Fock est pris dans une dynamique bien plus large et les invitations à participer aux grandes conférences internationales se multiplient. En 1963 il est convié par Carlo Cattaneo en Italie pour les célébrations des 400 ans de Galilée qui ont lieu en septembre 1964³. Il y fait une présentation en français sur « Les principes mécaniques de Galilée et la théorie d'Einstein » [Fock 1964b']. En 1966, dans le cadre d'un programme d'échange avec l'Université de Leipzig il se rend en Allemagne de l'Ouest avec son élève Yu. V. Novozhilov et participe aussi à Berlin aux célébrations du cinquantième de la théorie de la gravitation d'Einstein⁴. Il s'y exprime sur les principes fondamentaux de la théorie de la gravitation d'Einstein [Fock 1966a'']. En 1967, il est présent à Paris pour le colloque international « Fluides et champ gravitationnel en relativité générale » organisé par le Centre national de la recherche scientifique français⁵ et continue bien évidemment d'y exposer son point de vue sur la relativité [Fock 1969a].

¹ Dossier concernant la conférence sur les théories relativistes de la gravitation à Varsovie et Jablonna du 25 au 31 juillet 1962 – ARAN SPb, 1034-2-184. Voir aussi les comptes-rendus publiés sous la direction de Infeld [Infe 1964]. Notons que Fock y fait une présentation intitulée « The uniqueness of the mass tensor and Einstein's gravitational equations » [Fock 1964a].

² Comptes-rendus publiés sous la direction de Bondi et al. [Bond 1965].

³ Lettre de C. Cattaneo et G. Polvani à Vladimir Fock du 1^{er} juillet 1963 dans le dossier concernant la correspondance relative au voyage de Fock en Italie en 1964 – ARAN SPb, 1034-2-190.

⁴ Dossier sur le séjour ouest-allemand de Fock et Novozhilov et correspondance autour des célébrations du cinquantième de la théorie de la gravitation d'Einstein à Berlin – ARAN SPb, 1034-2-193.

⁵ Voir la correspondance de Fock avec Tonnelat – ARAN SPb, 1034-3-163 et 1034-3-701. Les comptes-rendus de cette conférence ont été édités en 1969 sous la direction de Lichnerowicz et Tonnelat [LiTo 1969]. Pour l'anecdote notons qu'au cours des deux rassemblements français sur la relativité de 1959 et 1969 sont chantés par les conférenciers une chanson. On trouve trace de la première dans les archives de Fock à Leningrad (ARAN SPb, 1034-2-179) et de la seconde dans les archives de Mercier à Berne (Archives de l'Etat de Berne, fond Mercier, BB 8 2. 1579 – Konferenzen). Cette dernière possède le couplet suivant, faisant directement référence à Fock

Il est clair que ces événements, qui sont les principaux auxquels Fock participe, sont axés sur la théorie de la relativité. Pour autant le physicien en profite aussi lorsqu'il le peut, et lorsqu'il prolonge son séjour dans les institutions du pays où il se rend, pour parler de mécanique quantique. C'est le cas à Paris en 1959 avec un exposé à l'Institut Henri Poincaré « Sur l'interprétation épistémologique [sic] de la mécanique quantique »¹ ou encore avec un exposé en 1965 à Leipzig sur les principes de la mécanique quantique et les idéalizations de la physique classique². Ainsi, de façon globale, suite la Conférence de Berne et plus encore avec son intégration au sein du Comité international sur la relativité générale et la gravitation, Fock est inclus dans une dynamique exceptionnelle qui lui permet de multiplier très largement ses contacts avec les physiciens étrangers et par conséquent d'asseoir une base solide pour la diffusion de ses idées.

2.2. La conférence de Tbilissi : un succès en trompe l'œil ?

2.2.1. Des préparatifs enthousiastes

Au cours de la Conférence de Londres en 1965, le Comité international se réunit et évoque naturellement la question du lieu de la conférence suivante. C'est alors l'idée de se réunir en Union soviétique qui semble faire l'objet d'un « vœu général »³. Ainsi, malgré certaines difficultés en vue d'une organisation de l'événement dès 1968, Fock, « touché de cette marque, annonce qu'avec ses collègues, il cherchera à réunir les conditions qui permettront la réalisation de ce vœu [et] fera connaître en automne, au plus tard fin décembre 1965, le résultat de ses démarches »⁴. C'est ici que la confiance de l'Académie des sciences d'URSS jusqu'alors accordée à Fock va se transformer en soutien véritable. Le 1^{er} octobre 1965, Fock

« Galilée pour la covariance ; Confondit mais Fock intervint (bis) ; Générale oui, oui, oui ; Mais restreinte non, non, non ; Harmonique et restreinte au fond ».

¹ Voir le dossier relatif à la conférence de Royaumont – ARAN SPb, 1034-2-179. Le texte de cette présentation est publié en 1960 dans *La Pensée* [Fock 1960].

² Voir le rapport sur le voyage de Fock et Novozhilov en Allemagne de l'ouest en 1965 – ARAN SPb, 1034-2-193.

³ « Procès-verbal succinct des séances du Comité GRG tenues à Londres les 30 juin et 7 juillet 1965 ». Je remercie Roberto Lalli de m'avoir communiqué ce document, présent dans les archives dans la collection des « Papers of the International Society on General Relativity et Gravitation » à la librairie du Max Planck Institute for the History of Science de Berlin.

⁴ *Ibid.*

reçoit de l'institution l'autorisation d'organiser une conférence internationale à Tbilissi au cours l'été 1968, pour laquelle pas moins de 250 scientifiques étrangers peuvent être invités¹. Une lettre du 3 novembre de la même année nous informe de plus que le Ministère de l'éducation supérieure soutient aussi la démarche de Fock². Si le choix de Tbilissi et de la Géorgie peut sembler anodin – Ginzburg souligne par exemple l'intérêt touristique et le faible coût pour les participants de la capitale géorgienne³ –, on peut penser que les organisateurs décident avant tout de s'appuyer avec précautions sur le savoir-faire démontré lors de l'organisation en ce lieu du 20 au 27 avril 1965 de la seconde Conférence soviétique sur la gravitation⁴.

La réponse de Bondi à l'annonce par Fock de la tenue à Tbilissi de la prochaine conférence sous les auspices du Comité international sur la relativité générale et la gravitation est enthousiaste : « On my behalf and on behalf of all my colleagues in the United Kingdom let me assure you that we are simply delighted at this proposal and look forward very much to this conference »⁵. Celui qui fait maintenant office de Président suite à la réunion de Londres, assure que le Comité collaborera autant que nécessaire avec les organisateurs soviétiques et l'événement géorgien s'annonce comme l'un des plus grands succès institutionnels de la carrière de Fock. Malheureusement, de sérieuses complications vont surgir. Celles-ci sont notamment développées dans l'ouvrage *Building the General Relativity and Gravitation Community During the Cold War* de Roberto Lalli, qui consacre un chapitre complet à la Conférence de Tbilissi [Lall 2017, chapitre 5]. En effet, de par son contexte particulier au cours de la Guerre froide elle possède un caractère unique dans l'histoire de la communauté des relativistes. Dans les mots de l'historien italien :

¹ Lettre de V. A. Leshkovtsev, secrétaire scientifique du département pour la physique fondamentale et appliquée de l'Académie des sciences de l'URSS, à Fock en date du 1^{er} octobre 1968 – ARAN SPb, 1034-2-198.

² Lettre de V. A. Kotel'nikov, académicien de l'Académie des sciences de l'URSS, du 3 novembre 1965 – ARAN SPb, 1034-2-198.

³ « Minutes of the Meeting held at New-York », 22 janvier 1967 – ARAN SPb, 1034-2-198.

⁴ Sur les conférences soviétiques sur la gravitation voir la biographie d'Ivanenko, qui en est l'instigateur [Sard 2014, pp. 142-148].

⁵ Lettre de Bondi à Fock du 15 novembre 1965 – ARAN SPb, 1034-2-198.

All these expectations for the Tbilisi Conference were faced with dramatic political events that abruptly affected the world of the ICGRG, in addition to the more manageable disagreements about scientific directions and related links to particular disciplinary domains [p. 77].

Les « attentes » dont il est ici question sont bien évidemment scientifiques¹, mais aussi institutionnelles. Après les succès de Varsovie et de Londres, la communauté entend démontrer toute sa maturité. La Conférence de Tbilissi est la première à introduire le label « GR » sur ses documents officiels, en l'occurrence ici « GR5 », Berne étant la conférence « GR0 » à laquelle succèdent Chapel Hill, Royaumont, Varsovie et Londres². Cette démarche vient sceller l'idée qu'une véritable tradition, qui prend sa source treize ans plus tôt avec les commémorations de Berne, s'est instaurée. Or, tout l'optimisme qui accompagne les préparatifs de la Conférence de Tbilissi va être menacé, comme l'indique Lalli, par de « dramatiques événements politiques ».

Si nous allons expliciter ces derniers, soulignons que notre ambition n'est pas de reproduire le travail déjà effectué par Lalli et qui s'inscrit dans une perspective plus large que la nôtre. En effet, s'il est essentiel à nos recherches d'en reprendre les principales problématiques, nous souhaitons avant tout à l'appui de notre propre travail d'archives en développer le point de vue relatif à la personnalité de Fock. Ce dernier préside le comité d'organisation de la conférence³ et cette position centrale va en faire un des acteurs principaux de l'intrigue politique qui se déroule alors à l'été 1968.

¹ Au cours des années qui précèdent la conférence de Tbilissi d'importantes contributions sont faites aux domaines de l'astrophysique relativiste et de la cosmologie observationnelle. C'est notamment le cas avec les découvertes en 1964 du fond diffus cosmologique par Penzias et Wilson ou encore des pulsars en 1967 par Hewish et Bell. Les trous noirs sont aussi un objet d'étude en vogue à cette époque. Voir Lalli [Lall 2017, pp. 76-77].

² Voir « The GNR conferences » sur le site de *The International Society on General Relativity & Gravitation*, institution qui résulte en 1971 de la transformation du Comité international sur la gravitation et la relativité générale. <http://www.isgrg.org/pastconfs.php> (consulté le 26 mai 2017). Il semble que Mercier soit à l'initiative de cette numérotation. Pour plus de détails voir Lalli [Lall 2017, pp. 77].

³ Fock est accompagné dans cette tâche par A. Z. Petrov de l'Université de Kazan, lui aussi membre du Comité international sur la relativité générale et gravitation, par I. M. Khalatnikov, directeur de l'Institut Landau de physique théorique à Moscou, M. M. Mirianashvili, membre correspondant de l'Académie des sciences de Géorgie, et enfin A. B. Kereselidze, de l'Université d'Etat de Tbilissi qui fait office de secrétaire scientifique.

2.2.2. L'affaire israélienne

Les complications politiques de la Conférence de Tbilissi trouvent leur origine dans la troisième guerre israélo-arabe – communément appelée Guerre des Six Jours – qui oppose Israël à l'Égypte, la Jordanie et la Syrie entre le 5 et le 10 juin 1967. En effet, l'une des conséquences directes de cet événement est la brusque interruption des relations diplomatiques de l'URSS avec Israël¹. Par ricochet, les relativistes israéliens dont est prévue la participation à la conférence de Tbilissi ne se rendront jamais en Géorgie. Ils sont au nombre de trois : Nathan Rosen, Asher Peres et Moshe Carmeli. Leurs noms sont clairement avancés lors d'une réunion du Comité international sur la relativité générale et gravitation, en date du 22 juin 1967 à Paris, où sont établies les listes de participants et conférenciers susceptibles d'être invités à Tbilissi en 1968. L'invitation doit leur parvenir via l'Académie des sciences de l'URSS. Rosen et Peres se trouvent sur une première liste de 128 scientifiques dont la présence est considérée comme « Highly Desirable ». Carmeli est sur une liste de physiciens dont la présence est jugée désirable, alors qu'une troisième liste énumère des noms de possibles participants². Le récit qui va maintenant suivre soulève l'importante question des relations entre science et politique dans le cadre des relations scientifiques internationales et de la capacité de la communauté à s'affranchir de toute influence extérieure.

En mai 1968, Peter Bergmann, membre du Comité international, est informé par Peres qu'aucun des trois israéliens susmentionnés n'a reçu d'invitation pour la Conférence de Tbilissi³. L'Américain se tourne alors vers Bondi, qui agit en qualité de Président suite à la Conférence de Londres en 1965, et lui demande d'intervenir auprès des collègues soviétiques pour rectifier la situation⁴. Or Bondi espère avoir l'occasion de rencontrer directement Fock le mois suivant lors d'un symposium de physique théorique à Trieste⁵, et il ne prend en réalité de véritables initiatives qu'une fois qu'il découvre ne pas pouvoir se rendre en Italie. Le 17

¹ Sur ce point on peut consulter Govrin [Govr 1998].

² Voir Lalli [Lall 2017, pp. 78] qui a pu avoir connaissance de ces différentes listes dans les archives de Peter Bergmann.

³ *Ibid* [p. 74]. Lettre de Peres à Bergmann du 14 mai 1968.

⁴ *Ibid*. Lettre de Bergmann à Bondi du 17 mai 1968.

⁵ « The events of summer 1968 », manuscrit non daté (mais postérieur au 28 septembre 1968) de Bondi à destination des membres du Comité international sur la gravitation et la relativité générale – Churchill College, Bondi papers, BOND 4/4A.

juin, il écrit aux quatre membres soviétiques du Comité – Ginzburg, Petrov, Ivanenko et Fock¹ – leur demandant expressément de faire parvenir aux trois scientifiques israéliens une invitation pour la conférence. La crainte qui est la sienne, mais aussi celle de Bergmann, est que leur non invitation soit d'ordre politique et non l'objet d'une simple erreur administrative. Dans le premier cas, c'est la tenue même de la conférence qui pourrait être menacée².

Si la situation aurait rapidement pu être réglée avec le simple envoi des invitations à leurs destinataires, elle va prendre une toute autre tournure et le Comité international sur la gravitation et la relativité générale va faire face à sa première grande crise politique³. En effet, ce n'est que le 4 septembre – à 5 jours du début de la conférence – que Peres, et seulement lui, reçoit une invitation⁴. Et en dépit de celle-ci, jamais il ne sera en mesure d'obtenir le précieux visa nécessaire à sa venue en Géorgie⁵. En amont, durant les deux mois qui précèdent, la tension au sein du Comité international ne fait qu'augmenter. Rapidement, dans une lettre datée du 12 juillet, Bondi aborde la question d'un point de vue politique avec l'ensemble des membres du Comité⁶. Des échéances claires sont posées :

If, however, by August 23rd we have not received any such notification we will send out telegrams to all members of the Committee stating "No invitation yet received by any Israeli colleague". If this is not countermanded by 2nd September I propose that, with the agreement

¹ Lettre de Bondi à Fock, Ginzburg, Ivanenko et Petrov en date du 17 juin 1968 – ARAN SPb, 1034-2-198.

² *Ibid.* Voir aussi la lettre de Bergmann à Bondi du 17 mai 1968 (Archives Bergmann) et le télégramme de Bondi à Fock du 3 juillet 1968 où Bondi explique très directement que « if people got the impression that there was a reluctance to invite these people on political grounds [...] it could endanger the entire conference » – Churchill College, Bondi papers, BOND 4/4A.

³ Voir Lalli pour le récit détaillé des événements et leur influence dans le contexte de la construction d'une communauté spécifique aux relativistes [Lall 2017, chapitre 5].

⁴ Voir les télégrammes de Spaethe Esro, Kereselidze et Ivanenko à Bondi du 4 septembre ainsi que de Peres à Bondi du 5 septembre 1968 – Churchill College, Bondi papers, BOND 4/4A.

⁵ Lettre de Peres à Bondi, Fock, Ivanenko et Petrov en date du 8 septembre 1968 – ARAN SPb, 1034-2-198. En raison de la coupure des relations diplomatiques entre l'URSS et Israël le précieux visa est supposé attendre Peres à Paris ou Rome. Néanmoins, en date du 6 septembre, Peres, d'une part a l'assurance qu'aucun visa n'est prêt à Paris, et d'autre part reste sans réponse du consulat à Rome. Incertain de pouvoir réellement effectuer le voyage jusqu'en Géorgie, il annonce dans cette lettre du 8 septembre sa décision de ne pas se rendre en URSS où la conférence débute le lendemain.

⁶ Lettre de Bondi aux membres du Comité en date du 12 juillet 1968 - ARAN SPb, 1034-2-198.

of the members of the Committee, our sponsorship of the Tbilisi Conference should be withdrawn and I myself would not in such a case go there.

Les quelques réponses alors reçues par Bondi appuient toutes les idées ici avancées¹.

La situation se dégrade encore davantage lorsque le 20 août 1968, l'Armée rouge, accompagnée de troupes de quatre autres membres du Pacte de Varsovie – la Bulgarie, la Hongrie, la Pologne et l'Allemagne de l'est –, entre en Tchécoslovaquie pour mettre fin au Printemps de Prague, période de libéralisation de la République socialiste tchécoslovaque conduite par le réformateur Alexander Dubček². Le 26 août, dans un télégramme aux membres du Comité, le secrétaire André Mercier recommande de ne pas se rendre à Tbilissi en raison des événements tchécoslovaques³. L'action est radicale et marque une véritable rupture de la neutralité généralement exigée d'un responsable d'une institution scientifique internationale. Toujours sans nouvelles d'une éventuelle invitation envoyée en Israël, le 28 août, Bondi envoie alors un télégramme aux membres du Comité où il annonce le retrait du soutien de ce dernier à l'organisation de la Conférence étant donné qu'elle « ne peut pas en l'état actuel des choses être considérée comme véritablement internationale ». En qualité de Président il explique qu'il n'ira pas personnellement en Géorgie, laissant toutefois à la convenance de chacun de prendre la décision de s'y rendre⁴. Ces décisions et les événements politiques adjacents provoquent alors une cascade de désistements chez des relativistes qui refusent de se rendre en URSS⁵.

¹ Réponses à Bondi de Ryoyu Utiyama et de Nathan Rosen le 18 juillet, de Clive Kilmister le 24 juillet et de Peter Bergmann le 25 juillet 1968 – Churchill College, Bondi papers, BOND 4/4A.

² Sur le Printemps de Prague on peut consulter *The Prague Spring and its Aftermath: Czechoslovak Politics, 1968-1970* de Kieran Williams [Will 1997].

³ Télégramme de Mercier aux membres du Comité en date du 26 août 1968 – Churchill College, Bondi papers, BOND 4/4A.

⁴ « I see no reason why the change in the character of the meeting should lead any scientist other than myself to cancel his proposed attendance nor do I see that any other political and non-scientific issue a reason for such cancellation ». Télégramme de Bondi aux membres du Comité en date du 28 août 1968 – ARAN SPb, 1034-2-198 et Churchill College, Bondi papers, BOND 4/4A.

⁵ Télégrammes d'Alfred Schild et de Jules Geheniau à Bondi en date du 30 août 1968, lettre de Roger Penrose à Bondi du 28 août 1968, lettre de Peter Havas à Bondi en date du 29 août où est demandée l'annulation ou le report de la conférence - Churchill College, Bondi papers, BOND 4/4A.

Suite à la réception de l'invitation par Peres quelques jours avant la conférence, en date du 6 septembre 1968, Bondi annonce par télégramme que la crise est résolue et que la Conférence de Tbilissi est bien reconnue par le Comité international sur relativité générale et la gravitation¹. L'essentiel est sauvé, mais le mal est déjà fait. De nombreux physiciens ont déjà annulé leur séjour et notamment, sur les vingt membres étrangers du Comité, seul quatre sont présents en Géorgie : Bryce DeWitt, Christian Møller, Andrzej Trautman et John Wheeler. Le malaise créé par cette situation inconfortable n'est pas sans conséquences comme le souligne Lalli : « [it] produced a series of resolutions that, if implemented, would have far-reaching consequences on the regulations governing the ICGRG [International Committee on General Relativity and Gravitation] and subsequent international conferences » [Lall 2017, p.87]. Comme nous le verrons au cours de nos développements, l'impulsion est en réalité donnée pour que le Comité se transforme en une véritable Société scientifique. Mais notons dès maintenant une première résolution sous forme de garantie d'apaisement qui est acceptée directement lors de la réunion du Comité se tenant à Tbilissi. Elle mentionne que « chaque conférence internationale est ouverte à tous »² et ne sera jamais remise en question malgré le peu de membres présents lors de son vote. Durant cette même réunion, en tant que Président du comité d'organisation de la Conférence de Tbilissi, Fock est élu – selon la tradition en vigueur – nouveau Président du Comité international sur la relativité générale et la gravitation³.

2.2.3. Fock au cœur de la tourmente

Le compte-rendu des événements tel que nous l'avons jusqu'à maintenant présenté donne une succession des faits de façon quelque peu unilatérale, selon un point de vue, pourrait-on dire, occidental. Plusieurs questions se posent alors sur la responsabilité dans cette situation des scientifiques membres du comité d'organisation de la conférence. Pour

¹ Télégramme de Bondi à Mercier, aux organisateurs de la conférence de Tbilissi et aux membres du Comité international sur la relativité générale et la gravitation en date du 6 septembre 1968 – Churchill College, Bondi papers, BOND 4/4A.

² « Minutes » de la réunion du Comité international sur la gravitation et la relativité générale réunit le 21 septembre 1968 à Tbilissi – ARAN SPb, 1034-2-178 et Churchill College, Bondi papers, BOND 4/4A. Pour un aperçu global des résolutions prises suite à la Conférence de Tbilissi et l'impact de cette dernière dans l'organisation de la communauté des relativistes voir Lalli [Lall 2017].

³ *Ibid.*

tenter de répondre à ces questions, mais aussi pour mieux saisir le rôle joué par Fock dans cette controverse politique, de nombreux documents issus du fond Fock des archives de l'Académie des sciences de Russie peuvent nous aider.

Le premier constat à dresser à partir de ces documents est que la réaction soviétique est pour le moins vive. La lettre de Bondi du 17 juin demandant aux quatre membres soviétiques du Comité international de rectifier la situation ne donne initialement lieu à aucune réponse¹. Notons que Fock est pour sa part à Trieste, au symposium international sur la physique contemporaine qui a lieu du 7 au 28 juin 1968². Or, de toute évidence, le bruit de la non-invitation des physiciens israéliens à Tbilissi court jusqu'à Trieste, puisque Fock en discute directement sur place avec Oskar Klein et Stanley Deser, qui lui demandent expressément d'inviter Peres³. Fock leur formule sa réponse de la façon suivante : « J'ai dit que probablement cela serait difficile, car entre l'URSS et Israël il n'y a pas de relations diplomatiques, mais que je parlerai de cela à l'Académie des sciences »⁴. Cette réaction relativement passive de Fock pousse Deser à écrire à Bondi le 16 juillet. Il lui indique que malgré ses discussions avec Fock à Trieste – où il reçoit l'appui d'Oskar Klein, mais aussi probablement Joseph Weber et Mendel Sachs – pour lui : « it was clear he [Fock] neither wished nor intended to take any serious action re[garding] the Israelis »⁵.

La réponse de Fock laisse aussi entendre que la non-invitation des physiciens israéliens ait simplement pu être la conséquence d'une vision quelque peu naïve, selon laquelle la rupture des relations diplomatiques avec Israël rendait l'invitation inutile car la réalisation effective de la venue de Peres et de ses collègues serait impossible pour raisons administratives. À l'appui d'un autre exemple on se rend compte en réalité que toute hypothèse est possible, y compris la volonté directe du comité d'organisation d'écarter les scientifiques israéliens. En effet, ce point peut être appuyé par l'attitude soviétique vis-à-vis de l'invitation de Pascual Jordan à la Conférence de Tbilissi. Celle-ci est de toute évidence un cas de conscience pour le comité d'organisation local. Le 20 mai 1968, dans une lettre de A. B. Kereselidze – secrétaire

¹ Lettre de Bondi à Fock, Ginzburg, Ivanenko et Petrov en date du 17 juin 1968 – ARAN SPb, 1034-2-198.

² Fock y fait notamment une intervention intitulée « Remarks on the general principles of Einstein's gravitation theory » [Fock 1969b].

³ Voir la lettre de Fock à Kereselidze en date du 13 juillet 1968 – ARAN SPb, 1034-2-198.

⁴ *Ibid.*

⁵ Lettre de Deser à Bondi du 16 juillet 1968 – Churchill College, Bondi papers, BOND 4/4A.

du comité d'organisation – à Fock la question Jordan est évoquée : « En dépit des mesures prises, de Jordan je reçois une lettre, j'ai reçu la carte d'enregistrement et des résumés de communications. Encore une fois, j'ai demandé aux autorités locales d'intervenir dans cette affaire avec plus de vigueur »¹. Dans sa réponse du 30 mai, Fock suggère à Kereselidze un argumentaire à présenter aux autorités pour empêcher la venue de Jordan². Il y est bien évidemment question de l'engagement politique de Jordan sous Hitler, son adhésion au Parti national-socialiste allemand, le NSDAP, mais aussi aux SA, formation paramilitaire du parti³. Fock évoque aussi sa nomination par les autorités allemandes comme directeur de l'Institut physico-technique de Kharkov durant son occupation. Le physicien de Leningrad conclut : « Ces données ne sont-elles pas suffisantes pour le refus du Visa ? »⁴. Quelles que soient alors les véritables mesures entreprises par Kereselidze, le 26 juillet on apprend officiellement que Jordan voit son visa refusé⁵. Ici, l'intervention directe de Fock dans ce processus est indéniable.

Les échanges entre Fock et Kereselidze sont francs et pragmatiques. Et par ce biais, alors que l'affaire israélienne a débuté, on croit apprendre que la responsabilité initiale de la controverse appartient au comité d'organisation local. Le 13 juillet 1968, Fock écrit :

Sur le fond, mon point de vue est le suivant. Je pense que nous /c. à. d. le Comité d'Organisation Soviétique/ avons eu raison, quand nous nous sommes abstenus d'inviter les juifs israéliens. Dans le fait que nous ne les ayons pas invités, mais ayons invités les Américains, il n'y a pas de contradiction : les scientifiques américains ne peuvent pas être identifiés à leur gouvernement dans la guerre contre le Vietnam, alors que les scientifiques israéliens doivent être identifiés à leur gouvernement dans la guerre avec les arabes.

Mais pour des raisons tactiques, par rapport à la demande de O. Klein et d'autres, inviter une personne est utile. S'il ne vient pas c'est mieux, mais ceci est une autre affaire⁶.

¹ Lettre de Kereselidze à Fock du 20 mai 1968 – ARAN SPb, 1034-2-198.

² Lettre de Fock à Kereselidze du 30 mai 1968 – ARAN SPb, 1034-2-198.

³ Sur l'engagement politique de Jordan voir Engelbert L. Schucking [Schu 1999].

⁴ *Ibid.*

⁵ Lettre de Kereselidze à Fock du 26 juillet 1968 – ARAN SPb, 1034-2-198.

⁶ Lettre de Fock à Kereselidze en date du 13 juillet 1968. Notons que la lettre est aussi envoyée en copie à Petrov – ARAN SPb, 1034-2-198.

La prise de position avancée ici par Fock est extrêmement politisée et laisse peu de place à l'interprétation. Sa mauvaise volonté apparente auprès de Klein et Deser à Trieste est fondée. Mais il s'avère que potentiellement il s'exprime sans connaître les détails techniques de l'histoire ou en employant un « nous » qui dépasse le strict comité local et englobe aussi les autorités. En effet, dans sa réponse, Kereselidze précise :

Dans la liste initiale des invités que nous avons soumise à l'approbation des autorités, on trouve trois personnes d'Israël : Peres A., Rosen N., Tauber J.. Cependant, comme on peut s'y attendre, nous n'avons pas été autorisés à les inviter. Pour parler franchement, je n'espère plus une résolution de la situation maintenant¹.

Si les organisateurs n'ont pas envoyé d'invitations aux scientifiques d'Israël, c'est bien après consultation des autorités. Il est coutumier dans ce genre de situation que le bureau diplomatique de l'Académie des sciences de l'URSS soit seul décisionnaire quand à liste des personnalités étrangères pouvant être invitées. Et au final, ce sont bien ces dernières qui font blocage.

Quoi qu'il en soit, Fock, qui a bien saisi qu'il en va aussi de sa réputation et du succès de la conférence, va s'investir concrètement pour parvenir à faire inviter un représentant d'Israël. De retour à Moscou depuis Trieste, il consulte le 1^{er} juillet le vice-président de l'Académie des sciences, Ya. V. Peyve, en charge des relations internationales. Le physicien de Leningrad se montre clair avec lui :

[...] j'ai évoqué avec lui la question, en disant que peut être, pour éviter les provocations et les tentatives de la part de juifs de différents pays de nuire au succès de la conférence il faudrait accéder à la requête de Klein / qui joue un rôle important dans le Comité Nobel / et inviter une personne d'Israël².

S'en suit que ce jour même, Fock obtient de ses interlocuteurs à l'Académie d'écrire lui-même une invitation à Peres dont l'envoi doit cependant attendre l'autorisation des « autorités supérieures »³. Fock confie ainsi la lettre à S. G. Korneev, directeur du département

¹ Lettre de Kereselidze à Fock, non datée – ARAN SPb, 1034-2-198.

² *Ibid.*

³ *Ibid.* Notons que l'expression est mise entre parenthèses par Fock dans sa lettre.

international de l'Académie des sciences. Mais Peres ne verra jamais cette invitation et le blocage exercé par les « autorités supérieures » se poursuit.

Dans le même temps, Bondi est toujours sans réponse à sa lettre du 17 juin¹. Ce n'est que le 3 juillet, au retour de Fock à Leningrad, qu'il parvient à joindre celui-ci par téléphone². C'est à ce moment qu'est scellé le sort des trois représentants israéliens initialement présents sur les listes d'invitation pour la conférence. En effet, Rosen n'a pas été invité, et ne le sera pas, car il avait de lui-même annoncé dans une lettre du 4 septembre 1967 à destination des membres du Comité international qu'il ne se rendrait pas à Tbilissi³. Il invoque en premier lieu la rupture des relations diplomatiques entre Israël et l'URSS, puis ajoute que sa décision est aussi motivée par des raisons plus personnelles : « [i]n view of the extreme and completely one-sided anti-Israel policy that has been adopted by the Soviet government an in view of reports of anti-semitism as a by-product of this policy ». Carmeli semble en revanche être exclu selon des critères purement scientifiques. Dans une lettre envoyée le 2 juillet à Bondi, Petrov, qui réagit enfin⁴, confirme la position prise vis-à-vis de Rosen et indique pour Carmeli que ce dernier n'est pas sur la liste des personnes invitées⁵. Il annonce aussi qu'il va engager des actions pour Peres, mais quoi qu'il en soit, lors de sa conversation téléphonique avec Fock, Bondi reçoit l'assurance que le physicien de Leningrad a entrepris les bonnes démarches auprès de l'Académie des sciences de l'URSS pour ce dernier. L'exclusion de Carmeli, bien que regrettée devient alors une concession acceptée par Bondi étant donné la situation : « the really vital matter now is to demonstrate that political difficulties must not stand in the way of scientific meetings. I therefore do not feel that any drastic action is called for provided, as an absolute minimum, that Peres is invited »⁶.

¹ Lettre de Bondi à Fock, Ginzburg, Ivanenko et Petrov en date du 17 juin 1968 – ARAN SPb, 1034-2-198.

² Sur le contenu de cette discussion téléphonique voir la lettre de Fock à Kereselidze en date du 13 juillet 1968 (ARAN SPb, 1034-2-198) et de Bondi aux membres du Comité international en date du 12 juillet 1968 (ARAN SPb, 1034-2-198 et Churchill College, Bondi papers, BOND 4/4A).

³ Lettre de Rosen à Mercier, copie aux membres du Comité international, en date du 4 septembre 1967 – ARAN SPb, 1034-2-198.

⁴ Il est possible que Petrov ait attendu le retour de Fock en URSS avant de prendre des initiatives.

⁵ Lettre de Petrov à Bondi en date du 2 juillet 1968 – Churchill College, Bondi papers, BOND 4/4A (en anglais) et ARAN SPb 1034-2-198 (en russe – version du 4 juillet envoyée pour information à Fock).

⁶ Lettre de Bondi aux membres du Comité en date du 12 juillet 1968 – ARAN SPb, 1034-2-198.

Mais la situation se complique progressivement. Présent entre le 16 et le 18 juillet à Moscou, Kereselidze constate auprès de l'Académie que l'invitation ne sera probablement pas envoyée avant la fin du mois¹, un sentiment renforcé par Isaak Khalatnikov dans une lettre du 24 juillet². En réalité, le processus s'éternise sans que les archives ne puissent nous permettre de dire si de nouvelles actions sont intentées. Les seuls rares éléments complémentaires apparaissent à la suite des télégrammes successifs de Mercier le 26 août³ et de Bondi le 28 août⁴. Dans un télégramme à Kereselidze, Fock affirme que « les humeurs des étrangers contre [eux] à la suite des événements en Tchécoslovaquie » ne peuvent retarder ou annuler la conférence⁵. Mais plus que jamais celle-ci est menacée, nombre d'étrangers annulant leurs séjours et Bondi retirant le soutien du Comité international.

Finalement, comme nous le savons, Peres reçoit son invitation le 4 septembre⁶. Aussitôt, Kereselidze et Ivanenko s'empressent d'informer Bondi⁷, le second indiquant la possibilité d'obtenir un visa à Paris ou Rome, information manquante à Peres qui ne l'apprend que via le britannique⁸. Ce dernier rectifie rapidement sa position et affirme que la Conférence de Tbilissi est bien organisée sous les auspices du Comité international sur la relativité générale et la gravitation⁹. Le retrait de ce soutien majeur a-t-il alors été l'élément déclencheur auprès de l'Académie en vue de l'émission de l'invitation à Peres ? Nous n'en savons rien. Ce dont nous sommes sûrs c'est que jusqu'à la veille de l'annonce par Bondi du retrait du soutien du Comité, Fock était toujours en discussion avec l'Académie pour obtenir la précieuse

¹ Lettre de Kereselidze à Fock, non datée – ARAN SPb, 1034-2-198.

² Lettre de Khalatnikov à Fock en date du 24 juillet 1968 – ARAN SPb, 1034-2-198.

³ Télégramme de Mercier aux membres du Comité en date du 26 août 1968 – Churchill College, Bondi papers, BOND 4/4A.

⁴ Télégramme de Bondi aux membres du Comité en date du 28 août 1968 – ARAN SPb, 1034-2-198 et Churchill College, Bondi papers, BOND 4/4A.

⁵ Télégramme de Fock à Kereselidze en date du 30 août 1968 – ARAN SPb, 1034-2-198.

⁶ Voir les télégrammes de Spaethe Esro, Kereselidze et Ivanenko à Bondi du 4 septembre ainsi que de Peres à Bondi du 5 septembre 1968 – Churchill College, Bondi papers, BOND 4/4A.

⁷ *Ibid.*

⁸ Voir la lettre de Rosen à Bondi en date du 15 octobre 1968 – ARAN SPb 1034-2-198.

⁹ Télégramme de Bondi à Mercier, aux organisateurs de la conférence de Tbilissi et aux membres du Comité international sur la gravitation et la relativité générale en date du 6 septembre 1968. Cambridge, The Churchill Archives Centre – Churchill College. Bondi papers. BOND 4/4A.

invitation¹. Mais l'institution scientifique, probablement très prudente dans cette affaire, devait être certainement suspendue à la décision d'autorités supérieures au bout d'une interminable chaîne bureaucratique. Finalement, l'envoi de l'invitation à Peres par télégramme a concrètement l'apparence d'un sauve-qui-peut, d'autant plus qu'il est invité à retirer un visa qui ne sera jamais émis à temps².

Quoi qu'il en soit, Fock parvient à conserver l'essentiel, la bonne tenue de la conférence. Une conférence que Fock, en dépit de nombreuses absences, considère comme une réussite, s'appuyant notamment sur les mots de Møller qui dans une lettre lui indique son point de vue selon lequel elle « a été un grand succès »³. Mais surtout, Fock sauve aussi sa réputation. Son élection en tant que Président du Comité international sur la relativité générale et la gravitation est par la suite confirmée malgré le caractère tronqué de son élection à Tbilissi, huit membres uniquement – dont quatre russes – étant présents⁴. En accord avec les investigations de Lalli c'est le physicien américain Ivor Robinson qui plus tard se montre le plus vindicatif à l'encontre de Fock [Lall 2017, p. 92-93]. Pour lui, le physicien russe avait une tactique claire : organiser une conférence avec le soutien du Comité international sur la relativité générale et la gravitation sans qu'aucun israélien n'y assiste. La suggestion qui en

¹ Voir le brouillon de lettre de Fock à destination de Kereselidze en date du 28 août 1968 – ARAN SPb, 1034-2-198.

² Voir la lettre de Rosen à Bondi en date du 15 octobre 1968. ARAN SPb 1034-2-198. Si au 8 septembre Peres sait qu'aucun visa ne se trouve à Paris et n'a pas de réponse de Rome, on trouve toutefois dans les archives le télégramme suivant du 13 septembre, soit bien après que Peres ait annoncé qu'il ne se rendrait finalement pas à Tbilissi, de Fock à Bondi : « Verified that visa for Peres has been actually sent to Paris and Rome » – Churchill College, Bondi papers, BOND 4/4A.

³ Voir la lettre de Fock à Bondi du 11 novembre 1968 – ARAN SPb, 1034-2-198. Comme points positifs majeurs de la conférence Lalli souligne la mise en place d'intéressantes collaborations scientifiques, notamment entre Kip Thorne et V. D. Braginsky en vue de travaux sur les ondes gravitationnelles, mais aussi avec Ya. B. Zel'dovich [Lall 2017, note 41, p. 86-87].

⁴ Pour l'élection de Fock voir les « Minutes » de la réunion du Comité international sur la gravitation et la relativité générale réunit le 21 septembre 1968 à Tbilissi. Pour les réactions à celle-ci voir la lettre de Rosen à Fock du 15 octobre 1968, où malgré la tension provoquée par la situation Rosen félicite Fock pour son élection (ARAN SPb, 1034-2-178 et Churchill College, Bondi papers, BOND 4/4A). Voir aussi le télégramme de Schild à Fock, non daté, où l'élection de Fock est commentée comme « un excellent choix », ou encore la lettre de Mercier à Fock du 3 octobre 1969 où il est mentionné que Fock a « grandement mérité cet honneur » (Churchill College, Bondi papers, BOND 4/4A).

suit est radicale : « [Fock should] spare himself and all of us much embarrassment by a prompt and graceful resignation [from the presidency of the Committee], [because he had been unable to] abstain from gross discrimination against our Israel colleagues »¹.

Si la requête de Robinson n'est pas suivie, il faut reconnaître, en particulier aux vues de la position prise par Fock auprès de Kereselidze le 13 juillet 1968², que le physicien américain n'a pas tout à fait tort. En effet, Fock avait clairement exprimé son opinion sur le fait que les physiciens israéliens étaient indissociables de la politique de leur pays – à l'inverse des américains – et que l'invitation de Peres n'était au final qu'un mouvement « tactique ». Ainsi, si son engagement entre juillet et septembre en vue de la mise en œuvre de cette tactique a pu donner à la communauté internationale l'impression d'une volonté réelle de voir Peres se rendre à Tbilissi, la priorité de Fock est clairement ailleurs. Roberto Lalli souligne que tout au long de la controverse se pose la question de la démarcation entre les principes et les actions [Lall 2017, pp. 92]. Et Fock est clairement au cœur de cette problématique. Tout d'abord, ses responsabilités en tant qu'organisateur puis en tant que Président du Comité international lui imposent de respecter en théorie le principe fondamental selon lequel la science est au-dessus de la politique. Et c'est bien évidemment ce qu'il promet dans son discours public³. Mais pour autant, à l'opposé, ses actions au sein du comité local d'organisation sont d'une toute autre nature. Il se rapproche là de Mercier, qui reconnaît dans une lettre à Fock du 3 octobre 1968 que son télégramme du 26 juillet invitant à ne pas se rendre à Tbilissi en raison des événements tchécoslovaques est une affirmation « qu'il est faux de vouloir séparer complètement la science et morale »⁴.

La Conférence de Tbilissi aurait dû être une consécration totale pour Fock d'un point de vue institutionnel, le gage d'une reconnaissance de son travail tant auprès des autorités soviétiques que de ses collègues internationaux. Mais le physicien de Léninegrad est rattrapé par les spécificités du contexte international de la Guerre froide. Son incapacité à mesurer les conséquences probables de la décision prise par les autorités soviétiques de ne pas inviter les

¹ Lettre de Robinson à Mercier en date du 5 avril 1969. Cité par Lalli [Lall 2017, p. 92-93].

² Lettre de Fock à Kereselidze en date du 13 juillet 1968 – ARAN SPb, 1034-2-198.

³ Voir notamment la lettre de Fock à Mercier en date du 11 novembre 1968 – Churchill College, Bondi papers, BOND 4/4A.

⁴ Lettre de Mercier à Fock du 3 octobre 1968. Cambridge, The Churchill Archives Centre – Churchill College. Bondi papers. BOND 4/4A.

physiciens israéliens, sa complaisance même, le place lui et ses collègues dans une situation embarrassante vis-à-vis de l'ensemble de la communauté des relativistes. Et si Fock va toutefois parvenir à sauver la conférence, mais aussi sa réputation, il faut bien reconnaître que c'est *a minima*.

2.3. Une autorité limitée : Fock face à Ivanenko

Au second plan du parcours institutionnel de Fock en relativité générale, de façon relativement constante, se situe une intrigue d'un autre genre qui attire tout particulièrement notre attention en raison des relations au pouvoir soviétique qu'elle implique. Il est ici question de l'évidente inimitié entre Fock et son ancien collaborateur de la fin des années 1920 à Léninegrad, Ivanenko. Compte tenu du caractère particulier du sujet ici discuté, notre récit sera probablement partiel, et quelque peu partial, étant donné que nous travaillons principalement sur des sources ayant appartenu à Fock¹. C'est pourquoi nous tenons à préciser qu'en raison de ce dernier point, que le lecteur doit garder à l'esprit, nous allons principalement nous attacher à rapporter ce qui d'un ordre factuel, sur la base de documents d'archives, et que nous ne nous risquons pas à arbitrer l'opposition entre les deux hommes qui s'apparente avant tout à un conflit personnel².



Figure 16. Dmitri Ivanenko (1904-1994)
[Domaine public].

¹ Le point de vue relatif à Ivanenko peut se retrouver dans la biographie de ce dernier par G. A. Sardanashvili, publiée en russe en 2014 [Sard 2014]. La critique de Fock y est principalement développée sur la base d'un texte d'Ivanenko, ses souvenirs sur le physicien de Léninegrad, reproduit intégralement dans la biographie [pp. 226-235].

² John Snygg, dans son ouvrage *A New Approach to Differential Geometry using Clifford's Geometric Algebra* se penche davantage sur les causes de l'inimitié entre Fock et Ivanenko, cherchant ses origines dans l'attitude d'Ivanenko vis-à-vis de ces collègues durant les périodes de grandes tensions politiques en URSS [Snyg 2012, pp. 174-179].

Comme nous avons pu le constater, Fock et Ivanenko sont les deux premiers membres soviétiques du Comité international sur la gravitation et la relativité générale nouvellement formé à Royaumont en 1959. Le second nommé est alors Professeur à l'Université d'Etat de Moscou et tout au long des années 1960 il va être très actif pour le développement du domaine en URSS. Il est notamment l'instigateur en 1961 d'une Conférence soviétique sur la gravitation, première d'une longue série¹. Le 25 août 1962, Fock reçoit du département physico-mathématique de l'Académie des sciences une requête² visant à donner son avis sur un long rapport de onze pages rédigé par Ivanenko, où est dressé un état des lieux de la recherche en théorie de la gravitation en URSS. Adressé initialement à Khrouchtchev en personne, ce document possède une touche très personnelle et se conclut par une expression claire des ambitions du physicien moscovite :

Je ne cacherai pas que je considère comme mission première de ma vie, de contribuer durant les années qui me restent, aux développements de la gravitation soviétique et d'être en mesure de voir nos physiciens jouer un véritable rôle de premier plan sur tous les problèmes de la structure de la matière, de l'espace-temps et de la gravitation³.

La réponse de Fock, en date du 6 septembre 1962, résume de façon assez générale les griefs de Fock à l'encontre d'Ivanenko. Le ton est cinglant :

La lettre du professeur D. D. Ivanenko au camarade N. S. Khrouchtchev ne peut pas être dissociée de la personnalité de D. D. Ivanenko.

Le soi-disant « professeur » Ivanenko, n'est pas tant un scientifique, qu'un spéculateur, un spéculateur à grande échelle (la preuve de ceci, par ailleurs, se trouve en elle-même dans sa lettre à N. S. Khrouchtchev).

Comme il est bien connu des physiciens, qui font partie du département des sciences physico-mathématiques, Ivanenko n'a aucun travail scientifique indépendant, mais se repose sur des auto-éloges concernant des travaux réellement effectués par d'autres, qui dans le meilleur des cas lui permettent de mettre son nom en tant que co-auteur⁴.

¹ Sur les activités soviétiques d'Ivanenko pour le développement de la théorie de la gravitation voir sa biographie [Sard 2014, pp. 142-152].

² Lettre du 25 août 1962 de L. A. Artsimovich à Fock – ARAN SPb, 1034-2-111.

³ Rapport sur l'état de la recherche en théorie de la gravitation en URSS adressé par Ivanenko à Khrouchtchev en date du 10 juillet 1962. Copie envoyée à Fock le 25 août 1962 – ARAN SPb, 1034-2-111.

⁴ Lettre de Fock à Artsimovich du 6 septembre 1962 – ARAN SPb 1034-2-111.

Fock poursuit sa lettre en mettant en avant le faible niveau scientifique d'Ivanenko, souhaitant montrer qu'il discrédite parfois la physique soviétique. Il fait référence, sans donner de détails, aux événements de la conférence de Varsovie et Jablonna sur la relativité générale et gravitation, durant laquelle Feynman humilie Ivanenko en soulignant son incompetence mathématique¹. Fock évoque aussi le Comité international sur la relativité générale et la gravitation, mais c'est pour mentionner qu'en 1959 Ivanenko n'y a été admis qu'à « sa propre insistance » et qu'à l'heure actuelle « [la commission] est pleinement consciente de son incapacité scientifique et cherche à se débarrasser de lui ». Une première étape dans ce sens aurait été franchie le 31 juillet 1962 lorsque le Comité aurait décidé d'inclure en son sein A. Z. Petrov, qui ne parle pourtant pas de langues étrangères, mais aussi de ne plus maintenir de correspondance avec Ivanenko².

Les attaques de Fock à l'encontre d'Ivanenko se poursuivent avec le récit d'un autre événement survenu en Pologne :

[...] durant la mission à Varsovie pour la conférence du 25-31 juillet, D. I. Ivanenko, a reçu du Ministère de l'enseignement supérieur l'intégralité des fonds alloués à la mission, et de plus s'est approprié des fonds, attribués par l'Académie polonaise des sciences à l'un des trois membres (Zharkov) de la délégation des académiciens soviétiques (V. Fock, V. Ginzburg, G. Zharkov), laissant G. Zharkov sans ressources. A la demande de Petrov de rendre l'argent à Zharkov, Ivanenko déclara qu'il l'avait perdu. Ainsi, D. D. Ivanenko, pour faire simple, a volé son camarade³.

¹ Ce commentaire est corroboré par le témoignage de E. L. Schucking présent à la conférence de Varsovie : « The charming Ginzburg-for the first time allowed out of the USSR into the Polish demi-West stats is talk in Russian, argues with his translator and continues his survey of gravitational tests in English. Wide acclaim, but the Russian delegation freezes into hostility. During a break outside Ivanenko explains to Feynman that Ginzburg is immature and speaks patronizingly of Ginzburg's physics. Feynman does not let him get away with that: "What have you ever done in physics, Ivanenko?"

- "I've written a book with Sokolov."

- "How do I know what you contributed to it. Ivanenko, what is the integral of e-to-the-minus-x-squared from minus to plus infinity?" No answer. « Ivanenko, what is one and one?" And he turns away before Ivanenko can solve this problem » [Schu 1990, p. 483]. Pour un compte-rendu plus général du ressenti de Feynman durant la conférence voir aussi les développements de Preskill et Thorne [FeMW 2002].

² Fock mentionne, entre parenthèses, que cette dernière décision a été prise de façon non officielle.

³ Lettre de Fock à Artsimovich du 6 septembre 1962 – ARAN SPb, 1034-2-111.

Ce dernier point incite alors Fock à statuer qu'Ivanenko n'est qu'un individu « malhonnête scientifiquement et moralement », et que son rapport à Khrouchtchev n'est qu'une « grande fraude visant à acquérir d'irréalisables avantages pour soi-même ». Pour autant, Fock ne tire pas la couverture à lui-même. Il vante en conclusion l'Université de Kazan et sa chaire sur la théorie de la relativité et de la gravitation, où Petrov et ses collègues sont à ses yeux les mieux armés pour devenir un véritable centre de recherche expérimentale pour le domaine¹. Notons que l'ensemble des éléments que nous venons d'évoquer concernant la Conférence de Varsovie sont aussi consignés par Fock dans le rapport à l'Académie des sciences sur cette mission polonaise. Daté du 7 août 1962, il est signé non seulement par Fock mais aussi par Ginzburg et Zharkov, élément renforçant grandement sa crédibilité². Datée du 25 août 1962, la lettre d'Ivanenko à Khrouchtchev résonne alors comme une contre-offensive lancée par le physicien moscovite aux accusations de Fock, Ginzburg et Zharkov.

Ajoutons enfin que, toujours dans sa lettre du 6 septembre 1962, Fock rappelle qu'il avait informé en amont de la Conférence de Varsovie les instances supérieures – notamment le camarade Zaytsev du comité de coordination – de son souhait de ne pas voir Ivanenko se joindre la délégation soviétique. Il annonçait même refuser de conduire cette dernière dans le cas où le physicien moscovite serait présent³. Dans les archives, une lettre du 6 juillet 1961 à destination de M. A. Prokofiev du Ministère de l'enseignement supérieur, nous permet effectivement de voir Fock argumenter en défaveur de l'intégration d'Ivanenko à la délégation pour Varsovie. Le principal argument mis en avant est que ce dernier n'est à l'origine d'aucune contribution individuelle à la théorie de la relativité et de la gravitation, « ce qui est bien connu [...] en URSS et à l'étranger »⁴.

Après Varsovie, à au moins une reprise, Fock va à nouveau se tourner vers les autorités pour faire entrave à la possibilité d'Ivanenko de se rendre à l'étranger. C'est le cas pour les

¹ *Ibid.*

² « Otchet o poezdke delegatsii AN SSSR na konferentsiyu po relativistskim teoryam gravitatsii v Varshave » (Rapport sur le voyage de la délégation de l'Académie des sciences de l'URSS à la conférence sur les théories relativistes de la gravitation à Varsovie) – ARAN SPb, 1034-2-184. Notons que dans ce rapport la mauvaise réputation d'Ivanenko auprès des collègues étrangers est jugé comme l'élément « le plus important », ceux-ci semblant constamment fuir le physicien moscovite aux yeux de Fock.

³ Lettre de Fock à Artsimovich du 6 septembre 1962 – ARAN SPb, 1034-2-111.

⁴ Lettre de Fock à M. A. Prokofiev du 6 juillet 1961 – ARAN SPb, 1034-2-184.

célébrations des 400 ans de Galilée organisées en septembre 1964 en Italie. Ayant appris la volonté d'Ivanenko de s'y rendre, Fock écrit le 7 avril 1964 au Ministère de l'enseignement supérieur et secondaire pour signaler le caractère « hautement indésirable » d'une telle possibilité¹. Pour argumentaire, les éléments suscités sont rappelés. Le 14 avril, une lettre de M. A. Prokofiev valide la requête de Fock, signifiant que le séjour d'Ivanenko en Italie ne devrait pas avoir lieu². Mais il n'en sera rien, et Ivanenko se rend aux célébrations des 400 ans de Galilée³. Car globalement, les obstacles que Fock essaie de mettre dans le parcours d'Ivanenko ne fonctionnent pas. Ce dernier se rend en Pologne en 1962, en Italie en 1964, reste membre du Comité international sur la relativité générale et la gravitation, mais surtout possède des fonctions importantes dans les instances soviétiques. Il est notamment vice-président de la Commission sur la gravitation du Ministère de l'enseignement supérieur, un poste qu'il occupe de sa création le 19 mai 1962 jusqu'à sa dissolution en 1989⁴.

Le seul succès, relativement minime toutefois, que semble obtenir Fock est relatif à la Conférence de Tbilissi. À la fin de l'année 1965, et au début de l'année 1966, est abordée la question du comité d'organisation local⁵. Dans sa lettre du 29 mars 1966 Fock commente l'inclusion par Petrov – agissant en qualité de président de la Commission soviétique sur la gravitation du Ministère de l'enseignement supérieur – d'Ivanenko dans son projet de comité d'organisation : « Je dois souligner que l'inclusion d'Ivanenko dans le comité d'organisation entrave sans aucun doute son travail ; en aucun cas cette personne ne peut prendre part à la direction du comité »⁶. En conséquence, Ivanenko n'aura semble-t-il aucun rôle décisionnaire dans l'organisation de l'événement⁷. Mais plus important, Fock va tenter durant la conférence

¹ Lettre de Fock à V. P. Elyutin du 7 avril 1964 – ARAN SPb, 1034-2-190.

² Lettre de Fock à M. A. Prokofiev du 14 avril 1961 – ARAN SPb, 1034-2-190.

³ Voir notamment la chronologie de la biographie d'Ivanenko [Sard 2014, p. 187].

⁴ *Ibid* [p. 186].

⁵ Lettre de V. A. Kotel'nikov (département de physique fondamentale et appliquée de l'Académie des sciences de l'URSS) à Fock du 3 novembre 1965, réponse de Ginzburg du 25 novembre 1965, de Petrov en date du 31 janvier 1966 et lettre de Fock du 29 mars 1966 au Ministère de l'enseignement supérieur – ARAN SPb, 1034-2-198.

⁶ *Ibid*.

⁷ Comme le suggère cependant Ginzburg au cours d'une réunion du Comité à New-York le 22 janvier 1967 il est bien membre du comité d'organisation local, mais nous n'avons aucune trace d'une quelconque activité de sa part. « Minutes of the Meeting held at New-York », 22 janvier 1967 – ARAN SPb, 1034-2-198.

d'évincer le physicien moscovite du Comité international sur la relativité générale et la gravitation.

En effet, durant le rassemblement géorgien est posée la question des règles de remplacement des membres du Comité. Dans ses travaux, Lalli montre bien toute la dimension politique d'une telle question [Lall 2017, pp. 93-97]. Elle oppose des traditions nationales différentes et se trouve être centrale quant à la continuité d'une institution qui se veut toujours plus représentative de la communauté des relativistes. D'un côté, la jeune génération, principalement américaine, fait pression pour que le Comité soit transformé en une société scientifique démocratique dont les responsables seraient élus par ses membres. Ils se heurtent néanmoins à une opposition soviétique qui privilégie la forme actuelle du Comité, souhaitant seulement qu'il soit incarné de façon plus concrète par une représentation de délégués nationaux, donnant ainsi un contrôle plus conséquent dans leur propre cas à l'Académie des sciences de l'URSS. Mais cette volonté incarne tout autant celle de Fock d'exclure Ivanenko du Comité international sur la relativité générale et la gravitation. En effet, lors de l'assemblée de ce dernier à Tbilissi, il s'appuie sur une proposition ayant circulé en novembre 1965 – suggérant qu'à la fin de chaque cycle de trois ans un membre d'une délégation en possédant plus de trois¹ soit systématiquement remplacé à la suite d'un processus interne à la délégation – pour proposer l'éviction d'Ivanenko au profit de Ludvig D. Faddeev². La motion suivante est alors ajoutée au compte-rendu de la réunion :

The President will check the by-laws concerning the election and retirement of members. If conform to the by-laws, he proposes the replacement of Ivanenko by Faddeev in accordance with the wishes of the Soviet delegation. If there is no by-laws on this matter, he proposes that the text previously circulated concerning the renewal of delegations of countries having three or more delegates be approved³.

¹ Fock, Ginzburg, Petrov et Ivanenko représentent alors l'URSS dans le Comité. Selon Lalli cette proposition de 1965 émane de Mercier [Lall 2017, p. 88].

² Un brouillon de lettre de Fock à destination de Kereselidze en date du 28 août 1968 nous informe que la décision de remplacer Ivanenko par Faddeev a été prise en amont de la Conférence de Tbilissi à trois voix contre une – ARAN SPb, 1034-2-198.

³ « Minutes » de la réunion du Comité international sur la gravitation et la relativité générale réunie le 21 septembre 1968 à Tbilissi – ARAN SPb, 1034-2-178 et Churchill College, Bondi papers, BOND 4/4A.

Mais Fock, malgré sa position ici privilégiée, va à nouveau se heurter aux institutions dans sa tentative de destitution d'Ivanenko. En raison des événements mentionnés dans la partie précédente, le Comité international n'est représenté à Tbilissi que par huit membres et les décisions prises ne sont donc que provisoires. Dès le 20 septembre 1968, Ivanenko écrit pour sa défense une longue lettre à Bondi dans laquelle il attaque Fock en retour¹. Selon lui, le physicien de Leningrad ne pourrait agir qu'en qualité de président « honoraire » du Comité, car il est dépassé par les problèmes actuels de la science. De cette lettre, que Bondi lui communique, Rosenfeld tire la conclusion que les membres soviétiques du Comité international doivent avant tout régler leurs problèmes en interne².

Mais surtout, le remplacement d'Ivanenko selon la forme qui lui est donnée à Tbilissi pourrait représenter un précédent dans l'organisation du Comité qui ne convient pas à tous³. L'amendement proposé par Fock est rejeté et il se heurte à une nouvelle forme d'autorité institutionnelle qui limite ses actions. Car c'est ici le principal enseignement de nos développements sur ses rapports avec Ivanenko. Que Fock soit la principale autorité scientifique soviétique dans le domaine de la relativité générale et qu'il ait su au début des années 1950 établir une relation de confiance avec le régime soviétique ne lui donne pas pour autant une marge de manœuvre illimitée. De façon indéniable, s'il lui faut d'une part s'accommoder du contexte international, il reste aussi évident d'autre part que les autorités politiques en URSS continuent d'être seules décisionnaires.

2.4. Conclusion intermédiaire

En 1982, Loren Graham mentionne les succès politiques de Fock, notamment en relativité générale, et souligne leur rapport avec l'exceptionnelle opportunité obtenue par le physicien soviétique de se rendre régulièrement à l'étranger :

¹ Lettre de Ivanenko à Bondi en date du 20 septembre 1968 – Niels Bohr Archives, Léon Rosenfeld papers, Copenhague, box 8, folder 11.

² Lettre de Rosenfeld à Bondi en date du 19 novembre 1968 – Niels Bohr Archives, Léon Rosenfeld papers, Copenhague, box 8, folder 11.

³ Voir par exemple le télégramme non daté d'Alfred Schild à Fock – Niels Bohr Archives, Léon Rosenfeld papers, Copenhague, box 8, folder 11. Pour plus d'informations sur les enjeux de cette modification au sein du Comité voir Lalli [Lall 2017, pp. 93-97].

In the late forties and early fifties Fock won the approval of the leaders of the regime, and he was rewarded with the right to travel widely in Europe and America. Soviet intellectuals were told in university classrooms and philosophical journals that V. A. Fock had cleansed relativity theory of the idealistic trappings placed upon it by bourgeois scientists and had developed a version of the theory that accorded thoroughly with Marxism. He had done this, they were told, because of his careful reading of Marx, Engels, Lenin and Stalin. And Fock agreed by praising Marxism even in his scientific works. Fock benefited from the government, and he repaid it with political praise and cooperation [Grah 1982, p. 129].

L'historien résume bien la situation qui est celle de Fock en Union soviétique dans les années 1950. Ses idées se sont fait une place de choix et il a le soutien des autorités. Comme nous l'avons vu, cette position de force locale, illustrée notamment par la dispute Fock-Infeld, est immédiatement valorisée par le processus de « renaissance » de la relativité générale et la constitution du point de vue institutionnel d'une véritable communauté internationale de relativistes. Le physicien de Léninegrad, au sein du Comité international sur la relativité générale et la gravitation, jouit dans la communauté d'une position privilégiée qui non seulement appuie son autorité scientifique, mais qui facilite aussi la diffusion de ses idées. Fock devient un personnage incontournable de la physique théorique moderne et contribue aussi à faire le rayonnement de la science soviétique, dont la Conférence de Tbilissi en 1968 est une forme de reconnaissance majeure pour les autorités.

Malgré tout, l'affaire israélienne qui s'y immisce souligne toutes les difficultés qui existent dans un monde extrêmement politisé comme celui de la Guerre froide, d'entretenir de saines relations internationales. Et Fock va en être une victime directe, tout comme il sera victime des limitations de son influence effective auprès des autorités que sa relation avec Ivanenko ont mises en avant. En effet, notre récit sur Tbilissi et l'inimitié entre Fock et Ivanenko continue d'avoir des conséquences avec la dernière grande conférence du Comité international sur la relativité générale et la gravitation à laquelle assiste Fock, du 5 au 10 juillet 1971, à Copenhague¹. En réaction aux événements de 1968, Rosen propose officiellement

¹ Le dossier des archives de Fock sur cette conférence ne contient pas d'éléments susceptibles d'alimenter notre présent récit sur son déroulement. Notamment, le rapport habituellement présenté au Ministère de l'éducation supérieure n'y est pas inclus, et ce probablement en raison du caractère sensible des questions qu'il pourrait évoquer – ARAN SPb, 1034-2-180. Notons aussi ici le rôle important de cette conférence d'un point de vue institutionnel avec la restructuration du Comité international en une Société internationale dont le bureau

avant la réunion danoise d'organiser la prochaine conférence, en 1974, en Israël¹. La décision doit alors être prise au Danemark. En accord avec le témoignage de Khalatnikov, la délégation soviétique, déjà informée des événements en préparation, reçoit pour ordre des autorités de s'y opposer [p. 134]. Lorsque le Comité se réunit en date du 6 juillet pour discuter de la question, Rosen renouvelle son offre mais Ivanenko et Fock s'élèvent immédiatement contre cette idée. Le premier souligne les difficultés des relations diplomatiques : « [h]e proposes to accept this invitation under the condition that the political affairs will be settled within this year »². Mais Fock est lui bien plus radical : « [...] the Committee should abstain from political actions and that choice of Israel would be a political action, since Israel is in a state of war with his [*sic*] neighbours. He is definitely against Israel as location of the next Conference ». Cependant, en dépit de la claire opposition exprimée par celui qui officie toujours en tant que Président du Comité, ce dernier vote largement la tenue de la Conférence de 1974 en Israël.

L'événement danois va alors prendre une tournure dramatique lorsqu'une réunion plénière est convoquée le 8 juillet en vue de la restructuration du Comité international. Ivor Robinson, physicien mathématicien américain d'ascendance juive, critique ouvertement l'échec soviétique de 1968 dans le dossier israélien : « he asks the whole General Assembly to express a regret at connecting political actions with scientific affairs by the Soviet Union »³. La tension est à son comble, Ivanenko tente de stopper Robinson en demandant à Dennis Sciama, qui préside la section, de le couper. C'est sans effet. La délégation soviétique, qui se sent insultée, quitte alors en masse l'assemblée générale, bientôt suivie par une grande majorité des membres polonais et est-allemands⁴. Les débats se poursuivent et Bondi, Peres, Thorne ou encore Bergmann expriment tout à tour leurs points de vue. Le soviétique Vladimir

est élu par ces membres. Sur ce processus voir Lalli [Lall 2017, pp. 101-125]. Le récit qui sera ici le nôtre au cours de cette conclusion intermédiaire, y est aussi accessible plus en détails.

¹ Lettre de Rosen à Mercier du 24 mars 1971 – Niels Bohr Archives, GR6 papers, « Correspondence M-Å ».

² « Minutes of the Meetings of the Committee on GRG held on the occasion of the GR6-Conference in Copenhagen ». Je remercie Roberto Lalli de m'avoir transmis ce document, ainsi que celui de la note suivante, initialement présents dans les archives personnelles de Georges Dautcourt.

³ « Minutes of the 1st meeting of a General Assembly towards the foundation of a Society for General Relativity and Gravitation GRG ». Issu des archives personnelles de George Dautcourt.

⁴ Voir la lettre en date du 22 juillet 1971 d'Ivanenko à Møller - Niels Bohr Archives, GR6 papers, « Correspondence A-L ».

Braginsky rejoint à nouveau l'assemblée dans une volonté d'apaisement : « [he] explains in some words the organization of the Tiflis Conference; at the same time, he urges the Chairman to bring the Assembly to speak about scientific things »¹. Ce n'est qu'à l'issue d'une motion présentée par Mercier, votée à 43 votes pour et 36 contre, que l'assemblée se tourne vers les questions à l'ordre du jour². Le Comité international devient alors une société démocratique dans laquelle les autorités scientifiques soviétiques perdent tout contrôle quant au choix de leur représentants³.

L'enchaînement des événements va être lourd de conséquences pour Fock. Une enquête est menée en URSS et de toute évidence il est jugé, si ce n'est directement responsable de la situation, du moins incapable de faire face à la situation internationale⁴. Plus jamais il ne sera autorisé à quitter le territoire soviétique⁵. Selon Khalatnikov :

Fok [sic] tried to fight off the infringement of his rights, applied to various instances, but could not achieve anything. He told me that during one of these visits he was shown a report about the trip to Copenhagen written by his protégée Petrov. All people travelling abroad had to write a report. In Petrov's report it was written that Zionists were not repulsed by Fok in his Conference appearances (this is how all the people were nicknamed, who voted for holding the Conference in Israel). Vladimir Aleksandrovich was upset and was applying logic, typical for a theoretical physicist, "Petrov could not know what I was speaking about at the Conference since he did not know a single foreign language. Also, Petrov was not in the audience when voting was conducted!" I had an impression that the official from the Ministry

¹ « Minutes of the 1st meeting of a Genral Assembly towards the foundation of a Society for General Relativity and Gravitation GRG ». Issu des archives personnelles de George Dautcourt.

² *Ibid.*

³ Sur ce point voir les développements de Lalli quant à la nouvelle forme prise par la Société international sur la relativité générale et la gravitation [Lall 2017, pp. 101-125].

⁴ Ce fait et les conséquences qui en découlent, nous sont rapportées par Khalatnikov dans son autobiographie [Khal 2012, pp. 134-135].

⁵ Pour exemple, Fock est convié par une lettre du 25 janvier 1971 par Carlo Cattaneo et l'Instituto Nazionale di Alta Matematica à un colloque sur la Relativité ayant lieu à Rome du 7 au 12 février 1972. Une lettre de Cattaneo du 18 février 1971 nous renseigne sur la réponse enthousiaste de Fock qui propose une communication sur « Le principe de relativité par rapport aux moyens d'observation ». Malheureusement, les événements de Copenhague vont changer la donne, et nous savons par une lettre à Cattaneo du 25 février 1972, que Fock ne peut se rendre en Italie – ARAN SPb 1034-3-434.

of Higher Education, who showed the Petrov's report, consciously intended to amplify the blow since he knew well that Fok promoted Petrov greatly, and the latter owed him a great deal [Khal 2012, p.135].

Après 16 années exceptionnelles d'échanges internationaux, la désillusion et l'injustice sont immenses pour Fock, qui avait jusqu'alors grandement mis à profit son statut d'autorité scientifique soviétique. La situation prend de plus une tournure ironique si l'on considère qu'à partir de là c'est Ivanenko qui prend le rôle d'interlocuteur privilégié pour les relations soviétiques avec la Société internationale sur la relativité générale et la gravitation nouvellement formée¹.

3. Réception de la pensée de Fock

En dépit des difficultés institutionnelles rencontrées par Fock sur le plan international en fin de carrière, nous avons pu constater qu'il a pu durant de longues années profiter d'une situation tout à fait favorable à une large diffusion de ses idées. Il convient alors de poser la question plus concrète de la réception de celles-ci au sein de la communauté scientifique. Les interprétations par Fock des théories de la physique moderne, qui se manifestent avant tout auprès de l'ensemble des physiciens au travers de la critique exercée par le soviétique de la pensée d'Einstein – via Infeld – et de Bohr, parviennent-elles à renverser l'orthodoxie qu'elles combattent ? Se font-elles un nom, et rassemblent-elles autour d'elles une communauté indépendante ? Pour répondre à ces questions, la réception de chaque théorie – mécanique quantique et relativité générale – va être abordée de façon indépendante. En effet, comme nous l'avons vu, elles répondent à des impératifs contextuels différents, mais surtout, en dépit de la cohérence que nous avons pu mettre en avant, elles n'ont jamais été considérées, ni par Fock, ni par ses collègues, ni par les historiens, comme un ensemble.

3.1. En mécanique quantique

Comme le souligne Graham dans le chapitre consacré à la mécanique quantique de son ouvrage sur la science soviétique publié en 1972², ce qui peut être considéré comme l'un des plus grands succès de Fock dans la diffusion de ses idées en URSS est le ralliement

¹ Voir Lalli [Lall 2017, p. 115].

² La réédition de 1987, que nous avons jusqu'à présent utilisée, propose un développement plus condensé de cette question [Grah 1987, pp. 346-348].

d'Omel'yanovskiy à son point de vue au tournant des années 1960, alors que le philosophe ukrainien soutenait jusque-là les idées de Blokhintsev [Grah 1972, pp 105-107]. Pour l'historien, cette conversion peut être considéré en deux étapes : « first his acceptance of the view that quantum mechanics can be applied to the individual micro-object, and second, his rehabilitation of the term “complementarity”, although with continuing reservations » [p. 105]. Ce constat pourrait de façon simplifiée signifier que Omel'yanovskiy se joint à l'interprétation de Copenhague. Mais le philosophe va en réalité plus loin dans le sens d'une acceptation des idées de Fock.

En 1958, lors de la Conférence de Moscou sur les problèmes philosophiques de la science moderne, il délivre un exposé intitulé « V. I. Lenin i filosofskie voprosy sovremennoy fiziki » (V. I. Lénine et les problèmes de la physique moderne) [Omel 1958]. Dans cette très longue présentation dédiée à une analyse matérialiste dialectique de la physique moderne – qu'il accompagne bien évidemment d'une critique du positivisme – le philosophe s'éloigne très clairement de la théorie des ensembles de Blokhintsev. Après avoir posé l'opposition conceptuelle entre ce dernier et Fock, il prend parti pour ce dernier :

Dans la mécanique quantique la fonction d'onde caractérise la probabilité du comportement d'un objet atomique individuel, et [que] les possibilités correspondantes sont réalisées au moyen de nombreux objets atomiques. En d'autres mots, la mécanique quantique connecte les probabilités inhérentes à la fois à l'objet atomique et le comportement réel d'une multitude d'objets atomiques » [p. 69].

Indéniablement, c'est une première victoire importante pour Fock, mais le philosophe est toujours très critique vis-à-vis de la complémentarité. Il faut attendre 1963, et le 13^e Congrès mondial de philosophie à Mexico, pour voir Omel'yanovskiy accepter la complémentarité et affirmer son caractère dialectique : « we have the right to make two opposite mutually exclusive statements concerning a single atomic objet » [Omel 1963, p. 77]. Il considère alors que le lien entre dialectique et complémentarité « se situe au cœur de l'interprétation de Copenhague de la mécanique quantique » [p. 75].

Nous suivons jusqu'à présent le raisonnement de Graham dans sa démonstration du rapprochement des idées d'Omel'yanovskiy et de Fock. Cependant nous pensons que l'historien ne va pas au bout de son propos et passe à côté d'éléments qui témoignent de la très grande proximité des idées du philosophe avec celles du physicien dans le courant des

années 1960. En effet, sur cette question de la complémentarité lors de la conférence de Mexico, Graham fait le commentaire suivant : « A vestige of his old views could be seen in his comments about the remaining « deficiencies » in the concept of complementarity, such as its insistence on applying classical notions in the new real of atomic physics » [Grah 1972, p. 106]. Ce constat fait immédiatement écho chez nous à l'emphase mise par Fock sur la nécessité de décrire les propriétés des objets atomiques à l'aide de la fonction d'onde mais aussi son souhait d'introduire des concepts propres à la théorie quantique.

Mais le rapprochement avec les idées de Fock est d'autant plus clair lorsqu'il est question de l'« interaction incontrôlable ». En effet, Graham mentionne un article de 1968 où Omel'yanovskiy appuie l'idée qu'il n'est pas correct de parler de « l'influence incontrôlable de l'instrument de mesure sur l'objet atomique »¹. Le philosophe appuie sur le fait que l'influence de la mesure n'est pas le résultat d'une force agissant sur l'objet, mais plutôt qu'elle a pour origine la dualité onde-corpuscule de l'objet atomique lui-même. Pour Graham : « this clarification by Omel'yanovskiy [...] is in agreement with Bohr's view shortly before his death » [Grah 1972, p. 106]. Il fait ici directement référence à l'article de Bohr de 1958, « Quantum Physics and Philosophy » [Bohr 1958a]. C'est alors sans rappeler que le changement de point de vue de Bohr sur ce sujet apparaît dans cet article qui comme nous l'avons vu est très probablement inspiré de ses discussions avec Fock en 1957. Surtout, il faut souligner qu'Omel'yanovskiy, dès 1958 [Omel 1958, pp. 54-57], consacre de nombreux commentaires élogieux à la critique formulée par Fock en 1951 de l'usage de la notion d'« interaction incontrôlable » chez Bohr [Fock 1951a]².

C'est une évidence, Omel'yanovskiy devient définitivement le plus grand promoteur des idées de Fock dans le courant des années 1960, et sa position de philosophe influent, couplée à l'autorité scientifique de Fock, permet au duo de donner un véritable écho à leur pensée³.

¹ Cité et traduit du russe par Graham [Grah 1972, p. 106]. L'article original s'intitule « Filosofskie aspekty teorii izmereniya » (Aspects philosophiques de la théorie de la mesure) [Omel 1968].

² En 1988 dans « The Soviet Reaction to Bohr's Quantum Mechanics », Graham développe davantage cette question en établissant notamment de façon plus concrète l'influence de Fock sur Bohr [Grah 1988, pp. 310-313]. Mais à notre sens il échoue toujours à montrer le rôle de la pensée de Fock sur Omel'yanovskiy lorsqu'il est question de l'« interaction incontrôlable ».

³ Pour Graham ils sont : « [t]he two most prominent Soviet interpreters of quantum mechanics during the last twenty years » [Grah 1988, p. 310].

Lorsque Graham complète son ouvrage en 1987, il souligne alors que durant les années 1970 et 1980, les idées de Fock tiennent une place centrale en Union soviétique :

The most influential philosophical interpretation of quantum mechanics in the Soviet Union has continued to be the one advanced by V. A. Fock, even though Fock died in 1974. Soviet philosophers to the present day credit Fock's theory of "real quantum states" with being a further development of the Copenhagen Interpretation in the direction of "freeing it from certain subjective features which, at one time or another, showed up in the general positions or separate statements of its adherents" [Grah 1987, p. 350]¹.

Fock a donc réussi avec le soutien d'Omel'yanovskiy à imposer ses idées sur la mécanique quantique en Union soviétique alors qu'il représentait au début des années 1950 un point de vue relativement marginal.

Pour autant, comme l'indique la tentation finale de Graham de rapprocher les idées d'Omel'yanovskiy à celles de Bohr plutôt qu'à celles de Fock, et comme nous avons pu l'aborder dans notre bilan de la dispute entre les deux physiciens, il faut rappeler que la victoire du Russe est aussi celle du Danois. Le rapprochement effectué entre leurs idées, la légère inflexion de ce dernier dans le sens d'un langage moins positiviste, mais aussi l'insistance du physicien de Léninegrad à mettre en avant ce rapprochement, ont avant tout permis de façon effective de promouvoir le cœur de l'interprétation de Copenhague auprès de la communauté marxiste. Dans les années 1960, même si la complémentarité n'est pas totalement acceptée et que de nombreux manuels continuent d'éviter le sujet, on ne trouve plus parmi les physiciens de critiques dénonçant son positivisme. Or tout ce processus masque les spécificités propres à l'interprétation de Fock, qui bien que connues en URSS, n'ont finalement que peu d'écho à l'étranger où on ne se revendique pas de lui. Lorsque le débat s'installe à l'international, on ne le questionne pas vraiment sur les subdivisions du processus expérimental ou sur l'introduction de notions purement quantiques, mais davantage sur des concepts plus connotés idéologiquement comme la causalité et l'objectivité².

Ainsi, on observe que la position de Fock sur la question de l'interprétation de la mécanique quantique est aisément réductible à son expression la plus singulière. Il est totalement absorbé par l'école de « Copenhague ». Pour Jammer, qui questionne la réception

¹ Graham cite ici Akhundov, Molchanov et Stepanov en 1981.

² Voir notamment la correspondance entre Fock et Belifante – ARAN SPb 1034-3-14 et 1034-3-251.

de la complémentarité en Union soviétique, celui qui avant-guerre faisait partie de « la “branche russe” de l’école de Copenhague » ne change pas de statut avec sa visite danoise de 1957. Tout au plus, étant donné son influence sur la façon qu’a Bohr de formuler son interprétation, Jammer considère le rôle de Fock de la façon suivante : « he paved the way for a *rapprochement* of Soviet philosophy of physics with the idea of complementarity » [Jamm 1974, pp. 248-250]. Pour Graham, qui reste jusqu’à présent une référence unique dans son traitement de la pensée de Fock en mécanique quantique, le premier commentaire à faire sur le physicien soviétique dès qu’il est question d’interprétation est similaire à celui de Jammer : « Fock may be correctly defined as a follower of Bohr’s Copenhagen Interpretation if one defines the Copenhagen Interpretation in terms of its minimum rather than its maximum claims » [Grah 1987, p. 337]. Bien évidemment, aucun de ces commentaires n’est incorrect et le rapprochement entre Fock et Copenhague est justifié. Mais à notre sens ils symbolisent une vision réductrice de la pensée du physicien qui est alors enfermée dans une conception de son interprétation vue comme une simple version édulcorée de philosophie matérialiste – pour ce qui est de sa formulation – de la pensée dite orthodoxe de Bohr.

La véritable valeur des idées de Fock ayant quelque peu été égarée face aux exigences très pragmatiques de l’idéologie et des politiques d’influences, le traitement réservé par l’histoire nous semble relativement injuste, les spécificités du physicien soviétique méritant d’être soulignées. Son différend initial avec Bohr ne s’avère pas si anodin qu’il n’y paraît, et Fock défend une variante de l’interprétation de Copenhague qui possède sa propre valeur intrinsèque. Ainsi, nous considérons que dans des études qui traitent de l’interprétation de Copenhague comme un ensemble – notamment pour en souligner le manque de cohésion comme chez Beller [Bell 1999a] ou Camilleri [Cami 2009] – Fock mérite une place plus détaillée que celle du simple critique du « positivisme » de Bohr. Notons toutefois quelques signes d’un traitement pertinent des idées de Fock, mis à part chez Graham bien entendu, avec L. Chiatti et I. Licata [ChLi 2014], dont l’approche en particulier du concept de relativité par rapport aux moyens d’observations saisit bien tout l’intérêt de la pensée du physicien¹.

¹ Leur conclusion vient tout particulièrement appuyer nos développements du chapitre deux : « In this sense, we seem that the Fock reflection is exemplary and paradigmatic for the system and emergence theories » [ChLi 2014, p. 587].

3.2. En relativité générale

Most interesting for me was the discussion between Fock and the Soviet physicists, in which I also took part [...] First Fock spoke and formulated his objections to Einstein's theory by defining his own conception of harmonic coordinate systems. Then I spoke in favor of Einstein's theory and was followed by Landau, Tamm and Ginzburg – all well-known physicists who preferred Einstein's theory to Fock's. They said that his additional equations for defining the coordinate system are unnecessary and provide nothing of value. Fock still stick to his interpretation, as he does today, but I learned during my visit to Moscow that he was isolated at the time [Infe 1978, p. 88].

Ce commentaire est celui d'Infeld dans son ouvrage à caractère autobiographique, *Why I left Canada*. Le physicien polonais évoque ici son premier séjour en URSS pour une conférence sur la théorie des champs à Moscou. Elle se déroule en 1955, avant la conférence de Berne, et pose en réalité une forme de constat qui est à étendre dans le temps et dans l'espace malgré l'excellente inclusion de Fock dans la communauté des relativistes d'un point de vue institutionnel : dans le domaine des idées, Fock est un physicien qui reste plutôt isolé dans le paysage de la théorie de la gravitation. Bien évidemment, mettre en évidence l'isolement de Fock est dans l'intérêt d'Infeld qui défend le point de vue opposé, mais nous souhaitons tout de même mettre en avant qu'en dépit du constat ici dressé, l'interprétation que fait Fock de la théorie d'Einstein est à l'origine d'un sentiment tout à fait différent du simple rejet tant en URSS qu'à l'étranger.

Gorelik, dans son article de 1993 dédié à Fock et son interprétation de la relativité générale s'est penché sur la question de la réception des idées de Fock en URSS, et notamment chez deux de ses collègues mentionnés par Infeld : Tamm et Ginzburg [Gore 1993, p. 320]. Il ne nie en rien le constat général du physicien polonais mais met concrètement en avant des propos qui font directement écho à la pensée de Fock. Ceux-ci sont issus d'une session de l'Académie des Sciences de l'URSS, le 30 novembre 1955, dédiée à l'anniversaire des 50 ans de la théorie de la relativité. Tamm est en charge du discours inaugural au cours duquel il explique que « [s]elon l'usage courant, bien que de façon peut-être pas tout à fait réussie, la terminologie parle de relativité restreinte et générale » [Tamm 1956, p. 7]. Ginzburg fait lui un exposé intitulé « Eksperimental'naya proverka obshchey teorii otnositel'nosti » (Vérification expérimentale de la théorie de la relativité générale) [Ginz 1956]. Il y énonce que « la théorie de la relativité générale est, avant tout, une théorie relativiste de la gravitation, une théorie

des champs gravitationnels » [p. 35]. Bien évidemment, ces énoncés de Tamm et de Ginzburg ne signifient en rien que leurs auteurs se rallient aux idées de Fock, et Ginzburg affirme par ailleurs très clairement sa différence avec le physicien de Léningrad : « l’auteur ne peut être en accord avec l’opinion de Fock qui dit que “la théorie de la gravitation a mal été comprise par son auteur” » [p. 46]. Mais on peut cependant y voir l’influence certaine du discours de Fock et son insistance sur les aspects terminologiques pour qualifier les théories de la relativité restreinte et générale. Fock est alors à ce moment-là la principale autorité scientifique soviétique dans ce domaine, comme en témoigne sa contribution de 1955 à la seconde édition de la prestigieuse *Bol'shaya Sovetskaya Entsiklopediya* (Grande encyclopédie soviétique) avec l’article « Otnositel’nosti teoriya. » (Théorie de la relativité) [Fock 1955b]¹. Par conséquent, à défaut de convaincre totalement, le physicien de Léningrad reste néanmoins largement écouté.

Ce constat est en réalité bien plus évident à l’étranger, et dès 1955 – avec la Conférence de Berne –, il va s’étendre à la grande majorité de la communauté des relativistes. Car le sentiment principal que Fock semble dégager de façon systématique avec son interprétation de la théorie de la relativité est pour le moins une curiosité sincère. Nul ne peut prétendre que Pauli soit un partisan des vues de Fock en relativité générale, mais il ne fait aucun doute que son initiative de voir publié en anglais *The Theory of Space, Time and Gravitation* [Fock 1955An] n’ait eu pour autre objet que de satisfaire la curiosité d’une communauté scientifique en proie à de multiples questionnements sur les fondements de la théorie. Ainsi, nous partageons le constat général de Graham en 1987 :

No agreement exists among prominent world physicists on Fock’s criticisms of “general relativity”. Fock’s interpretation has been challenged both in the Soviet Union and abroad. Yet it continues to command respect and attention as a defensible and interesting point of view [Grah 1987, p.374].

En effet, Fock reçoit de façon très régulière – tout au long de son parcours international – des marques de sympathie sur l’intérêt de son travail. C’est notamment le cas en 1964 à

¹ Comme Graham le souligne en 1982, à cette période (1955), Fock « était célébré par la presse officielle comme le meilleur exemple d’un interprète marxiste de la théorie de la relativité », jugeant que sa contribution dans la *Bol'shaya Sovetskaya Entsiklopediya* (Grande encyclopédie soviétique) ait pu être « le point d’orgue de son influence sur un public général éduqué » [Grah 1982, p. 126].

Florence où l'américain John Archibald Wheeler lui glisse, probablement en accompagnement d'un ouvrage ou d'un article, la note suivante : « To Professor Fock whose work I have studied ever since I was a student, and who proves by the solidity of his achievements in other fields the importance which everyone should attach to his present day dedication to gravitational physics »¹. Mais surtout, en clôture de son intervention sur « Les principes mécaniques de Galilée et la théorie d'Einstein » [Fock 1964b']², Fock reçoit plusieurs commentaires positifs. Tout d'abord, Bondi déclare :

I agree with Fock that the general principle of relativity is empty. We know of course that there is no *physical* equivalence between inertial and accelerate [sic] observers [...] I feel confident that given any laws, mathematicians could find a way of writing these laws in a *mathematically* equivalent way³.

Lichnerowicz pour sa part appuie la critique de Fock du principe d'équivalence. Graham rajoute : « Deser commented that Fock's analysis of the concept of covariance had been very helpful in understanding general relativity more fully » [Grah 1972, p. 135]. Cependant, en contrepartie de ces commentaires laudatifs, Fock fait aussi l'objet de critiques, y compris par Lichnerowicz et Deser quant à sa défense des coordonnées harmoniques.

Cette ambivalence dans la réception des idées de Fock, entre un bon accueil de sa critique de la notion de « relativité générale » et une retenue certaine quant à la défense des coordonnées harmoniques, est très explicite dans un article de Léon Brillouin intitulé « General Relativity Theory of Gravitation and Experiments » publié en 1967 [Bril 1967]. Le physicien franco-américain est tout d'abord très positif sur les travaux de Fock :

His [Fock's] most interesting result is the fact that it is *unreasonable* to keep the theory as *completely general as Einstein did*, and that some simple some simple rules lead to a great simplification of the mathematical structure; at the same time he obtains a much better physical explanation of the practical meaning of the theory [p. 1530].

Pour autant la prudence s'impose immédiatement dès que sont abordés les coordonnées harmoniques :

¹ Note de Wheeler à Fock en date du 14 septembre 1964 - ARAN SPb 1034-2-190.

² Nous n'avons pas eu accès au document tel que publié dans les actes du colloque, et vraisemblablement accompagné de la discussion ayant suivie. Notre source sur ce point est donc Graham [Grah 1972, p. 135].

³ Cité par Graham, *ibid.*

His method is certainly brilliant, but it is not obvious whether his solution is the only possible one. He selects a certain class of frames of reference that simplify the resolution, but there may perhaps be other classes to be considered and compared with Fock's classes. It also remained to be proved that Fock's selection of "preferred" frames correspond to practical experimental conditions [p. 1530].

Brillouin suggère ici très clairement que des investigations complémentaires sont nécessaires afin de mieux saisir la portée de la pensée de Fock. Néanmoins, la retenue assez généralisée de la communauté face à l'idée de coordonnées privilégiées semble avant tout conduire à des investigations en vue de contredire le physicien soviétique. C'est notamment ce qui est avancé par Belifante – qui pour sa part apporte son soutien à Fock – dès 1962 :

Discussing with others your idea that harmonic coordinate systems should allow only the inhomogeneous Lorentz group, I found many that were not convinced that the transformations between your harmonic systems would form any group at all. During 1961, several people in the U.S.A. (so far unsuccessfully!) tried to find "counter examples" against your idea. In particular they thought that the logarithmic term in the general solution of the harmonic radial coordinate expressed as a function of the Schwarzschild radial coordinate would lead to non-Lorentzian transformations¹.

Ainsi, ce fait confirme que le constat principal à dresser sur la diffusion des idées de Fock en relativité générale, est que, *a contrario* du scénario en mécanique quantique, ses spécificités sont bien connues de l'ensemble de la communauté, elles suscitent un intérêt certain et ne tombent en rien dans l'indifférence. Cependant, pour Havas, l'insistance de Fock à défendre les coordonnées harmoniques détériore progressivement la situation : « [it] had cast a cloud over all his work in the minds of most relativists » [Hava 1989]².

L'interprétation de la relativité générale par Fock, prise comme un ensemble, ne parvient en réalité jamais à faire école. Y compris chez ses principaux soutiens en URSS, la pensée du théoricien n'est véhiculée que de façon partielle. Citons bien évidemment le cas du mathématicien Aleksandrov qui assiste aussi à la Conférence de Berne grâce à la requête en

¹ Lettre de Belifante à Fock en date du 31 janvier 1962 – ARAN SPb 1034-3-251.

² Voir aussi Graham en 1982 : « [h]is [Fock's] insistence on harmonic coordinates is now widely regarded as an unseccessful appendage to relativity theory emanating from his eccentric criticism of Einstein's general relativity » [Grah 1982, p. 126].

ce sens de Fock. Comme le souligne Graham, si les deux hommes se soutiennent mutuellement et que l'interprétation Fock-Aleksandrov de la théorie de la relativité a pu être présentée comme un bloc unitaire indivisible, « chacun [Fock et Aleksandrov] suit une voie relativement différente et met l'accent sur des parties différentes de la théorie de la relativité » [Grah 1972, p. 120]. Aleksandrov se concentre sur la relativité restreinte, la définition de la simultanéité et de l'espace-temps¹, alors que Fock travaille sur la relativité générale et son interprétation d'un point de vue épistémologique. Autre soutien important de Fock, A. Z. Petrov de l'Université de Kazan le suit véritablement dans l'idée d'une révision générale de la théorie². Mais son approche de la théorie est profondément mathématique – comme en témoigne son principal ouvrage sur la théorie de la relativité traduit en anglais en 1969, *Einstein Spaces* [Petr 1969]³ – et jamais il ne prend concrètement part au débat sur l'interprétation. En dépit de son inclusion dans la communauté internationale, de la nette diffusion de ses idées, Fock reste effectivement – comme Infeld le dépeignait en 1955 déjà – un personnage relativement isolé.

Par ailleurs, en URSS, la position dominante que Fock occupait dans les années 1950 perd progressivement de sa superbe. Graham argumente en ce sens en faisant notamment une comparaison entre l'article de Fock dans la seconde édition de la *Bol'shaya Sovetskaya Entsiklopediya* (Grande encyclopédie soviétique) [Fock 1955b] et celui de la troisième édition, écrit par I. Yu. Kobzarev et publié en 1974 [Kobz 1974]. Alors que l'article de Fock ne discute bien évidemment que d'une théorie de la gravitation et non pas de relativité générale, Kobzarev accepte lui la terminologie internationale et supprime même les mentions à Marx et Lénine que Fock fait en introduction et conclusion. En fin de compte seule persiste une

¹ Sur les travaux d'Aleksandrov, voir les développements de Graham dans le chapitre consacré à la théorie de la relativité sur les rapports entre science et philosophie en Union soviétique [Grah 1987, p. 363-367].

² Voir Graham qui rapporte qu'en 1969 P. S. Dyshlevyi classe relativistes soviétiques en trois catégories distinctes. Fock et Petrov font alors partie de la même catégorie qui partage une opinion commune : « the foundations of general relativity needed to be given a thorough re-examination in order to make corrections in the conceptual structure of the theory as presented by Einstein » [Grah 1987, p. 375].

³ « [...] we have consciously tried to limit ourselves to a number of questions not considered in these works, which should be of interest to both physicists and mathematicians. This explains why the treatment is given a mathematical emphasis and the special attention paid to 4-spaces with a Lorentz-type signature » [Petr 1969, p. xi].

insistance sur le fait que la théorie est une expression des propriétés réelles de l'espace-temps [Grah 1982, p. 127]. Gorelik donne lui l'exemple d'un ouvrage publié pour le centenaire d'Albert Einstein en 1979 [Kura 1979]. Celui-ci reproduit deux articles de Fock [Fock 1929c, 1939c] mais l'inscription sur la couverture est éloquent : « [...] general theory of relativity, i. e., mechanics of arbitrary accelerated system [...] » [Gore 1993, p. 320]. Si ces deux éléments peuvent apparaître comme mineurs et purement symboliques, on peut aussi estimer qu'ils le sont en réalité de l'incapacité de Fock à avoir su donner naissance à une école de pensée qui aurait pu continuer d'appuyer sa position. Ses idées en relativité générale ont été largement diffusées, discutées, mais trop peu acceptées. Surtout, il faut souligner qu'à des années 1960, la figure d'Einstein est réhabilitée en URSS et qu'on commence même à lui vouer une forme de culte¹. Alors, de façon quasi-systématique, les critiques d'Einstein tombent en désuétude, et Fock en est un exemple majeur.

3.3. Conclusion intermédiaire

La réception des idées de Fock suit différentes trajectoires qu'il soit question de mécanique quantique ou de relativité générale, du contexte soviétique ou international. Alors qu'il est la principale autorité d'URSS dans les années 1950 dans le domaine de la théorie d'Einstein, son point de vue est minoritaire en théorie quantique alors que la complémentarité fait l'objet de très nombreuses critiques. Mais au tournant des années 1960 son point de vue sur cette dernière théorie commence à s'imposer, alors que son isolement concernant la relativité générale se fait progressivement ressentir. À l'étranger, les idées de Fock en relativité générale sont particulièrement connues de l'ensemble de la communauté à partir du milieu des années 1950, elles sont amplement discutées, mais sans pour autant créer de véritables vocations. Au contraire, ses idées en mécanique quantique, presque uniquement associées au rôle joué pour lui par la philosophie marxiste ne restent en définitive que peu connues pour leurs spécificités, et ce malgré l'influence qu'il peut avoir sur Bohr en 1957.

Notons aussi que la perception des idées de Fock en relativité générale nous paraît nettement moins conditionnée par le rôle joué dans sa pensée par le matérialisme dialectique. Si une large portion du débat international en mécanique quantique s'articule autour d'une discussion alimentée par des marxistes revendiqués – Bohm et Vigier pour ne citer qu'eux –,

¹ Sur ce point voir Vucinich [Vuci 2001, pp. 120-141] ou Kojevnikov pour un bref compte-rendu de cette dynamique [Koje 2002b].

ce n'est pas le cas pour la théorie d'Einstein et nous n'avons pas eu besoin d'aborder cette question dans nos développements. Ainsi, on observe dans le cadre de cette dernière théorie, que la réception des idées de Fock est nettement moins influencée par le contexte d'origine et qu'au final elle reçoit à la fois des scientifiques soviétiques mais aussi étrangers un traitement similaire.

Malgré ces différences, le bilan final est relativement identique pour les deux théories. Que d'une part Fock n'ait jamais réussi à établir les bases solides d'une communauté de physiciens partageant ses idées, ou que d'autre part le contexte soviétique et l'enracinement idéologique de ses idées en aient masqué la véritable valeur épistémologique, dans tous les cas, avec la disparition du physicien de Leningrad, ses idées tombent en désuétude faute de véritable porte-parole. Le nom de Fock reste bien évidemment connu de tous scientifiques, mais avant tout pour ses contributions directes au développement des théories. Les questions d'interprétation, qui ont pourtant occupé sa carrière pendant près de quarante ans à partir de 1936, deviennent progressivement un objet d'étude pour l'historien des sciences soviétiques. Car au final, il faut l'ajouter à ce bilan, le principal succès de Fock du point de vue des questions d'interprétation n'est pas des moindres : il a su contribuer efficacement à la défense des théories modernes de la physique en URSS.

4. Conclusion

Nous pouvons maintenant faire le bilan de la diffusion des idées de Fock sur l'interprétation des théories de la physique moderne en apportant une réponse plus précise aux différentes problématiques soulevées en introduction de ce chapitre. La première d'entre elle concernait la capacité de Fock à faire connaître sa pensée au-delà des frontières soviétiques. Nous avons observé dans un premier temps que l'idée de diffusion des idées du physicien est irrémédiablement connectée aux spécificités de son contexte d'origine. Si au cours des deux chapitres précédents nous nous sommes particulièrement penchés sur le parcours soviétique de Fock, en particulier au cours des premières années ayant suivi la seconde Guerre mondiale, on a pu ici constater que son itinéraire international en est dépendant. D'une part, c'est l'autorité acquise localement et son rapport de confiance avec les instances politiques qui lui ont permis de se voir propulser sur la scène internationale. D'autre part, c'est le discours critique vis-à-vis d'Einstein et de Bohr qu'il a formulé dans le

contexte de la doctrine Jdanov qui lui sert de catalyseur dans la propagation à l'étranger de ses idées. Que ce soit avec Infeld ou avec Bohr, l'autorité scientifique du physicien de Léninegrad légitime son inclusion dans le débat international et il reçoit très rapidement un large auditoire pour la diffusion de ses idées. Inclus dans la dynamique de la « renaissance » de la relativité générale, Fock est assurément parmi les scientifiques soviétiques un de ceux qui – dans les premiers temps de la réouverture sur l'extérieur de son État – bénéficie de la meilleure exposition à l'étranger. En particulier, son intégration au Comité international sur la relativité générale et la gravitation témoigne la reconnaissance de son travail par ses pairs.

Cependant, comme nous l'avons vu, en réponse à notre seconde problématique sur la nature des relations internationales, la participation de Fock au Comité international engage notamment des responsabilités vis-à-vis des autorités soviétiques en raison de son caractère représentatif. L'organisation de la Conférence de Tbilissi en 1968, et ses conséquences en 1971 à Copenhague, sont bien l'incarnation du rapport complexe entretenu par le physicien soviétique et son gouvernement dans un contexte permanent de tensions interétatiques. Fock conserve sa liberté de parole avec les autorités, mais sa marge de manœuvre reste limitée, car la science dans son organisation doit continuer de composer avec la tentation des États d'y imposer leur politique. Mais les enjeux locaux sont remplacés par des enjeux internationaux pour lesquels les conséquences en termes de diffusion des idées peuvent être décuplées. Et alors qu'à Tbilissi Fock aurait pu voir sa réputation profondément entachée, il parvient à conserver l'essentiel. Le différend de Copenhague se réglant quant à lui en interne les conséquences restent scientifiquement minimales. Malgré tout, assez nettement, en fin de carrière l'influence du physicien de Léninegrad s'estompe.

La dernière interrogation qui était la nôtre en introduction était de savoir si, en dépit de la coloration idéologique que possède durant longtemps – en raison du contexte soviétique – le discours scientifique de Fock, ce dernier parvient à se rendre correctement audible hors d'URSS. Et ici la réponse est clairement positive pour ce qui est de la relativité générale, alors qu'elle doit être nuancée pour la mécanique quantique. Dans le premier cas, nous l'avons observé, Fock crée de l'intérêt, de la curiosité, ses idées sont connues et véritablement discutées. Mais à aucun moment il ne semble que le matérialisme dialectique se présente comme un obstacle à la réception des idées de Fock. Pour preuve, même si la dispute avec Infeld émerge dans le contexte des débats philosophiques soviétiques, le point de rupture entre Fock et la grande majorité de ses collègues est incarné par un aspect purement

technique de l'interprétation du physicien soviétique : les coordonnées harmoniques. Ce sont elles qui à la fois cristallisent la curiosité de la communauté pour les idées de Fock, mais aussi leur rejet. Alors, l'adhésion du physicien de Leningrad au matérialisme dialectique devient un élément secondaire – si ce n'est absent – des débats. En revanche, Fock est rattrapé par celle-ci dans le cadre de la mécanique quantique. Cela s'explique avant tout par le fait que le contexte soviétique se reflète dans le contexte international où la question de l'interprétation est largement conçue comme une opposition entre positivistes et réalistes, voire même marxistes. Ainsi, lorsque Fock est confronté à Bohr, il est reçu comme un marxiste, et quand il rentre en URSS, il doit convaincre que le Danois n'est pas un positiviste. Si Fock s'est efforcé d'exposer sa pensée dans tout ce qu'elle a de plus original, elle reste néanmoins trop proche des idées de Bohr pour pouvoir faire sauter toutes les barrières d'un débat initialement trop teinté d'idéologie. Le physicien russe est simplement perçu comme un membre de l'école de Copenhague au discours dénué de tout positivisme. Cette description est exacte mais ne reflète pas tout ce qui dans sa pensée mérite d'être entendu.

Par conséquent, lorsqu'il est question d'interprétation on pense aujourd'hui davantage à Fock pour son rôle joué en relativité générale que pour celui en mécanique quantique. Mais pour autant, s'il a su durant sa carrière influencer ou lancer le débat, sa pensée reste relativement marginale dans les deux cas. C'est qu'il faut noter qu'il est un personnage singulier dans le paysage de la physique théorique moderne. Physicien de grande qualité, figure internationale de premier plan, acteur de la popularisation des sciences soviétiques, son indépendance vis-à-vis de l'interprétation des théories de la mécanique quantique et de la relativité générale se traduit aussi par une forme d'isolement. Bien que parfaitement intégré dans la communauté, il lutte quasiment seul pour la diffusion de ses idées et n'est jamais en mesure de constituer une véritable école de pensée. Disparu en 1974, Fock laisse alors seules derrière lui des idées qui malgré tout leur intérêt n'ont jamais su fédérer, et qui rejoignent les livres d'histoire lorsqu'ils acceptent tant bien que mal de se tourner avec intérêt vers l'Est.

Conclusion générale

Notre recherche se donnait pour but de fournir une première étude complète sur la question de l'interprétation de la mécanique quantique et de la relativité générale par le physicien théoricien soviétique Vladimir Fock. Notre souhait initial était d'être en mesure d'exhiber les racines scientifiques et philosophiques de la pensée de Fock, ainsi que sa place dans le contexte socio-culturel soviétique, l'influence du politique sur sa formulation, et enfin les questions relatives à sa diffusion. En somme, nous souhaitions reconsidérer l'intérêt que présente la pensée de Fock pour l'histoire des théories de la physique moderne. C'est pourquoi nous avons suivi le physicien tout au long de sa carrière, analysé le contenu de sa pensée, mais aussi son évolution dans son environnement scientifique. Il convient maintenant de faire le bilan de cette étude, de constater si nos ambitions ont été réalisées, de dresser des conclusions plus générales, mais aussi de prendre un peu de recul sur notre travail et d'ouvrir de nouvelles perspectives.

En introduction nous avons énoncé quatre points que nous ambitionnions de revaloriser. Commentons-les maintenant un à un à la lumière de nos développements.

- *Tout d'abord, je souhaite explorer la nature des passerelles entre l'interprétation de la mécanique quantique et de la relativité générale qui peuvent se manifester chez Fock, afin de montrer qu'il existe chez le physicien soviétique une véritable cohérence qui puisse dépasser le simple constat d'une adhésion au matérialisme dialectique. Il apparaît sensé de rechercher cette cohérence en tentant d'extraire les racines épistémologiques de la pensée de Fock. Dans ce but, il sera essentiel de recentrer le débat sur la pratique scientifique du physicien ainsi que de considérer les diverses problématiques qui y sont associées. Comme le suggèrent nos commentaires précédents, c'est de réalisme et d'antiréductionnisme dont il sera alors principalement question.*

Les quatre premiers chapitres de notre étude sont dédiés à cette question. Ceux-ci avaient pour vocation de se pencher sur les travaux de Fock, sur sa pratique scientifique, sur les principes épistémologiques qui guident sa pensée et sur le contenu de ses interprétations des

théories modernes de la physique. Il nous a fallu dans un premier temps – afin de présenter le personnage mais aussi de mieux comprendre son fonctionnement – dresser un rapide compte-rendu du processus qui lui a permis de devenir un physicien théoricien reconnu internationalement (chapitre un). Nous avons pu à cette occasion confirmer que son approche de sa discipline se caractérise par une grande intuition physique doublée d’une extraordinaire maîtrise des mathématiques. Surtout, nous avons pu constater qu’il est au début des années 1930 à la pointe des développements de la théorie quantique et qu’inévitablement il est confronté à ses principales problématiques, y compris lorsqu’il est question d’en donner une interprétation (chapitre deux et trois).

Se manifeste alors très clairement chez le physicien de Leningrad une prise de recul sur sa discipline. Comme certains de ses contemporains, il se lance dans une réflexion qui vise à rationaliser le processus qui a vu une théorie aussi bonne que celle de la mécanique classique être soudainement remise en question par l’apparition de deux nouvelles théories révolutionnaires, la mécanique quantique et la relativité. Aussi cherche-t-il à étendre cette rationalisation à d’autres exemple de la physique. Dans ce but, Fock développe une conception des relations interthéoriques en physique qui se veut antiréductionniste et, selon nos propres termes, son attitude est celle d’un *pluraliste en série* (chapitre deux). Selon son raisonnement, toute théorie doit être considérée comme l’approximation d’une autre théorie qui se veut plus générale. Mais ce qui est essentiel dans l’approche de Fock est qu’il considère que chacune d’entre-elles possède au travers de concepts émergents – un concept fondateur de l’antiréductionnisme – une valeur et un domaine d’application qui lui sont propres. Dans la pratique scientifique, une description complète des phénomènes de la nature ne peut être fournie que par l’ensemble des théories, et non uniquement celle qui se présente comme la plus générale. Cette conception de la physique se double de plus d’une approche qui se veut résolument réaliste (chapitre 3). Fock croit en la réalité du monde extérieur indépendamment de la pensée et il estime que celle-ci se manifeste concrètement au travers du formalisme mathématique d’une théorie, le physicien ayant pour tâche d’en extraire la signification physique fondamentale.

Antiréductionnisme et réalisme scientifique sont précisément les deux principes épistémologiques qui dessinent toute la cohérence de la pensée de Vladimir Fock. En effet, nous avons montré qu’ils sont les piliers d’un principe plus méthodologique, celui de rigueur physique (chapitre trois), auquel le théoricien se soumet tout aussi bien lorsqu’il est question

de résoudre un problème scientifique que d'en discuter les résultats. Par conséquent, c'est l'approche qu'il dessine qui est sous-jacente à sa compréhension des théories de la mécanique quantique et de la relativité générale et qui en établit la cohérence globale. Dans son approche critique des pensées de Bohr et d'Einstein, Fock est clairement guidé par la nécessité de faire preuve de rigueur physique. C'est en faisant face aux obstacles qui se présentent à lui, en s'appuyant sur son antiréductionnisme et son réalisme, qu'il fonde le caractère non-orthodoxe de sa propre conception des théories modernes de la physique (chapitre quatre). Ainsi, en basant notre analyse sur une reconstruction des conceptions épistémologiques de Fock, plutôt qu'en prenant pour point de départ l'une ou l'autre de ses interprétations de la relativité générale et de la mécanique quantique, nous avons pu reconstruire ce qui faisait véritablement la singularité de sa pensée, au-delà du simple constat de son adhésion au matérialisme dialectique. Plus encore, nous avons pu dévoiler les motivations et le processus intellectuel à la base du caractère indépendant de son interprétation des théories.

- *Sur cette base, ma seconde ambition est de reconsidérer le rapport de Fock au matérialisme dialectique afin de pouvoir évaluer plus concrètement ce qui l'a séduit dans cette philosophie et ce qui a véritablement pu influencer sa pensée, dépassant ainsi l'idée d'une simple imposition dogmatique subie passivement par le physicien.*

Une approche de la philosophie du matérialisme dialectique dans le cadre de l'Union soviétique soulève nombre de difficultés en raison de son caractère idéologique et même dogmatique. Nous avons pu montrer au cours des quatre premiers chapitres qu'il était possible d'apporter des éclaircissements conceptuels sur la pensée de Fock tout en s'abstenant de se lancer dans un discours sur la philosophie marxiste. Et pourtant, nous savions bien que le physicien russe se revendiquait de cette philosophie. Cependant, l'intérêt de notre démarche, en revalorisant ce qui d'un point de vue épistémologique a de la valeur pour Fock, est aussi de montrer en quoi le matérialisme dialectique participe concrètement de ses conceptions sur la physique. Nous avons ainsi pu tout d'abord observer que le volet scientifique de la philosophie marxiste, développé par Engels et Lénine, englobe en réalité les principes épistémologiques d'antiréductionnisme et de réalisme scientifique qui sont si précieux pour comprendre la pensée de Fock. Le premier se manifeste particulièrement au travers de la dialectique et le second au travers du matérialisme.

En prenant soin de bien historiciser notre approche nous avons pu constater que les deux composantes de la philosophie marxiste peuvent difficilement être considérées à parts égales

pour leur influence sur les prises de position épistémologiques du physicien. Ce dernier présente effectivement une claire prédisposition à accepter le matérialisme dialectique en raison de ses propres conceptions réalistes. Sur ce point, sa proximité intellectuelle avec Lénine dans *Matérialisme et empiriocriticisme* – un ouvrage qu’il lit en 1932 alors qu’il est déjà un physicien bien établi, mais bien avant qu’il ne se tourne concrètement vers les questions d’interprétation – facilite très probablement son acceptation de la philosophie marxiste.

En revanche, il apparaît que l’antiréductionnisme de Fock est influencé par sa découverte des classiques du marxisme, dont il transpose les fondements dans sa pensée. Rappelons qu’à cette époque, Fock – comme beaucoup de ses collègues – est confronté à la nécessité de prendre du recul sur la théorie quantique, notamment en raison de la rupture avec la mécanique classique mais aussi des difficultés soulevées par l’électrodynamique quantique. Fock, comme Heisenberg et plus tard Kuhn, accepte alors l’idée que la mécanique classique et la mécanique quantique sont deux théories conceptuellement dissemblables, mais pour autant – dans une large mesure – correctes. Alors, en vertu de nos considérations du chapitre deux, la dialectique est en mesure d’apporter au physicien de Léninegrad des réponses quant à la rationalisation des rapports interthéoriques en physique moderne. Pour résumer, il voit dans le matérialisme dialectique une philosophie qui englobe une conception sur le réalisme qui lui est propre, mais qui par son volet dialectique se montre aussi très utile en vue d’une meilleure compréhension de sa discipline.

- *Par conséquent, au cours de cette recherche, il sera intéressant de se pencher à nouveau sur la stratégie employée par Fock dans la protection des théories modernes de la physique en URSS. En effet, un regard nouveau sur la pensée du physicien soviétique doit aussi permettre de reconsidérer l’impact du totalitarisme soviétique sur celle-ci.*

Ce point, que nous avons abordé aux chapitres six et sept, est celui qui recoupe le plus les développements déjà existants dans la littérature secondaire, en particulier pour ce qui est de la question plus spécifique du rapport du physicien à la politique et aux débats philosophiques. Rappelons cependant, à toutes fins utiles, que c’est la dynamique suivie par Fock dans sa défense en Union soviétique des théories de la mécanique quantique et de la relativité qui, dans la lignée de ses premières considérations du milieu des années 1930, révèle toute l’envergure du physicien épistémologue. Dans le combat principalement politique que conduisent les Académiciens soviétiques, nous avons pu constater que Fock est parmi les plus

prompts à se saisir des questions idéologiques. Convaincu de sa capacité à démontrer la compatibilité des théories de la physique moderne avec le matérialisme dialectique, il est en première ligne pour répondre aux attaques de ceux qui se présentent comme les « chiens de garde » de la pensée marxiste. Par conséquent, il est correct d'affirmer que le contexte catalyse le développement de sa pensée. Dès la fin des années 1930, la transition entre un Fock pur physicien théoricien et un autre, physicien philosophe engagé, est déjà effective. Il en sera marqué jusqu'à la fin de sa carrière.

Afin que notre étude centrée sur les interprétations par Fock des théories modernes de la physique puisse rendre compte des différents aspects de l'influence du contexte, nous avons fait le choix de nous pencher plus spécifiquement sur son discours scientifique (chapitre sept), un domaine jusque-là peu exploré. L'idée était d'y déceler si la pression politique et idéologique qu'il subit du pouvoir stalinien a un impact réel sur le fond et la forme de sa pensée. Nous avons pu en tirer la conclusion que Fock fait preuve d'une grande capacité d'adaptation aux exigences rhétoriques et rituelles de son époque, qu'il accepte la politisation de la culture scientifique soviétique. Le physicien a bien compris que c'est uniquement en acceptant de suivre cette démarche que les autorités peuvent devenir réceptives à sa défense des théories modernes de la physique. Mais surtout, nous avons pu constater que Fock n'en dénature pas pour autant le contenu scientifique de ses travaux et qu'il continue de véhiculer le même message du point de vue de la physique. Fock a pour lui le bénéfice d'avoir embrassé le matérialisme dialectique. Ainsi, les contraintes exercées sur sa personne ne se manifestent au final que dans la forme de l'expression de sa pensée et non sur son contenu. Plus spécifiquement encore, on a pu noter que la *kritika* – une spécificité rituelle soviétique – est parmi les catalyseurs qui le conduisent vers ce qu'il considère comme la correcte interprétation de la mécanique quantique et de la relativité générale. En effet, c'est en aiguisant sa critique des points de vue jugés orthodoxes sur les théories modernes de la physique qu'il est en mesure de consolider son propre point de vue. Pour résumer, il est indéniable que le contexte politique et idéologique soviétique oriente Fock vers la philosophie marxiste, puis décuple son intérêt pour les questions d'interprétation. Mais il est avant tout essentiel de souligner que l'influence subie ne s'exprime jamais chez lui sous la forme d'une contrainte sur la pensée à adopter et sur le contenu scientifique. Chez le physicien de Léninegrad, quel que soit le contexte, quel que soit l'objectif à remplir et la nature de son argumentation persuasive, c'est toujours la rigueur des énoncés physiques qui prime.

Le contexte soviétique est un subtil jeu d'influence. Les opposants à Fock d'un point de vue idéologique – des personnages comme Timiryazev, Mitkevich, Kuznetsov et bien entendu Maksimov – sont en réalité eux aussi dans une dynamique où ils doivent constamment assurer leur position et sont en quête d'approbation de la part des autorités politiques¹. S'ils peuvent à certains instants obtenir leur soutien et donner l'impression de les représenter directement, ils doivent eux aussi faire appel à la rhétorique et aux rituels du Parti pour défendre leurs intérêts et critiquer la physique moderne. Dans cette lutte, le camp représenté par Fock l'emporte non seulement car il est le plus habile rhétoriquement, mais aussi, il ne faut pas l'oublier, en raison d'arguments plus pragmatiques, comme le projet atomique soviétique. Ainsi, au fur et à mesure de son combat il est vrai que Fock gagne progressivement le soutien des autorités soviétiques. Un soutien qui lui est indispensable à la bonne diffusion de sa pensée.

- *Plus globalement, j'ambitionne de mieux saisir les mécanismes de la diffusion des idées de Fock, aussi bien localement que d'un point de vue international. L'objet de cette enquête est de reconsidérer le rôle joué par le physicien dans l'histoire de sa discipline, au-delà de sa simple contribution aux développements théoriques de la mécanique quantique et de la relativité générale.*

La question de la diffusion des idées de Fock a été développée de façon indirecte dans le chapitre sept pour ce qui est du contexte local, puis dans le chapitre huit à l'aide d'une approche de sa dynamique internationale. Dans le premier cas, on a pu remarquer que Fock détourne en réalité la politisation de sa culture scientifique en Union soviétique en vue de la promotion de ses propres interprétations des théories de la physique moderne. Pour que les mécanismes de défense des théories soient pertinents dans leur contexte, il estime qu'ils doivent s'accommoder des attentes de ce dernier. Ici, une théorie ne peut être correctement protégée que si l'on part du principe que les erreurs d'interprétation qui lui sont relatives peuvent être corrigées. Ses tentatives de conciliation de la physique moderne avec le matérialisme dialectique se proposent d'effectuer ces corrections et le physicien de Leningrad est alors en position de force pour diffuser ses idées. Néanmoins, bien qu'il se montre efficace dans son combat face aux idéologues marxistes, la réception de ses idées en URSS poursuit pour la relativité générale et la mécanique quantique des trajectoires opposées (chapitre

¹ Pour une mise en relief de cette idée voir en particulier les travaux de Kojevnikov [Koje 2002b ; 2004].

huit). Dans le premier cas, principale autorité scientifique dans les années 1950, le physicien de Léninegrad perd de son aura dans les années 1960. Dans le second cas, la dynamique est inverse : indéniablement en position minoritaire dans les années 1950, son influence est croissante dans les années 1960.

Au chapitre huit, nous avons pu observer qu'il est essentiel de prendre en considération le contexte soviétique pour analyser le processus de diffusion à l'étranger de la pensée de Fock. Les problématiques locales, que ce soient les contraintes dues au débat idéologique ou celles d'un rapport conflictuel aux autorités, continuent de se manifester à l'étranger. Malgré cela, il faut souligner que c'est avant tout le discours critique vis-à-vis d'Einstein et de Bohr formulé par Fock qui lui sert à nouveau de catalyseur, mais ici pour la propagation de ses idées à l'international. L'autorité scientifique acquise par le physicien de Léninegrad légitime son inclusion dans le débat international et en s'opposant respectivement à Infeld et à Bohr il reçoit très rapidement un large auditoire pour la diffusion de ses idées. En particulier, il devient un personnage emblématique de la relativité générale en étant activement inclus dans la dynamique de la « renaissance » du domaine. Pour ce dernier, les idées de Fock suscitent très clairement de l'intérêt au sein de la communauté, bien que le physicien russe incarne tout au long de son parcours international une forme d'opposition minoritaire. En mécanique quantique, son impact se fait moins sentir, particulièrement car il lui est moins évident de se démarquer de l'orthodoxie, représentée par Copenhague, dont il reste relativement proche. Mais on observe aussi que son discours participe d'une dynamique internationale où les luttes idéologiques sont prépondérantes et contribuent à masquer ce qui en fait la spécificité. Toutefois son interaction avec Bohr en 1957 – et la possible influence qu'il a eu sur le Danois – manifeste tout l'intérêt de son approche dans le débat international.

Pour conclure, il faut insister sur le fait que Fock est un physicien particulièrement actif après-guerre sur les questions d'interprétation des théories de la physique moderne, et que parmi ses collègues soviétiques il bénéficie d'un statut privilégié et d'une posture inédite. C'est pour cette raison qu'il a l'opportunité de faire entendre largement sa voix à l'international tant en mécanique quantique qu'en relativité générale, et il prend ainsi une place à part dans l'histoire de la physique du XX^e siècle.

Les différents points ci-dessus nous ont permis de restituer chacune de nos conclusions partielles. Ils nous invitent aussi à revenir sur l'articulation générale de notre étude, et en

premier lieu, sur le choix qui a été fait dans le titre d'introduire métaphoriquement l'idée d'« itinéraire externaliste » de la « pensée internaliste » de Fock. Rappelons que la structure même de notre approche fait cette distinction : la première partie (chapitre un à quatre) est consacrée à une étude de la pensée de Fock où l'accent est mis sur la science pour elle-même, et la seconde partie (chapitre six à huit) replace le scientifique dans son environnement socio-politique, le tout étant articulé par la question du matérialisme dialectique (chapitre cinq). Nous souhaitons alors défendre la thèse qu'un discours sur le contenu de l'interprétation par le physicien soviétique de la mécanique quantique et de la relativité générale peut s'affranchir de considérations concernant le dogmatisme de l'idéologie soviétique, alors qu'une étude de l'évolution du physicien dans son environnement et de l'impact de son travail sur la communauté scientifique ne peut y échapper. Suite à nos développements il est maintenant temps de la commenter.

Afin de mettre en perspective nos propos il apparaît assez inévitable dans une étude de notre genre de faire mention de Paul Forman et de sa thèse développée en 1971 dans son article « Weimar Culture, Causality, and Quantum Theory, 1918-1927: Adaptation by German Physicists and Mathematicians to a Hostile Intellectual Environment » [Form 1971]¹. L'article de l'historien américain est considéré comme un classique de l'histoire des sciences en particulier pour son importance majeure dans la définition d'une histoire culturelle des sciences qui se développe largement à partir des années 1980. Nous ne souhaitons pas ici exposer les différentes dimensions du débat historiographique dont il est l'objet, mais seulement l'utiliser pour souligner ce qui fait en réalité la singularité d'un personnage comme Fock. L'article de Forman se présente tout d'abord comme une étude du milieu culturel et social des sciences mathématiques et physiques durant les premières années de la République de Weimar, instaurée en Allemagne suite à la défaite de 1918. L'historien souhaite démontrer que la crise qui s'y déroule conduit à un soulèvement radical des élites contre les idées de progrès, de rationalité, de modernité, de matérialisme et de déterminisme. La jeune génération de physiciens et de mathématiciens qui vont jouer un rôle majeur dans l'élaboration de la mécanique quantique sont alors profondément imprégnés de cette atmosphère. Ainsi, la thèse que défend Forman est que l'un des attributs principaux de la

¹ Sur la thèse de Forman, voir sa réédition de 2011 accompagnée de différents développements qui permettent une mise en perspective de son rôle pour l'histoire des sciences [CaKT 2011].

nouvelle mécanique quantique, à savoir son caractère indéterministe au travers de l'approche probabiliste qui la consacre, est le résultat d'une adaptation délibérée des scientifiques à leur environnement culturel, en vue d'une amélioration de leur statut social. Très clairement, l'historien lie l'émergence de la mécanique quantique et de l'interprétation de Copenhague à la révolte d'après-guerre des élites allemandes contre une philosophie des sciences rationaliste, causale et réaliste :

[...] if the physicist were to improve his public image he had first and foremost to dispense with causality, with rigorous determinism, that most universally abhorred feature of the physical world picture. And this, of course, turned out to be precisely what was required for the solution of those problems in atomic physics which were then at the focus of the physicist's interest [pp. 7-8].

En 1984, Forman poursuit ses développements et se penche davantage sur la question de l'interprétation de la mécanique quantique et de son contenu idéologique [Form 1984]. Il en dégage trois thèmes qui affectent l'image publique de la théorie dans la République de Weimar : *anschaulich*, *individualität* et *kausalität*. Tout d'abord, il montre que malgré le caractère abstrait et contre-intuitif de la théorie de nombreux commentateurs la qualifient d'*anschaulich* (intuitive, visible, claire...¹). Ensuite, il explique que le concept d'indivisibilité du quantum d'action se transforme une notion plus stricte et fondamentale d'individualité, *individualität*, des événements atomiques. Enfin, il indique que les lois probabilistes de la mécanique quantique sont associées à un abandon de la causalité, *kausalität*, dans son sens strict. En 2012, en conclusion d'un article sur la mécanique quantique en URSS, Alexei Kojevnikov applique les idées de Forman au contexte soviétique afin de mieux interpréter les choix effectués par les physiciens de ce dernier [Koje 2012]. Il souligne que suite à la Première Guerre mondiale, à l'opposé du mouvement connu en Allemagne, les idéaux de progrès, rationalité et de scientisme sont embrassés en Union soviétique. De plus, en raison de l'application d'une doctrine unique, les scientifiques y subissent des pressions totalement différentes. Par conséquent, les valeurs idéologiques partagées par la communauté des physiciens en diffèrent profondément de celles de la République de Weimar et la mécanique quantique y devient *unaanschaulich* (non-visuelle), statistique mais non acausale, et surtout

¹ Il n'existe pas de traduction précise de ce terme en français, dont le sens dépend aussi du contexte.

elle signifie la perte d'individualité des particules quantiques ¹. Plus spécifiquement, Kojevnikov argumente sur le fait que le caractère *unauschaulich* de la théorie quantique est plus facilement accepté en Union soviétique en raison de son caractère « révolutionnaire », ce terme possédant une connotation politique positive dans le discours public. Il est de plus appuyé par l'aspect antiréductionniste de la philosophie matérialiste dialectique. Pour ce qui est de la *kausalität*, elle est une valeur fondamentale de l'idéologie marxiste et en vertu de sa rationalité son abandon est inacceptable pour les physiciens en URSS. Enfin, en termes de valeur, Kojevnikov souligne que le collectivisme prend le pas sur l'individualisme et une compréhension des lois probabilistes de la mécanique quantique comme des collectifs statistiques plutôt que des particules individuelles – comme nous l'avons discuté avec Blokhintsev (VII.2.2.2) – en est facilitée.

L'approche de Forman, tant que son application par Kojevnikov dans le contexte soviétique, tendent avant tout à donner des conclusions générales qui s'appliquent à une communauté et n'excluent pas des variations en termes d'individualités. Ainsi, il faut bien concevoir que si l'itinéraire de Fock – en particulier nos considérations sur son discours scientifique (chapitre sept) et la diffusion de ses idées (chapitre huit) – donne raison à Forman en ce qui concerne la nécessité du physicien de s'adapter aux spécificités de son contexte pour « améliorer son image publique » [Form 1971, p. 7], il apparaît aussi que se contenter d'une telle approche, du moins dans le cas présent, implique le risque de passer à côté de ce qui fait l'authenticité du physicien. Fock est une individualité au sein d'une communauté, et alors qu'il embrasse les deux premières valeurs idéologiques soviétiques mentionnées par Kojevnikov, la situation est nettement plus complexe pour la dernière. Il est vrai que le physicien russe consacre une bonne partie de sa production scientifique à des problèmes de la théorie quantique traitant de modèles collectifs – méthode de Hartree-Fock, seconde quantification, espace de Fock... – mais lorsqu'il est question de l'interprétation de la mécanique quantique dans son sens le plus strict il en rejette toute interprétation collectiviste. En outre, ce fait justifie grandement le côté marginal de sa position en URSS dans les années 1950 face aux interprétations statistique et causale de la théorie. Mais comme nous l'avons constaté, sur ce

¹ Pour initier ce constat Kojevnikov s'appuie sur l'autorité de Ioffé et sur une intervention qu'il effectue en 1934 à l'adresse principalement de philosophes marxistes, présentant une image de la physique pensée comme le tronc commun de la coopération entre philosophes et physiciens [Ioff 1934].

point précis, l'approche du formalisme mathématique par Fock – sa pratique scientifique – joue un rôle essentiel. Pour clarifier cela, il faut souligner qu'il nous a été nécessaire de nous pencher sur ce qui fait la spécificité de son approche de la physique, indépendamment de son contexte socio-culturel.

La littérature sur Fock et les compléments qu'y apportent notre étude montrent qu'il est difficile de reconstruire toute l'étendue de sa pensée si nous concentrons initialement sur des critères socio-culturels. Ici, très clairement, c'est la question du matérialisme dialectique qui illustre cette problématique. En effet, c'est uniquement *a posteriori* – une fois la pensée épistémologique de Fock reconstruite – que nous avons pu observer ce que la philosophie marxiste y apporte et la façon dont le physicien a tendance à en extraire les principes épistémologiques qui lui sont essentiels en vue d'une approche des problèmes scientifiques qui se posent à lui. Car lorsque le contexte l'y autorise, Fock souhaite autant que possible avoir recours à des énoncés que nous qualifions d'épistémologiques – formulés avec le plus haut niveau de scientificité possible –, plutôt que des énoncés plus philosophiques – sujets à une interprétation idéologique – et qui à son sens sortent du domaine strict de la science. Ainsi, alors même que le contexte exige bien souvent de Fock une véritable prise de position idéologique pour des raisons politiques, c'est bien leur dissipation dans son discours scientifique doublée de la constance de ses propos – bien que la pression du milieu ne se fait plus ressentir – qui indique que le physicien fait en réalité subir au matérialisme dialectique un véritable processus d'« internalisation ». Les principes qu'il en dégage deviennent des composantes à part entière de ce qu'il considère être la bonne pratique scientifique. L'analyse de la nature au prisme du matérialisme dialectique perd le caractère contingent que l'on peut lui attribuer en vertu de la diversité des points de vue philosophiques acceptés par les scientifiques : il prend chez Fock une forme si nécessaire qu'elle en est totalement diluée dans la *Science*. C'est à partir de ce constat que nous parlons de pensée « internaliste », dans le sens où Fock nous donne clairement les outils pour tenir un discours sur le contenu de son interprétation de la mécanique quantique et de la relativité générale en s'affranchissant totalement de considérations concernant le dogmatisme de l'idéologie soviétique.

Fock est un physicien qui dévoue sa vie à la science. Alors, comme nous l'avons mentionné en conclusion du chapitre sept : « la rigueur physique à laquelle s'astreint Fock dans son approche des problèmes scientifiques a une contrepartie dans la façon dont il diffuse sa pensée, à savoir une forme de rigueur – de systématique – à énoncer de façon pointilleuse

l'unique point de vue qu'il juge correct ». Le cas de la méthode de Hartree-Fock, où le russe refuse jusqu'à la fin de sa vie de mentionner même l'existence du formalisme de Slater – pourtant le plus usité – en est une illustration que nos développements initiaux ont mise en avant (I.3.5). Mais en vertu des considérations de Fock sur le matérialisme dialectique, ce constat s'étend à la philosophie. En 1993, Gorelik explique : « Fock believed in the existence of one true philosophy as the most general scheme or quintessence that uniquely realized the evolution of scientific knowledge » [Gore 1993, p. 325]. Rappelons que l'historien lui oppose alors l'opportunisme philosophique d'Einstein, qui estime pour sa part qu'en fonction des circonstances le physicien se doit de prendre la position la plus convenable [Eins 1949]. Une telle approche est inconcevable pour Fock, car elle n'a pas de sens pour lui du point de vue de la rigueur scientifique. Le physicien de Léningrad en développe donc une forme de dogmatisme, persuadé que son approche des théories modernes de la physique est la seule qui soit convenable. Et lorsque que nous discutons du fait qu'il accorde un intérêt certain à la philosophie dans les sciences (VII.3.2.2), il faut souligner que jamais dans son esprit il ne semble avoir été question d'un autre courant que le matérialisme dialectique. Cette philosophie lui offre en réalité un cadre idéal pour structurer sa pensée et nul ne doute que son caractère méthodique, rationnel et surtout scientifique, participent à lui donner de la valeur aux yeux de Fock.

Pour autant, malgré le constat que nous venons de dresser, il va de soi que Fock n'est pas non plus le candidat idéal pour contester la thèse de Forman. Malgré toutes les subtilités de son approche de la physique moderne, il n'en reste pas moins un physicien soviétique qui a adopté le matérialisme dialectique. Une question subsiste cependant à notre esprit et nous plonge dans le domaine de la fiction, plus précisément de l'uchronie : s'il était né en 1898 à Göttingen, Fock aurait-il pu développer une interprétation similaire des théories de la mécanique quantique et de la relativité générale ? Là où Forman répondrait probablement par la négative, après avoir observé le personnage durant ces cinq dernières années nous sommes tentés de dire oui. Fock y aurait probablement suivi un enseignement de très grande qualité en mathématiques, serait allé sur le front en 1917 et aurait sans doute souffert des conditions difficiles de la République de Weimar. En raison de sa surdité on imagine qu'il aurait connu l'isolement et que celui-ci se serait matérialisé en une forme de dévotion à la science qu'il approcherait de façon très rigoureuse : il ferait toujours potentiellement jouer au formalisme mathématique un rôle tout particulier. Mais, si nous avons répondu oui à notre

propre question, nous admettons que le dénouement attendu de cette histoire n'est possible que si Fock tombe par hasard à la bibliothèque de l'Université allemande où il enseigne en 1932 sur *Matérialisme et empiriocriticisme*. Car il faut bien reconnaître qu'il n'existe à notre connaissance pas d'autre philosophie qui combine en son sein le réalisme et l'antiréductionnisme indispensables à la pensée du physicien dans l'optique de résoudre les problèmes de la théorie quantique au début des années 1930 et surtout de formuler les interprétations des théories de la physique moderne telles que nous les lui connaissons aujourd'hui. Mais pour dresser un tableau complet de cette histoire alternative il faut aussi accepter l'idée qu'en raison de son caractère méthodique, rationnel et surtout scientifique, Fock aurait tout aussi bien pu être séduit par le courant de l'empirisme logique. Il aurait alors accepté une vision réductionniste des sciences et admis que leur finalité ne réside pas en la description de la réalité objective du monde extérieur – sans pour autant cesser d'y croire. Car en fin de compte, ce qui nous incitait réellement à répondre par l'affirmative n'est autre que la dévotion sans limite de Fock pour la science, un domaine qui est sans conteste sa préoccupation principale tout au long de sa carrière.

Pour saisir au mieux les spécificités de la pensée de Fock, nous sommes restés très proches du contenu de ses publications en essayant de reconstruire son raisonnement et d'en identifier la cohérence interne. Nous souhaitons ici prendre un peu de recul et compléter nos considérations avec quelques commentaires critiques qui portent principalement sur deux points. Le premier est issu des considérations que nous venons de discuter, et dont les implications dans le cas de la mécanique quantique ont déjà été mentionnées, à savoir le caractère profondément dogmatique de l'approche des sciences par le physicien soviétique. Le second est relatif à son manque d'engagement dans les développements théoriques de la mécanique quantique et de la relativité générale après-guerre. Notons qu'une critique poussée de la pensée de Fock est en réalité un élément qui manque à l'historiographie sur le physicien, y compris de la part de ses opposants scientifiques. Nous espérons alors que les quelques points soulevés ici permettent de mieux comprendre en quoi ses interprétations possèdent un caractère marginal en dépit de leur large diffusion dans les années 1950-1970, mais aussi d'ouvrir de nouvelles perspectives de recherche.

Comme nous l'avons constaté, Fock est un physicien qui présente une approche assez dogmatique de sa discipline. Il ne fait de la science que pour la science, et à ses yeux la pratique

de celle-ci se fait à l'appui de principes épistémologiques intangibles que tout un chacun devrait spontanément adopter. De plus, la philosophie qui définit son cadre de pensée se présente comme l'unique courant en capacité de remplir cette fonction. L'une des conséquences majeures de cette attitude est que le physicien de Leningrad ne semble pas – peut-être n'a-t-il pas voulu – avoir pris la mesure de toute l'étendue des questionnements soulevés par sa propre interprétation des théories. Pour exemple, notons tout d'abord que jamais Fock ne se préoccupe des éventuelles implications de sa conception antiréductionniste des théories physiques, et notamment de l'impact que celle-ci peut avoir sur la question du réalisme. Mais c'est avant tout sur ce dernier point – sur la justification de son approche réaliste de la physique – que Fock se montre particulièrement avare en développements et peut laisser le lecteur dans l'expectative. Comme mentionné au chapitre trois (III.3.3) :

Notons que la conception du formalisme mathématique [...] chez Fock révèle une approche particulièrement pragmatique, pour ne pas dire prosaïque, du problème philosophique de la réalité. [...] Le schéma selon lequel la réalité du monde extérieur est directement accessible à la pensée au travers du formalisme mathématique est accepté tel quel, sans qu'à ses yeux il ne puisse, ni ne doive être questionné.

Au chapitre quatre nous avons aussi constaté que cette attitude se renouvelle plus concrètement pour la mécanique quantique lorsque Fock se cache derrière un critère d'« objectivité » pour justifier l'approche réaliste de son concept de « possibilité potentielle », pourtant relatifs à des situations non-réalisées (IV.1.1.3). Nous pouvons aussi ajouter à ce constat son attitude en relativité générale, où le théoricien ne prend jamais la peine de discuter concrètement de la potentielle réalité des différentes configurations étudiées (espace homogène à l'infini, espace de Friedmann-Lobatchevski...). Si Fock les considère comme réalistes, il faut noter qu'il ne s'appuie dans cette direction que sur le sens commun.

Cependant, pour quiconque n'accepte pas de tenir une position réaliste scientifique ou tout simplement souhaite approfondir ses implications pour la pratique de la physique, l'interprétation des théories de la mécanique quantique et de la relativité générale par Fock est génératrice d'une multitude de questionnements philosophiques. Fock, en s'abstenant d'engager le débat, laisse des zones d'ombre et met à mal la cohérence globale de son œuvre. Sa pensée peut parfois avoir un goût d'inachevé. Il nous semble que le matérialisme

dialectique pourrait dans ce cadre venir à la rescousse de Fock. En effet, les classiques du marxisme possèdent, sur la question du réalisme, des développements et une argumentation poussés qui peuvent au moins esquisser des réponses sur les problématiques ici soulevées. Pourtant, lorsque le physicien renvoie le lecteur à la philosophie du matérialisme dialectique, c'est uniquement pour rappeler les principes épistémologiques qu'il a lui-même internalisés dans son approche scientifique, et en aucun cas pour proposer une ouverture du débat sur le réalisme :

The problems we are speaking of concern the fundamental philosophical question as to the relation of the objects of the external world to the perceiving subject. In our analysis of these problems we are to be led not only by the general doctrine of materialistic philosophy that consciousness presupposes the existence of matter, but also by the doctrine that all limits in nature are conditional and relative [Fock 1970', p. 294].

Dans cet article de 1970, suite à cette citation, Fock développe simplement son discours habituel sur l'interprétation de la théorie quantique. Ainsi, il nous conforte simplement dans l'idée qu'il est en réalité persuadé que le seul problème « philosophique » qui puisse ici exister est un pur problème de physique, qui trouve notamment une réponse dans le concept de relativité par rapport aux moyens d'observation¹. En dépit de ses multiples invitations à collaborer avec les philosophes (VII.3.2.2), son attitude personnelle et sa production scientifique donne clairement l'impression que le caractère dogmatique de sa pensée le déconnecte des multiples implications philosophiques qu'elle peut générer, tout simplement car il est persuadé d'être le garant d'une interprétation aboutie tant de la mécanique quantique que de la relativité générale.

Cette forme d'immobilisme de sa pensée trouve aussi un écho dans une forme d'immobilisme de sa pratique de la physique. Fock est loin d'être inactif après la seconde guerre-mondiale – il participe à de nombreuses conférences et publie en quantité – mais il faut souligner que la dynamique débutée à la fin des années 1930 avec la transition d'un statut de « pur physicien théoricien » à celui de « physicien philosophe en action » (VI.1.2), se concrétise définitivement dans le sens où la production scientifique de Fock sur la physique moderne se limite quasi-exclusivement à des écrits sur les aspects interprétatifs des théories. Surtout, sur ce point, comme le suggèrent nos commentaires sur son dogmatisme, se

¹ Voir nos développements du chapitre quatre (IV.1.2.2).

manifeste une forme de redondance qui donne l'impression que le physicien est détaché des véritables avancées de son domaine, mais aussi que ses propres projets n'avancent pas. La situation étant relativement commune pour des scientifiques en fin de carrière, il faut ici faire preuve d'indulgence, Fock restant par ailleurs remarquablement actif dans la communauté et entreprenant pour la diffusion de sa pensée. Cependant, si nous évoquons ici ces aspects, c'est que nous pensons qu'en raison de la dynamique au sein de la discipline, en particulier en mécanique quantique, ils contribuent aussi à marginaliser ses idées.

Prenons tout d'abord le cas de la relativité générale. L'article de 1939 sur le problème du mouvement annonce l'idée d'un vaste programme de recherche en vue de développer ses résultats [Fock 1939c]. Mais si ce programme donne l'impression de se concrétiser par la publication de la monographie de Fock sur la théorie de la relativité en 1955 [Fock 1955a], on peut regretter qu'il ne soit jamais en mesure d'apporter un argument de poids à son interprétation, à savoir la preuve qu'il existe aussi pour d'autres types d'espace étudiés dans la relativité générale des systèmes de coordonnées privilégiés. En effet, dans sa monographie, le théoricien juge qu'« il est possible que dans un espace de Friedmann-Lobatchevski il [...] existe des systèmes de coordonnées privilégiés » et il renvoie cette question à de futures investigations [Fock 1955a', p. 4]. Malheureusement, de tels résultats ne sont jamais publiés, cette lacune se présentant clairement comme un argument en défaveur de son interprétation de la théorie d'Einstein.

En mécanique quantique, Fock ne poursuit pas de programme de recherche spécifique et nous l'avons discuté au chapitre huit (VIII.1.2.1), après quelques articles utiles à la défense de la théorie au début des années 1950, son retour au premier plan sur les questions d'interprétations apparaît si ce n'est complètement fortuit, du moins comme en grande partie catalysé par sa rencontre avec Bohr en 1957. Notons cependant pour introduire nos propos à venir qu'il est l'auteur en 1946 avec N. S. Krylov, d'un article qui traite du problème de la mesure, et plus précisément des relations d'indétermination pour le temps et l'énergie [FoKr 1947]. Cet article est critiqué des années plus tard, en 1962, par Aharonov et Bohm [AhBo 1962] et s'en suit un échange par publications interposées entre les trois acteurs où chacun tient sa position [AhBo 1964 ; Fock 1962a ; 1965a]. Si nous mentionnons ici ces articles c'est qu'ils sont des traces singulières – mis à part le rejet pur et simple formulé de façon dogmatique des interprétations causales et statistiques (VII.2.2.2 et VIII.1.2.2) – d'une

réflexion de Fock sur les développements les plus récents de nouveaux courants appartenant à un champ disciplinaire alors en formation, les « fondements de la théorie quantique ».

Dans un article publié en 2004, Olival Freire Jr. met en avant la dynamique qui dans le courant des années 1950-1970 – celles où Fock est actif dans le débat interprétatif – donne naissance au champ disciplinaire susmentionné [Frei 2004b]¹. Il s'appuie notamment sur trois cas de figure qui démontrent la vitalité du domaine bien avant la découverte des inégalités de Bell en 1964 et l'explosion d'une approche expérimentale : la question des variables cachées chez Bohm et leur influence sur les travaux de Bell, les expériences idéales de Wigner et la théorie des états relatifs d'Everett. Alors, si dans le même temps Fock est dans une réflexion permanente sur l'interprétation de la mécanique quantique, sa production scientifique se montre totalement sourde à toutes nouvelles considérations théoriques alternatives, ou expérimentales, relatives au domaine des fondations de la théorie quantique. Jamais le physicien soviétique ne semble manifester la volonté d'être inclus dans une dynamique plus large qui aurait tout aussi bien pu l'amener à reconsidérer sa position, qu'à la renforcer.

Indéniablement, il nous semble que dans la dernière partie de sa carrière, bien qu'étant très actif pour la diffusion de sa pensée, Fock passe à côté d'opportunités qui auraient pu donner un nouvel écho à sa pensée. La situation est bien évidemment compréhensible : l'âge faisant son effet, l'homme étant parfois affaibli par la maladie, il n'a plus la même vitalité et la même volonté créatrice que durant ses jeunes années particulièrement fructueuses. Ainsi, l'expression de nos critiques est ici avant tout celle du regret de n'avoir pu constater le renouvellement permanent de sa riche pensée face aux nouvelles avancées de sa discipline.

Car il faut bien rappeler que la pensée de Fock, tout aussi sujette à la critique qu'elle soit, prend une place à part dans l'histoire de l'interprétation des théories de la physique moderne. En dépit de la tendance résolument antiréaliste et réductionniste de la philosophie moderniste du début du XX^e siècle, Fock nous offre une approche cohérente des théories de la mécanique quantique et de la relativité générale qui se veut pour sa part réaliste et antiréductionniste. Ainsi, son originalité ouvre d'indéniables perspectives intellectuelles et scientifiques qui n'ont semble-t-il malheureusement pas pu révéler tout leur potentiel. Alors

¹ Pour une poursuite des idées de cet article voir l'ouvrage récent d'Olival Freire Jr. intitulé *The Quantum Dissidents. Rebuilding the Foundations of Quantum Mechanics (1950-1990)* [Frei 2015].

que la présente étude a souligné les spécificités de la pensée de Fock et reconsidéré leur rôle dans l'histoire de la physique moderne, en mots de conclusion, nous nous proposons donc finalement de présenter différentes pistes de recherche qui peuvent permettre d'approfondir, mais surtout d'élargir notre travail :

- Nous avons évoqué au cours de notre introduction générale le caractère incomplet de notre travail d'archives dans le fond Fock. Même si nous avons méthodologiquement essayé d'en extraire l'essentiel, nous n'excluons pas que des documents continuent d'apporter un éclairage important sur la pensée du physicien.
- Nous venons ici en conclusion de souligner l'incapacité – ou le manque de volonté – de Fock à traiter de l'ensemble des problématiques que son interprétation des théories modernes de la physique peut soulever, en particulier en ce qui concerne la question du réalisme. Indéniablement, son discours mérite d'être intégré dans une étude de philosophie des sciences relative au thème du réalisme en physique moderne afin d'en extraire toutes les implications possibles.
- Nous n'avons pas réalisé l'exégèse technique des interprétations par Fock des théories de la mécanique quantique et de la relativité générale. C'est en particulier ce second cas qui se présente comme le plus riche. Il nous semble alors qu'à l'appui non seulement de nos développements sur l'épistémologie du physicien soviétique mais aussi de sa riche monographie publiée en 1955, une telle étude se présente comme une poursuite logique de nos travaux.
- Dans le même sens, une étude plus complète consacrée à la production scientifique de Fock dans ses jeunes années, au prisme de la grille de lecture que nous avons établie, pourrait se révéler riche d'enseignements. En effet, nos considérations sur la méthode de Hartree-Fock ont mis *a posteriori* en lumière la façon dont les considérations épistémologiques du physicien soviétique peuvent avoir une influence directe sur sa pratique scientifique.
- De nos considérations sur l'antiréductionnisme de Fock – du caractère fondamental de cette position épistémologique pour sa pensée et de la claire connexion établie avec le volet dialectique de la philosophie marxiste – nous estimons qu'il est nécessaire non seulement d'observer si ce constat peut être étendu à d'autres physiciens se revendiquant de la même philosophie, mais aussi de réévaluer le rôle de la dialectique dans la pensée scientifique en URSS.

- Nous avons évoqué la dynamique de Fock dans le domaine de la relativité générale en soulignant qu'il y joue un rôle particulier en URSS. Alors que Blum, Lalli et Renn ont récemment appelé à reconsidérer le processus de « renaissance » de la discipline [BILR 2015], il nous semble intéressant de rebondir sur nos considérations en utilisant Fock comme point de départ à une analyse plus complète du phénomène au sein même de la physique soviétique.
- Au travers de notre étude, il est aussi apparu qu'une approche plus systématique des dynamiques internationales des physiciens soviétiques, à l'appui non seulement des archives locales mais aussi de celles de leurs hôtes étrangers, pouvait se révéler particulièrement intéressante non seulement d'un point de vue biographique, mais aussi afin de mieux saisir les modalités du fonctionnement de la science en URSS.

Œuvres de Fock

1922 :

- Fock 1922 **Fock V. A.**, « Ob odnom sluchaye polnogo resheniya integral'nogo uravneniya Volterra » [Sur un cas de résolution complète de l'équation intégrale de Volterra], *Trudy s"yezda fizikov v Nizhnem Novgorode*, 1922, pp. 62-64.

1923 :

- Fock 1923 **Fock V. A.**, « Conditionally periodic systems with commensurabilities and their adiabatic invariants », *Transactions of the Optical Institute in Petrograd*, Berlin, 1923, Vol. 3, N°16, p. 1-20.
- *Trudy GOI*, 1924, T. 3, N°19, pp. 1-24 (en russe).
- KuFo 1923 **Krutkov Yu. A. et Fock V.**, « Über das Rayleighsche Pendel » [Sur le pendule de Rayleigh], *Zeitschrift für Physik*, 1923, Vol. 13, N°3, pp. 195-202 / Disponible en anglais (Fock 2004)

1924 :

- Fock V. A.**, « Issledovaniye V.S.Ignatovskogo. Svyaz' mezhdru geometricheskoy i volnovoy optikoy i diffraktsiya gomotsentricheskogo puchka. Difraktsiya ob"yektiva pri lyubom otverstii. (Novoye izlozheniye) » [Travaux de V. S. Ignatov. Liens entre la géométrie, optique ondulatoire et diffraction d'un faisceau homocentrique. Diffraction d'un objectif à toute ouverture. (Nouvelle présentation)], *Trudy GOI*, 1924, T. 3, N°27, pp. 1-51.
- Fock V. A.**, « Osveshchennost' ot poverkhnostey proizvol'noy formy », [Illumination depuis une surface de forme arbitraire], *Trudy GOI*, 1924, T. 3, N°28, p. 1-12.
- *Zhurnal Russkogo fiziko-khimicheskogo obshchestva*, 1924, N°4, pp. 436-437 (Résumé).
- « Zur Berechnung der Beleuchtungsstärke », *Zeitschrift für Physik*, 1924, Vol. 28, N°1, pp. 102-113.

Fock 1924 **Fock V. A.**, « Über eine Klasse von Integralgleichungen » [Sur une classe d'équations intégrales], *Mathematische Zeitschrift*, 1924, Vol. 21, N°3-4, pp. 161-173.

- *Matematicheskiiy sbornik*, 1925, T. 32, pp. 519-528 (en russe).

1926 :

Fock V. A., « Resheniye odnoy zadachi teorii diffuzii po metodu konechnykh raznostey i prilozheniye ego k diffuzii sveta » [Solution d'un problème de la théorie de diffusion de la lumière par la méthode des différences finies et son application à la diffusion de la lumière], *Trudy GOI*, 1926, T. 4, N°34, pp.1-32.

Fock V. A., « Tochnyy raschet teplovogo soprotivleniya mnogozhil'nykh kabeley » [Calcul exact de la résistance à la chaleur de câbles multiples], dans *Sbornik rabot po prikladnoy fizike* [Recueil de travaux en physique appliquée], Moscou, NTO VSNKH, 1926, pp. 72-86.

- *Trudy Len. fiz.-tekhn. lab.*, N°3.

- « Über die Wärmeleitung in mehrphasigen Kabeln », *Archiv für Elektrotechnik*, 1926, Vol. 16, N°5, pp. 331-340.

Fock V. A., « Privedeniye ploskoy zadachi teorii uprugosti k integral'nomu uravneniyu Fredgol'ma », *Zhurnal Russkogo fiziko-khimicheskogo obshchestva*, 1926, T. 58, N°1, p. 11-20.

- « Réduction d'un problème d'élasticité plan à une équation d'intégrale de Fredholm », *Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 1926, T. 182, pp. 264-266 (Résumé).

Fock V. A. et Bursian V. R., « Elektromagnitnoye pole peremennogo toka v tsepi s dvumya zazemleniyami » [Champ électromagnétique d'un courant alternatif dans un circuit à deux prises de terre], *Zhurnal Russkogo fiziko-khimicheskogo obshchestva*, 1926, T. 58, N°2, p. 355-363.

Fock 1926a **Fock V. A.**, « Zur Schrödingerschen Wellenmechanik » [Sur la mécanique ondulatoire de Schrödinger], *Zeitschrift für Physik*, 1926, Vol. 38, N°3, pp. 242-250 / Disponible en anglais (Fock 2004)

- Fock 1926b **Fock V. A.**, « Über die invariante Form der Wellen und der Bewegungsgleichungen für einen geladenen Massenpunkt. » [Sur la forme invariante de l'équation d'onde pour un point massif chargé], *Zeitschrift für Physik*, 1926, Vol. 39, N°2-3, pp. 226-232 / Disponible en anglais (Fock 2004)

1927 :

- Fock 1927a **Fock V. A.**, « Matematicheskiy apparat teorii Shrëdingera » [Apparatus mathématique de la théorie de Schrödinger], dans *Osnovaniya novoy kvantovoy mekhaniki. Sbornik statey pod red. A. F. Ioffe* [Principes de la nouvelle mécanique quantique. Recueil d'articles sous la rédaction de A. F. Ioffé], Moscou – Léningrad : Gosizdat, 1927, pp. 111-125.

- Fock 1927b **Fock V. A.**, « O konformnom izobrazhenii chetyrekhugol'nika s nulevymi uglami na poluploskost' » [Sur la cartographie conformationnelle d'un quadrilatère avec des angles nuls sur le demi-plan], *Zhurnal Leningradskogo matematicheskogo obshchestva*, 1927, T. 1, N°2, pp. 147-168.

- « Über die konforme Abbildung eines Kreisvierecks mit verschwindenden Winkeln auf eine Halbebene », *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, 1929, Vol. 161, N°3, pp. 137-151.

- Fock V. A.**, « Zut Warmetheorie des electrischen Durchschlags » [Sur la théorie de la chaleur du claquage des isolants], *Archiv für Elektrotechnik*, 1927, Vol. 19, N°1, pp. 71-81.

- Dans *Sbornik rabot po prikladnoy fizike* [Recueil de travaux en physique appliquée], Moscou : VSNKH, 1928, pp. 52-71.

- *Trudy Len. fiz.-tekhn. lab.*, N°5.

1928 :

- Fock V. A. et Malyshev V. N.** « Elektricheskoye pole trekhfaznogo sektornogo kabelya i odnozhil'nogo kabelya so skruchenoy zhiloy » [Champ électrique d'un câble de secteur triphasé et d'un câble à cœur simple avec un

conducteur torsadé], dans *Sbornik rabot po prikladnoy fizike* [Recueil de travaux en physique appliquée], Moscou : VSNKH, 1928, pp. 110-121.

- *Trudy Len. fiz.-tekhn. lab.*, N°5.

- Fock 1928a **Fock V. A.**, « Bemerkung zur Quantelung eines harmonischen Oszillators im Magnetfeld » [Note sur la quantification d'un oscillateur harmonique dans un champ magnétique], *Zeitschrift für Physik*, 1928, Vol. 47, N°5-6, pp. 446-448 / Disponible en anglais (Fock 2004)
- Fock 1928b **Fock V. A.**, « Über die Beziehung zwischen den Integralen der quantenmechanischen Bewegungsgleichungen und der Schrödingerschen Wellengleichung » [Sur la relation entre les intégrales des équations quantiques du mouvement et l'équation de Schrödinger], *Zeitschrift für Physik*, 1928, Vol. 49, N°5-6, pp. 323-338 / Disponible en anglais (Fock 2004)
- Fock 1928c **Fock V. A.**, « Verallgemeinerung und Lösung der Diracschen statistischen Gleichung. » [Généralisation et solution de l'équation statistique de Dirac], *Zeitschrift für Physik*, 1928, Vol. 49, N°5-6, pp. 339-357 / Disponible en anglais (Fock 2004)
- BoFo 1928 **Born M. et Fock V. A.**, « Beweis des Adiabatenatzes. » [Démonstration du théorème adiabatique], *Zeitschrift für Physik*, 1928, Vol. 51, N°3-4, pp. 165-180 / Disponible en anglais (Fock 2004)
- Fock V. A., Malyshev V. N et Walther A. K.**, « Elektrische Felder einiger Hochspannungskabel » [Champs électriques de quelques câbles de haut voltage], *Archiv für Elektrotechnik*, 1928, Vol. 19, N°4, pp. 463-471.

1929 :

- Fock 1929a **Fock V. A.**, « 0 nesobstvennykh funktsiyakh v kvantovoy mekhanike » [Sur les fonctions « impropres » dans la mécanique quantique], *Zhurnal Russkogo fiziko-khimicheskogo obshchestva*, 1929, T. 61, N°1, p. 1-7 / Disponible en anglais (Fock 2004)
- Folv 1929a **Fock V. A. et Ivanenko D. D.**, « Quantum Geometry », *Nature*, Vol. 123, N°109, p. 838.

- Folv 1929b **Fock V. A. et Ivanenko D. D.**, « Über eine mögliche geometrische deutung der relativistischen quantentheorie » [Sur une possible géométrisation de la théorie quantique relativiste], *Zeitschrift für Physik*, 1929, Vol. 54, N°11-12, pp. 798-802.
- Folv 1929c **Fock V. A. et Ivanenko D. D.**, « Géométrie quantique linéaire et déplacement parallèle », *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, 1929, T. 188, pp. 1470-1472.
- Folv 1929d **Fock V. A. et Ivanenko D. D.**, « Zur Quantengeometrie » [Pour la géométrie quantique], *Physikalische Zeitschrift*, 1929, Vol. 30, N°19, pp. 648-651.
- Fock 1929b **Fock V. A.**, « Über den Begriff der Geschwindigkeit in der Diracschen Theorie des Elektrons » [Sur la notion de vitesse dans la théorie de l'électron de Dirac], *Zeitschrift für Physik*, 1929, Vol. 55, N°2, pp. 127-140.
- *Physikalische Zeitschrift*, 1929, Vol. 30, N°19, pp. 654.
- Fock 1929c **Fock V. A.**, « Geometrisierung der Diracschen Theorie des Elektrons. » [Géométrisation de la théorie des électrons de Dirac], *Zeitschrift für Physik*, 1929, Vol. 57, N°3-4, pp. 261-277.
- Fock 1929d **Fock V. A.**, « Sur les équations de Dirac dans la théorie de la relativité générale », *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, 1929, T. 189, N°1, pp. 25-28.
- Fock 1929e **Fock V. A.**, « L'équation d'onde de Dirac et la géométrie de Riemann », *Journal de physique et le radium*, 1929, T. 10, N°11, pp. 392-405.
- « Volnovo uravneni Dirak i geometri Rimana », *Zhurnal Russkogo fiziko-khimicheskogo obshchestva*, 1930, T. 62, N°2, pp. 133-152.
- Fock V. A.**, « Über die Invarianz der Naturgesetze » [Sur l'invariance des lois de la nature], *Die Naturwissenschaften*, 1929, Vol. 17, N°21, p. 388.
- Fock V. A.**, « Über die konforme Abbildung eines Kreisvierecks mit verschwindenden Winkeln auf eine Halbebene » [Sur la représentation conforme d'un carré circulaire avec des angles de fuite sur un demi-plan], *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, 1929, Vol. 161, N°3, pp. 137-151.

1930 :

- Fock V. A.**, « Skin-effekt v kol'tse kruglogo secheniya » [Effet de surface dans l'anneau d'une section circulaire], *Zhurnal Russkogo fiziko-khimicheskogo obshchestva*, 1930, T. 62, N°3, pp. 281-297.
- *Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion*, 1932, T.1, N°2, pp. 215-236.
- Fock 1930a **Fock V.A.**, « Näherungsmethode zur Lösung des quantenmechanischen Mehrkörperproblems » [Méthode approximative de solution du problème quantique à plusieurs corps], *Zeitschrift für Physik*, 1930, Vol. 61, N°1-2, pp. 126-148 / Disponible en anglais (Fock 2004)
- *Trudy GOI*, 1931, T. 5, N°51, pp. 1-28.
- Fock 1930a' - « Priblizhenny sposob resheniya kvantovoy zadachi mnogikh tel », *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1967, T. 93, N°2, pp. 342-363.
- Fock 1930b **Fock V. A.**, « 'Self-consistent field' mit Austausch für Natrium. » [“Champ auto-cohérent” avec échange pour le sodium], *Zeitschrift für Physik*, 1930. Vol. 62, N°11-12, pp. 795-805 / Disponible en anglais (Fock 2004)
- *Trudy GOI*, 1931, T. 5, N°51, pp. 29-39.
- Fock 1930c **Fock V. A.**, « Bemerkung zum Virialsatz. » [Commentaire sur le théorème du viriel], *Zeitschrift für Physik*, 1930, Vol. 63, N°11-12, pp. 855-858 / Disponible en anglais (Fock 2004)
- « Novyy vyvod teoremy viriala v kvantovoy mekhanike » [Nouvelle dérivation du théorème du viriel en mécanique quantique], *Zhurnal Russkogo fiziko-khimicheskogo obshchestva*, 1930, T. 62, N°4, pp. 379-382.
- Fock 1930d **Fock V. A.**, « La mécanique des photons. », *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, 1930, T. 190, N°24, p. 1399-1401.
- JoFo 1930 **Jordan P. et Fock V. A.**, « Neue Unbestimmtheitseigenschaften des electromagnetischen Feldes. » [Nouvelles relations d'indétermination pour les champs électromagnétiques], *Zeitschrift für Physik*, 1930, Vol. 66, N°3-4, pp. 206-209 / Disponible en anglais (Fock 2004)

1931 :

Bursian V. R. et Fock V. A., « Tables of the functions $\int_x^\infty K_0(x)dx, \int_x^\infty I_0(x)dx, e^x \int_x^\infty K_0(x)dx, e^{-x} \int_x^\infty I_0(x)dx$ », Tr. Fiz.-matem. in-ta im. V. A. Steklova, 1931, T. 2, N°1, pp. 1-10.

Fock V. A., « Die inneren Freiheitsgrade des Elektrons. » [Degrés de liberté internes de l'électron], Zeitschrift für Physik, 1931, Vol. 68, N°7-8, pp. 522-534.

Fock V. A., « Zur vorstehenden Bemerkung des Herrn E. Schrödinger » [Sur un précédent article de E. Schrödinger], Zeitschrift für Physik, 1931, Vol. 70, N°11-12, p. 811.

1932 :

Fock 1932a **Fock V. A.**, *Nachala kvantovoy mekhaniki* [Principes de la mécanique quantique], Léningrad : Izdatel'stvo KUBUCH, 1932, 251 p.

Fock 1932a' - *Nachala kvantovoy mekhaniki, izdaniye vtoroye, dopolnennoye* [Fondamentaux de la mécanique quantique, seconde édition, complétée], Moscou : Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, Izdatel'stvo « Nauka », 1976, 376 p.

Fock 1932An - *Fundamentals of Quantum Mechanics*, traduit du russe par Yankovsky E., Moscou : URSS Publishers, 1976, 367 p.

Fock 1932a'' - *Nachala kvantovoy mekhaniki, 5-e izd* [5^e édition], Moscou : Izdatel'stvo LKI/URSS, 1932, 376 p.

Fock 1932b **Fock V. A.**, *Mekhanika sploshnykh sredin* [Mécanique des milieux continus], Léningrad : Izdatel'stvo KUBUCH, 1932, 148 p.

Fock 1932c **Fock V. A.**, « Konfigurationsraum und zweite Quantelung. » [Espace de configuration et seconde quantification], *Zeitschrift für Physik*, 1932, Vol. 75, N°9-10, pp. 622-647.

- « Erratum », *Zeitschrift für Physik*, 1932, Vol. 76, N°11-12, p. 852.

Fock V. A., « Ob ostatochnom chlene nekotorykh formul kvadratur » [Sur le terme restant de certaines formules quadratiques], *Izvestiya Akademii*

nauk SSSR. VII seriya. Otdeleniye matematicheskikh i estestvennykh nauk, 1932, N°4, pp. 419–448

- Fock 1932d **Fock V. A.**, « Über die Gültigkeit des Virialsatzes in der Fermi-Thomas'schen Theorie. » [Sur l'applicabilité du théorème du viriel dans la théorie de Fermi-Thomas], *Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion*, 1932, Vol. 1, N°6, pp. 747-755.
- FoKr 1932 **Fock V. A. et Krutkov Yu. A.**, « Bemerkung zum Virialsatz der klassischen Mechanik. » [Commentaire sur le théorème du viriel en mécanique classique], *Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion*, 1932, T. 1, N°6, pp. 756-758 / Disponible en anglais dans (Fock 2004).
- FoPo 1932a **Fock V. A. et Podolsky B.**, « Zur Diracschen Quantenelektrodynamik. » [Sur l'électrodynamique de Dirac], *Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion*, 1932, Vol. 1, N°6, pp. 798-800 / Disponible en anglais (Fock 2004).
- FoPo 1932b **Fock V. A. et Podolsky B.**, - « On quantization of Electro-magnetic Waves and Interaction of Charges in Dirac Theory », *Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion*, 1932, T. 1, N°6, pp. 801-817 / Disponible dans (Fock 2004).
- PoFo 1932 **Podolsky B. et Fock V. A.**, « Derivation of Möller's Formula from Dirac's Theory », *Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion*, 1932, T. 2, N°3, pp. 275-277.
- DiFP 1932 **Dirac P. A. M., Fock V. A. et Podolsky B.**, « On Quantum Electrodynamics. » *Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion*, 1932, T. 2, N°6, pp. 468-479 / Disponible dans (Fock 2004).

1933 :

- Fock 1933a **Fock V. A.**, *Teoriya opredeleniya soprotivleniya gornykh porod po sposobu karotazha*. [Théorie de la détermination de la résistance des roches par le procédé de diagraphie], Moscou : Kniga po Trebovaniju, 1933, 65 p.
- Fock 1933b **Fock V. A.**, « K teorii pozitronov » [Sur la théorie des positrons], *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 1933, N°6, pp. 265-267 et pp. 267-271 (en allemand).
- Fock 1933c **Fock V. A.**, - « Über Austauschenergie. » [Sur l'énergie d'échange quantique], *Zeitschrift für Physik*, 1933, Vol. 81, N°3-4, pp. 195-208 / Disponible en anglais (Fock 2004)

- *Zhurnal Eksperimental'noy i Teoreticheskoy Fiziki*, 1934, T. 4, N°1, pp. 1-16 (en russe).

- *Trudy GOI*, T. 10, N°92, PP. 1-16 (en russe).

Fock V. A., « Zur Berechnung des elektromagnetischen Wechselstromfeldes bei ebener Begrenzung » [Sur le calcul du champ électromagnétique d'un courant alternatif à proximité d'une limite plane], *Annalen der Physik*, 1933, Vol. 5, N°17, pp. 401-420.

Fock 1933d **Fock V. A.**, « On the Electromagnetic Fields due to Variable Electric Charges and the Intensities of Spectrum Lines according to the Quantum Theory », *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 1933, Vol. 141, N°845, pp. 550-553.

Fock V. A. et Muschelishvili, « Sur l'équivalence de deux méthodes de réduction du problème plan biharmonique à une équation intégrale. », *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, 1933, T. 196, N°25, pp. 1947-1948.

1934 :

Fock V. A., « Novoye asimptoticheskoye vyrazheniye dlya besselevykh funktsiy » [Nouvelle expression asymptotiques pour les fonctions de Bessel], *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 1934, Vol. 1, N°3, pp. 99-102 et pp. 97-99 (en allemand).

FoPe 1934 **Fock V. A. et Petrashen M. I.**, « On the Numerical Solution of Generalized Equations of the Self-consistent Field », *Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion*, 1934, T. 6, N°1-4, pp. 368-414 / Disponible en anglais (Fock 2004)

- *Zhurnal Eksperimental'noy i Teoreticheskoy Fiziki*, 1934, T. 4, N°4, pp. 295-325 (en russe).

Fock 1934a **Fock V. A.**, « Priblizhennoye predstavleniye volnovykh funktsiy pronikayushchikh orbit. » [Représentation approximative des fonctions d'onde des orbitales pénétrantes], *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 1934. Vol.

1, N°5, pp. 241-244 et pp. 244-247 (en allemand) / Disponible en anglais (Fock 2004)

- *Trudy GOI*, 1934, T. 10, N°96, pp. 1-4 (en allemand).

Fock V. A., « Ob odnom opredelennom integrale, soderzhashchem tsilindricheskuyu funktsiyu $K_\nu(x)$. » [Sur une intégrale définie possédant une fonction cylindrique $K_\nu(x)$], *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 1934. Vol. 1, N°8, pp. 443-444.

Fock V. A., « O dvizhenii szhimayemoy zhidkosti. » [Sur le mouvement d'un fluide compressible], *Izvestiya Akademiya nauk SSSR*, 1934, N°1, pp. 129-134.

Fock 1934b **Fock V. A.**, « Za podlinno nauchnyu sovetskuyu knigu » [Pour un véritable livre scientifique soviétique], *SORENA*, 1934, N°3, pp. 132-136.

Fock 1934c **Fock V. A.**, « Zur Quantenelektrodynamik » [Sur l'électrodynamique quantique], *Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion*, 1934, T. 6, N°5, pp. 425-469 / Disponible en anglais (Fock 2004).

Fock 1934d **Fock V. A.**, « Über die Anwendbarkeit das quantenmechanischen Summensatzes. » [Sur l'applicabilité des règles de sommation en mécanique quantique], *Zeitschrift für Physik*, 1934, Vol. 89, N°11-12, pp. 744-749.

1935 :

FoPe 1935a **Fock V. A. et Petrashen M. I.**, « Calculation of the Self-Consistent field with exchange for Lithium », *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 1935, Vol. 3, N°7, pp. 295-296 et pp. 297-300 (en russe).

Fock 1935b **Fock V. A.**, « Atom vodoroda i neyevklidova geometriya. (Predvaritel'noye soobshcheniye). » [Atome d'hydrogène et géométrie non-euclidienne. Remarques préliminaires], *Izvestiya Akademiya nauk SSSR*, 1935, N°2, pp. 179-188 et 169-179 (en allemand) / Disponible en anglais (Fock 2004).

- « Zur Theorie des Wasserstoffatoms », *Zeitschrift für Physik*, 1934, Vol. 98, N°34, pp. 145-154.

- Fock V. A.**, « 0 dubletnom rasshcheplenii termov shchelochnykh metallov. » [Sur le fractionnement en doublet de l'état des atomes alcalins], *Zhurnal Eksperimental'noy i Teoreticheskoy Fiziki*, 1935, T. 5, N°10, pp. 891-906.
- Fock V. A.**, « 0 dvizhenii gazov v kanale stvola orudiya vo vremya vystrela. » [Sur le mouvement des gaz dans un canon de revolver durant un coup de feu], *Byul. sektsii nauchn.rabota. In-ta UMS RKKA*, 1935, N°2, pp. 30-72.
- Fock V. A.**, « Simmetriya atoma vodoroda. » [Symétrie de l'atome d'hydrogène], *SORENA*, 1935, N°5, pp. 3-9.
- Fock 1935c **Fock V. A.**, « Chto vnesla teoriya kvantov v osnovnyye predstavleniya fiziki. » [Qu'apporte la théorie quantique aux notions de base de la physique], *SORENA*, 1935, N°6, pp. 3-10.
- *Uchenyye zapiski LGU. Seriya Fizika*, 1936 N°2, pp. 77-84.
- FoPe 1935b **Fock V. A. et Petrashen M. I.**, « Analytical wave functions for berillium like atoms », *Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion*, 1935, T. 8, N°4, pp. 359-368.
- *Zhurnal Eksperimental'noy i Teoreticheskoy Fiziki*, 1936, T. 6, N°1, pp. 1-8.
- Fock 1935d **Fock V. A.**, « Predel'nyye zadachi teorii kvantov. » [Problèmes extrêmes de la théorie des quanta], *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1935, T. 15, pp. 341-346 / Disponible en anglais (Fock 2004).
- FoPe 1935c **Fock V. A. et Petrashen M. I.**, « Self-consistent field with exchange for lithium. », *Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion*, 1935, T. 8, N°5, pp. 547-561.

1936 :

- Fock 1936a **Fock V. A.**, *Osnovy kvantovoy mekhaniki i granitsy yeye prilozhimosti* (Principes de la mécanique quantique et limites de son applicabilité), Moscou : Vsesoyuznyy sovet nauchnykh inzhenerno-tekhnicheskikh obshchestva VSNITO, Fiziko-khimicheskii fakul'tet, N°4, 1935, 24 p.
- Fock V. A.**, « Adiabaticheskaya gipoteza » (Hypothèse adiabatique), *Fizicheskii slovar'*, T. 1, 1936, pp. 62-64.

- Fock V. A.**, « Volnovoye dvizheniye » (Mouvement ondulatoire), *Fizicheskiy slovar'*, T. 1, 1936, pp. 545-57.
- Fock 1936b **Fock V. A.**, « Problema mnogikh tel v kvantovoy mekhanike » [Problème à plusieurs corps dans la mécanique quantique], *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Seriya fizicheskaya*, 1936, N°1-2, pp. 351-362.
- *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1936, T. 16, N°7, pp. 943-954.
- Fock 1936c **Fock V. A.**, « Mozhno li schitat', chto kvantovo-mekhanicheskoye opisaniye fizicheskoy real'nosti yavlyayetsya polnym? (Vstupitel'naya stat'ya k odnoimennym stat'yam Eynshteyna i Bora) » [Peut-on considérer la description mécanique quantique de la réalité physique comme complète ? (Introduction aux articles d'Einstein et al. et de Bohr du même titre)], *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1936, T. 16, N°4, pp. 436-457.
- Fock 1936d **Fock V. A.**, « Printsipial'noye znacheniyе priblizhennykh metodov v teoreticheskoy fizike » [La signification fondamentale des méthodes d'approximations dans la physique théorique], *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1936, T. 16, N°8, pp. 1070-1083 / Disponible dans en anglais (Fock 2004)
- Fock 1936e **Fock V. A.**, « Osnovnyye idei kvantovoy mekhaniki » [Idées fondamentales de la mécanique quantique], *Priroda*, 1936, N°3, pp. 52-58.
- Fock 1936f **Fock V. A.**, « Fizicheskiy smysl volnovoy funktsii v kvantovoy mekhanike » [Signification physique de la fonction d'onde en mécanique quantique], *Priroda*, 1936, N°4, pp. 7-13.
- Fock 1936g **Fock V. A.**, « Prosteyshiyе prilozheniya kvantovoy mekhaniki i granitsy yeye primenimosti » [Applications les plus simples de la mécanique quantique et limites de son applicabilité], *Priroda*, 1936, N°5, pp. 48-51.

1937 :

- Fock 1937a **Fock V. A.**, *Konspekt lektsiy po kvantovoy mekhanike* [Notes de cours sur la mécanique quantique], Leningrad : Izdatel'stvo LGU, 1937, 241 p.
- Fock V. A.**, « Besprovolochnaya telegrafiya » [Télégraphe sans fil], dans Frank F. et Mises R. (éds.), *Differentsial'nyye i integral'nyye uravneniya matematicheskoy fiziki* [Équations différentielles et intégrales de la mathématique physique], seconde édition, traduit de l'allemand par

Gurevich (réd.), Léningrad-Moscou : ONTI. Glavnaya redaktsiya obshchetekhnicheskoy literatury, 1937, pp. 937-968.

Fock V. A., « Diraka uravnenie » [Équation de Dirac], *Fizicheskiy slovar'*, T. 2, pp. 140-145.

Fock V. A., « Kanonicheskoe prebrazovanie » [Transformation canonique], *Fizicheskiy slovar'*, T. 2, pp. 620-623.

Fock V. A., « Kvantovaya mekhanika » [Mécanique quantique], *Fizicheskiy slovar'*, T. 2, pp. 732-743.

Fock V. A., « Kvantovaya elektrodinamika » [Électrodynamique quantique], *Fizicheskiy slovar'*, T. 2, pp. 751-754.

Fock V. A., « Über die Bose-amplituden in der neutrinotheorie des lichtes » [Sur les amplitudes de Bose dans la neutrino-théorie de la lumière], *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 1935, Vol. 15, N°5, pp. 241-244.

Blokhintsev D. I., Fock V. A., Leontovich M. A., Rumer Yu. B., Tamm I. E. et Frenkel Ya. I., « 0 stat'ye N. L. Kasterina "Obobshcheniye osnovnykh uravneniy aerodinamiki i elektrodinamiki" » [Sur l'article de N. L. Kasterin "Généralisations des équations fondamentales de l'aérodynamique et de l'électrodynamique"], *Izdatel'stvo Akademii Nauk SSSR. Seriya fizika*, 1937, N°1-3, pp. 425-436.

Fock V. A., « Sobstvennoye vremya v klassicheskoy i kvantovoy mekhanike » [Temps propre en mécanique classique et quantique], *Izdatel'stvo Akademii Nauk SSSR. Seriya fizika*, 1937, N°4-5, pp. 551-568 / Disponible en anglais (Fock 2004).

- *Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion*, 1937, T. 12, N°4, pp. 404-425 (en allemand).

Fock V. A., « Elementarnyy kriteriy primenimosti uravneniy klassicheskoy mekhaniki » [Critère élémentaire de validité des équations de la mécanique classique], *Uchenyye zapiski LGU. Seriya Fizika*, 1937, T. 3, N°14, pp. 5-9.

Fock 1937b **Fock V. A.**, « Metod funktsionalov v kvantovoy elektrodinamike » [Méthode des fonctionnelles en électrodynamique quantique], *Uchenyye zapiski*

LGU. Seriya Fizika, 1937, T. 3, N°17, pp. 109-124 / Disponible en anglais (Fock 2004).

Fock V. A., « O nesostoyatel'nosti neytrinnoy teorii sveta » [Sur l'échec d'une neutrino-théorie de la lumière], *Zhurnal Eksperimental'noy i Teoreticheskoy Fiziki*, 1937, T. 7, N°1, pp. 1-6.

Fock V. A., « O stat'ye A.A.Sokolova: "O vozmozhnosti postroyeniya neytrinnoy teorii sveta" » [Sur l'article de Sokolov : "Sur la possibilité de construire une neutrino-théorie de la lumière"], *Zhurnal Eksperimental'noy i Teoreticheskoy Fiziki*, 1937, T. 7, N°9-10, p. 1068.

Fock 1937c **Fock V. A.**, « K stat'ye K.V.Nikol'skogo: "Printsipy kvantovoy mekhaniki". » [Sur l'article de K. V. Nikol'skiy : Principes de la mécanique quantique], *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1937, T. 17, N°4, pp. 552-554.

Fock V. A., « Kritisches zur Neutrinotheorie des Lichtes » [Critique de la neutrino-théorie de la lumière], *Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion*, 1937, T. 11, N°1, pp. 1-8.

Fock V. A., « The neutrino theory of light », *Nature*, 1937, Vol. 140, N°3533, p. 113.

1938 :

Fock V. A., « Kvantovaya mekhanika » [Mécanique quantique], dans *Matematika i estestvoznaniye v SSSR. Ocherki razvitiya matematicheskikh i estestvennykh nauk v SSSR za dvadtsat' let* [Mathématiques et sciences naturelles en URSS. Compte-rendu des développements des mathématiques et des sciences naturelles en URSS depuis 20 ans], Moscou-Léningrad : AN SSSR, 1938, pp. 165-176.

Fock V. A., « Sobstvennye znacheniya » [Valeurs propres], *Fizicheskiy slovar'*, T. 4, pp. 944-946.

Fock V. A., « Eshche o neytrinnoy teorii sveta » [Encore sur la neutrino-théorie], *Zhurnal Eksperimental'noy i Teoreticheskoy Fiziki*, 1938, T. 8, N°7, pp. 771-778.

- Fock 1938a **Fock V. A.**, « Ob odnoy stat'ye K.V.Nikol'skogo i ob ego otvete na kritiku etoy stat'i. » [Sur un article de K. V. Nikol'skiy et sa réponse à la critique], *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1938, T. 19, N°1, pp. 139-140.
- Fock 1938b **Fock V. A.**, « K diskussii po voprosam fiziki » [Au sujet des discussions sur les questions en physique] *Pod znamenem marksizma*, 1938, N°1, pp. 140-159.

1939 :

- Fock 1939a **Fock V. A.**, « Dolg uchenogo » [Devoir du scientifique], *Izvestia sovetov deputatov trudyashchikhsya SSSR*, 30 janvier 1939, N°24 (6794), p. 3.
- Fock 1939b **Fock V. A.**, « Za tesnyy kontakt s molodezh'yu » [Pour des contacts étroits avec la jeunesse], *Krasnaya gazeta*, 3 février 1939, N°27 (6298).
- Fock 1939c **Fock V. A.**, « O dvizhenii konechnykh mass v obshchey teorii otноситel'nosti », *Zhurnal Eksperimental'noy i Teoreticheskoy Fiziki*, 1939, T. 9, N°4, pp. 375-410.
- Fock 1939c' - « Sur le mouvement des masses finies d'après la théorie de gravitation einsteinienne », *Journal of Physics (USSR)*, 1939, Vol. 1, N°2, pp. 81-116.
- Fock 1939d **Fock V. A.**, « Velikiy fizik sovremennosti. (K 60-ti letiyu A.Eynshteyna) » [Un grand physicien de notre temps (Pour le 60^e anniversaire d'Einstein)], *Leningradskiy Universitet*, 23 mars 1939, N°13.
- Fock 1939e **Fock V. A.**, « Al'bert Eynshteyn (Po povodu 60-letnya sso dnya ego rozhdeniya) » [Albert Einstein (Pour le 60^e anniversaire de sa naissance)], *Priroda*, 1939, N°7, pp. 95-97.
- Fock V. A.**, « Zakon N'yutona i zakon Eynshteyna » [Loi de Newton et loi d'Einstein], dans *120 let Leningradskogo gosudarstvennogo universiteta* [120 ans de l'Université d'Etat de Léningrad], conférence organisée du 16 au 20 avril 1939, Léningrad. Léningrad : Izdatel'stvo Leningradskiy Gosudarstvennyy Universitet, 1939, pp. 16-17.

1940 :

- Fock V. A.**, « Difraktsiya voln ot izognutoy reshetki » [Diffraction des ondes dans un treillis courbé], *Zhurnal Eksperimental'noy i Teoreticheskoy Fiziki*, 1940, T. 10, N°2, pp. 211-231.

- « Diffraction of waves from a curved lattice », *Journal of Physics (USSR)*, 1940, Vol. 3, N°2, pp. 125-140.

Fock V. A., « Novyy vyvod vektornoy modeli » [Nouvelle dérivation du modèle de vecteur], *Zhurnal Eksperimental'noy i Teoreticheskoy Fiziki*, 1940, T. 10, N°4, pp. 383-392.

FoVP 1940 **Fock V. A., Veselov M. G. et Petrashen M. I.**, « Nepolnoye razdeleniye peremennykh dlya dvukhvalentnykh atomov » [Incomplète séparation des variables pour les atomes bivalents], *Zhurnal Eksperimental'noy i Teoreticheskoy Fiziki*, 1940, T. 10, N°7, pp. 723-739 / Disponible en anglais (Fock 2004).

Fock 1940 **Fock V. A.**, « 0 volnovykh funktsiyakh mnogoelektronnykh sistem » [Sur la fonction d'onde des systèmes à plusieurs électrons], *Zhurnal Eksperimental'noy i Teoreticheskoy Fiziki*, 1940, T. 10, N°9-10, pp. 961-979 / Disponible en anglais (Fock 2004).

Semenov N., Sobolev S., Fock V., Alikhanov A., Landau L., Lifshits E., Shal'nikov A., Brilliantov N. et Strelkov P., « "Populyarizatsiya" nauki v zhurnale "Zvezda". » [Popularisation de la science dans le journal « Zvezda »], *Sovetskaya nauka*, 1940, N°1, pp. 177-179.

1941 :

Fock V. A., « Teoreticheskoye issledovaniye provodimosti kruglogo otverstiya v peregorodke, postavlennoy poperek trubyy. » [Une investigation théorique de la conductivité acoustique d'une ouverture circulaire dans un mur au travers d'un tube], *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1941, Vol. 31, N°9, pp. 875-879.

- « A theoretical investigation of the acoustical conductivity of a circular aperture in a wall put across the tube », *Comptes rendus de l'Académie des Sciences de l'URSS*, 1941, Vol. 31, N°9, pp. 875-878.

Fock V. A., « Ob integralakh dvizheniya tsentra dvukh konechnykh mass v obshchey teorii otnositel'nosti. », *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1941, Vol. 32, N°1, pp. 28-30.

- « Sur les intégrales du centre de gravité dans le problème relativiste de deux masses finies », *Comptes rendus de l'Académie des Sciences de l'URSS, 1941*, Vol. 32, N°1, pp. 25-27.

1942 :

Fock V. A., « O nekotorykh integral'nykh uravneniyakh matematicheskoy fiziki. », *Doklady Akademii nauk SSSR, 1942*, Vol. 36, N°4-5, pp. 147-151.

- « Sur certaines équations intégrales de physique mathématique », *Comptes rendus de l'Académie des Sciences de l'URSS, 1942*, Vol. 36, N°4-5, pp. 133-136.

1943 :

Fock V. A., « O razlozhenii proizvol'noy funktsii v integral po funktsiyam Lezhandra s kompleksnym znachkom », *Doklady Akademii nauk SSSR, 1943*, Vol. 39, N°7, pp. 279-283 / Disponible en anglais (Fock 2004).

- « On the Representation of an Arbitrary Function by an Integral Involving Legendre's Function with a Complex Index », *Comptes rendus de l'Académie des Sciences de l'URSS, 1943*, Vol. 39, N°7, pp. 253-256.

Fock V. A., « Elektricheskoye pole v uglublenii v provodyashchey ploskosti », *Doklady Akademii nauk SSSR, 1943*, Vol. 40, N°9, pp. 391-403.

- « Electrical field near a depression in a conducting plane », *Comptes rendus de l'Académie des Sciences de l'URSS, 1943*, Vol. 40, N°9, pp. 343-345.

1944 :

Fock V. A., « O nekotorykh integral'nykh uravneniyakh matematicheskoy fiziki » [Sur quelques équations intégrales de physique mathématique], *Matematicheskii sbornik, 1944*, T. 14, N°1-2, pp. 3-50.

1945 :

Fock V. A., « Difraktsiya radiovoln vokrug zemnogo shara », *Doklady Akademii nauk SSSR, 1945*, Vol. 46, N°8, pp. 343-346.

- « Diffraction of radio-waves around the Globe », *Comptes rendus de l'Académie des Sciences de l'URSS*, 1943, Vol. 46, N°8, pp. 310-313.

Fock V. A., « Difraktsiya radiovoln vokrug zemnoy poverkhnosti », *Zhurnal Eksperimental'noy i Teoreticheskoy Fiziki*, 1945, T. 15, N°9, pp. 479-476.

- *Vestnik Akademii Nauk SSSR*, 1945, N°4, p. 116 (résumé).

- « Diffraction of radio waves around the Earth's surface », *Journal of Physics (USSR)*, 1945, Vol. 9, N°4, pp. 255-266.

Fock V. A., « Raspredeleniye tokov, vzbuzhdayemykh ploskoy volnoy na poverkhnosti provodnika », *Zhurnal Eksperimental'noy i Teoreticheskoy Fiziki*, 1945, T. 15, N°12, pp. 693-702.

- « The distribution of currents induced by plane wave on the surface of a conductor », *Journal of Physics (USSR)*, 1945, Vol. 10, N°2, pp. 130-136.

1946 :

Fock V. A. et Krylov N. S., « 0 sootnoshenii neopredelennosti dlya energii i vremeni » [Sur les relations d'indétermination pour l'énergie et le temps], dans *Nauchnaya sessiya 1946 g. Tezisy dokladov po sektsii fizicheskikh nauk* [Session scientifique de 1946. Résumé d'exposés pour la session de physique], Leningrad : Izdatel'stvo Leningradskiy Gosudarstvennyy Universitet, 1946, pp. 5-7.

Fock V. A., *Tablitsy funktsiy Eyri* [Tables de fonctions d'Airy], Moscou : Inf. otd. NII, 1946, 53 p.

1947 :

Fock 1947a **Fock V. A.**, « Sistema Kopernika i sistema Ptolomeya v svete obshchey teorii otnositel'nosti », dans *Nikolay Kopernik*, Moscou : Izdatel'stvo Akademii Nauk SSSR, 1947, pp. 180-186.

Fock 1947a' - « Le système de Ptolémée et le système de Copernic à la lumière de la théorie générale de la relativité », *Questions scientifiques*, 1952, T. 1, pp. 147-154.

- « Das Kopernikanische und das Ptolemaesche System im Lichte der allgemeinen Relativitätstheorie », Sowjetwissenschaft. Naturwissenschaftliche Abteilung, 1953, Vol. 6, N°5-6, pp. 805-809.

Fock 1947b **Fock V. A.**, « Mnogoelektronnaya zadacha kvantovoy mekhaniki i stroyeniye atoma. » [Problème à corps multiples en mécanique quantique et structure de l'atome], dans *Yubileynyy sbornik, posvyashchenny tridtsatiletiyu Velikoy Oktyabr'skoy so tsialisticheskoy revolyutsii, chast' 1* [Recueil jubilé consacré au 30^e anniversaire de la Révolution socialiste d'Octobre, partie 1], Leningrad : Izdatel'stvo Akademii Nauk SSSR, 1947, pp. 255-284.

FoKr 1947 **Fock V. A. et Krylov N. S.**, « 0 dvukh osnovnykh tolkovaniyakh sootnosheniya neopredelennosti dlya energii i vremeni » [Sur les deux principales interprétations des relations d'indétermination pour l'énergie et le temps], *Zhurnal Eksperimental'noy i Teoreticheskoy Fiziki*, 1947, T. 17, N°2, pp. 93-107/ Disponible en anglais (Fock 2004).

- « On the Uncertainty Relation between Time and Energy », *Journal of Physics (USSR)*, 1947, T. 11, N°2, pp. 112-120.

Fock V. A., « Novyye metody v teorii difraktsii », *Vestnik Leningradskiy Gosudarstvennyy Universitet*, 1947, N°4, pp. 5-11.

- « New methods in diffraction theory », *Philosophical Magazine*, 1948, Vol. 39, N°289, p. 149-155.

Fock V. A., « A note on the paper "Second quantization and representation theory" [by Corson E. M.] », *Physical Review*, Vol. 72, N°8, p. 737.

1948 :

Fock V. A., « Zakon vseirnogo tyagoteniya i zakon dvizheniya mass v teorii Eynshyteyna » [Loi universelle de la gravité et loi du mouvement des masses dans la théorie d'Einstein], dans *Nauchnaya sessiya 1948 g. Tezisy dokladov po seksii fizicheskikh nauk* [Session scientifique de 1948. Résumé d'exposés pour la session de physique], Leningrad : Izdatel'stvo Leningradskiy Gosudarstvennyy Universitet, 1948, pp. 14-16.

Fock V. A. et Leontovich M. A., « Resheniye zadachi o rasprostraneniі elektromagnitnykh voln vdol' poverkhnosti zemli po metodu parabolicheskogo uravneniya » [Solution du problème de la propagation des ondes électromagnétiques le long de la surface de la terre par la méthode des équations paraboliques], dans Vvedenskiy V. A. (réd.), *Issledovaniya po rasprostranenyu radiovoln Sb.2*. [Études sur la propagation des ondes radio, recueil n°2], Moscou-Léningrad : Izdatel'stvo Akademii Nauk SSSR, 1948, pp. 13-39.

Fock V. A., « Rasprostraneniye pryamoy volny vokrug zemli pri uchete difraktsii i refraktsii » [Propagation d'une onde directe autour de la terre en prenant compte de la diffraction et de la réfraction], dans Vvedenskiy V. A. (réd.), *Issledovaniya po rasprostranenyu radiovoln Sb.2*. [Études sur la propagation des ondes radio, recueil n°2], Moscou-Léningrad : Izdatel'stvo Akademii Nauk SSSR, 1948, pp. 40-68.

- *Izvestiya Akademiya nauk SSSR. Seriya fizicheskaya*, 1948, Vol. 12, N°2, pp. 81-97.

Fock V. A. et Grinberg G. A., « K teorii beregovoy refraktsii elektromagnitnykh voln » [Vers une théorie de la réfraction côtière des ondes électromagnétiques], dans Vvedenskiy V. A. (réd.), *Issledovaniya po rasprostranenyu radiovoln Sb.2*. [Études sur la propagation des ondes radio, recueil n°2], Moscou-Léningrad : Izdatel'stvo Akademii Nauk SSSR, 1948, pp. 69-96.

Fock V. A., « O tolkovanii volnovoy funktsii, obrashchennoy k proshlomu » [Sur l'interprétation de la fonction d'onde comme dirigée vers le passé], *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1948, Vol. 60, N°7, pp. 1157-1159.

- *Zhurnal Eksperimental'noy i Teoreticheskoy Fiziki*, 1948, T. 18, N°8, pp. 737-740.

Fock V. A., « O dvizhenii ionov v plazme » [Sur le mouvement des ions dans un plasma], *Zhurnal Eksperimental'noy i Teoreticheskoy Fiziki*, 1948, T. 18, N°11, pp. 1049-1055.

Fock V. A., « Zakon otrazheniya Frenelya i zakony difraktsii » [Loi de réflexion de Fresnel et lois de diffraction], *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1948, T. 36, N°3, pp. 308-327.

1949 :

Fock V. A., « Pole ot vertikal'nogo i gorizontal'nogo dipolya, pripodnyatogo nad poverkhnost'yu zemli » [Champ d'un dipôle vertical et d'un dipôle horizontal, élevé au dessus de la surface de la terre], *Zhurnal Eksperimental'noy i Teoreticheskoy Fiziki*, 1949, T. 19, N°10, pp. 916-929.

Fock 1949 **Fock V. A.**, « Osnovnyye zakony fiziki v svete dialekticheskogo materializma. » [Lois fondamentales de la physique à la lumière du matérialisme dialectique], *Vestnik Leningradskiy Gosudarstvennyy Universitet*, 1949, N°4, pp. 34-47.

Fock V. A., « K filosofskoy diskussii po voprosam kvantovoy mekhaniki » [Sur les discussions philosophiques en mécanique quantique], *Leningradskiy Universitet*, N°2, 12 janvier 1949.

1950 :

Fock 1950a **Fock V. A.**, « Problema dvizheniya mass v teorii tyagoteniya Eynshteyna. » [Le problème du mouvement des masses dans la théorie de la gravitation d'Einstein] dans *Sbornik, posvyashchenny semidesyatiletuyu akademika A.F.Ioffe* [Collection, dédiée au soixantième anniversaire de l'Académicien A. F. Ioffé], Moscou : Izdatel'stvo Akademii Nauk SSSR, 1950, pp. 31-43.

Fock 1950b **Fock V. A.**, « Nekotoryye primeneniya idey neyevklidovoy geometrii Lobachevskogo v fizike » [Quelques applications des idées de la géométrie non-euclidienne de Lobatchevsky en physique], dans Kotel'nikov A. P. et Fock V. A. (éds.), *Nekotoryye primeneniya idey Lobachevskogo v mekhanike i fizike* [Quelques applications des idées de Lobachevsky en mécanique et en physique], Moscou – Léningrad : Gostekhizdat, 1950, pp. 48-86.

Fock V. A., « Nikolay Sergeyeovich Krylov », dans Fock V. A. (réd.), *Krylov N. S. Raboty po obosnovaniyu statisticheskoy fiziki* [Krylov N. S. Travaux sur la

confirmation de la physique statistique] Moscou-Léningrad : Izdatel'stvo Akademii Nauk SSSR, 1950, pp. 3-4.

Fock V. A. et Migdal A. B., « Vzglyady N.S. Krylova na obosnovaniye statisticheskoy fiziki » [Vues de N. S. Krylov sur la confirmation de la physique statistique], dans Fock V. A. (éd.), *Krylov N. S. Raboty po obosnovaniyu statisticheskoy fiziki* [Krylov N. S. Travaux sur la justification de la physique statistique], Moscou-Léningrad : Izdatel'stvo Akademii Nauk SSSR, 1950, pp. 5-15.

Fock V. A., « Primneniye dvukhelektronnykh funktsiy v teorii khimicheskoy svyazi » [Application de la fonction d'onde à deux électrons dans la théorie de la liaison chimique], *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1950, Vol. 73, N°4, pp. 735-738/ Disponible en anglais (Fock 2004).

Fock V. A., « Teoriya rasprostraneniya radiovoln v neodnorodnoy atmosfere dlya pripodnyatogo istochnika » [Théorie de la propagation des ondes radio dans un atmosphère inhomogène pour une source soulevée], *Izvestiya Akademiya nauk SSSR. Seriya fizicheskaya*, 1950, Vol. 14, N°1, pp. 70-94.

Fock V. A., « Obobshcheniye otrazhatel'nykh formul na sluchay otrazheniya proizvol'noy volny ot poverkhnosti proizvol'noy formy » [Généralisation des formules de réflexion pour la réflexion d'une onde arbitraire à la surface d'une forme arbitraire], *Zhurnal Eksperimental'noy i Teoreticheskoy Fiziki*, 1948, T. 20, N°11, pp. 961-978.

Fock V. A., « Rasprostraneniye radiovoln v neodnorodnoy atmosfere (Referat doklada) » [Propagation des ondes radio dans une atmosphère inhomogène (Résumé de présentation)], *Vestnik Akademii Nauk SSSR*, 1950, N°3, p. 106.

1951 :

Fock V. A., « Difraktsiya Frenelya ot vypuklykh tel » [Diffraction de Fresnel à partir de corps convexes], dans Shpol'skiy E. V., *Problemy fizicheskoy optiki i drugiye voprosy fiziki. Sbornik statey, posvyashchenny pamyati S.I.Vavilova* [Problèmes d'optique physique et autres problèmes de

physique. Collection d'articles consacrés à la mémoire de SI Vavilov], Moscou : Gostekhizdat, 1951, pp. 194-203.

- *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1951, T. 43, N°4, pp. 587-599.

- Dans *Abhandlung aus der Sowjetischen Physik. Folge 2* [Traité de physique soviétique. Volume 2], Berlin : Verlag Kultur und Fortschritt, 1951, pp. 7-18.

Fock 1951a **Fock V. A.**, « Kritika vzglyadov Bora na kvantovuyu mekhaniku. » [Critique des vues de Bohr sur la mécanique quantique], *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1951, T. 45, N°1, pp. 3-14.

Fock 1951a' - « Kritik der Anschauungen Bohrs über die Quantenmechanik », *Sowjetwissenschaften Naturwissenschaftliche Abteilung*, 1952, Vol. 5, N°1, pp. 123-132.

Fock 1951a'' - *Chechoslovatskiy fizicheskiy zhurnal*, 1955, T. 5, N°4, pp. 436-448.

- *Československý časopis pro fyziku*, 1956, T. 6, pp. 113-122.

Fock 1951b **Fock V. A.**, Recension de « Mandelshtam, L. I., Polnoe sobranie trudov, Vol. 5, Moscou, 1950 » [Mandelstam L. I., Œuvres complètes, Vol. 5], *Uspekhi fizicheskikh nauk*, Vol. 45, N°9, pp. 160-163.

1952 :

Fock 1952 **Fock V. A.**, « O tak nazyvayemykh ansamblyakh v kvantovoy mekhanike » [Sur les "ensembles" en mécanique quantique], *Voprosy filosofii*, 1952, N°4, pp. 170-174.

- *Vestnik Leningradskiy Gosudarstvennyy Universitet*, 1952, N°6, pp. 67-73.

Fock V. A., « Massa i energiya », [Masse et énergie], *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1952, T. 48, N°2, pp. 161-165.

1953 :

Fock V. A., « Sistema Kopernika i sistema Ptolomeya v svete obshchey teorii otnositel'nosti – Referat doklada » [Le système de Ptolémée et le système de Copernic à la lumière de la théorie générale de la relativité - Rapport d'exposé], *Vestnik Akademii Nauk SSSR*, 1953, N°6, pp. 26-28.

- Fock V. A.**, « Aleksey Nikolayevich Krylov », *Trudy Voyenno-morskaya akademiya korablestroyeniya i vooruzheniya*, 1953, N°6, pp. 151-160.
- Fock 1953a **Fock V. A.**, « Protiv nevezhestvennoy kritiki sovremennykh fizicheskikh teoriy » [Contre la critique ignorante des théories physiques modernes], *Voprosy filosofii*, 1953, N°1, pp. 168-174.
- Fock 1953b **Fock V. A.**, « Sovremennaya teoriya prostranstva i vremeni. », [Théorie moderne de l'espace et du temps], *Priroda*, 1953, N°12, pp. 13-26.
- Fock 1953b' - « Współczesna teoria przestrzeni i czasu », *Myśl Filozoficzna*, 1953, N°4, pp. 162-182.
- « Die moderne Theorie von Raum und Zeit », *Sowjetwissenschaft. Naturwissenschaftliche Abteilung*, 1954, Vol. 7, N°4, pp. 525-544.
- Fock V. A.**, « Das Kopernikanische und das Ptolemaesche System im Lichte der allgemeinen Relativitätstheorie » [Le système de Ptolémée et le système de Copernic à la lumière de la théorie générale de la relativité], *Sowjetwissenschaft. Naturwissenschaftliche Abteilung*, 1953, Vol. 6, N°5-6, pp. 805-809.

1954 :

- Fock 1954a **Fock V. A.**, « Ob uravnenii Shredingera dlya atoma geliya » [Sur l'équation de Schrödinger pour l'atome d'hélium], *Izdatel'stvo Akademii Nauk SSSR. Seriya fizika*, 1954, T. 18, N°2, pp. 161-172 / Disponible en anglais (Fock 2004).
- *Det Kongelige Norske Videnskabers selskabs forhandling*, 1958. Vol. 31, N°22-23, pp. 138-152.
- Fock 1954b **Fock V.A.**, « O rabote F. I. Franklya "Nekotoryye printsipial'nyye zamechaniya k obshchey teorii otnositel'nosti" ». [Sur l'article de F. I. Frankl' « Quelques remarques de principe pour la théorie de la relativité générale »], *Uspekhi matematicheskikh nauk*, 1954, T. 9, N°4, pp. 229-236.
- Fock V. A.**, « Predisloviye » [Préface], dans Faddeyeva V. N. et Terent'yev, « Tablitsy znacheniy integrala veroyatnostey ot kompleksnogo podkhoda » [Tables de valeurs d'une intégrale de probabilité d'argument complexe], Moscou : Gostekhizdat, 1954. 268 pp.

1955 :

- Fock 1955a **Fock V. A.**, *Teoriya prostranstva, vremeni i tyagoteniya* [La théorie de l'espace, du temps et de la gravitation], 1955, Moscou : Gostekhizdat, 504 p.
- Fock 1955An - *The Theory of Space, Time and Gravitation*, 1959, Londres : Pergamon Press, 412 p.
- Fock 1955All - *Theorie von Raum, Zeit und Gravitation*, 1960, Berlin : Academic Verlag, 501 p.
- *Teoriya prostranstva, vremeni i tyagoteniya. Izdanie 2-e, dopolnennoye*. [Seconde édition, révisée], Moscou : Fizmatgiz, 1961, 564 p.
- Fock 1955Ro - *Teoria spaliutul, timputul si gravitatul*, Bucarest : Academia RPP, 1962, 664 p.
- Fock 1955a' - *The Theory of Space, Time and Gravitation, 2nd Revised Edition*, 1964, Londres : Pergamon Press, 448 p.
- Fock 1955b **Fock V. A.**, « Otnositel'nosti teoriya. » [Théorie de la relativité], *Bol'shaya Sovetskaya Entsiklopediya* [Grande encyclopédie soviétique], 2^e édition, 1955, T. 31, pp. 405-411.
- Fock V. A.**, « Sistema Kopernika i sistema Ptolomeya v svete sovremennoy teorii tyagoteniya. » [Le système de Ptolémée et le système de Copernic à la lumière de la théorie moderne de la gravitation], dans *Nikolay Kopernik. Sbornik statey i materialov k 410-let so dnya smerti (1543-1953)* [Nicolas Copernic. Recueil d'articles et de matériaux pour les 410 de sa mort], Moscou : Izdatel'stvo Akademii Nauk SSSR, 1955, pp. 57-72.
- Dans *Sesta Kopernikovska*, Varsovie : Panstwowe wydawictwo naukowe, 1955, pp. 81-108 (en polonaise).
- Fock 1955c **Fock V. A. et Infeld L.**, « O garmonicheskikh sistemakh v teorii otnositel'nosti. (Perepiska V. A. Foka i L. Infel'da) » [Sur les systèmes de coordonnées harmoniques en théorie de la relativité (Correspondance entre V. A. Fock et L. Infeld)], *Voprosy filosofii*, 1955, N°3, pp. 155-157.

- Fock 1955d **Fock V. A.**, « Ponyatiya odnorodnosti, kovariantnosti i otnositel'nosti v teorii prostranstva i vremeni. » [Notions d'homogénéité, de covariance et de relativité dans la théorie de l'espace et du temps], *Voprosy filosofii*, 1955, N°4, pp. 131-135
- *Československý časopis pro fyziku*, 1956, N°6, pp. 227-241.
- « Homogenität, Kovarianz und Relativität », *Czechoslovak Journal of Physics*, 1957, Vol.7, pp. 255-261.
- Fock 1955e **Fock V. A.**, « Uber philosophische Fragen der modernen Physik » [Sur des aspects philosophiques de la physique moderne], *Deutsche Zeitschrift für Philosophie*, 1955, Vol. 3, N°6, pp. 736-757.

1956 :

- Fock 1956a **Fock V. A.**, « Polveka velikogo otkrytiya. O teorii otnositel'nosti Al'berta Eynshteyna. » [Un demi-siècle d'une grande découverte. Sur la théorie de la relativité par Einstein], *Pravda*, N°106, 15 janvier 1956.
- Fock V. A.**, « Primeneniyye metoda konturnykh integralov k nekotorym zadacham teorii diffraktsii. » [Application de la méthode des intégrales de contour à quelques problèmes de la théorie de la diffraction], dans *Trudy III Vsesoyuznogo matematicheskogo s'yezda, T.2. Kratkoye sodержaniyye obzornykh i sektionnykh dokladov*, Moscou : Izdatel'stvo Akademii Nauk SSSR, 1956, pp. 98-99.
- Fock 1956b **Fock V. A.**, « Uravneniya dvizheniya sistemy konechnykh mass s uchetom ikh vnutrenney struktury i vrashcheniya » [Equation du mouvement des masses finies prenant en considération leur structure interne et leur rotation], *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1956, T. 59, N°1, pp. 67-69.
- Publié dans Tamm I. (éd.), *Eynshteyn i sovremennaya fizika*, Moscou : Gostekhizdat, 1956, pp. 160-162.
- Fock 1956c **Fock V. A.**, « Zamechaniya k tvorcheskoy avtobiografii Al'berta Eynshteyna. » (Remarques sur l'autobiographie créative d'Albert Einstein), *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1956, T. 59, N°1, pp. 107-117.
- Fock 1956d - Publié dans Tamm I. (éd.), *Eynshteyn i sovremennaya fizika*, Moscou : Gostekhizdat, 1956, pp. 72-85.

- Fock 1956e **Fock V. A.**, « Zamechaniye k rabote F. I. Franklya "O korrektnosti postanovki zadachi Koshi i o svoystvakh garmonicheskikh koordinat v obshchey teorii otnositel'nosti" ». [Remarques sur le travail de de F. I. Frankl' « Sur l'exactitude de la formulation du problème de Cauchy et les propriétés des coordonnées harmoniques dans la relativité générale »], *Uspekhi matematicheskikh nauk*, 1956, T. 11, N°3, pp. 197-198.
- Fock V. A.**, « Sistema otscheta » [Système de référence], *Bol'shaya Sovetskaya Entsiklopediya* [Grande encyclopédie soviétique], 2^e édition, 1956, T. 39, p. 158.
- Fock V. A.**, « Priblizhennaya formula dlya dal'nosti gorizonta pri nalichii sverkhrefraktsii. » [Formule d'approximation pour la distance de l'horizon en présence de super réfraction], *Radiotekhnika i elektronika*, 1956, T. 1, N°5, pp. 560-574.
- Fock V. A., Vainshtein L. A. et Belkina M. G.**, « O rasprostranenii radiovoln vblizi gorizonta pri sverkhrefraktsii. » [Sur la propagation des ondes radio à proximité de l'horizon d'une super réfraction], *Radiotekhnika i elektronika*, 1956, T. 1, N°5, pp. 575-592.
- Fock 1956f **Fock V. A.** « Sur le mouvement des corps en rotation d'après la théorie de la gravitation d'Einstein », *Helvetica Physica Acta*, 1956, N°29, pp. 204-205.
- Fock 1956g **Fock V. A.**, « Sur les systèmes de coordonnées privilégiées dans la théorie de la gravitation d'Einstein », *Helvetica Physica Acta*, 1956, N°29, pp. 239-244.

1957 :

- Fock 1957a **Fock V. A.** « Ob interpretatsii kvantovoy mekhaniki » [Sur l'interprétation de la mécanique quantique], *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1957, T. 62, N°4, pp. 461-474 / Disponible en anglais (Fock 2004).
- Fock 1957a' - « On the Interpretation of Quantum Mechanics », *Czechoslovakian Journal of Physics*, 1957, Vol. 7, pp. 643-656.
- « Über Deutung der Quantenmechanik », dans Kockel B., Macke W. et Papapetrou A., *Max Planck Festschrift 1958*, Berlin : Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1959, pp. 177-195.

- Dans Fedoseev P. N. (éd.), *Filosofskiye voprosy sovremennogo yestestvoznaniya. Trudy vsesoyuznogo soveshchaniya* (Questions philosophiques de la science moderne. Travaux de conférence de toute l'Union), Moscou : Izdatel'stvo Akademii Nauk SSSR, 1959, p. 212-236.

Fock 1957b **Fock V. A.**, « Three lectures on Relativity Theory », *Review of Modern Physics*, 1957, Vol. 29, N°3. pp. 335-353.

Fock 1957c **Fock V. A.**, « Poyezdka v Kopengagen. » [Voyage à Copenhague], *Vestnik Akademii Nauk SSSR*, 1957, N°7, pp. 54-57.

Fock V. A., « Teoriya difraktsii ot paraboloida vrashcheniya » [Théorie de diffraction d'un paraboloïde de révolution], dans *Difraktsiya elektromagnitnykh voln na nekotorykh telakh vrashcheniya*, Moscou : Sovetskoe radio, 1957, pp. 5-56.

Fock V. A., « Application des intégrales complexes à certains problèmes de diffraction », *Onde électrique*, 1957, N°362, pp. 480-481.

Fock V. A., *Raboty po kvantovoy teorii polya* (Travaux en théorie quantique des champs), Leningrad : Izdatel'stvo Leningradskiy Gosudarstvennyy Universitet, 1957, 158 p.

1958 :

Fock V. A. et Fedorov A. A., « Difraktsiya ploskoy elektromagnitnoy volny na ideal'no provodyashchem paraboloido vrashcheniya » [Diffraction d'une onde électromagnétique plane dans un paraboloïde de révolution conductrice idéale], *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 1958, T. 28, N°11, pp. 2548-2566.

Fock V. A., « Rasprostraneniye radiovoln po prizemnomu troposfernomu volnovodu » [Propagation des ondes radio par le guide d'ondes troposphériques], *Radiotekhnika i elektronika*, 1958, T. 3, N°12, pp. 1411-1429.

Fock 1958 **Fock V. A.**, « Zamechaniye k stat'ye Bora o ego diskussiyakh s Eynshteynom » [Remarques sur l'article de Bohr sur ses discussions avec Einstein], *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1958, T. 66, N°4, pp. 599-602.

1959 :

Fock V. A., « O kanonicheskom preobrazovanii v klassicheskoy i kvantovoy mekhanike » [Sur les transformations canoniques en mécanique classique et quantique], *Vestnik Leningradskiy Gosudarstvennyy Universitet*, 1959, N°16, pp. 67-70 / Disponible en anglais (Fock 2004).

- « Prilozheniye » [Appendice], dans Dirac P. A. M., *Printsipy kvantovoy mekhaniki*, Moscou : Fizmatgiz, 1960, pp. 428-432.

- « On the canonical transformation in classical and quantum mechanics », *Acta physica Academiae Scientiarum Hungaricae*, 1969, Vol. 27, pp. 219-224.

Fock V. A. et Kuni F. M., « O vvedenii "gasyashchey" funktsii v dispersionnyye sootnosheniya » [Sur l'introduction d'une fonction d' « amortissement » dans les relations de dispersion], *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1959, Vol. 127, N°6, pp. 1195-1198.

Kapitsa P. L., Fock V. A. et Vainshtein L. A., « Statische granichnyye zadachi dlya pologo tsilindra konechnoy dliny » [Problèmes de limite statique pour un cylindre fini creux], *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 1959, T. 39, N°10, pp. 1177-1187.

Fock V. A., « Simmetrichnyye elektricheskiye kolebaniya ideal'no provodyashchego pologo tsilindra konechnoy dliny », *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 1959, T. 39, N°10, pp. 1188-1205.

Fock V. A., « Po povodu pis'ma v redaktsiyu R. G. Mirimanova » [Sur la lettre de P. G. Mirimanov au comité éditorial], *Radiotekhnika i elektronika*, 1959, T. 4, N°4, p. 730.

Fock V. A., « On the Clock Paradox », *Vistas in Astronomy*, 1959, Vol. 3, p. 88-91.

1960 :

Fock V. A., « Sravneniye razlichnykh koordinatnykh usloviy v teorii tyagoteniya Eynshteyna » [Comparaison de différentes conditions de coordonnées

dans la théorie de la gravitation d'Einstein], *Zhurnal Eksperimental'noy i Teoreticheskoy Fiziki*, 1960, T. 38, N°1, pp. 108-115.

Fock V. A., « Eynshteynova statika v konformnom prostranstve. » [Statique d'Einstein dans un espace conforme], *Zhurnal Eksperimental'noy i Teoreticheskoy Fiziki*, 1960, T. 38, N°5, pp. 1476-1485.

- « Einsteinnian Statics in Conformal Space », dans *Recent Developments In General Relativity*, 1962, Oxford – London – New-York – Paris : Pergamon Press, pp. 209-223.

Fock V. A., « 200-letiyе Korolevskogo norvezhskogo obshchestva » [Bicentenaire de la Société royale norvégienne], *Vestnik Leningradskiy Gosudarstvennyy Universitet*, 1960, N°8, pp. 102-103.

Fock 1960 **Fock V. A.**, « Critique épistémologique de théories récentes », *La Pensée*, 1960, N°91, pp.8-15.

1961 :

Fock V. A., « 0 roli printsipov otnositel'nosti i ekvivalentnosti v teorii tyagoteniya Eynshteyna » [Sur les principes de relativité et d'équivalence dans la théorie de la gravitation d'Einstein], *Voprosy filosofii*, 1961, N°12, p. 45-52.

- Dans les *Actes du Symposium International R.J.Boskovic, 1961*, Belgrade - Zagreb - Ljubljana : Izdatel'stvo Nauchno delo, 1962, pp. 27-37.

- *Det kongelige Norske videnskabers selskabs, Forhandlinger*, 1963, V. 36, N°4-5, pp. 16-27

- *Annales Universitatis Scientiarum Budapestinensis*, 1963-1964, Vol. 7, p. 35.

1962 :

Fock 1962a **Fock V. A.**, « 0 sootnoshenii neopredelennosti dlya energii i vremeni i ob odnoy popytke ego oprovergnut' » [Sur les deux principales interprétations des relations d'indétermination pour l'énergie et le temps], *Zhurnal Eksperimental'noy i Teoreticheskoy Fiziki*, 1962, T. 42, N°4, pp. 1135-1139.

- « On the uncertainty relation for energy and time and one attempt to disprove it », *Soviet Physics JETP*, 1947, V. 15, N°4, pp. 784-786.

Fock V. A., « Kinematicheskiy i gravitatsionnyy efekty izmeneniya khoda vremeni » [Effets cinématiques et gravitationnels des changements au cours du temps], *Byuletin Pol'skoy Akademii Nauk. Seriya matematicheskikh, astronomicheskikh i fizicheskikh nauk*, 1962, T. 10, N°8, pp. 447-450.

Fock 1962b **Fock V. A.**, « Quelques remarques sur les équations du mouvement et les conditions pour les coordonnées », dans Lichnerowicz A. et Tonnelat M.-A. (éds.), *Les théories relativistes de la gravitation : Royaumont, 21-27 Juin 1959*, Paris : Éditions du Centre national de la recherche scientifique, Colloques internationaux du Centre national de la recherche scientifique, N°91, 1962, pp. 67-74.

Fock 1962c **Fock V. A.**, « Sur les ondes de gravitation émises par un système de masses en mouvement », dans Lichnerowicz A. et Tonnelat M.-A. (éds.), *Les théories relativistes de la gravitation : Royaumont, 21-27 Juin 1959*, Paris : Éditions du Centre national de la recherche scientifique, Colloques internationaux du Centre national de la recherche scientifique, N°91, 1962, pp. 137-140.

Fock V. A., Vainshtein L. A. et Maljuzhinets, « Poperechnaya diffuziya pri difraktsii korotkikh voln na spiral'nom tsilindre » [Diffusion transverse à la diffraction d'ondes courtes dans cylindre hélicoïdal], dans *Vsesoyuznyy simpozium po difraktsii voln (annotatsii dokladov) Gor'kiy, 1962* [Symposium de l'URSS sur la diffraction des ondes (résumé des exposés), Gorki, 1962], Moscou : Izdatel'stvo Akademii Nauk SSSR, 1962.

Fock V. A. et al., « Nil's Bor (nekrolog) » [Niels Bohr (nécrologie)], *Vestnik Akademii Nauk SSSR*, 1962, pp. 90-91.

1963 :

Fock V. A., « Prostranstvo, vremya, tyagoteniye » [Espace, temps, gravitation] dans *Glazami uchenogo* [A travers les yeux d'un scientifique], Moscou : Izdatel'stvo Akademii Nauk SSSR, 1963, pp. 13-30.

- Fock V. A.**, « On the transverse diffusion of short waves diffracted by convex cylinder », dans *Proceedings of the 1962 Copenhagen Symposium on Electromagnetic Theory and Antennas. Copenhagen, June 25-30, 1962*, Oxford - London - New-York - Paris : Pergamon Press, Paris, 1963, p. 11-25.
- Fock 1963 **Fock V. A.**, « Raboty A. A. Fridmana po teorii tyagoteniya Eynshteyna. » [Travaux de A. A. Friedmann sur la théorie de la gravitation d'Einstein], *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1963, T. 80, N°3, pp. 353-356.
- « The researches of A. A. Fridman on the Einstein theory of gravitation », *Soviet Physics Uspekhi*, Vol. 6, N°4, 1964, pp. 473-474.
- Fock V. A.**, « Vystupleniye po dokladu Il'icheva 18.10.63 na rasshirennom zasedanii Prezidiuma AN SSSR » [Discussion sur l'exposé d'Il'ichev du 18 octobre 1963 sur l'extension du Présidium de l'Académie des Sciences de l'URSS], *Vestnik Leningradskiy Gosudarstvennyy Universitet*, 1963, N°11, p. 61.
- Fock V. A. et Vainshtein L. A.**, « Poperechnaya diffuziya pri difraktsii korotkikh voln na vypuklom tsilindre s plavno menyayushcheysya kriviznoy. Ch. I i II » [Sur la diffusion transverse d'ondes courtes diffractées par un cylindre convexe avec une courbure variant doucement. Parties 1 et 2], *Radiotekhnika i elektronika*, T. 8, N°3, pp. 363-388.
- Fock V. A.**, « Vazhnyy metodologicheskiy vopros » [Une importante question méthodologique], *Leningradskiy universitet*, N°61, 13 décembre 1963.

1964 :

- Fock V. A.**, « Diskussiya s Nil'som Borom » [Discussion avec Niels Bohr], *Voprosy filosofii*, 1964, N°8, pp. 49-59.
- Fock 1964a **Fock V. A.**, « The uniqueness of the mass tensor and Einstein's gravitational equations », dans Infeld L. (éd.), *Relativistic Theories of Gravitation. Conference in Warszawa and Jabloma 25-31 July 1962*, Paris : Gauthier-Villar, 1964, pp. 269-273.
- Fock 1964b **Fock V. A.**, « Printsipy mekhaniki Galileya i teoriya Eynshteyna », *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1964, T. 82, N°4, pp. 577-582.

- Fock 1964b' - « Le principes mécanique de Galilée et la théorie d'Einstein », dans Berbera G (éd.), *Atti del convegno sulla relativita generale problemi dell'energia e onde gravitazionale*, Florence, 1965, p. 88-94.
- Fock 1964c **Fock V. A.**, « Zhivyye kontakty mezhdu fizikami i filosofami sposobstvuyut razvitiyu nauki » [Des contacts vivants entre les physiciens et les philosophes permettent de promouvoir le développement de la science], *Metodologicheskiye problemy nauki*, Moscou : Izdatel'stvo Akademii Nauk SSSR, 1964, pp. 234-235.

1965 :

- Fock V. A.**, *Electromagnetic diffraction and propagation problems*, Francfort : Pergamon Press, 1965, 414 p.
- Fock 1965a **Fock V. A.**, « Eshche raz o sootnoshenii neopredelennosti dlya energii i vremeni (otvet Aaronovu i Bomu) » [Une fois de plus sur les relations d'indétermination pour l'énergie et le temps (réponse à Aharonov et Bohm)], *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1965, T. 86, N°2, pp. 363-365.
- « More about the energy-time uncertainty relation (Reply to Aharonov and Bohm) », *Soviet Physics Uspekhi*, Vol. 8, N°4, janvier-février 1966, pp. 628-629.
- Fock 1965b **Fock V. A.**, *Kvantovaya fizika i stroyeniye materii* [Physique quantique et structure de la matière], Leningrad : Izdatel'stvo Leningradskiy Gosudarstvennyy Universitet, 28 p.
- Fock 1965c **Fock V. A.**, « La physique quantique et les idéalizations classiques », *Dialectica*, Vol. 19, N°3/4, pp. 223-245.
- « Kvantovaya fizika i klassicheskiye idealizatsii », dans *Filosofskkiye voprosy sovremennoy fiziki*, Vol. 2, Moscou : Nauka, 1966, pp. 44-80.
- Fock V. A. et Tulub A. V.**, « Primeneniye preobrazovaniya Laplasa k zadacham teorii izlucheniya », *Vestnik Leningradskiy Gosudarstvennyy Universitet*, 1965, N°16, pp. 7-20.
- Fock V. A.**, « Ob osnovnykh printsipakh teorii tyagoteniya Eynshteyna. » [Sur des principes de base de la théorie de la gravitation d'Einstein] dans *Problemy gravitatsii. Tezisy dokladov Vtoroy sovetskoy gravitatsionnoy*

konferentsii. Tbilisi, 20-28 aprelya [Problèmes de gravité. Résumé des exposés de la seconde Conférence soviétique sur la gravitation], 1965, Tbilissi, pp. 3-6.

1966 :

- Fock 1966a **Fock V. A.**, « Osnovnyye printsipy teorii tyagoteniya Eynshteyna » [Principes de base de la théorie de la gravitation d'Einstein], *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Seriya fizicheskaya*, 1966, T. 30, N°8, pp. 1229-1236.
- *Voprosy filosofii*, 1966, N°8, pp. 15-22
- Fock 1966a' - *Annales de l'Institut Henri Poincaré, Section A : Physique théorique*, 1966, Vol. 5, N°3. pp. 205-215 (en français).
- Fock 1966a'' - *Einstein-Symposium: Entstehung, Entwicklung und Perspektiven der Einsteinschen Gravitationstheorie vom 2.-5. November 1965 in Berlin*, Berlin : Deutsche Akademie der Wissenschaften, 1966, pp. 27-37 (en allemand).
- Fock 1966b **Graham L. R.**, « Quantum Mechanics and Dialectical Materialism : Comments », *Slavic Review*, 1966, Vol. 25, N°3, pp. 411-413.

1967 :

- Fock 1967 **Fock V. A.**, *Teoriya Eynshteyna i fizicheskaya otnositel'nost'* [La théorie d'Einstein et la relativité physique], Moscou : Znaniye, 1967, 40 p.
- Fock V. A. et Trapeznikova O. N.**, « O vychislenii polarizuyemosti molekul » [Sur le calcul de la polarisation des molécules], *Optik i spektroskopia*, 1967, T. 23, Vol. 5, pp. 696-708.
- Fock V. A.**, « Simmetrichnyye elektricheskiye kolebaniya ideal'no provodyashchego pologo tsilindra konechnoy dliny. III. Peredayushchiy vibrator. Obshchiye zamechaniya », [Oscillations électriques symétriques d'un cylindre creux idéalement conducteur de longueur finie. III. Vibreur de transmission. Commentaires généraux], *Zhurnal Eksperimental'noy i Teoreticheskoy Fiziki*, 1967, T. 37, pp. 1189-1195.
- Fock V. A.**, « Wie schwer haben es neue Ideen » [À quel point il est difficile d'accepter de nouvelles idées], *Sonntag*, 1967, 11 juin, N°24.

1968 :

Fock V. A., « Metod parabolicheskogo uravneniya v teorii diffraktsii » [La méthode de l'équation parabolique en théorie de la diffraction], dans *1-ya Vsesoyuznaya shkola-seminar po difraktsii i rasprostraneniyu voln, g. Palanga, 30.5-15.6 1965* [Première école-séminaire de l'URSS sur la diffraction et la propagation des ondes. Ville de Palanga, 30 mai – 15 juin 1965], Moscou : Khar'kov, 1968, pp. 150-176

1969 :

Fock 1969a **Fock V. A.**, « Les deux principes de relativité et la théorie d'Einstein », dans *Fluides et Champ Gravitationnel en Relativité Générale. Paris, Collège de France, 19-23 juin 1967*, Paris : Editions du Centre national de la recherche scientifique, Collection : Colloques internationaux du Centre national de la recherche scientifique, N°170, 1969, pp. 237-239.

Fock 1969b **Fock V. A.**, « Remarks on the general principles of Einstein's gravitation theory », dans *Contemporary Physics : Trieste Symposium 1968*, Vienne : International Atomic Energy Agency, Vol. 1, 1969, p. 511-513.

Fock V. A., Fiziki i list bumagi (interv'y u s V. A. Fokom) [Les physiciens et une feuille de papier (interview avec V. A. Fock)], *Smena*, 1969, N°40.

1970 :

Fock 1970 **Fock V. A.**, « Kvantovaya fizika i filosofskiye problemy » [Physique quantique et problèmes philosophiques] dans *Lenin i sovremennoye estestvoznaniye*, Moscou : Mysl', 1970, pp. 186-201.

- *Voprosy filosofii*, 1971, N°3, pp. 46-48.

Fock 1970' - « Quantum Physics and Philosophical Problems », *Foundations of Physics*, 1971, Vol. 1, N°4, pp. 293-306.

- Dans *Fizicheskaya nauka i filosofiya*, Moscou : Nauka, 1973, pp. 55-65.

Fock V. A., *Problemy difraktsii i rasprostraneniya elektromagnitnykh voln* [Problèmes de diffraction et propagation des ondes radio], Moscou : Sovetskoe radio, 1970, 517 p.

1971 :

Fock V. A., « A possible generalization of the Concept of Physical Space », *Physica Norvegica*, 1971, Vol. 5, N°3-4. pp. 149-150.

Fock 1971 **Fock V. A.**, « Printsip otноситel'nosti k sredstvam nablyudeniya v sovremennoy fizike. » [Le principe de relativité par rapport à l'observation dans la physique moderne], *Vestnik Akademii Nauk SSSR*, 1971, N°4, pp. 8-12.

Fock V. A., « Vmeshchayutsya li khimicheskiye svoystva atomov v ramki chisto khimicheskikh predstavleniy » [Les propriétés chimiques des atomes rentrent-elles dans le cadre des pures notions chimiques ?], dans *Periodicheskiy zakon i stroyeniye atoma* [Loi périodique et structure de l'atome], Moscou : Atomizdat, 1971, pp. 107-117.

1973 :

Fock 1973 **Fock V. A.**, « Le principe de relativité par rapport aux moyens d'observation », dans *Symposia mathematica, Convegno del Febraio 1972, Relatività*, Bologne : Institute nazionale di Alta Matematica, Vol. 12, pp. 327-335.

Fock V. A., « V. A. Fock », dans *Vospominaniya ob A.F. Ioffe* [Souvenirs sur A. F. Ioffé], Leningrad : Nauka, 1973, p. 107.

1974 :

Fock V. A., « Printsipial'noye znachenkiye priblizhennykh metodov v fizike » [Signification fondamentale des méthodes d'approximation en physique], dans *Filosofskiye voprosy fiziki*, Leningrad : Izdatel'stvo LGU, 1974, pp. 3-7.

1987 :

Fock 1987 **Logan N. A. et Blacksmith P. (éds.)**, *Diffraction, refraction, and reflection of radio waves, thirteen papers by V. A. Fock*, Air force Cambridge research center, air research and development command Bedford Massachusetts, 1987, 391 p.

2004 :

Fock 2004 **Faddeev L. D., Khalfin L. A. et Komarov I. V. (éds.),** *Selected Works. V. A. Fock. Quantum Mechanics and Quantum Field Theory*, Chapman & Hall/CRC, 2004, 562 p.

Archives

Archives de l'État de Berne, fond Mercier – Berne.

Archives de l'Institut Ioffé – Saint-Pétersbourg.

ARAN **Arkhir Rossiiskoy Akademii Nauk** [Archives de l'Académie des Sciences russe] – Moscou.

ARAN SPb **Arkhir Rossiiskoy Akademii Nauk – Sankt-Peterburgskiy Filial** [Archives de l'Académie des Sciences russe – Filiale de Saint-Pétersbourg] – Saint-Pétersbourg.

Christ's College, Old Library Archives. Papers of D. R. Hartree – Cambridge.

GARF **Gosudarstvennyy Arkhir Rossiyskoy Federatsii** [Archives d'État de la Fédération de Russie] – Moscou.

Niels Bohr Archive – Copenhague.

St John's College Archives. Papers of Bertha Jeffreys – Cambridge.

The Churchill Archives Centre – Churchill College. Dirac and Bondi papers – Cambridge.

Bibliographie générale

A

- AhBo 1962 **Aharonov Y. et Bohm D.**, « Time in the Quantum Theory and the Uncertainty Relation for Time and Energy », *Physical Review*, 1961, Vol. 122, N°5, pp. 1649-1658.
- AhBo 1964 **Aharonov Y. et Bohm D.**, « Answer to Fock Concerning the Time Energy Indeterminacy Relation », *Physical Review*, 1964, Vol. 134, N°6B, pp. 1417-1418.
- Alek 1946 **Aleksandrov G.F.**, *Istoriya zapadnoyevropeyskoy filosofii* [Histoire de la philosophie d'Europe de l'ouest], Moscou – Léningrad : Izdatelstvo AN SSSR, 1946, 513 p.
- Alek 1955 **Aleksandrov A. D.**, « Otnositel'nosti teoriya (teoretiko-poznavatel'noye znachenie) » [Théorie de la relativité (valeur épistémologique), dans Vvedenskiy B. A. (éd.), *Bol'shaya sovetskaya entsiklopediya*, T. 31, 1955, pp. 411–416.
- Alld 1988 **Aleksandrov A. D. et Idlis G. M.**, « Vklad V. A. Foka v relyativistskuyu teoriyu prostranstva, vremeni i tyagoteniya. K 90-letiyu so dnya rozhdeniya » [Contribution de V. A. Fock à la théorie relativiste de l'espace, du temps et de la gravitation. Pour les 90 ans de sa date d'anniversaire], dans Ashot T. (éd.), *Issledovaniya po istorii fiziki i mekhaniki*, Moscou : Nauka, 1988, pp. 106-112.
- Alek 1997 **Aleksandrov D. A.**, « The Politics of Scientific 'Kruzhok': Study Circles in Russian Science and Their Transformation in the 1920s », dans Kolchinskii E. I. (éd.), *Na perelome: Sovetskaia biologiya v 20-30-kh godakh*, Saint-Pétersbourg, 1997, p.255-267.
- Ande 2001 **Andersen H.**, « The history of reductionism versus holistic approaches to scientific research », *Endeavour*, 2001, Vol. 25, N°4, pp. 153-156.
- Ande 1972 **Anderson P. W.**, « More Is Different. Broken symmetry and the nature of the hierarchical structure of science. », *Science*, 1972, Vol. 177, N°4047, pp. 393-396.

- Anon 1936 **Anonyme**, « Martovskaya sessiya Akademii nauk SSSR » [Session de mars de l'Académie des sciences de l'URSS], *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1936, T. 16, N°7, pp. 837-838.
- Ayal 1974 **Ayala F. J.**, « Introduction », dans Ayala F. J. et Dobzhansky T. (éds.), *Studies in the Philosophy of Biology. Reduction and Related Problems*, Londres : The MacMillan Press LTD, 1974, pp. vii-xvi.

B

- Bala 2016 **Balaguer M.**, « Platonism in Metaphysics », dans *Stanford Encyclopedia of Philosophy* [en ligne], Stanford Encyclopedia of Philosophy, page consultée le 5 juillet 2017.
<https://plato.stanford.edu/entries/platonism/#1>
- BeRi 2010 **Bechtel W. et Richardson R.**, *Discovering Complexity: Decomposition and Localization as Strategies in Scientific Research*, Cambridge (Mass.) : MIT Press, 2010, 340 p.
- Bell 1996 **Beller M.**, « The Rhetoric of Antirealism and the Copenhagen Spirit », *Philosophy of Science*, 1996, Vol. 63, N°2, pp. 183-204.
- Bell 1999a **Beller M.**, *Quantum Dialogue. The Making of a Revolution*, Chicago : Chicago University Press, 1999, 356 p.
- Bell 1999b **Beller M.**, « Jocular Commemorations: The Copenhagen Spirit », *Osiris*, 1999, Vol. 14, pp. 252-273.
- BeFi 1994 **Beller M. et Fine A.**, « Bohr's Response to EPR », dans Faye J. et Folse H. J. (éds.), *Niels Bohr and Contemporary Philosophy*, Boston Studies in the Philosophy of Science, Vol. 153, Springer, 1994, pp. 1-31.
- Berg 1982 **Bergmann P. G.**, « The Quest for Unity: General Relativity and Unitary Field », dans Holton G. et Elkana Y. (éds), *Albert Einstein, Historical and Cultural Perspectives. The Centennial Symposium in Jerusalem, 14-23 March 1979*, Princeton : Princeton University Press, 1982, pp. 27-38.
- Bess 2018 **Besson V.**, *L'interprétation causale de la mécanique quantique : biographie d'un programme de recherche minoritaire (1951-1964)*, Thèse de Doctorat en Histoire, philosophie et épistémologie des sciences, des techniques et des technologies, Lyon : Université Claude Bernard – Lyon 1, 2018.

- Bitb 2006 **Bitbol M.**, « Complémentarité », dans Lecourt D. (dir.), *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences*, 4^e édition, Paris : Presses universitaires de France, Quadrige, 2006, pp. 237-240.
- Bloc 1928 **Bloch F.**, « Uber die Quantenmechanik der Elektronen in Kristallgittern » [Sur la mécanique quantique des électrons dans des réseaux cristallins], *Zeitschrift für Physik*, 1928, Vol. 52, pp. 555-600.
- Blok 1997 **Blokh A.**, « Ideologicheskiye bredni Eynshteyna : kak "Krasnyy flot" chut' ne potopil sovetskiy atomnyy proyekt » [Les absurdités idéologiques d'Einstein : comment « Krasnyy flot » a presque éliminé le projet atomique soviétique], *Nezavisimaya gazeta*, 3 juin 1997.
- Blok 1949 **Blokhintsev D. I.**, *Osnovy kvantovoi mekhaniki. Izdanie vtoroe, pererabotannoe* [Fondements de la mécanique quantique. Seconde édition, révisée], Moscou – Leningrad : GITTL, 1949, 588 p.
- Blok 1952 **Blokhintsev D. I.**, « Otvet Akademiku V. A. Foku » [Réponse à l'Académicien V. A. Fock] *Voprosy filosofii*, 1952, N°6, pp. 171-175.
- BILR 2015 **Blum A., Lalli R. et Renn J.**, « The Reinvention of General Relativity: A Historiographical Framework for Assessing One Hundred Years of Curved Space-time », *Isis*, 2015, Vol. 106, pp. 598-620.
- BoRS 1990 **Boag J. W., Rubinin P. E., Shoenberg D.** (éds.), *Kapitsa in Cambridge and Moscow*, Amsterdam : North-Holland, 1990, 429 p.
- Bohm 1951 **Bohm D.**, *Quantum Theory*, New-York : Prentice-Hall, 1951, 646 p.
- BoSc s. d. **Bohm D. et Schumacher D. L.**, « On the failure of communication between Bohr and Einstein », non publié.
- Bohr 1927 **Bohr N.**, « The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory », dans *Atti del Congresso Internazionale dei Fisici, Como, 11-20 Settembre 1927*, 1928, Vol. 2, pp. 565-588.
- Bohr 1927' - « Le postulat quantique et le dernier développement de la théorie atomique », dans Bohr N., *La théorie atomique et la description des phénomènes*, Paris : Editions Jacques Gabay, 1993 [1932], pp. 49-85.
- Bohr 1932 **Bohr N.**, *La théorie atomique et la description des phénomènes*, Legros A. et Rosenfeld L. (trads.), Paris : Editions Jacques Gabay, 1993 [1932], 112 p.
- Bohr 1933 **Bohr N.**, « Light and Life », *Nature*, 1933, N°131, pp. 421-423.

- Bohr 1933' - « Lumière et vie », dans Bohr N., *Physique atomique et connaissance humaine*, Bauer E. et Omnes R. (trads.), Paris : Gonthier, 1961, pp. 9-24.
- Bohr 1935a **Bohr N.**, « Quantum Mechanics and Physical Reality », *Nature*, 1935, N°135, p. 65.
- Bohr 1935b **Bohr N.**, « Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be considered Complete? », *Physical Review*, 1935, Vol. 48, pp. 696-702.
- Bohr 1948 **Bohr N.**, « On the notions of causality and complementarity », *Dialectica*, Vol. 2, N°3-4, novembre 1948, pp. 312–319.
- *Science*, New Series, Vol. 111, N°2873, 20 janvier 1950, pp. 51-54.
- Bohr 1949 **Bohr N.**, « Discussion with Einstein on epistemological problems in atomic physics », dans Schilpp P. A. (éd.), *The Library of Living Philosophers, Volume 7. Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, Open Court, 1949, pp. 199-241.
- Bohr 1949' - « Diskussii s Eynshteynom o problemakh teorii poznaniya v atomnoy fizike », *Uspekhi fizicheskikh nauk*, T. 66, N°4, pp. 571-598.
- Bohr 1958a **Bohr N.**, « Quantum Physics and Philosophy. Causality and Complementarity », dans Klibansky R. (éd.), *La philosophie au milieu du vingtième siècle. Chroniques*, Firenze : La Nuova Italia Editrice, 1958, p. 236.
- Bohr 1958a' - « Kvantovaya fizika i filosofiya (Prichinnost' i dopolnitel'nost') », *Uspekhi fizicheskikh nauk*, T. 67, N°1, pp. 37-42.
- Bohr 1958b **Bohr N.**, *Physique atomique et connaissance humaine*, Paris : Editions Gonthier, Bibliothèque Médiations, 1961 [1958], 183 p.
- Bohr 1958b' - *Atomnaya fizika i chelovecheskoye poznaniye*, Moscou : Izdatel'stvo inostrannoy literatury, 1961, 151 p.
- BoRo 1933 **Bohr N. et Rosenfeld L.**, « Zur Frage der Messbarkeit der elektromagnetischen Feldgrößen » [Sur la question de la mesurabilité des champs électromagnétiques], *Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskabs, Mathematisk-fysiske Meddeleser*, 1933, série 12, N°8, pp. 1-65.
- Boku 2004 **Bokulich A.**, « Open or closed? Dirac, Heisenberg, and the relation between classical and quantum mechanics », *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 2004, Vol. 35, pp. 377-396.

- Boku 2006 **Bokulich A.**, « Heisenberg Meets Kuhn: Closed Theories and Paradigms », *Philosophy of Science*, 2006, Vol. 73, N°1, pp. 90-107.
- Boku 2008 **Bokulich A.**, *Reexamining the Quantum-Classical Relation. Beyond Reductionism and Pluralism*, Cambridge : Cambridge University Press, 2008, 195 p.
- Bond 1965 **Bondi H. et al.** (éds.), *International Conference on Relativistic Theories of Gravitation*, 2 volumes, Londres : King's College, 1965, 69 et 151 p.
- Born 1926 **Born M.**, « Zur Quantenmechanik der Stossvorgänge » [Sur la mécanique quantique des processus de collision], *Zeitschrift für Physik*, Vol. 37, pp. 863-867.
- Born 1927 **Born M.**, « Das Adiabatenprinzip in der Quantenmechanik » [Le principe adiabatique en mécanique quantique], *Zeitschrift für Physik*, Vol. 40, N°3-4, pp. 167-192.
- Born 1954 **Born M.**, « The Statistical Interpretations of Quantum Mechanics », *Nobel Lectures, Physics 1942-1962*, Amsterdam : Elsevier, 1964, pp. 256-267.
- Born 1978 **Born M.**, *My Life. Recollections of a Nobel Laureate*, New-York : Charles Scribner's Sons, 1978, 308 p.
- BoHJ 1926 **Born M., Heisenberg W. et Jordan P.**, « Zur Quantenmechanik II » [Sur la mécanique quantique II], *Zeitschrift für Physik*, 1926, Vol. 35, pp. 557-615.
- BoJo 1925 **Born M. et Jordan P.**, « Zur Quantenmechanik » [Sur la mécanique quantique], *Zeitschrift für Physik*, 1925, Vol. 34, pp. 858-888.
- BrDu 2003 **Bretislav F. et Dudley H.**, « Stern and Gerlach: How a Bad Cigar Helped Reorient Atomic Physics », *Physics Today*, 2003, Vol. 56, N°12, pp 53-59.
- Bril 1932a **Brillouin L.**, « Les problèmes de perturbations et les champs self-consistants », *Journal de Physique et Le Radium*, 1932, Vol. 3, N°9, pp. 373-389.
- Bril 1932b **Brillouin L.**, « Les électrons libres dans un réseau cristallin. Équation ondulatoire et propriétés magnétiques », *Journal de Physique et Le Radium*, Vol. 3, N°12, pp. 565-581.
- Bril 1934a **Brillouin L.**, « Les champs "self-consistent" de Hartree et de Fock », *Actualités scientifiques et industrielles*, Paris : Hermann & Cie, N°159, 38 p.
- Bril 1934b **Brillouin L.**, « Le champ self-consistent de Fock pour les électrons des métaux », *Journal de Physique et Le Radium*, 1934, Vol. 5, N°8, pp. 413-418.

- Bril 1967 **Brillouin L.**, « General Relativity Theory of Gravitation and Experiments », *Proceedings of the National Academy of the United States of America*, 1967, Vol. 57, N°6, pp. 1529-1535
- Bron 1936 **Bronstein M. P.**, « Kvantovanie gravitatsionnykh voln » [Quantification des ondes gravitationnelles], *Zhurnal Eksperimental'noy i Teoreticheskoy Fiziki*, 1936, T. 6, pp. 195-236.
- Brow 1933 **Brown F. W.**, « Charge Distributions in Fluorine and Neon », *Physical review*, 1933, N°44, pp. 214-223.

C

- Cami 2009 **Camilleri K.**, « Constructing the Myth of the Copenhagen Interpretation », *Perspectives on Science*, 2009, Vol. 17, N°1, pp. 26-57.
- Carn 1955 **Carnap R.**, « Logical Foundations of the Unity of Sciences », dans Neurath O., Carnap R. et Morris C. (dir.), *International Encyclopedia of Unified Science*, Vol. I, Chicago : University of Chicago Press, 1938-1955, p. 42-62.
- Cars 1996a **Carson C.**, « The Peculiar Notion of Exchange Forces—I: Origins in Quantum Mechanics, 1926–1928. », *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 1996, Vol. 27, N°1, pp. 23–45.
- Cars 1996b **Carson C.**, « The Peculiar Notion of Exchange Forces—II: From Nuclear Forces to QED, 1929–1950. », *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 1996, Vol. 27, N°2, pp. 99–131.
- CaKT 2011 **Carson C., Kojevnikov A. et Trischler H. (éds.)**, *Weimar Culture and Quantum Mechanics. Selected Papers by Paul Forman and Contemporary Perspectives on the Forman Thesis*, Singapour : Imperial College Press et World Scientific, 2011, 560 p.
- Cart 1927 **Cartan E.**, « La théorie des groupes et la géométrie », *L'enseignement mathématique*, 1927, T. 26, pp. 200-225.
- Cast 2002 **Castellani E.**, « Reductionism, emergence, and effective field theories », *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 2002, Vol. 33, pp. 251-267.
- Ceru 1998 **Ceruzzi P. E.**, *A history of modern computing*, Cambridge (Mass) : MIT Press, 1998, 398 p.

- Chak 2017 **Chakravartty A.**, « Scientific Realism », dans *Stanford Encyclopedia of Philosophy* [en ligne], Stanford Encyclopedia of Philosophy, page consultée le 18 juin 2017.
<https://plato.stanford.edu/entries/scientific-realism/>
- Chal 2006 **Chalmers D. J.**, « Strong and Weak Emergence », dans Clayton P. et Davies P. (éds), *The Re-emergence of Emergence*, Oxford : Oxford University Press, 2006, pp. 244-255.
- Char 2013 **Charbonnat P.**, *Histoire des philosophies matérialistes*, 2nd édition, Paris : Editions Kimé, 2013, 706 p.
- Chev 1985 **Chevalley C.**, « Complémentarité et langage dans l'interprétation de Copenhague », *Revue d'histoire des sciences*, 1985, Vol. 38, N°3-4, pp. 251-292
- Chev 1997 **Chevalley C.**, « Mythe et philosophie : la construction de Niels Bohr dans la doxographie », *Physis, Rivista Internazionale di Storia della Scienza*, 1997, Vol. 34, N°3, pp. 569-603.
- Chev 1998 **Chevalley C.**, « Physical Reality and Closed Theories in Werner Heisenberg's early Papers », dans Batens D. et van Bendegem J. P. (éds.), *Theory and Experiment: Recent Insights and New perspectives on Their Relation*, Dodrecht: Reidel, pp. 159-176.
- ChLi 2014 **Chiatti L. et Licata I.**, « Relativity with Respect to Measurement: Collapse and Quantum Events from Fock to Cramer », *Systems*, 2014, N°2, pp. 576-589.
- ChRV 2014 **Chibbaro S., Rondoni L. et Vulpiani A.**, *Reductionism, Emergence and Levels of Reality. The Importance of Being Borderline*, Heidelberg : Springer, 2014, 154 p.
- CoDL 1973 **Cohen-Tannoudji C., Diu B. et Lalöe F.**, *Mécanique quantique I*, Paris : Hermann, 1973, 890 p.
- Cola 1982 **Colas D.**, *Le léninisme*, Paris : Presses universitaires de France, 1982, 296 p.
- CoSh 1935 **Condon E. U. and Shortley G. H.**, *The Theory of Atomic Spectra*, Cambridge: Cambridge University Press, 1935, 460 p.
- Conn 1977 **Connolly J. W. D.**, « The X α method » dans Segal, G. A. (éd.), *Semiempirical Methods of Electronic Structure Calculation*, New-York: Plenum Press, 1977, pp. 105–132.

- Cros 1991 **Cross A.**, « The Crisis in Physics: Dialectical Materialism and Quantum Theory », *Social Studies of Science*, 1991, Vol. 21, N°4, pp. 735-759.

D

- Darr 1984 **Darrigol O.**, « La genèse du concept de champ quantique », *Annales de physique*, 1984, Vol. 9, N°3, pp. 433-501.
- Darr 1986 **Darrigol O.**, « The Origin of Quantized Matter Waves », *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, 1986, Vol. 16, N°2, pp. 197-253.
- Darr 1991 **Darrigol O.**, « Cohérence et complétude de la mécanique quantique : l'exemple de Bohr-Rosenfeld », *Revue d'histoire des sciences*, T. 44, N°2, pp. 137-179.
- Diet 1887 **Dietzgen J.**, *Streifzüge eines Sozialisten in das Gebiet der Erkenntnistheorie*, Berlin : Vorwärts, 1905 [1887], 98 p.
- Dira 1926 **Dirac P. A. M.**, « On the Theory of Quantum Mechanics », *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 1926, Vol. 112, N°762, pp. 661–677.
- Dira 1927a **Dirac P. A. M.**, « The Physical Interpretation of the Quantum Dynamics », *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 1926, Vol. 113, N°765, pp. 621–641.
- Dira 1927b **Dirac P. A. M.**, « The Quantum Theory of the Emission and Absorption of Radiation », *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 1926, Vol. 114, N°767, pp. 243–265.
- Dira 1928a **Dirac P. A. M.**, « The Quantum Theory of the Electron », *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 1928, Vol. 117, N°778, pp. 610–624.
- Dira 1928b **Dirac P. A. M.**, « The Quantum Theory of the Electron. Part II », *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 1928, Vol. 118, N°779, pp. 351–361.
- Dira 1929 **Dirac P. A. M.**, « Quantum Mechanics of Many-Electron Systems », *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 1929, Vol. 123/792, pp 714-733.

- Dira 1930a **Dirac P. A. M.**, « A Theory of Electrons and Protons », *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 1930, Vol. 126, N°801, pp. 360–365.
- Dira 1930b **Dirac P. A. M.**, « Note on Exchange Phenomena in the Thomas Atom », *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 1930, Vol. 26/3, pp 376-385.
- Dira 1932 **Dirac P. A. M.**, « Relativistic Quantum Mechanics », *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 1932, Vol. 136, N°829, pp. 453–464.
- Dira 1947 **Dirac P. A. M.**, *The Principles of Quantum Mechanics*, 3^e édition, Oxford : Clarendon Press, 1947, 311 p.
- Dira 1958 **Dirac P. A. M.**, *The Principles of Quantum Mechanics*, 4^e édition, Oxford : Clarendon Press, 1958, 314 p.
- DiTa 1993 **Dirac P. A. M. et Tamm I.**, *Paul Dirac and Igor Tamm. Correspondence, Part I: 1928-1933*, commenté par Kojevnikov A., Munich : Max Planck Institut für Physik, Preprint 93-80, 1993, 79 p.
- Dive 1936 **Divers**, *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1936, Vol. 16, N°7.
- Dive 1948 **Divers**, « Diskussiia o prirode fizicheskogo znaniia. Obsuzhdenie stat'i M. A. Markova », *Voprosy Filosofii*, N°3, p. 203-224.
- Dond 1921 **de Donder T.**, *La gravifique einsteinienne*, Paris : Gauthier-Villars & cie, 1921, 191 p.
- Doro 1966 **Dorozynski A.**, *The Man They Wouldn't Let Die*, Londres : Secker & Warburg, 1966, 207p.
- Duhe 1908 **Duhem P.**, *Σύζειν τὰ φαινόμενα. Sur la notion de théorie physique de Platon à Galilée*, Paris : Hermann, 1908, 138 p.

E

- EfFr 1990 **Efremidze T. I. et Frenkel V. Ya.**, « Perevody na rysskiy yazyk "Printsipov kvantovoy mexaniki" Diraka » [Traduction en langue russe de "Principes de la mécanique quantique" de Dirac], dans Medvedev B. V. et al. (éds), *Pol' Dirak i Fizika XX Veka* [Paul Dirac et la physique du 20^e siècle], Moscou : Nauka, 1990, pp. 197-203.

- Ehlo 1973 **Ehrenfest P. et Ioffé A. F.**, *Erenfest-Ioffe. Nauchnaya Perepiska (1907-1933 gg.)* [Ehrenfest-Ioffé. Correspondance scientifique (1907-1933)], Léninegrad : Nauka, 1973, 309 p.
- Eins 1907 **Einstein A.**, « Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogene Folgerungen » [Sur le principe de relativité et les conclusions qui peuvent en être tirées], *Jahrbuch Radioaktivität Elektron*, 1907, Vol. 4, pp. 411-462.
- Eins 1913 **Einstein A.**, *Entwurf einer verallgemeinerten Relativitätstheorie und einer Theorie der Gravitation. I. Physikalischer Part* [Ebauche d'une théorie de la relativité généralisée et d'une théorie de la gravitation. I. Partie physique], Leipzig et Berlin : B. G. Teubner, 1913, 38p.
- Eins 1936 **Einstein A.**, « Physics and Reality », *Journal of the Franklin Institute*, 1936, N°221, pp. 349-382.
- Eins 1949 **Einstein A.**, « Remarks Concerning the Essays Brought Together in This Co-operative Volume », dans Schilpp P. A. (éd.), *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, Evanston : The Library of Living Philosophers, 1949, pp. 683-684.
- Eins 1949 **Einstein A.**, *Autobiographical notes: A Centennial edition*, Schilpp P. A. (trad. et éd.), La Salle, Illinois : Open Court, 1979 [1949].
- Eins 1955 **Einstein A.**, *Sushchnost' teorii otnositel'nosti* [La signification de la relativité], Moscou : Izdatel'stvo inostrannoy literatury, 1955, 160 p.
- EiGr 1927 **Einstein A., Grommer J.**, « Allgemeine Relativitätstheorie und Bewegungsgesetz » [La théorie de la relativité générale et la loi du mouvement], dans *Physikalisch-mathematische Klasse. Sitzungsberichte*, Berlin : Preussischen Akademie der Wissenschaften, 1927, pp. 235-245.
- EiIn 1938 **Einstein A. et Infeld L.**, *L'évolution des idées en physique*, traduit de l'anglais par Solovine M., Paris : Flammarion, 1983 [1938], 280 p.
- EiIn 1949 **Einstein A. et Infeld L.**, « On the motion of particles in general relativity theory », *Canadian Journal of Mathematics*, 1949, Vol. 1, pp. 209-241.
- EiIH 1938 **Einstein A., Infeld L. et Hoffmann B.**, « Gravitational Equations and the Problem of Motion », *Annals of Mathematics*, 1938, Vol. 39, pp. 65-100.
- EiPR 1935 **Einstein A., Podolsky B. et Rosen N.**, « Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be considered Complete? », *Physical Review*, 1935, Vol. 47, pp. 777-780.

- Eise 1986 **Eisenstaedt J.**, « La relativité générale à l'étiage : 1925-1955 », *Archive for History of Exact Sciences*, 1986, Vol. 35, N°2, pp. 115-185.
- El'y 1977 **El'yashevich M. A.**, « From the origin of quantum concepts to the establishment of quantum mechanics », *Soviet Physics Uspekhi*, Vol. 20, N°8, 1977, pp. 656-682.
- Enge 1877 **Engels F.**, *Antidühring*, trad. Cervetto A., Montreuil-sous-bois : Editions Science Marxiste, 2007 [1877], 435 p.
- Enge 1886 **Engels F.**, Ludwig Feuerbach et la fin de la philosophie classique allemande, Paris : Editions sociales, 1970 [1886], 59 p.
- Enge 1925 **Engels F.**, *Dialectique de la nature*, Paris : Editions sociales, 1975 [1925], 364 p.

E

- Farm 2009 **Farmelo G.**, *The Strangest Man. The Hidden Life of Paul Dirac, Quantum Genius*, Londres : Faber and Faber Ltd, 2009, 539 p.
- Favr 1994 **Favrholt D.**, « Niels Bohr and Realism », dans Faye J. et Folse H. J. (éds.), *Niels Bohr and Contemporary Philosophy*, Boston Studies in the Philosophy of Science, Vol. 153, Springer, 1994, pp. 77-96.
- Faye 1994 **Faye J.**, « Non-Locality or Non-Separability? A Defense of Bohr's Anti-Realist Approach to Quantum Mechanics », dans Faye J. et Folse H. J. (éds.), *Niels Bohr and Contemporary Philosophy*, Boston Studies in the Philosophy of Science, Vol. 153, Springer, 1994, pp. 97-118.
- Faye 2014 **Faye J.**, « Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics », dans *Stanford Encyclopedia of Philosophy* [en ligne], Stanford Encyclopedia of Philosophy, page consultée le 6 février 2017.
<https://plato.stanford.edu/entries/qm-copenhagen/>
- Fedo 1959 **Fedoseev P. N.** (éd.), *Filosofskiye voprosy sovremennogo yestestvoznaniya. Trudy vsesoyuznogo soveshchaniya* [Questions philosophiques de la science moderne. Travaux de conférence de toute l'Union], Moscou : Izdatel'stvo Akademii Nauk SSSR, 1959, 664 p.
- Ferm 1929 **Fermi E.**, « Sopra l'elettrodinamica quantistica », *Accademia dei Lincei. Rendiconti*, Vol. 9, pp. 881-887.

- Ferm 1930 **Fermi E.**, « *Sopra l'elettrodinamica quantistica* », *Accademia dei Lincei. Rendiconti*, Vol. 10, pp. 431-435.
- Feye 1962 **Feyerabend P.**, « *Explanation, Reduction and Empiricism* », dans Feigl H. et Maxwell G. (éds.), *Scientific Explanation, Space and Time*, Minneapolis : University of Minneapolis Press, 1962, pp. 28-97.
- FeMW 2002 **Feynman R., Morinigo F., et Wagner W.**, *Feynman Lectures on Gravitation*, édité par Hatfield B. et Pines D., préface de Preskill J. et Thorne K. S., Boulder, Colorado : Westview Press, 2002, 272 p.
- FeLS 2014 **Feynman R., Leighton R., et Sands M.**, *Le cours de physique de Feynman. Mécanique quantique*, Nouvelle édition, Equer B. et Fleury P. (trads.), Paris : Dunod, 2014, 534 p.
- Fine 1986 **Fine A.**, *The Shaky Game. Einstein, Realism and the Quantum Theory*, Chicago : University of Chicago Press, 1986, 186 p.
- Fine 2007 **Fine A.**, « *Bohr's Response to EPR: Criticism and Defense* », *Iyyun: The Jerusalem Quarterly*, 2007, Vol. 56, pp. 31-56.
- Fine 2013 **Fine A.**, « *The Einstein-Podolsky-Rosen Argument in Quantum Theory* », dans *Stanford Encyclopedia of Philosophy* [en ligne], Stanford Encyclopedia of Philosophy, page consultée le 5 février 2017.
<https://plato.stanford.edu/entries/qt-epr/#2>
- Fino 1991 **Finocchiaro M. A.**, « *Review : A Rhetoric of Science: Inventing Scientific Discourse by Lawrence J. Prelli* », *Philosophy & Rhetoric*, 1991, Vol. 24, N°2, pp. 168-173.
- Fitz 1979 **Fitzpatrick S.**, *Education and Social Mobility in the Soviet Union 1921-1934*, Cambridge : Cambridge University Press, 1979, 355 p.
- Fitz 1992 **Fitzpatrick S.**, *The Cultural Front. Power and Culture in Revolutionary Russia*, Ithaca : Cornell University Press, 1992, 267 p.
- Fock 1993 **Fock M. V.**, « *Vospominaniya ob ottse* » [Souvenirs sur mon père], *Voprosy istorii estestvoznaniya i tekhniki*, 1993, N°2, pp. 132-138.
- Fokk 1955 **Fokker A. D.**, « *Albert Einstein, Inventor of Chronogeometry* », *Synthese*, 1955, Vol. 9, pp. 442-444.
- Fols 1985 **Folse H. J.**, *The Philosophy of Niels Bohr. The Framework of Complementarity*, Amsterdam : North-Holland, 1985, 281 p.

- Fols 1986 **Folse H. J.**, « Niels Bohr, Complementarity, and Realism », *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, 1986, pp. 96-104.
- Fols 1994 **Folse H.**, « Bohr's Framework of Complementarity and the Realism Debate », dans Faye J. et Folse H. J. (éds.), *Niels Bohr and Contemporary Philosophy*, Boston Studies in the Philosophy of Science, Vol. 153, Springer, 1994, pp. 119-140.
- Form 1971 **Forman P.**, « Weimar Culture, Causality, and Quantum Theory, 1918-1927: Adaptation by German Physicists and Mathematicians to a Hostile Intellectual Environment », *Historical Studies in the Physical Sciences*, Vol. 3, pp. 1-115.
- Form 1984 **Forman P.**, « *Kausalität, Anschaulichkeit, and Individualität*, or How Cultural Values Prescribed the Character and the Lessons Ascribed to Quantum Mechanics », dans Stehr N. et Meja V. (éds.), *Society and Knowledge: Contemporary Perspectives in the Sociology of Knowledge*, New Brunswick : Transaction Books, 1984, pp. 333-347.
- Fors 2008 **Forstner C.**, « The Early History of David Bohm's Quantum Mechanics Through the Perspective of Ludwik Fleck's Thought-Collectives », *Minerva*, 2008, N°46, pp. 215-229.
- FrFr 1924 **Frederiks V. K. et Friedmann A. A.**, *Osnovy teorii otnositel'nosti (Vyp I. Tenzorial'noe ischislenie)* [Principes fondamentaux de la théorie de la relativité. Part I. Analyse tensorielle], Leningrad : Academia, 1924, 167 p.
- Frei 1994 **Freire Junior. O.**, « Sobre o diálogo Fock-Bohr », *Perspicillum*, 1994, Vol. 8, N°1, pp. 63-84.
- Frei 1997 **Freire Junior O.**, « Quantum controversy and Marxism », *Historia Scientarum*, 1997, N°7, pp. 137-152.
- Frei 2004a **Freire Junior O.**, « Popper, probabilidade e mecânica quântica », *Episteme*, 2004, Vol. 18, pp. 103-127.
- Frei 2004b **Freire Junior O.**, « The Historical Roots of "Foundations of Quantum Physics" as a Field of Research (1950-1970) », *Foundations of Physics*, 2004, Vol. 34, N°11, pp. 1741-1760.

- Frei 2011 **Freire Junior O.**, « On the connections between the dialectical materialism and the controversy on the quanta », *Jahrbuch für Europäische Wissenschaftskultur / Yearbook for European Culture of Science*, 2011, Vol. 6, pp. 195-210.
- Frei 2015 **Freire Junior O.**, *The Quantum Dissidents. Rebuilding the Foundations of Quantum Mechanics (1950-1990)*, Heidelberg : Springer, 2015, 356 p.
- Fren 1971 **Frenkel V. Ya.**, « Yurii Aleksandrovich Krutkov », *Soviet Physics Uspekhi*, 1971, Vol. 13, N°6, pp. 816-825.
- Fren 1987 **Frenkel V. Ya.**, « Professor Dirac and Soviet Physicists », *Soviet Physics Uspekhi*, 1987, Vol. 30, N°9, pp. 816-822.
- Fren 1990 **Frenkel V. Ya.** (éd.), *Fiziki o sebe* [Les physiciens et moi], Léningrad : Nauka, 1990, 488 p.
- FrJo 1990 **Frenkel V. Ya. et Josephson P.**, « Soviet Physicists awarded stipends by the Rockefeller Foundation », *Soviet Physics Uspekhi*, 1990, Vol. 33, N°11, pp. 938-955.
- Freu 2007 **Freund P. G. O.**, *A Passion for Discovery*, World Scientific, 2007, 240 p.
- Fried 1922 **Friedmann A. A.**, « Über die Krümmung des Raumes » [À propos de la courbure de l'espace], *Zeitschrift für Physik*, Vol. 10, N°1, pp. 377-386.
- Fried 1923 **Friedmann A. A.**, *Mir kak prostranstvo i vremya* [Le monde comme espace et temps], Izdaniye vtoroye (seconde édition), Moscou : Nauka, 1965 [1923].
- Fried 1924 **Friedmann A. A.**, « Über die Möglichkeit einer Welt mit konstanter negativer Krümmung des Raumes » [Sur la possibilité d'un monde avec une courbure de l'espace négative constante], *Zeitschrift für Physik*, Vol. 21, N°1, pp. 326-332.
- Froe 2003 **Froese Fischer C.**, *Douglas Rayner Hartree. His Life in Science and Computing*, Singapour : World Scientific, 2003, 224 p.

G

- Gamo 1970 **Gamow G.**, *My World Line. An Informal Autobiography*, New-York: The Viking Press, 1970, 178 p.

- GaHo 1929 **Gamow G. et Houtermans F. G.**, « Zur Quantenmechanik des radioaktiven Kerns » [Sur la mécanique quantique d'un noyau radioactif], *Zeitschrift für Physik*, Vol. 52, N°7-8, pp. 496-509.
- Gaun 1928 **Gaunt J. A.**, « A Theory of Hartree's Atomic Fields », *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 1928, Vol.24/2, pp. 328-342.
- GaSi 2002 **Gavroglu K. et Simões A.**, « Preparing the Ground for Quantum Chemistry in Great Britain: The Work of the Physicist R. H. Fowler and the Chemist N. V. Sidgwick », *The British Journal for the History of Science*, 2002, Vol. 35, N°2, pp. 187-212.
- GaSi 2012 **Gavroglu K. et Simões A.**, *Neither Physics nor Chemistry. A History of Quantum Chemistry*. Cambridge, MA: The MIT Press, 2012, 351 p.
- Gett 1985 **Getty J. A.**, *Origins of the Great Purges: The Soviet Communist Party Reconsidered, 1933-1938*, Cambridge : Cambridge University Press, 1985, 288 p.
- Ginz 1956 **Ginzburg V. L.**, « Eksperimental'naya proverka obshchey teorii otnositel'nosti » [Vérification expérimentale de la théorie de la relativité générale], *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1956, T. 59, N°1, pp. 11-49.
- Ginz 2005 **Ginzburg V. L.**, *About Science, Myself and Others*, Bristol – Philadelphie : IOP Publishing Ltd, 2005, 553 p.
- Goen 2004 **Goenner H. F. M.**, « On the History of Unified Field Theories », *Living Reviews in Relativity*, Vol. 7, N°2, 153 p.
- Gold 1999 **Goldstein J.**, « Emergence as a Construct: History and Issues », *Emergence*, 1999, Vol. 1, N°1, pp. 49-72.
- Gord 1926 **Gordon W.**, « Der Comptoneffekt nach der Schrödingerschen Theorie », [L'effet Compton d'après la théorie de Schrödinger], *Zeitschrift für Physik*, 1926, Vol. 40, N°1, pp. 117-133.
- Gord 1928 **Gordon W.**, « Über den Stoß zweier Punktladungen nach der Wellenmechanik » [Sur la collision de deux charges ponctuelles d'après la mécanique ondulatoire], *Zeitschrift für Physik*, 1928, Vol. 48, N°3, pp. 180-191.

- GoFr 1985 **Gorelik G. E. et Frenkel V. Ya.**, « M. P. Bronshteyn i yego rol' v stanovlenii kvantovoy teorii gravitatsii » [M. P. Bronstein et son rôle dans le développement de la théorie quantique de la gravitation], dans Kobzarev I. Yu. (éd.), *Eynshteynovskiy sbornik 1980-1981*, Moscou : Nauka, 1985, pp. 291-327.
- Gore 1990 **Gorelik G. E.**, « Naturfilosofskiye problemy fiziki v 1937 godu » [Problèmes de philosophie naturelle en physique en 1937], *Priroda*, 1990, N°2, pp. 93-102.
- Gore 1993 **Gorelik G. E.**, « Vladimir Fock : Philosophy of Gravity and Gravity of Philosophy », dans Earman J., Janssen M., Norton J. D. (éds.), *The Attraction of gravitation: new studies in the history of general relativity*, , Boston : Birkhauser, 1993, 439 p.
- Gore 2005 **Gorelik G.**, « Matvei Bronstein and quantum gravity: 70th anniversary of the unsolved problem », *Physics Uspekhi*, 2005, Vol. 48, N°10, pp. 1039-1053.
- GoFr 1994 **Gorelik G. E. et Frenkel V. Ya.**, *Matvei Petrovich Bronstein and Soviet Theoretical Physics in the Thirties*, traduit du russe vers l'anglais par Levina V. M., Bâle – Boston – Berlin : Birkhäuser Verlag, 1994, 208 p.
- Goro 2012 **Gorobets B. S.**, *Sovetskie fiziki shytyat... Khotya byvalo ne do shytok. Izd. 3-e* [Les physiciens soviétiques plaisantent... Bien que ce ne soit pas une blague. 3^e édition], Moscou : URSS/Librokom, 2012, 208 p.
- Gouz 2010 **Gouz S.**, *Biographie d'une vision du monde : Les relations entre science, philosophie et politique dans la conception marxiste de J.B.S. Haldane*, Thèse de Doctorat en Histoire, philosophie et épistémologie des sciences, des techniques et des technologies, Lyon : Université Claude Bernard – Lyon 1, 2010.
- Govr 1998 **Govrin Y.**, *Israeli-Soviet relations, 1953-67: from confrontation to disruption*, London-Portland : Franck Cass, 1998, 347 p.
- Grah 1966a **Graham L. R.**, « Quantum Mechanics and Dialectical Materialism », *Slavic Review*, 1966, Vol. 25, N°3, pp. 381-410.
- Grah 1966b **Graham L. R.**, « Reply », *Slavic Review*, 1966, Vol. 25, N°3, pp. 418-420.
- Grah 1972 **Graham L. R.**, *Science and Philosophy in the Soviet Union*, New-York: Alfred A. Knopf, 1972, 584 p.

- Grah 1982 **Graham L. R.**, « The Reception of Einstein's Ideas: Two Examples from Contrasting Political Cultures », dans Holton G. et Elkana Y. (éds), *Albert Einstein, Historical and Cultural Perspectives. The Centennial Symposium in Jerusalem, 14-23 March 1979*, Princeton : Princeton University Press, 1982, pp. 107-136.
- Grah 1987 **Graham L. R.**, *Science, Philosophy, and Human Behaviour in the Soviet Union*, 1987, New York : Columbia University Press, 565 p.
- Grah 1988 **Graham L. R.**, « The Soviet Reaction to Bohr's Quantum Mechanics », dans Feshbach H., Matsui T. et Oleson A. (éds.), *Niels Bohr: Physics and the World*, 2014 [1988], pp. 305-317.
- Grah 1993 **Graham L. R.**, *Science in Russia and the Soviet Union : a short history*, Cambridge : Cambridge University Press, 1993, 321 p.
- Gree 2005 **Greenspan N. T.**, *The End of the Certain World: The Life and Science of Max Born*, New York : Basic Books, 2005, 374 p.
- GuGh 1946 **das Gupta N. N. et Ghosh S. K.**, « A Report on the Wilson Cloud Chamber and its Applications in Physics », *Reviews of Modern Physics*, 1946, Vol. 18, N°2, pp. 225–365.

H

- Haje 2011 **Hájek A.**, « Intepretations of Probability », dans *Stanford Encyclopedia of Philosophy* [en ligne], Stanford Encyclopedia of Philosophy, page consultée le 8 juillet 2017.
<https://plato.stanford.edu/entries/probability-interpret/#ProInt>
- Hall 2005 **Hall K.**, « 'Think Less about Foundations': A short Course on the Course of Theoretical Physics of Landau and Lifshitz », dans Kaiser D. (éd), *Pedagogy and the practice of science: historical and contemporary perspectives*, Cambridge : The MIT Press, 2005, p. 253-286.
- Hall 2008 **Hall K.**, « The schooling of Lev Landau: The European Context of Postrevolutionary Soviet Theoretical Physics », *Osiris*, N°23, 2008, p. 230-259.
- HaMa 1994 **Halliday M. A. K. et Martin J. R.**, *Writing Science: Literacy and Discursive Power*, London : CRC Press, 1994, 434 p.

- Hart 1928a **Hartree D. R.**, « The Wave Mechanics of an Atom with a Non-Coulomb Central Field. Part I. Theory and Methods », *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 1928, Vol. 24, N°1, pp. 89-110.
- Hart 1928b **Hartree D. R.**, « The Wave Mechanics of an Atom with Non-Coulomb Central Field. Part II. Some Results and Discussion », *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 1928, Vol. 24, N°1, pp 111-132.
- Hart 1928c **Hartree D. R.**, « The Wave Mechanics of an Atom with Non-Coulomb Central Field. Part III. Term Values and Intensities in Series in Optical Spectra », *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 1928, Vol. 24, N°3, pp 426-437.
- Hart 1929 **Hartree D. R.**, « The Wave Mechanics of an Atom with Non-Coulomb Central Field. Part IV. Further Results relating to Terms of the Optical Spectrum », *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 1929, Vol. 25, N°3, pp 310-314.
- Hart 1933 **Hartree D. R.**, « Results of Calculations of Atomic Wave Functions. I.-Survey, and Self-consistent Fields for Cl^- and Cu^+ . », *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 1933, Vol. 139/838, pp 311-335.
- Hart 1960 **Hartree D. R.**, *Raschety atomnykh struktur*, traduction de M. I. Petrashen, sous la rédaction et avec préface de V. A. Fock, Moscou : Izdatel'stvo inostrannoy literatury, 1960, 272 p.
- HaBl 1933 **Hartree D. R. et Black M. M.**, « A Theoretical Investigation of the Oxygen Atom in Various States of Ionisation. », *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 1933, Vol. 141/844, pp 282-301.
- HaHa 1935a **Hartree D. R. et Hartree W.**, « Results of Calculations of Atomic Wave Functions. III. Results for Be, Ca and Hg », *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 1935, Vol. 149/867, pp 210-231.
- HaHa 1935b **Hartree D. R. et Hartree W.**, « Self-Consistent Field, with Exchange, for Beryllium », *Proceedings of the Royal Society of London. Series A,*

Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, 1935, Vol. 150/869, pp 9-33.

- HaHa 1938 **Hartree D. R. et Hartree W.**, « Self-consistent field, with exchange for potassium and argon », *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 1938, Vol. 166/927, pp 450-464.
- HaHS 1939 **Hartree D. R., Hartree W. and Swirles B.**, « Self-Consistent Field, Including Exchange and Superposition of Configurations, with Some Results for Oxygen », *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1939, Vol. 238/790, pp. 229
- HaSw 1937 **Hartree D. R. & Swirles B.**, « The effect of configuration interaction on the low terms of the spectra of oxygen », *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 1937, Vol. 33/2, pp. 240-249.
- Hava 1989 **Havas P.**, « The Early History of the “Problem of Motion” in General Relativity », dans Howard D. et Stachel J. (éds), *Einstein and the History of General Relativity*, Boston : Birkhäuser, 1989, pp. 234-276.
- Hege 1817 **Hegel G. W. F.**, *Enzyklopädie der philosophischen Wissenschaften* [Encyclopédie des sciences philosophiques], Heidelberg, 1817, 588 p.
- Heis 1925 **Heisenberg W.**, « Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen » [Sur la réinterprétation quantique-théorique des relations cinématiques et mécaniques], *Zeitschrift für Physik*, 1925, Vol. 33, pp. 879-893.
- Heis 1926 **Heisenberg W.**, « Mehrkörperprobleme und Resonanz in der Quantenmechanik » [Problème à plusieurs corps et résonance dans la mécanique quantique], *Zeitschrift für Physik*, Vol. 38, N°6, 1926, pp. 411-426.
- Heis 1927 **Heisenberg W.**, « Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik », *Zeitschrift für Physik*, 1927, Vol. 43, pp. 172-198.
- Heis 1927' - « The Physical Content of Quantum Kinematics and Mechanics », dans Wheeler J. A. et Wojciech H. Z. (éds. et trads.), *Quantum Theory and Measurement*, Princeton : Princeton University Press, 1983, pp. 62-84.

- Heis 1930 **Heisenberg W.**, *The physical principles of the quantum theory*, traduit de l'allemand par Eckart C. et Hoyt F. C., Chicago : The University of Chicago Press, 1930, 186p.
- Heis 1958 **Heisenberg W.**, *Physics and Philosophy: The Revolution in Modern Science*, New-York : Harper and Row, 1958, 192 p.
- Heis 1969 **Heisenberg W.**, *Der Teil und das Ganze*, Munich : R. Piper & Co, 1969, 334 p.
- Heis 1969' - *La Partie et le Tout. Le monde de la physique atomique*, traduit par Kessler P., Paris : Flammarion, Champs, 1990, 338p.
- HePa 1929 **Heisenberg W. et Pauli W.**, « Zur Quantendynamik der Wellenfelder » [Sur la dynamique quantique des champs d'ondes], *Zeitschrift für Physik*, Vol. 59, N°1-2, 1929, pp. 1-61.
- Heit 1927 **Heitler W.**, « Störungsenergie und Austausch beim Mehrkörperproblem » [Flux d'énergie et « échange » dans le problème à plusieurs corps], *Zeitschrift für Physik*, 1927. Vol. 46, N°1-2, pp. 47-72.
- Heit 1927 **Heitler W.**, « Störungsenergie und Austausch beim Mehrkörperproblem » [Énergie et échange de rayonnement dans un problème à plusieurs corps], *Zeitschrift für Physik*, Vol. 46, N°1, pp. 47–72.
- Heit 1946 **Heitler W.**, *Elementary wave mechanics*, Oxford : Clarendon Press, 1946, 136 p.
- HeLo 1927 **Heitler W. et London F.**, « Wechselwirkung neutraler Atome und homöopolare Bindung nach der Quantenmechanik » [Interaction des atomes neutres et liaison homopolaire en mécanique quantique], *Zeitschrift für Physik*, 1927, Vol. 44, pp. 455-472.
- Helm 1867 **von Helmholtz H.**, *Handbuch der physiologischen Optik* [Manuel d'optique physiologique], Leipzig : L. Voss, 1867, 875 p.
- HeSk 1963 **Herman F. et Skillman S.**, *Atomic Structure Calculations*, Englewood Cliffs : Prentice-Hall, 1963, 7-62 p.
- Hess 1931 **Hessen B.**, *Les racines sociales et économiques des Principia de Newton*, traduit par Guérout S., Paris : Vuibert, 2006 [1931], 229 p.
- HiUf 2016 **Hilgevoord J. et Uffink J.**, « The Uncertainty Principle », dans *Stanford Encyclopedia of Philosophy* [en ligne], Stanford Encyclopedia of Philosophy, page consultée le 4 février 2017.
<https://plato.stanford.edu/entries/qt-uncertainty/>

- Hodd 1992 **Hoddeson L. et al.**, *Out of the Crystal Maze: Chapters from the History of Solid-State Physics*, New York: Oxford University Press, 1992, 697 p.
- Hodg 2000 **Hodgson G. M.**, « The Concept of Emergence in Social Science », *Emergence*, 2000, Vol. 2, N°4, pp. 65-77.
- Holl 2016 **Hollings C. D.**, *Scientific Communication Across the Iron Curtain*, SpringerBriefs in History of Science and Technology, Springer, 2016, 123 p.
- Hoof 2015 **'t Hooft G.**, « The Evolution of Quantum Field Theory: from QED to Grand Unification », dans Maiani L. et Rolandi L. (éds), *The Standard Theory of Particle Physics, Essays to celebrate CERN's 60th Anniversary*, Singapour : World Scientific, pp 1-27.
- Hook 1972 **Hooker C. A.**, « The Nature of Quantum Mechanical Reality: Einstein Versus Bohr », dans Colodny J. (éd.), *Paradigmes & Paradoxes: The Philosophical Challenges of the Quantum Domain*, Pittsburgh : University of Pittsburgh Press, 1972, pp. 67-208.
- Hove 1958 **van Hove L.**, « Von Neumann's contributions to quantum theory », *Bulletin of the American Mathematical Society*, 1958, Vol. 64, N°3, pp. 95-99.
- Howa 1990 **Howard D.**, « "Nicht sein kann was nicht sein darf," or the prehistory of EPR, 109-1935: Einstein's early worries about the quantum mechanics of composite systems », dans *Sixty-Two Years of Uncertainty*, New-York : Plenum Press, 1990, pp. 61-111.
- Howa 1992 **Howard D.**, « Popper and Bohr on Realism in Quantum Mechanics », *Quanta*, 2012, Vol. 1, N°1, pp. 33-57.
- Hoyn 1994 **Hoyningen-Huene P.**, « Niels Bohr's argument for the irreducibility of biology to physics », dans Faye J. et Folse H. (éds.), *Niels Bohr and Contemporary Physics*, Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1994, pp. 231-255.
- Hüb 1973 **Hübner K.**, « Über die Philosophie der Wirklichkeit in der Quantenmechanik » [Sur la philosophie de la réalité en mécanique quantique], *Philosophia Naturalis*, 1973, Vol. 14, p. 3-24.
- Hund 1927a **Hund F.**, « Zur Deutung der Molekelspektren » [Sur l'interprétation des spectres moléculaires], *Zeitschrift für Physik*, 1927, Vol. 40, pp. 742-764.
- Hund 1927b **Hund F.**, « Symmetriecharaktere von Termen bei Systemen mit gleichen Partikeln in der Quantenmechanik » [Caractéristiques de la symmétrie des

termes dans un système à particules identiques en mécanique quantique], *Zeitschrift für Physik*, Vol. 43, N°11, pp. 788–804.

I

- lIPu 1994 **Ilizarov S. S. et Pushkareva L. I.**, « Beriya i teoriya otnositel'nosti » [Beria et la théorie de la relativité], *Istoricheskiy arkhiv*, 1994, N°3, pp. 215-223.
- Infe 1954a **Infeld L.**, « Kilka uwag o teorii względności » [Quelques remarques sur la théorie de la relativité], *Myśl Filozoficzna*, 1954, N°1, pp. 70-79.
- Infe 1954a' - « Neskol'ko zamechaniy o teorii otnositel'nosti », *Voprosy filosofii*, 1954, N°5, pp. 173-178.
- Infe 1954b **Infeld L.**, « On the Motion of Bodies in General Relativity Theory », *Acta Physica Polonica*, 1954, Vol. 13, pp. 187-204.
- Infe 1955 **Infeld L.**, « Od Kopernika do Einsteina » [De Copernic à Einstein], *Kosmos*, 1955, Vol. 1, pp. 209-226.
- Infe 1956 **Infeld L.** « On Equations of Motion in General Relativity », *Helvetica Physica Acta*, 1956, N°29, pp. 206-209.
- Infe 1964 **Infeld L.** (éd.), *Relativistic Theories of Gravitation. Conference in Warszawa and Jabloma 25-31 July 1962*. Paris : Gauthier-Villar, 1964, 379 p.
- Infe 1978 **Infeld L.**, *Why I left Canada: Reflections on Science and Politics*, traduit par Infeld H., Montréal – Londres : McGill-Queen's University Press, 1978, 212 p.
- loff 1934 **Ioffé A. F.**, « Razvitie atomisticheskix vozzreniy v XX v. » [Développements des vues atomistiques au XX^e siècle], *Pod znamenem marksizma*, 1934, N°4, pp. 52-68.
- loff 1949 **Ioffé A. F.**, *Osnovnye predstavleniya sovremennoy fiziki* [Concepts fondamentaux de la physique moderne], Léningrad – Moscou : GITTL, 1949, 368 p.

J

- JaOk 2001 **Jackson J. D. et Okun L. B.**, « Historical roots of gauge invariance », *Reviews of Modern Physics*, Vol. 73, N°3, pp. 663-680.

- JaCo 1933 **James H. M and Coolidge A. S.**, « Ground state of the hydrogen molecule », *Journal of Chemical Physics*, 1933, N°1, pp. 825-830.
- JaJo 2015 **James J. et Joas C.**, « Subsequent and Subsidiary? Rethinking the Role of Applications in Establishing Quantum Mechanics », *Historical Studies in the Natural Sciences*, 2015, Vol. 45, N°5, pp. 641-702.
- Jamm 1974 **Jammer M.**, *The Philosophy of Quantum Mechanics. The Interpretations of Quantum Mechanics in Historical Perspective*, New-York : John Wiley & Sons, 1974, 536 p.
- Jdan 1947 **Jdanov A. A.**, *Vystupleniye na disussii po knige G. F. Aleksandrova "Istoriya zapadnoyevropeyskoy filosofii". 24 iyunya 1947 g.* [Discours sur la discussion au sujet du livre de G. F. Aleksandrov « Histoire de la philosophie d'Europe de l'ouest », 24 juin 1947], Gosudarstvennoye izdatel'stvo politicheskoy literatury, 1952, 48 p.
- JoFE 2015 **Joaquim L., Freire Junior. O. et El-Hani C. N.**, « Quantum Explorers: Bohr, Jordan and Delbrück Venturing in Biology », *Physics in Perspective*, 2015, Vol. 17, pp. 236-250.
- Jora 1961 **Joravsky D.**, *Soviet Marxism and Natural Science, 1917-1932*, New-York : Columbia University Press, 1961. 433 p.
- Jord 1927a **Jordan P.**, « Über quantenmechanische Darstellung von Quantensprüngen » [Sur la représentation en mécanique quantique des sauts quantiques], *Zeitschrift für Physik*, 1927, Vol. 40, N°9, pp. 661-666.
- Jord 1927b **Jordan P.**, « Zur Quantenmechanik des Gasentartung » [Sur la mécanique quantique de la dégénérescence gazeuse], *Zeitschrift für Physik*, 1927, Vol. 44, pp. 473-480.
- JoKl 1927 **Jordan P. et Klein O.**, « Zum Mehrkörperproblem der Quantentheorie » [Sur le problème à plusieurs corps en théorie quantique], *Zeitschrift für Physik*, 1927, Vol. 45, pp. 751-765.
- Jose 1988 **Josephson P. R.**, « Physics and Soviet-Western Relations in the 1920s and 1930s », *Physics Today*, 1988, Vol. 414, N°9, pp. 54-61.
- Jose 1991 **Josephson P. R.**, *Physics and politics in revolutionary Russia*, Berkeley - Los Angeles : University of California Press, 1991, 422p.

- Juko 1999 **Jukov V. Yu.**, « Pulkovskoe delo » [L'affaire Pulkovo], dans *Repressirovannyye geologi, 3-ye izdanie* [Géologues réprimés, troisième édition], Moscou - Saint-Pétersbourg, 1999, pp. 411-418.

K

- Kana 2013 **Kanayama K.**, « Between Ideology and Science: Dialectics of Dispute on Physics in 1920s-1930s Soviet Russia », *Historia Scientiarum*, 2013, Vol. 22, N°3, pp. 201-214.
- Kant 1781 **Kant E.**, *Critique de la raison pure*, traduit en français par Renaut A., Paris : Flammarion, 2006 [1781], 749 p.
- Kaya s. d. **Kayas G.**, « Fock Vladimir Alexandrovitch - (1898-1974) », *Universalis éducation* [en ligne]. Encyclopædia Universalis, consulté le 11 janvier 2017. <http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/vladimir-alexandrovitch-fock/>
- Khal 2012 **Khalatnikov I. M.**, *From the Atomic Bomb to the Landau Institute. Autobiography. Top Non-Secret*, Dordrecht : Springer, 2012, 213 p.
- *Dau, Kentavr I drugie (Top nonsecret)*, Moscou : Fizmatlit, 2012, 191 p.
- Kim 1993 **Kim J.**, *Mind in a Physical Word*, Cambridge (Mass) : MIT Press, 1998, 156 p.
- Kim 2006 **Kim J.**, « Emergence: Core ideas and issues », *Synthese*, 2006, Vol. 151, pp. 547-559.
- Kist 2007 **Kistler M.**, « La réduction, l'émergence, l'unité de la science et les niveaux de réalité », *Matière Première*, Vol. 2, pp. 67-97.
- Klein 1926 **Klein O.**, « Quantentheorie und fünfdimensionale Relativitätstheorie. » [Théorie quantique et théorie de la relativité à cinq dimensions], *Zeitschrift für Physik*, 1926, Vol. 37, N°12, pp. 895-906.
- Klein 1985 **Klein M. J.**, *Paul Ehrenfest: The making of a theoretical physicist*, Amsterdam : North Holland, 1985, 330 p.
- Kobz 1974 **Kobzarev Yu.**, « Otnositel'nosti teoriya. » [Théorie de la relativité], *Bol'shaya Sovetskaya Entsiklopediya* [Grande encyclopédie soviétique], 3^e édition, 1974, T. 18, pp. 623-628.
- Kohl 1978 **Kohler E.**, « A Policy for the Advancement of Science: The Rockefeller Foundation, 1924-1929 », *Minerva*, 1978, Vol. 16, N°4, pp. 480-515.

- Koje 1988 **Kojevnikov A. B.**, « V. A. Fock i metod vtorichnogo kvantovaniya » [V. A. Fock et la méthode de la seconde quantification], dans *Issledovaniya po istorii fiziki i mekhaniki*, Moscou : Nauka, 1988, pp. 113-138.
- Koje 1990 **Kojevnikov A. B.**, « Perepiska Diraka s V. A. Fokom. Materialy k istorii stat' l Diraka-Foka-Podol'skogo » [Correspondance entre Dirac et V. A. Fock. Matériel pour l'histoire de l'article Dirac-Fock-Podolsky], dans Medvedev B. V. et al. (éds), *Pol' Dirak i Fizika XX Veka*, Moscou : Nauka, 1990, pp. 177-197.
- Koje 1993 **Kojevnikov A. B.**, « Filantropiya Rokfellera i sovetskaya nauka » [Philantropie Rockefeller et science soviétique], *Voprosy istorii estestvoznaniya i tekhniki*, N°2, 1993, pp. 80-111.
- Koje 2002a **Kojevnikov A. B.**, « Dirac's Quantum Electrodynamics », dans Balashov Yu. et Vizgin V. (éds.), *Einstein Studies in Russia*, Boston: Birkhäuser, 2002, pp. 229-259.
- Koje 2002b **Kojevnikov A. B.**, « Einstein and Soviet Dogma; An elusive Relationship », *Physics Today*, 2002, Vol. 55, N°9, pp. 59-60.
- Koje 2004 **Kojevnikov A. B.**, *Stalin's Great Science: The Times and Adventures of Soviet Physicists*, Londres : Imperial College Press, 2004, 360 p.
- Koje 2012 **Kojevnikov A.**, « Probability, Marxism, and Quantum Ensembles », *Yearbook for the European Culture of Science*, 2012, N°7, pp. 211-235.
- KoKo 1986 **Kotek J. et Kotek D.**, *L'affaire Lyssenko*, Editions Complexe, 1986, 238 p.
- Komi 1938 **Komissii TsK VKP (b)** (réd.), *Istoriya Vsesoyuznoy kommunisticheskoy partii (bol'shevikov)* [Histoire du Parti communiste (bolchévique) de l'URSS], Moscou : Izdatel'stvo TsK VKP (b) « Pravda », 1938, 341 p.
- Kuhn 1962 **Kuhn T. S.**, *The Structure of Scientific Revolutions*, Chicago : University of Chicago Press, 1962, 172 p.
- Krag 1984 **Kragh H.**, « Equation with the many fathers. The Klein-Gordon equation in 1926 », *American Journal of Physics*, 1984, Vol. 52, N°11, pp. 1024-1033.
- Krag 1990 **Kragh H.**, *Dirac: a scientific biography*, Cambridge : Cambridge University Press, 1990, 389 p.
- Krem 1997 **Kremenstov N.**, *Stalinist Science*, Princeton: Princeton University Press, 1997, 371 p.

- Krip 1994 **Krips H.**, « A Critique Of Bohr's Local Realism », dans Faye J. et Folse H. J. (éds.), *Niels Bohr and Contemporary Philosophy*, Boston Studies in the Philosophy of Science, Vol. 153, Springer, 1994, pp. 269-278.
- Kuhn 1967 **Kuhn T. S.**, *Interview of Vladimir Fok by Thomas S. Kuhn on 1967 October 11* [en ligne], Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, College Park, MD USA. Consulté le 31 janvier 2017.
www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/4606
- KuHe 1963 **Kuhn T. S. et Heilbron J. L.**, *Interview of Leon Rosenfeld (Session 3) on 1963 July 22* [en ligne], Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, College Park, MD USA. Consulté le 25 mai 2017.
<https://www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/4847-3>
- Kura 1979 **Kuranskiy E.** (éd), *Al'bert Eynshteyn I teoriya gravitatsii* [Albert Einstien et la théorie de la gravitation], Moscou : MIR, 1979, 592 p.
- Kuzn 1965 **Kuznetsov B.**, « Eynshteyn i Bor » [Einstein et Bohr], *Organon*, Vol. 2, pp. 105-121.

L

- Lack 2000a **Lacki J.**, « The Early Axiomatizations of Quantum Mechanics: Jordan, von Neumann and the Continuation of Hilbert's Program », *Archive for History of Exact Sciences*, 2000, Vol. 54, N°4, pp. 279-318.
- Lack 2000b **Lacki J.**, « André Mercier (1913-1999) », *Archs Sci. Genève*, 2000, Vol. 53, Fasc. 1, pp. 69-72.
- Lall 2017 **Lalli R.**, *Building the General Relativity and Gravitation Community During the Cold War*, Dordrecht : Springer, 2017, 168 p.
- Lanc 1922 **Lánczos K.**, « Ein vereinfachendes Koordinatensystem für die Einsteinschen Gravitationsgleichungen » [Un système de coordonnées simplifié pour les équations de la gravitation d'Einstein], *Physikalische Zeitschrift*, 1922, Vol. 23, pp. 537-539.
- LaLi 1974 **Landau L. et Lifshitz E.**, *Mécanique quantique. Théorie non relativiste*, 3e édition, Moscou : MIR, 1974, 766 p.

- LaPe 1930 **Landau L. et Peierls R.**, « Quantenelektrodynamik im Konfigurationsraum » [Électrodynamique quantique dans l'espace des configurations], *Zeitschrift für Physik*, 1930, Vol. 62, pp. 188-200.
- LaPe 1931 **Landau L. et Peierls R.**, « Erweiterung des Unbestimmtheitsprinzips für die relativistische Quantentheorie » [Extension du principe d'incertitude pour la théorie quantique relativiste], *Zeitschrift für Physik*, 1931, Vol. 69, N°1, pp. 56-69.
- Lang 1905 **Langevin P.**, « La physique des électrons », *Revue générale des Sciences*, 1905, vol. 16, pp. 257-276.
- Larg s. d. **Largeault J.**, « Réductionnisme & holisme », dans *Universalis éducation* [en ligne], Encyclopædia Universalis, page consultée le 22 janvier 2017. <http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/reductionnisme-et-holisme/>
- LaPi 2000 **Laughlin R. B. et Pines D.**, « The Theory of Everything », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2000, Vol. 97, N°1, pp. 28-31.
- Leco 1976 **Lecourt D.**, *Lyssenko : histoire réelle d'une « science prolétarienne »*, 2nd édition, Paris : PUF, Quadrige, 1995 [1976], 257 p.
- Ledu 2007 **Leduc P.**, *La notion d'incommensurabilité chez Thomas Kuhn*, Thèse de Doctorat en Philosophie, Montréal : Université du Québec, 2007.
- Lee 2007 **Lee S.**, *Sir Rudolf Peierls. Selected Private and Scientific Correspondence Vol. 1*, Singapour : World Scientific, 2007, 866 p.
- Lefe 1940 **Lefebvre H.**, *Le matérialisme dialectique*, Paris : Presses universitaires de France, 1990 [1940], 170 p.
- Leni 1909 **Lénine V. I.**, *Matérialisme et empiriocriticisme*, trad. Cervetto A., Montreuil-sous-bois : Editions Science Marxiste, 2009 [1909], 427 p.
- Leni 1933 **Lénine V. I.**, *Cahiers philosophiques*, Paris : Éditions sociales, 1973 [1933], 607 p.
- Lenn 1929 **Lennard-Jones J. E.**, « The electronic structure of some diatomic molecules », *Transactions of the Faraday Society*, 1929, Vol. 25, pp. 668-686.
- Lenn 1931 **Lennard-Jones J. E.**, « Wave Functions of Many-Electron Atoms », *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 1931, Vol. 27, N°3, pp 469-480.

- Lenz 1932 **Lenz W.**, « Über die Anwendbarkeit der statistischen Methode auf Ionengitter » [Sur l'applicabilité de la méthode statistique au réseau ionique], *Zeitschrift für Physik*, 1932, Vol. 77, N°11-12, pp. 713-721.
- Lero 2006 **Leroux J.**, « Opérationnalisme », dans Lecourt D. (dir.), *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences*, 4^e édition, Paris : Presses universitaires de France, Quadrige, 2006, pp. 831-832.
- LiTo 1962 **Lichnerowicz A. et Tonnelat M.-A.** (éds.), *Les théories relativistes de la gravitation : Royaumont, 21-27 Juin 1959*, Paris : Éd. du Centre national de la recherche scientifique, Colloques internationaux du Centre national de la recherche scientifique, N°91, 1962, 475 p.
- LiTo 1969 **Lichnerowicz A. et Tonnelat M.-A.** (éds.), *Fluides et Champ Gravitationnel en Relativité Générale. Paris, Collège de France, 19-23 juin 1967*, Paris : Editions du Centre national de la recherche scientifique, Collection : Colloques internationaux du Centre national de la recherche scientifique, N°170, 1969, 326 p.
- Lind 1924 **Lindsay R. B.**, *Publications from the Massachusetts Institute of Technology*, II, N°20, 1924.
- Lodg 1905 **Lodge O.**, *Life and Matter. A Criticism of Professir Haeckel's 'Riddle of the Universe'*, New-York : G. P. Putnam's sons, 1905, 175 p.
- Löwd 1995 **Löwdin P.-O.**, « The historical development of the electron correlation problem », *International Journal of Quantum Chemistry*, 1995, Vol. 55, N°2, pp. 77–102.

M

- Mach 1886 **Mach E.**, *Beiträge zur Analyse der Empfindungen* [Contributions à l'analyse des sensations], Jena : G. Fischer, 1886, 187 p.
- Mack 1994 **Mackinnon E.**, « Bohr and the Realism Debates », dans Faye J. et Folse H. J. (éds.), *Niels Bohr and Contemporary Philosophy*, Boston Studies in the Philosophy of Science, Vol. 153, Springer, 1994, pp. 279-302.
- Mack 2011 **Mackinnon E.**, *Interpreting Physics*, Boston Studies in the Philosophy of Science, Vol. 289, Springer, 2011, 268 p.

- Maks 1948 **Maksimov A. A.**, « Ob odnom filosofskom kentavre » [Sur un centaure philosophique], *Literaturnaya Gazeta*, 10 avril 1948.
- Maks 1952 **Maksimov A. A.**, « Protiv reaktsionnogo eynshteynianstva v fizike » [Contre l'einsteinisme réactionnaire en physique], *Krasnyy flot*, 14 juin 1952.
- MKTO 1952 **Maksimov A. A., Kuznetsov I. V., Terletsky Ya. P. et Ovchinnikov N. F.** (éds.) *Filosofskiye voprosy sovremennoy fiziki* [Problèmes philosophiques de la physique moderne], Moscou : Izdatel'stvo AN SSSR, 1952, 576 p.
- Mala 2011 **Malaterre C.**, « Reductionism », dans Gargaud M. et al. (éds.), *Encyclopedia of Astrobiology*, Berlin : Springer-Verlag, 2011, p. 1444.
- Mand 1926 **Mandel H. Z.**, « Zur Herleitung der Feldgleichungen in der allgemeinen Relativitätstheorie » [Sur la dérivation des équations de champ dans la théorie de la relativité générale], *Zeitschrift für Physik*, 1926, Vol. 39, N°2, pp. 136-145.
- Mand 1947 **Mandelstam L. I.**, *Polnoye sobraniye trudov : v 5 t.* [Œuvres complètes : en 5 tomes], Rytov S. M., Leontovich M. A. (éds), Moscou : Izdatel'stvo AN SSSR, 1947. – 1955.
- Mark 1948 **Markov M.**, « O prirode fizicheskogo znaniia » [Sur la nature de la connaissance physique], *Voprosy Filosofii*, N°2, pp. 140-176.
- Mark 1990 **Markov M.**, « Glazami ochevidtsa » [Témoignage oculaire], *Priroda*, N°5, pp. 99-100.
- Mark 1993 **Markov M.**, *Razmyshlyaya o fizikakh... o fizike... o mire...* [Réflexions sur les physiciens... sur la physique... sur le monde...], Moscou : Nauka, 1993, 254 p.
- MaVe 1998 **Martin J. R. et Veil R.**, *Reading Science: Critical and Functional Perspectives on Discourses of Science*, Londres : Routledge, 1998, 368 p.
- Mart 2010 **Martinez J.-P.**, *La mécanique scientifique stalinienne à l'oeuvre au second Congrès international d'histoire des sciences et techniques de Londres en 1931*, Mini-mémoire de Master 1, Histoire et philosophie des sciences, Paris : Université Paris Diderot, 2010.
- Mart 2011 **Martinez J.-P.**, *Lev Davidovitch Landau : Genèse d'une autorité scientifique pour l'élaboration d'une école paradigmatique en physique théorique*, Mémoire de Master, Histoire et philosophie des sciences, Paris : Université Paris Diderot, 2011.

- Mart 2017a **Martinez J.-P.**, « The Hartree-Fock method: from self-consistency to correct symmetry », *Annalen der Physik*, 2017, DOI 10/1002/andp.201600328.
- Mart 2017b **Martinez J.-P.**, « Beyond computational difficulties: Survey of the two decades from the elaboration to the extensive application of the Hartree-Fock method », *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, DOI 10.1016/j.shpsb.2017.03.001
- Marx 1902 **Marx K.**, « Differenz der demokritischen und epikureischen Naturphilosophie nebst einem Anhang » [Différence entre la philosophie naturelle de Démocrite et d’Epicure. Avec annexe], dans Mehring F. (éd.), *Von März 1841 bis März 1844 (Gesammelte Schriften von Karl Marx und Friedrich Engels 1841–1850, 1) (Aus dem literarischen Nachlass von Karl Marx, Friedrich Engels und Ferdinand Lassalle, 1)*, Stuttgart, 1902, pp. 12–128.
- MaEn 1846 **Marx K. & Engels F.**, *Die deutsche Ideologie* [L’idéologie allemande], Berlin : Verlag, 1969 [1846], 530 p.
- Mast 2010 **Mastny V.**, « Soviet foreign policy, 1953-1962 », dans Leffler M. P. et Wastad O. A. (éds.), *The Cambridge History of the Cold War, Vol. 1, Origins*, Cambridge : Cambridge University Press, pp. 312-333.
- Math 1997 **Mathis G.**, « Stylistique et discours scientifique », *La revue du GERAS. ASp*, 1997, Vol. 15-18, pp. 157-183.
- Mayr 1988 **Mayr E.**, « The limits of reductionism », *Nature*, 1988, Vol. 331, p. 475.
- Mccu 1991 **Mccutcheon R. A.**, « The 1936-1937 Purge of Soviet Astronomers », *Slavic Review*, 1991, Vol. 50, N°1, pp. 100-117.
- MeSh 1987 **Medvedev B. V. et Shirkov D. V.**, « P. A. M. Dirac and the formation of the basic ideas of quantum field theory », *Soviet Physics Uspekhi*, 1987, Vol. 30, N°9, pp. 791-815.
- Mehr 1974 **Mehra J.**, *Einstein, Hilbert, and The Theory of Gravitation*, Dordrecht : D. Reidel Publishing Company, 1974, 88 p.
- MeRe 2000a **Mehra J. et Rechenberg H.**, *The Historical Development of Quantum Theory. Volume 6, The Completion of Quantum Mechanics 1926-1941, Part 1*. New-York : Springer, 2000, 670 p.

- MeRe 2000b **Mehra J. et Rechenberg H.**, *The Historical Development of Quantum Theory. Volume 6, The Completion of Quantum Mechanics 1926-1941, Part 2.* New-York : Springer, 2000, 1612 p.
- MeKe 1956 **Mercier A. et Kervaire M.** (éds.), « Fünfzig Jahre Relativitätstheorie / Cinquantenaire de la Théorie de la Relativité / Jubilee of Relativity Theory », *Helvetica Physica Acta*, 1956, Supplementum IV, Bâle : Birkhauser Verlag, 286 p.
- MeSc 1962 **Mercier A. et Schaer J.**, « General information », *Bulletin on General Relativity and Gravitation*, 1962, N°1, pp. 1-2.
- Mill 2014 **Miller A.**, « Realism », dans *Stanford Encyclopedia of Philosophy* [en ligne], Stanford Encyclopedia of Philosophy, page consultée le 25 juin 2017.
- Mitk 1933 **Mitkevich V. F.**, *Fizicheskiye osnovy elektrotehniki* [Fondements physiques de l'électrotechnique], Leningrad : KUBUCH, 1933, 459 p.
- Moff 2010 **Moffat J. W.**, *Einstein Wrote Back. My Life in Physics*, Toronto : Thomas Allen Publishers, 2010, 244 p.
- Mors 1982 **Morse P. M.**, « John Clarke Slater 1900-1976 », *Biographical Memoir*, 1982, National Academy of Sciences Washington D. C., pp. 296-321.
- Mull 1928a **Mulliken R. S.**, « Assignment of quantum numbers for electrons in molecules. I. », *Physical Review*, 1928, Vol. 32, 186-22.
- Mull 1928b **Mulliken R. S.**, « Assignment of quantum numbers for electrons in molecules. II. The correlation of molecular and atomic electron states », *Physical Review*, 1928, Vol. 32, 761-772.
- Murd 1987 **Murdoch D.**, *Niels Bohr's philosophy of physics*, Cambridge : Cambridge University Press, 1987, 294 p.
- Murd 1994 **Murdoch D.**, « The Bohr-Einstein Dispute », dans Faye J. et Folse H. J. (éds.), *Niels Bohr and Contemporary Philosophy*, Boston Studies in the Philosophy of Science, Vol. 153, Springer, 1994, pp. 303-324.
- Møll 1931 **Møller C.**, « Über den Stoß zweier Teilchen unter Berücksichtigung der Retardation der Kräfte » [Sur la collision de deux particules, en tenant compte du retard des forces], *Zeitschrift für Physik*, Vol. 70, 1931, pp. 786-795.

N

- Nade 2006 **Nadeau R.**, « Objectivité », dans Lecourt D. (dir.), *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences*, 4^e édition, Paris : Presses universitaires de France, Quadrige, 2006, pp. 818-827.
- Nage 1935 **Nagel E.**, « The Logic of Reduction in the Sciences », *Erkenntnis*, 1935, N°5, pp. 46-52.
- Nage 1949 **Nagel E.**, « The Meaning of Reduction in the Natural Sciences », dans Stauffer R. C. (éd.), *Science and Civilization*, Madison : University of Wisconsin Press, 1999, pp. 99-135.
- Nage 1961 **Nagel E.**, *The Structure of Science. Problems in the Logic of Scientific Explanation*, Indianapolis : Hackett, 1961, 618 p.
- Nage 1998 **Nagel T.**, « Reductionism and Antireductionism », dans Bock G. R. et Goode J. A. (éds.), *The Limits of Reductionism in Biology. Novartis Foundation Symposium 213*, Chichester : John Wiley & Sons, 1998, pp. 3-14.
- Naum 1959 **Naumann H.**, « Zur erkenntnistheoretischen Bedeutung der Diskussion zwischen Albert Einstein und Niels Bohr » [Sur l'importance épistémologique de la discussion entre Albert Einstein et Niels Bohr], *Deutsche Zeitschrift für Philosophie*, 1959, Vol. 7, pp. 389-411.
- NaPe 2006 **Navarro L. et Pérez E.**, « Paul Ehrenfest: The Genesis of the Adiabatic Hypothesis, 1911-1914 », *Archive for History of Exact Sciences*, N°60, 2006, pp. 209-267.
- Neum 1932 **von Neumann J.**, *Die Grundlehren der Mathematischen Wissenschaften* [Les principes fondamentaux des sciences mathématiques], Berlin : Verlag, 1932, 262 p.
- Neur 1931 **Neurath O.**, *Empirische Soziologie. Der wissenschaftliche Gehalt der Geschichte und Nationalökonomie* [Sociologie empirique. Le contenu scientifique de l'histoire et de l'économie nationale], Vienne : Springer, 1931, 466 p.
- Ney s. d. **Ney A.**, « Reductionism », dans *Internet Encyclopedia of Philosophy* [en ligne], IEP, page consultée le 20 janvier 2017.
<http://www.iep.utm.edu/red-ism/>

- Niko 1936 **Nikol'skiy K. V.**, « Printsipy kvantovoy mekhaniki. I. » [Principes de la mécanique quantique], *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1936, Vol. 16, N°5, pp 539–565.
- Niko 1937 **Nikol'skiy K. V.**, « Otvet V. A. Foku » [Réponse à V. A. Fock], *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1937, Vol. 17, N°4, pp 554–560.
- Nort 1989 **Norton J.**, « What was Einstein's Principle of Equivalence », dans Howard D. et Stachel J. (éds), *Einstein and the History of General Relativity*, Boston : Birkhäuser, 1989, pp. 5-47.
- Novo 1999a **Novozhilov Yu. V. et Novozhilov V. Yu.**, « Works of Vladimir Aleksandrovich Fock in quantum field theory (On the centennial of the birth of V. A. Fock) », *Theoretical and Mathematical Physics*, Vol. 120, N°3, 199, pp. 1150-1163.
- Novo 1999b **Novozhilov Yu. V. et Novozhilov V. Yu.**, « Klein-Fock equation, proper-time formalism and symmetry of Hydrogen atom », *Pré-publication des Proceedings of the UNESCO International School of Physics "Quantum theory"*, [en ligne], 1999, 9 p. Disponible sur : <<http://arxiv.org/abs/hep-ph/9911378v1>> (consulté le 25 octobre 2015)

O

- ObHo 2013 **Oberheim. E et Hoyningen-Huene P.**, « The Incommensurability of Scientific Theories », dans *Stanford Encyclopedia of Philosophy* [en ligne], Stanford Encyclopedia of Philosophy, page consultée le 24 janvier 2017.
<https://plato.stanford.edu/entries/incommensurability/#ComConConPauFeyInc>
- O'Co 2015 **O'Connor T.**, « Emergent Properties », dans *Stanford Encyclopedia of Philosophy* [en ligne], Stanford Encyclopedia of Philosophy, page consultée le 22 janvier 2017.
<https://plato.stanford.edu/entries/properties-emergent/#EpiEme>
- OgPo 1965 **Ogievetskii V. I. et Polubarinov I. V.**, « Spinors in Gravitation Theory », *Soviet Physics JETP*, 1965, Vol. 21, N°6, pp. 1093-1100.
- Okun 2010 **Okun L. B.**, « V. A. Fock and gauge symmetry », *Physics-Uspekhi*, 2010, Vol. 53, N°8, pp. 835-837.

- OIMS 2009 **Oldham, K. B., Myland J. C., et Spanier, J.**, *An Atlas of Functions. Second edition*, New-York : Springer, 2009, 748 p.
- Omel 1958 **Omel'yanovskiy M. E.**, « V. I. Lenin i filosofskie voprosy sovremennoy fiziki » [V. I. Lénine et les problèmes de la physique moderne], dans Fedoseev P. N. (éd.), *Filosofskiye voprosy sovremennogo yestestvoznaniya. Trudy vsesoyuznogo soveshchaniya* (Questions philosophiques de la science moderne. Travaux de conférence de toute l'Union), Moscou : Izdatel'stvo Akademii Nauk SSSR, 1959, p. 32-92.
- Omel 1963 **Omel'yanovskiy M. E.**, « The Concept of Dialectical Contradiction in Quantum Physics » dans *Philosophy, Science and Man: The Soviet Delegation Reports for the XIII World Congress of Philosophy*, Moscou, 1963.
- Omel 1968 **Omel'yanovskiy M. E.**, « Filosofskie aspekty teorii izmereniya » [Aspects philosophiques de la théorie de la mesure], dans *Materialisticheskaya dialektika I metody estestvennykh nauk*, Moscou, 1968, pp. 207-255.
- Omel 1972 **Omel'yanovskiy M. E.**, « On the principle of observability in modern physics », *Foundations of physics*, 1972, Vol. 2, N°2, pp. 223-239.
- OpPu 1958 **Oppenheim P. et Putnam H.**, « Unity of Science as a Working Hypothesis », dans Feigl H. et al (éds.), *Minnesota Studies in the Philosophy of Science*, Vol. 2, Minneapolis : Minnesota University Press, pp. 3-36.
- Oppe 1931 **Oppenheimer J. R.**, « Note on the light quanta and the electromagnetic field », *Physical Review*, 1931, Vol. 38, pp. 725-746.

P

- Pach 2006 **Pacherie E.**, « Réductionnisme », dans Lecourt D. (dir.), *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences*, 4^e édition, Paris : Presses universitaires de France, Quadrige, 2006, pp. 945-948.
- Pann 1938 **Pannekoek A.**, *Lénine philosophe : examen critique des fondements philosophiques du léninisme*, trad. D. Saint-James et C. Simon, Paris : Spartacus, 1970 [1938], 122 p.
- Park 2000 **Park B. S.**, « The Contexts of Simultaneous Discovery: Slater, Pauling, and the Origins of Hybridisation. » *Studies in History and Philosophy of Science Part B:*

- Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 2000, Vol. 31, N°4, pp. 451–474.
- Park 2003 **Park B. S.**, « The ‘Hyperbola of Quantum Chemistry’: the Changing Practice and Identity of a Scientific Discipline in the Early Years of Electronic Digital Computers, 1945–65 », *Annals of Science*, 2003, Vol. 60, N°3, pp. 219–247.
- Park 2009 **Park B. S.**, « Between Accuracy and Manageability: Computational Imperatives in Quantum Chemistry », *Historical Studies in the Natural Sciences*, Vol. 39, N°1, 2009, pp. 32–62.
- PaCR 1950 **Parr R. G., Craig D. P. et Ross I. G.**, « Molecular orbital calculations of the lower excited electronic levels of benzene, configuration interaction included », *Journal of Chemical Physics*, 1950, Vol. 18, pp. 1561–1563.
- Paul 1979 **Pauli W.**, *Scientific correspondence with Bohr, Einstein, Heisenberg A. O., Volume I: 1919-1929*, New-York: Springer-Verlag, 1979, 577 p.
- Pech 2014 **Pechenkin A. A.**, *Leonid Isaakovich Mandelstam. Research, Teaching, Life.*, Heidelberg : Springer, 2014, 241 p.
- Pere 2009 **Pérez E.**, « Ehrenfest’s adiabatic theory and the old quantum theory, 1916-1918 », *Archive for History of Exact Sciences*, 2009, Vol. 63, N°1, pp. 81-125.
- Petr 1969 **Petrov A. Z.**, *Einstein Spaces*, traduit du russe par Kelleher R. F., Oxford : Pergamon Press Ltd., 1969, 411 p.
- Petr 1949 **Petrova N. A.**, « Ob uravnenii dvizheniya i tenzore materii dlya sistemy konechnyx mass v obshchey teorii otnositel’nosti » [Sur l’équation du mouvement et le tenseur matériel pour les masses finies dans la théorie de la relativité générale], *Zhurnal Eksperimental’noy i Teoreticheskoy Fiziki*, 1949, T. 19, N°11, pp. 989-999.
- Piet 2006 **Piettre B.**, « Platonisme », dans Lecourt D. (dir.), *Dictionnaire d’histoire et philosophie des sciences*, 4e édition, Paris : Presses universitaires de France, Quadrige, 2006, pp. 865-868.
- PLKr 2015 **Plotnisky A. et Khrennikov A.**, « Reality Without Realism: On the Ontological and Epistemological Architecture of Quantum Mechanics », *Foundations of Physics*, 2004, Vol. 35, pp. 1269-1300.
- Poin 1902 **Poincaré H.**, *La science et l’hypothèse*, Paris : Flammarion, 1968 [1902], 252 p.
- Poin 1905 **Poincaré H.**, *La valeur de la science*, Paris : Flammarion, 1905, 302 p.

- Poin 1906 **Poincaré L.**, *La physique moderne : son évolution*, Paris : Flammarion, 1906, 311 p.
- Poll 2006 **Pollock E.**, *Stalin and the Soviet Science Wars*, Princeton – Oxford : Princeton University Press, 2006, 269 p.
- Popp 1957 **Popper K.**, « The Propensity Interpretation of the Calculus of Probability and the Quantum Theory », dans *The Colston Papers*, Vol. 9, pp. 65-70.
- Popp 1959 **Popper K.**, « The Propensity Interpretation of Probability », *British Journal of the Philosophy of Science*, Vol. 10, pp. 25-42.
- Prim 1981 **Primas H.**, *Chemistry, Quantum Mechanics and Reductionism. Perspectives in Theoretical Chemistry*, Berlin : Springer-Verlag, 1981, 451 p.
- Putn 1973 **Putnam H.**, « Reductionism and the nature of psychology », *Cognition*, 1973, Vol. 2, N°1, pp. 131-146

R

- Ra'a 1983 **Ra'anan G.**, *International Policy Formation in the U. S. S. R.: Factional "Debates" During the Zhdanovschina*, Hamden : Archon Books, 1983, 248 p.
- Rena 2001 **Renault E.**, *Hegel, la naturalisation de la dialectique*, Paris : Vrin, 2001, 321 p.
- Rey 1907 **Rey A.**, *La théorie de la physique chez les physiciens contemporains*, Paris : F. Alcan, 1907, 412 p.
- Rich 2004 **Richmond Y.**, *Cultural Exchange and the Cold War. Raising the Iron Curtain*, University Park : The Pennsylvania State University, 2004, 264 p.
- RiGu 2014 **van Riel R. et van Gulick R.**, « Scientific Reduction », dans *Stanford Encyclopedia of Philosophy* [en ligne], Stanford Encyclopedia of Philosophy, page consultée le 20 janvier 2017.
<https://plato.stanford.edu/entries/scientific-reduction/>
- Righ 1908 **Righi A.**, *Neuere Anschauungen über die Struktur der Materie* [Vues récentes sur la structure de la matière], Leipzig : J. A. Barth, 1908, 54 p.
- Rohr 2004 **Rohrlich F.**, « Realism Despite Cognitive Antireductionism », *International Studies in the Philosophy of Science*, 2004, Vol. 18, N°1, pp. 73-88.
- Roll 2000 **Roll-Hansen N.**, « The Application of Complementarity to Biology: From Niels Bohr to Max Delbrück », *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, 2000, Vol. 30, N°2, pp. 417-442.

- Roma 1986 **Romanovskaya T. V.**, *Istoriya kvantovo-mekhanicheskoy interpretatsii periodichnosti* [Histoire de l'interprétation mécanique quantique de la périodicité], Moscou : Nauka, 1986, 136 p.
- Roqu 1992 **Roqué X.**, « Møller Scattering: a Neglected Application of Early Quantum Electrodynamics », *Archive for History of Exact Sciences*, Vol. 44, No. 3, 1992, pp. 197-264.
- Rose 1989 **Rosenbaum T. E.**, « Rockefeller philanthropies in revolutionary Russia », *Newsletter of the Rockefeller Archive Center*, 1989.
- Rose 1932 **Rosenfeld L.**, « Über eine möglich Fassung des Diracschen Programms zur Quantenelektrodynamik und deren formalen Zusammenhang mit der Heisenberg Paulischen Theorie » [Sur une version possible du programme de Dirac sur l'électrodynamique quantique et sa connexion formelle avec la théorie de Pauli et de Heisenberg], *Zeitschrift für Physik*, Vol. 76, pp. 729–734.
- Rose 1955 **Rosenfeld L.**, « On quantum electrodynamics » dans Pauli W., Rosenfeld L. et Weisskopf V., (éds.), *Niels Bohr and the Development of Physics: Essays Dedicated to Niels Bohr on the Occasion of His Seventieth Birthday*, New-York : Mc Graw-Hill, 1955, pp. 70-95.

S

- Sard 2014 **Sardanashvili G. A.**, *Dmitriy Ivanenko — superzvezda sovetskoy fiziki* [Dmitri Ivanenko – superstar de la physique soviétique], Moscou : URSS/Librokom, 2014, 320 p.
- Sark 1992 **Sarkar S.**, « Models of Reduction and Categories of Reductionism », *Synthese*, 1992, Vol. 91, N°3, pp. 167-194.
- Sart s. d. **Sartenaer O.**, « Réductionnisme (A) », dans *L'Encyclopédie Philosophique* [en ligne], L'Encyclopédie Philosophique, page consultée le 20 janvier 2017.
<http://encyclo-philos.fr/reductionnisme-a-2/>
- Schm 1906 **Schmid A.-F.**, « Conventionalisme », dans Lecourt D. (dir.), *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences*, 4^e édition, Paris : Presses universitaires de France, Quadrige, 2006, pp. 287-289.

- Schr 1926a **Schrödinger E.**, « Quantisierung als Eigenwertproblem. (Erste Mitteilung) » [La quantification en tant que problème aux valeurs propres. (Première communication)], *Annalen der Physik*, 1926, Vol. 79, pp. 361–376.
- Schr 1926b **Schrödinger E.**, « Quantisierung als Eigenwertproblem. (Zweite Mitteilung) » [La quantification en tant que problème aux valeurs propres. (Deuxième communication)], *Annalen der Physik*, Vol. 79, pp. 489–527.
- Schr 1926c **Schrödinger E.**, « Quantisierung als Eigenwertproblem (Dritte Mitteilung: Störungstheorie mit Anwendung auf den Starkeffekt der Balmerlinien) » [La quantification en tant que problème aux valeurs propres. (Troisième communication : théorie des perturbations avec application à l'effet Stark des raies de Balmer)], *Annalen der Physik*, Vol. 80, pp. 437–490.
- Schr 1926d **Schrödinger E.**, « Quantisierung als Eigenwertproblem. (Vierte Mitteilung) » [La quantification en tant que problème aux valeurs propres. (Quatrième communication)], *Annalen der Physik*, Vol. 81, pp. 109–139.
- Schr 1944 **Schrödinger E.**, *What is Life?*, Londres : Cambridge University Press, 1944, 194 p.
- Schu 1990 **Schucking E. L.**, « Views from a distant past », dans N. Ashby, D. Bartlett, & W. Wyss (éds.), *General Relativity and Gravitation, 1989: Proceedings of the 12th International Conference on General Relativity and Gravitation*, Cambridge: Cambridge University Press, 1990, pp. 479-490.
- Schu 1999 **Schucking E. L.**, « Jordan, Pauli, Politics, Brecht...and a Variable Gravitational Constant », *Physics Today*, 1999, Vol. 52, N°10, pp. 26-31.
- Schw 1916 **Schwarzschild K.**, « Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie » [Sur le champ gravitationnel d'une masse ponctuelle selon la théorie d'Einstein], *Sitzungsberichte der Königlich-Preussischen Akademie der Wissenschaften*, N°3, 1916, pp. 189–196.
- Schw 1986 **Schweber S. S.**, « The Empiricist Temper Regnant: Theoretical Physics in the United States 1920-1950 », *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, 1986, Vol. 17, N°1, pp. 55–98.
- Schw 1990 **Schweber S. S.**, « The Young John Clarke Slater and the Development of Quantum Chemistry. », *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, 1990, Vol. 20, N°2, pp. 339–406.

- Schw 1993 **Schweber S. S.**, « Physics, community and the crisis in physical theory », *Physics Today*, 1993, Vol. 46, N°11, pp. 34-40.
- Schw 1994 **Schweber S. S.**, *QED and the Men Who Made It: Dyson, Feynman, Schwinger, and Tomonaga*, Princeton : Princeton University Press, 1994, 732 p.
- Schw 1948 **Schwinger J.**, « Quantum Electrodynamics. I. A Covariant Formulation », *Physical Review*, 1948, Vol. 74, N°10, pp. 1439-1461.
- Sebe 2006 **Sebestik J.**, « Physicalisme », dans Lecourt D. (dir.), *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences*, 4^e édition, Paris : Presses universitaires de France, Quadrige, 2006, pp. 857-860.
- Seit 1940 **Seitz F.**, *Modern Theory of Solids*, New-York : McGraw-Hill Book Company, 1940, 698 p.
- Sell 1989 **Selleri F.**, *Quantum Paradoxes and Physical Reality*, Dordrecht : Kluwer Academic Publisher, 1989, 381 p.
- Sieg 2004 **Siegmund-Schultze R.**, « Mathematicians Forced to Philosophize: An Introduction to Khinchin's Paper on von Mises ' Theory of Probability », *Science in context*, 2004, Vol. 17, N°3, pp. 373-390.
- Simõ 2002 **Simões A.**, « Dirac's Claim and the Chemists », *Physics in Perspective*, 2002, Vol. 4, pp. 253-266.
- SiGa 2000 **Simões A. et Gavroglu, K.**, « Quantum Chemistry in Great Britain: Developing a Mathematical Framework for Quantum Chemistry », *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, Vol. 31, N°4, 2000, pp. 511–548.
- Skaa 2012 **Skaar Jacobsen A.**, *Léon Rosenfeld. Physics, Philosophy, and Politics in the Twentieth Century*, Singapour : World Scientific Publishing Co, 2012, 354 p.
- SmVr 1956 **Smirnov V. I. et Vreden-Kovetskoj T. O.**, « Vladimir Aleksandrovich Fock », *Akademiya Nauk SSSR. Materialy k biobibliografii uchionykh SSSR, Seriya fiziki*, N°7, Moscou, 1956, 95 p.
- Slat 1928 **Slater J. C.**, « The Self Consistent Field and the Structure of Atoms », *Physical Review*, septembre 1928, Vol. 32/3, pp 339-348.
- Slat 1929 **Slater J. C.**, « The Theory of Complex Spectra », *Physical Review*, novembre 1929, Vol. 34/10, pp 1293-1322.
- Slat 1930 **Slater J. C.**, « Note on Hartree's method », *Physical Review*, janvier 1930, Vol. 35/2, pp 210-211.

- Slat 1934 **Slater J. C.**, « Electronic Energy Bands in Metals », *Physical Review*, 1951, Vol. 45, pp. 794-801.
- Slat 1951a **Slater J. C.**, « A simplification of the Hartree-Fock Method », *Physical Review*, 1951, Vol. 81, N°3, pp. 385-390.
- Slat 1951b **Slater J. C.**, « Magnetic Effects and the Hartree-Fock Equation », *Physical Review*, 1951, Vol. 82, N°4, pp. 538-541.
- Slat 1963 **Slater J. C.**, « The Electronic Structure of Atoms – The Hartree-Fock Method and Correlation », *Reviews of Modern Physics*, Vol. 35, N°3, pp. 484–487.
- Slat 1974 **Slater J. C.**, « The history of the $X\alpha$ method », dans Daudel R. et Pullman B. (éds.) *The World of Quantum Chemistry*, Dordrecht-Holland : Reidel Publishing Company, 1974, pp. 3-15.
- Slat 1975 **Slater J. C.**, *Solid-State and Molecular Theory: A Scientific Biography*, John Wiley & Sons : New-York – London – Sydney – Toronto, 1975, 357 p.
- SIFo 2011 **Sloan P. R. et Fogel B.** (éds.), *Creating a Physical Biology: The Three-Man Paper and Early Molecular Biology*, Chicago : The University of Chicago Press, 2011, 319 p.
- Snyg 2012 **Snygg J.**, *A New Approach to Differential Geometry using Clifford's Geometric Algebra*, New-York : Springer, 2012, 464 p.
- Soni 1991 **Sonin A. S.**, « Gazeta "Krasnyy flot" protiv idealizma v fizike » [Le journal « Krasnyy flot » contre l'idéalisme en physique], *Vestnik RAN*, 1991, T. 61, N°1, pp.113-122.
- Soni 2017 **Sonin S. A.**, *Fizicheskiy idealizm: Dramaticheskiiy put' vnedreniya revolyutsionnykh idey fiziki nachala XX veka (na primere istorii protivostoyaniya v sovetskoy fizike)* [Idéalisme physique : une façon dramatique d'introduire les idées révolutionnaires de la physique du début du XX^e siècle (par l'exemple de l'histoire conflictuelle de la physique soviétique)] 2nd édition, Moscou : Lenand, 2017, 318 p.
- SoFr 1995 **Sonin A. S. et Frenkel V. Ya.**, *Vsevolod Konstantinovich Frederiks, 1885-1944*, Moscou : Nauka, 1995, 176 p.
- Stac 1979 **Stachel J.**, « Einstein and the Rigidly Rotating Disc. », *General Relativity and Gravitation*, N°1, 1979, pp.30–45.

- Stac 1989 **Stachel J.**, « Einstein's Search for General Covariance, 1912-1915 », dans Howard D. et Stachel J. (éds), *Einstein and the History of General Relativity*, Boston : Birkhäuser, 1989, pp. 63-100.
- Stap 1972 **Stapp H.**, « The Copenhagen Interpretation », *American Journal of Physics*, 1972, Vol. 40, pp. 1098-1116.
- Stra 1996 **Straumann N.**, « Early History of Gauge Theories and Weak Interactions », *Invited talk at the PSI Summer School on Physics with Neutrinos, Zuoz, Switzerland, August 4-10, 1996*, en ligne [arXiv].
arXiv:hep-ph/9609230v2
- Swir 1935 **Swirles B.**, "The Relativistic Self-Consistent Field", *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 1935, Vol. 152/877, pp. 625-649.
- Swir 1987 **Swirles Jeffreys B.**, « Douglas Rayner Hartree (1897-1958). », *Comments Atomic and Molecular Physics*, 1987, N°20, pp. 189–198.
- Swir 1990 **Swirles Jeffreys B.**, « John Arthur Gaunt (1904-1944) », *Notes & Records. The Royal Society Journal of the History of Science*, 1990, Vol. 44, pp. 73-79.

I

- Tamm 1956 **Tamm I.**, « A. Eynshteyn i sovremennaya fizika » [A. Einstein et la physique moderne], *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1956, T. 59, N°1, pp. 5-10.
- TaBl 1932 **Tamm I. et Blokhintsev D.**, « Über die Austrittsarbeit der Elektronen aus Metallen. » [Sur le travail de sortie des électrons dans un métal], *Zeitschrift für Physik*, 1932, Vol. 77, N°11-12, pp 774-777.
- Thom 1907 **Thomson J. J.**, *The Corpuscular Theory of Matter*, New-York : Scribner's Sons, 1907, 172 p.
- Thom s. d. **Thomas J.-P.**, « Réductionnisme, sciences », dans *Universalis éducation* [en ligne], Encyclopædia Universalis, page consultée le 20 janvier 2017.
<http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/reductionnisme-sciences/>
- Tier 2006 **Tiercelin C.**, « Réalisme », dans Lecourt D. (dir.), *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences*, 4^e édition, Paris : Presses universitaires de France, Quadrige, 2006, pp. 936-940.

- Timi 1933 **Timiryazev A. K.**, *Vvedeniye v teoreticheskuyu fiziku* [Introduction à la physique théorique], Moscou : Gosudarstvennoy Tekhniko-teoreticheskoye izdatel'stvo, 333 p.
- TiZD 1935 **Timoféeff-Ressovsky N. W., Zimmer K. G. et Delbrück M.**, « Über die Natur der Genmutation und der Genstruktur » [Sur la nature de la mutation des gènes et de la structure des gènes], dans *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*, Mathematisch-Physikalische Klasse, Fachgruppe VI Biologie, Neue Folge, Vol. 1, N°13, pp. 189-245.
- Todo 2012 **Todorov I.**, « “Quantization is a Mystery” », *Bulgarian Journal of Physics*, 2012, N°39, pp. 107-149.
- Tomo 1946 **Tomonaga S.**, « On a relativistically Invariant Formulation of the Quantum Theory of Wave Fields », *Progress of Theoretical Physics*, 1946, Vol. 1, pp. 27-42.
- Tool 1990 **Tooley M.**, « Causation: Reductionism Versus Realism », *Philosophy and Phenomenological Research*, 1990, Vol. 50, Supplément, pp. 215-236.
- TrFC 1993 **Tropp E. A., Frenkel V. Ya., & Chernin A. D.**, *Alexander A. Friedmann: the Man who Made the Universe Expand*, traduit par Dron A. & Burov M., Cambridge : Cambridge University Press, 1993, 267 p.
- Trot 1937 **Trotsky L.**, *La révolution trahie*, Paris : Les Éditions de Minuit, 1963 [1937], 208 p.
- Truc 2015 **Truchon L.**, *Lénine épistémologue : Les thèse de Matérialisme et Empiriocriticisme et la constitution d'un matérialisme intégral*, version électronique revue et corrigée, <hal-01232102>, 2015, 223 p.
- Tuck 1990 **Tucker R. C.**, *Stalin in Power : The Revolution from Above, 1928-1941*, New-York : W. W. Norton & Company, 1990, 728 p.

U

- Ulam 1958 **Ulam S.**, « John von Neumann 1903-1957 », *Bulletin of the American Mathematical Society*, 1958, Vol. 64, N°3, pp. 1-49.
- Unfr 1994 **Unfried B.**, « Rituale von Konfession und Selbstkritik: Bilder vom stalinistischen Kader » [Rituels de confession et d'autocritique : images des cadres

staliniens], *Jahrbuch für Historische Kommunismusforschung*, 1994, pp. 148-164.

V

- VdKI 2011 **Van der Kloot W.**, « Mirrors and smoke: A. V. Hill, his brigands, and the science of anti-aircraft gunnery in World War I », *Notes & Records of the Royal Society*, Vol. 65, 2011, pp. 393-410.
- Verl 1998 **Verley X.**, *Mach, un physicien philosophe*, Paris : Presses Universitaires de France, 1998, 124 p.
- Veselov M. G., Kapitsa P. L., Leontovitch M. A.**, « Pamyati Vladimira Aleksandrovicha Foka » [En mémoire de Vladimir Aleksandrovich Fock], *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 1975, T. 117, N°2, pp. 375-376.
- VeKL 1975 - « Vladimir Aleksandrovich Fock (obituary) », *Physics-Uspekhi*, 1975, Vol. 18, N°10, pp. 840-841.
- Vizg 1981 **Vizgin V. P.**, « Leninskiy analiz sostoyaniya fiziki na rubezhe XIX i XX vv. » [L'analyse de la physique par Lénine au tournant du XX^e siècle], dans *Leninskoye filosofskoye naslediyе i sovremennaya fizika*, Moscou : Nauka, 1981, pp. 222-263.
- Vizg 1989 **Vizgin V. P.**, « Einstein, Hilbert, and Weyl: The Genesis of the Geometrical Unified Field Theory Program », dans Howard D. et Stachel J. (éds), *Einstein and the History of General Relativity*, Boston : Birkhäuser, 1989, pp. 234-276.
- Vizg 1999 **Vizgin V. P.**, « The nuclear shield in the 'thirty-year war' of physicists against ignorant criticism of modern physical theories », *Physics-Uspekhi*, T. 42, N°12, pp. 1259-1283.
- Vizg 2002 **Vizgin V.**, « The Role Played by Mach's Ideas in the Genesis of the General Theory of Relativity », dans Balashov Yu. et Vizgin V. (éds.), *Einstein Studies in Russia*, Boston : Birkhäuser, 2002, pp.45–89.
- ViFr 2002 **Vizgin V. P. et Frenkel V.**, « Vsevolod Frederiks, Pioneer of Relativism and Liquid Crystal Physics », dans : Balashov Yu. et Vizgin V. (Eds.), *Einstein Studies in Russia*, Boston: Birkhäuser, 2002, pp.149-180.

- ViGo 1987 **Vizgin V. P. et Gorelik G. E.**, « The reception of the Theory of Relativity in Russia », dans Glick T. F. (éd.), *The Comparative reception of relativity*, Dordrecht, Boston, Lancaster, Tokyo : D. Reidel Publishing Company, 1987, pp. 265-326.
- Vlad 2012 **Vladimirova L. F.**, *Akademik V. A. Fok: Teoreticheskaya fizika v chistom vide [L'Académicien V. A. Fock : la physique théorique dans sa forme la plus pure]*, Moscou : URSS/KRASAND, 2012, 224 p.
- Vuci 1980 **Vucinich A.**, « Soviet Physicists and Philosophers in the 1930s: Dynamics of a Conflict », *Isis*, Juin 1980, Vol. 71, No. 2, pp. 236-250.
- Vuci 2001 **Vucinich A.**, *Einstein and Soviet Ideology*, Stanford : Stanford University Press, 2001, 291 p.

W

- Walk 2001 **Walker M.**, *Nazi Science: Myth, Truth, and the German Atomic Bomb*, Cambridge, Massachusetts : Perseus Publishing, 2001, 334 p.
- Weiz 1971 **von Weizsäcker C. F.**, « Niels Bohr and complementarity: The place of classical language », dans Bastin T. (éd.), *Quantum Theory and Beyond*, Cambridge : Cambridge University Press, 1971, pp. 23-31.
- Weyl 1918 **Weyl H.**, « Gravitation und Elektrizität » [Gravitation et électricité], dans *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, pp. 465–480.
- Weyl 1928 **Weyl H.**, *Gruppentheorie und Quantenmechanik* [Théorie des groupes et mécanique quantique], Leipzig : Hirzel, 1928, 288 p.
- Wert 1987 **Werth N.**, *Les Procès de Moscou : 1936-1938*, Bruxelles : Éditions Complexe, 2006 [1987], 224 p.
- Wert 2009 **Werth N.**, *L'ivrogne et la marchande de fleurs. Autopsie d'un meurtre de masse 1937-1938*, Paris : Editions Points, Histoire, 2009, 335 p.
- Wert 2012 **Werth N.**, *Histoire de l'Union soviétique. De l'Empire russe à la Communauté des États indépendants, 1900-1991*, Paris : Presses universitaires de France, 2012, 608 p.
- Whit 2004 **Whitaker M. A. B.**, « The EPR Paper and Bohr's Response: A Re-Assessment », *Foundations of Physics*, 2004, Vol. 34, N°9, pp. 1305-1340.

- Wign 1927 **Wigner E.**, « Über nicht kombinierende Terme in der neueren Quantentheorie »
[Sur la non-combinaison de termes dans la récente théorie quantique],
Zeitschrift für Physik, 1927, Vol. 40, N°7, pp. 492–500.
- WiSe 1933 **Wigner E. et Seitz F.**, « On the Constitution of Metallic Sodium », *Physical Review*, 1933, Vol. 43, pp. 804-810.
- WiSe 1934 **Wigner E. et Seitz F.**, « On the Constitution of Metallic Sodium. II », *Physical Review*, 1934, Vol. 46, pp 509-524.
- Will 1986 **Will C.**, *Was Einstein Right? Putting General Relativity to the Test*, Oxford:
Oxford University Press, 1986, 274 p.
- Will 1989 **Will C.**, « The Renaissance of General Relativity », dans Davies P. (éd), *The New Physics*, Cambridge : Cambridge University Press, 1989, pp. 7-33.
- Will 1997 **Williams K.**, *The Prague Spring and its Aftermath: Czechoslovak Politics, 1968-1970*, Cambridge : Cambridge University Press, 1997, 270 p.
- Wojc 1989 **Wojciech D.**, « Bohr, Einstein and Realism », *Dialectica*, 1949, Vol. 43, N°3,
pp. 249-261.

Z

- Zang 2013 **Zangwill A.**, « Hartree and Thomas: the forefathers of density functional theory »,
Archive for History of Exact Sciences, Vol. 67, N°3, 2013, pp. 331–348.
- Zene 1930 **Zener C.**, « Analytic Atomic Wave Functions », *Physical Review*, 1930, Vol. 36/1,
pp 51-56.

Index des noms

A

Aharonov Y 484
 Akhiezer A. I. 341
 Akulov N. S. 328, 338, 340
 Aleksandrov A. D. ... 72, 220, 268, 269, 285, 321, 334, 341,
 342, 368, 369, 381, 406, 407, 462, 463
 Aleksandrov G. F. 319, 353
 Alikhanov A. I. 334, 335
 Anderson P. W. 124, 125
 Andronov A. A. 326
 Artsimovich L. A. 334, 335, 339, 340, 445, 446, 447
 Ayala F. J. 119

B

Baade W. 405
 Bargmann V. 408
 Baugmart K. K. 24
 Bazarov V. 260
 Bell J. S. 485
 Beller M. 130, 157, 167, 170, 171, 458
 Belov N. V. 399
 Bergmann P. 231, 405, 426, 428, 433, 434, 435, 452
 Beria L. P. 334, 335, 337
 Bernstein S. N. 24
 Black M. M. 89
 Blokhintsev D. I. 270, 285, 314, 334, 335, 339, 342, 349,
 358, 367, 371, 373-376, 388, 411, 417, 455, 478
 Blum A. 425, 487
 Bogdanov P. A. 260, 262, 288
 Bohm D. 197, 198, 371, 417-420, 464, 484, 485
 Bohr N. 42, 49, 50, 66, 74, 75, 77, 78, 96, 98, 99, 126-129,
 141-143, 145-149, 151, 155-157, 161-175, 177-181,
 185, 189, 195-205, 209-211, 213, 214, 216, 233, 247,
 248, 272, 278, 290, 306, 313, 314, 322, 341, 342, 349,
 356, 358, 362-366, 370, 374-377, 383, 389, 391, 393-

397, 399, 409-418, 420-425, 450, 452, 454, 456-458,
 464, 465, 467, 471, 475, 527

Bokulich A. 99, 126, 128-131, 139, 153
 Boltzmann L. 23
 Bondi H. 396, 405, 408, 427-429, 431, 433-437, 440-443,
 449, 450, 452, 461
 Borgman I. I. 22
 Born M. 42, 46- 51, 54, 55, 59, 74, 178, 179, 223, 405
 Braginsky V. D. 442, 453
 Bridgman P. W. 160, 370
 Brillouin L. 84, 91, 93, 104, 174, 461, 462
 de Broglie L. 43, 48, 74, 96, 161, 417, 419
 Bronstein M. P. ... 148, 149, 223, 224, 296, 300, 302, 306,
 310
 Brown F. W. 84
 Bursian V. R. 24, 43, 51, 217, 302
 Bush V. 101, 102

C

Camilleri K. 155, 157, 171, 458
 Carmeli M. 433, 440
 Carson C. 104-107
 Cattaneo L. 428, 429, 453
 Chadwick J. 298
 Charbonnat P. 251-253, 255-257, 277, 282-284, 286, 287
 Chentsov R. A. 399
 Chervinska N. A. 20
 Chiatti L. 458
 Chibbaro S. 120-122, 153
 Condon E. U. 90
 Coolidge A. S. 115
 Copernic N. 378, 379, 389, 399, 401, 406
 Coulson C. 87

D

Darwin C. 286
 Davydov A. S. 341

Deborin A. M.	287, 300, 301, 355
Delbrück M.	127
Demkov Yu. M.	72
Démocrite.....	256
Deser S.	437, 439
DeWitt B.	428, 436
Dietzgen J.	263
Dirac P. A. M. 42, 48, 52, 53, 55, 57-68, 74, 75, 81, 84, 88, 93, 96, 98, 99, 105, 106, 118, 126, 129-131, 140, 141, 144, 148, 151, 223, 232, 420, 428, 527	
de Donder T.....	43, 227
Drude P.....	23
Drukarev G. F.....	72
Dubček A.	435
van den Dugen	43
Dühring E.....	258

E

Eddington A.....	196, 225, 326
Ehrenfest P.	23-25, 46- 50, 54, 55, 66, 74, 218
Einstein A... 49, 53, 96, 107, 120, 155, 156, 158, 159, 161, 165-173, 175-178, 189, 190, 196, 198, 207, 213, 216- 218, 220, 222, 224-231, 232-235, 237, 239-241, 243, 247, 248, 262, 267, 270, 290, 314, 315, 320, 332, 336, 345, 349, 356, 358-363, 366, 369, 372, 376, 378-383, 385, 389, 391, 393, 397, 399-402, 404, 407, 408, 421, 425, 429, 437, 454, 459, 461-465, 471, 475	
Eisenstaedt J.....	230, 333
Engels F. 249, 250, 252-259, 261-264, 268, 273, 276, 281, 283-285, 355, 451, 471	
Épicure	256
Ergoshin V. P.....	287
Everett H.	485

F

Faddeev L. D.	26, 69, 72, 449
Feinberg E. L.	369
Fermi E.	53, 64, 114
Feuerbach L.....	257, 263
Feyerband P.	123
Feynman R.....	158, 446

Fock A. A.	20
Fock M.....	24
Forman P.....	476, 477, 478
Fowler R. H.....	77, 87
Frank P.	370
Frederiks V. K.	25, 44, 217-219, 221, 302, 310
Freire Jr. O.....	127, 157, 196, 213, 371, 418, 423, 485
Frenkel V. Ya.	46
Frenkel Ya. I....	39, 43, 46, 71, 75, 146, 296, 308, 316, 325
Friedmann A. A.	24, 217-219, 221, 223, 236, 238, 378
Frish S. E.	298, 299, 304
Froese Fischer C.	76, 77, 102, 103
Fursov V. S.....	340

G

Galilée	169, 241, 429, 430, 448, 461
Gamow G. A.	43, 47, 55, 56, 66, 296, 412
Gaunt J. A.	80, 81, 85, 86
Gavroglu K....	55, 76, 85, 87, 101, 105, 110, 111, 115, 118
Gehrcke E.	315
Gelfand I. M.	406
Ginzburg V. L.	324, 325, 369, 431, 434, 437, 440, 446, 447, 448, 449, 459
Goltsman A.....	288
Golyakov I. T.....	310
Gorbunov N. P.....	308
Gordon W.....	43, 44, 45, 47, 51
Gorelik G. E. 20, 22, 25, 29, 148, 149, 182, 194-196, 218, 219, 223, 224, 227, 229, 268, 269, 276, 285, 307-310, 315, 342, 343, 360, 377, 378, 395, 459, 464	
Gornshtein T. N.	302
Gouz S.	251, 254, 259, 262
Graham L. R. 21, 29, 30, 57, 194, 195, 200, 215, 251, 254, 255, 259, 260, 263, 266, 270, 271, 273, 276, 277, 280, 283, 288, 289, 291, 297, 312, 320, 321, 333, 341-343, 365, 373, 374, 388, 395, 406, 414, 424, 450, 454-458, 460-463	
Grdina Ya. I.....	286

H

Haldane J. B. S.	251
-----------------------	-----

Hartree D. R.	66, 76,-84, 86-90, 93-95, 101-104, 108-110, 114-117, 151, 175, 527, 542
Hartree W.	77, 86, 89, 102
Havas P.	462
Hegel G. W. S.	252, 254, 256, 257, 258
Heilbron J. L.	411
Heisenberg W.	42, 43, 53, 54, 61, 64, 65, 67, 68, 75, 81, 85, 96, 98, 99, 104, 107, 126, 129-131, 138-143, 146, 151, 157-164, 166, 176-178, 197, 201, 204, 327, 355, 356, 357, 412, 417
Heitler W.	49, 55, 82, 105, 106, 107, 109
von Helmholtz H.	277
Herman F.	115
Hertz G.	277
Hessen B.	287, 288, 301, 302
Hilbert F. G.	23, 55, 70
Hitler A.	307, 438
Hoffman B.	225, 226, 227, 228, 232, 400, 404, 408
Houtermans F. G.	55, 56
Howard D.	77, 165, 213, 214
Hoyle F.	405
Hoyningen-Huene P.	127, 128
Hund F.	79, 82, 85

I

Iejov N. I.	304, 308, 343
Ilizarov S. S.	334, 335, 337
Infeld L.	223, 225-228, 230, 232, 378, 394, 397-405, 407, 408, 423, 425, 428, 429, 451, 454, 459, 463, 466, 475
Ioffé A. F.	20, 23, 25, 42, 46, 51, 73, 146, 200, 218, 298, 301, 308, 310, 316, 324, 325, 328, 329, 331, 390
Ivanenko D. D.	58, 65, 67, 222, 296, 328, 338, 340, 342, 375, 427, 428, 431, 434, 437, 440, 441, 444-452, 454

J

James J.	81, 93, 100, 117
James H. M.	115
Jammer M.	49, 155, 156, 157, 159, 160-163, 165-167, 169-171, 178, 186, 457
Jdanov A. A.	282, 318-321, 351-353, 366, 423, 466
Joas C.	81, 93, 100, 117

Joliot F.	418
Joravsky D.	251, 259, 260, 286, 287
Jordan P.	54, 59-61, 74, 105, 142-144, 147, 326, 356, 405, 437, 438
Josephson P. R.	22-24, 29, 42, 43, 45-48, 50, 51, 71, 73, 74, 251, 261, 286, 287, 295, 297-299, 302, 307, 309

K

Kaftanov S. V.	324, 325, 329
Kaluza T.	45
Kant E.	277
Kapitsa P. L.	26, 182, 304, 311, 326, 329
Kasterin N. P.	286, 314
Kedrov B. M.	322
Keldysh M. V.	338
Kemmer N.	426
Kereselidze A. B.	432, 434, 437-443, 449
Khalatnikov I. M.	42, 432, 441, 452, 453
Kharazov G. A.	286
Khaykin S. E.	369, 370
Khintchine A.	372, 373, 374
Khrouchtchev N. S.	338, 339, 396, 445, 447
Khvol'son O. D.	22, 25
Kikoin	334, 335, 340
Klein F.	23, 55
Klein O.	43, 44, 60, 78, 405, 437, 438
Kobzarev Yu. B.	463
Kochin N.	56
Koikin I. K.	335
Kojevnikov A.	19, 29, 42, 43, 46, 47, 56, 61, 62, 64-67, 76, 142-144, 200, 285, 295, 298, 299, 305, 306, 313, 318-321, 323-325, 329-331, 342, 349, 352, 353, 371-373, 477, 478
Kolman E.	288, 296, 316, 342, 355, 375, 376, 417
Kolomenskiy A. A.	370
Komar A. P.	370
Konstantinov F. K.	288
Korneev S. G.	439
Korolev F. A.	338, 340
Kourtchatov I. V.	330, 334, 335, 338, 339, 340
Kramers H.	75, 174
Krementsov N.	294, 295, 297, 318, 319, 320, 349, 350

Krutkov Yu. A. 24-26, 46-48, 50, 54, 72, 150, 217, 302,
310
Krylov A. N. 25
Krylov N. S. 484
Krylov, A. N. 303
Krzhizhanovskiy G. M. 300, 308, 309, 314
Kuhn T. S. 26, 54, 123, 130, 140, 150, 151, 411
Kuznetsov I. V. 331, 341, 474

L

Lacki J. 19, 186
Lalli R. 395, 404, 405, 425, 427, 428, 430-434, 436, 442,
443, 449, 450, 452-454, 487
Lanczos K. 227
Landau L. D. . 19, 26, 39, 42, 43, 47, 56, 64, 72, 74, 75, 95,
96, 141, 143-145, 148, 149, 158, 172, 296, 302, 306,
313, 324, 325, 326, 329, 334, 335, 340, 341, 412, 432,
459
Landsberg G. S. 326, 332, 369
Langevin P. 48, 262
Lavrent'ev M. A. 339
Lebedev P. 22, 321, 332, 417
Lebedev T. A. 375
Lefebvre H. 281, 282, 285
Lenard P. 315
Lénine 21, 26, 218, 250, 251, 252, 259-266, 268, 269,
273-275, 277, 278, 280, 281, 284, 285, 288-290, 311,
325, 351, 355, 367, 380, 384, 385, 387, 390, 402, 455,
463, 471, 472
Lennard-Jones J. E. 79, 84, 87
Leontovich V. 324, 325, 334, 339, 340, 370
Leypunskiy A. I. 302
Licata I. 458
Lichnerowicz A. 404, 426, 427, 428, 429, 461
Lifshitz E. M. 42, 72, 158, 328, 341
Lifshitz I. M. 341
Lindsay R. B. 78, 88, 89
Lobatchevski N. I. 358, 379, 389
London F. 55, 105, 106, 107
Lorentz H. 25, 46, 47, 61, 228, 462, 463
Lounatcharski A. V. 260
Löwdin P.-O. 116

Lukirskiy P. I. 302, 310
Lukyanov 340
Lvov V. E. 307, 308, 314
Lyssenko T. D. 320, 322, 330

M

Mach E. . 34, 169, 260, 262, 277, 306, 359, 372, 380-384,
389, 402
Maksimov A. A. 288, 301, 308, 309, 312-314, 316, 321,
322, 326, 327, 331-333, 335-337, 347, 355, 360, 369,
370, 403, 405, 474
Malaterre C. 119
Malenkov G. M. 311, 324, 329, 333, 335, 338, 339
Malyshev V. A. 338
Mandel H. Z. 44
Mandelstam L. I. 310, 316, 323, 341, 349, 358, 367, 368,
369, 370, 373, 375, 377
Markov M. 321, 322, 325, 326, 329, 342, 355, 356, 365,
369, 373
Marx K. 249, 250, 252, 255-259, 261, 281, 283-285, 329,
351, 423, 451, 463
Mayr E. 119
Mehra J. 41, 49, 50, 156, 157, 159-161, 163, 165, 166,
167, 170, 174, 178, 218
Mercier A. ... 396, 404, 406, 427, 428, 429, 432, 435, 436,
440-443, 449, 452, 453
Meshcheryakov M. G. 334, 338, 339
Mezhlauk V. I. 182, 304
Mikhaylov 337
Miller A. 153
Milne A. 77, 321
Minkowski H. 55
von Mises R. 372
Mitin M. B. 288, 301, 375
Mitkevich V. F. 286, 307, 308, 309, 313, 314, 315, 316,
342, 474
Moffat J. W. 407
Møller C. . 65, 396, 405, 409, 410, 411, 428, 436, 442, 452
Murdoch D. . 156, 157, 161, 163, 165, 166, 167, 170, 180

N

Nagel E.	119, 121-123, 126
Nagel T.	121
Nesmeyanov A. N.	338
von Neumann L.	156, 177, 179, 186, 187
Neurath O.	121
Newton.....	128
Nicolas II.....	22
Nikol'skiy K. V.	305, 306, 313, 314, 372, 373, 375, 383, 384
Novozhilov Yu. V.....	53, 58, 62, 63, 68, 429
Numerov B. B.	303

O

Obreimov I. V.	24, 302
Omel'yanovskiy M. E. ..	270, 331, 341, 375, 388, 455, 456, 457
Oparin A.	355
Oppenheim P.....	120
Oppenheimer R.	49, 144, 197, 426
Ovchinnikov N. F.....	331, 342

P

Pais A.....	426
Papapetrou A.	227, 405
Park B. S.....	76, 80, 85, 89, 101, 103, 105, 107, 110, 111, 115, 116, 118
Pauli W.	42, 43, 60, 61, 64, 67, 68, 75, 79, 81, 82, 91, 96, 143, 404-406, 408, 425, 460
Peierls R.....	42, 74, 143-145, 148, 149, 412
Peirce C. S.....	213
Pekar S. I.....	341
Peres A.	433, 434, 436, 437, 439-443, 452
Perfiliev V. V.	376, 417
Petrashen M. I.	72, 94, 102, 103, 107, 317
Petrov A. Z.....	427, 432, 434, 437, 438, 440, 446-449, 453, 454, 463
Petrova N. A.	400, 408
Petrovskiy I. G.....	339
Peyve Ya. V.	439

Pierre le Grand	20, 21, 28
Planck M.....	49, 96, 124, 158, 430
Plekhanov G.	252, 277, 278, 367
Podolsky B.	64- 68, 74, 148, 156, 165-168, 170-172, 175, 178, 190
Poincaré H.....	234, 262, 277, 382, 419, 430
Poincaré L.....	262
Pollock E.....	295, 318, 319-321, 323, 324, 326, 329-331, 338, 339, 383
Ponomarenko P. K.....	338
Popper K.....	212, 213, 214, 215
Prokofiev M. A.	447, 448
Ptolémée.....	378, 379, 406
Pushkareva L. I.	334, 335, 337
Putnam H.	120, 121

R

Rabouin D.....	19
Rechenberg H....	41, 49, 50, 156, 157, 159, 160, 161, 163, 165-167, 170, 174, 178
Renn J.....	425, 487
Rey A.	262
Righi A.	262
Robertson H.	405
Robinson I.	442, 443, 452
Rondoni L.	120, 121, 122, 153
Röntgen W.	23
Rosbaud P.	425, 426
Rosen N.	156, 165-168, 171, 172, 175, 178, 190, 428, 433, 435, 439-442, 451, 452
Rosenfeld L.	49, 67, 75, 145-149, 172, 371, 396, 409-412, 416, 418, 422, 424, 425, 428, 450
Rozenkevich L. V.	302
Rozhdestvenskiy D. S....	23-25, 42, 46, 146, 182, 298, 299, 316
Rumer Yu. B.....	49, 302
Rytov S. M.	367, 369

S

Sachs M.	437
Sakharov A.	334, 335

Sarkar S.....	119
Sartenaer O.	119
Schmidt O.	355
Schrödinger E.43-45, 48, 49, 51, 53-55, 74, 77, 78, 80, 96, 104, 127, 170, 175, 180, 326, 412	
Schwarzschild K.	223, 462
Schweber S. S.	39, 59-61, 85, 100, 111, 123-125, 131, 132, 138, 141
Schwinger J.....	68, 426
Sciama D.....	452
Seitz F.	106, 112-116
Semenov N.	24
Semkovskiy S. Yu.	287, 288
Shepilov D. T.....	329
Shortley G. H.	90
ShteynmanR. Ya.	332
Shubin S. P.....	302
Shubnikov L. V.	302
Simões A.....	55, 76, 85, 87, 101, 105, 110, 111, 115, 118
Sinel'nikov K. D.....	341
Skaar Jacobsen A.	145, 148, 172, 371, 409, 410, 418, 422-424
Skillman S.	115
Slater J. C.	39, 76, 78- 91, 93, 100-108, 111-117, 138, 151, 426
Sliv L. A.	409
Smirnov V. I.	20, 25, 41, 310, 317
Sobolev S. L.	335, 339
Sokolov A. A.....	338, 340, 446
Sommerfeld A.....	49
Sonin A. S.....	29, 217, 295, 307, 309, 315, 321, 324-326, 329, 331, 338, 367, 368, 370
Staline.....	281-284, 288, 291, 297, 302, 304, 337, 396
Stark J.	315
Strauss M.....	410
Sushchinskiy	370
Suslov M. A.	334
Swirles B.	88, 89, 90, 108, 109
Synge J. L.	428

T

Tamarkin Ya. D.	24
----------------------	----

Tamm I. E. .	39, 46, 47, 49, 65, 66, 75, 146, 147, 299, 301, 306, 308-310, 313, 316, 324-326, 328, 334, 335, 339, 340, 350, 359, 360, 362, 366, 369, 370, 459
Teller E.	49
Terletskiy Ya. P.	328, 331, 342, 375, 417
Thomson J. J.	262
Thorne K. S.	442, 446, 452
Timiryazev A. K....	286, 307, 313, 315, 316, 321, 326, 342, 383, 474
Timiryazev K. A.....	286
Timoféeff-Ressovsky N. W.	127
Tomonaga S.....	68
Tonnelat M.-A.	230, 405, 419, 426, 427, 428, 429
Topchiev A. V.	324, 328, 354, 356
Towbridge A.	46
Trautman A.	436
Trotski L.....	283
Truchon L.	251, 261, 262, 263, 264, 265, 266, 277
Truman H. S.....	319

V

Valentinov N.	260
Vasilev S. V.	302
Vavilov S. I...	146, 299, 308, 310, 316, 321, 322, 324, 325, 330, 332, 338, 355, 367
Veksler V. I.	370
Veselov M. G.	72, 317
Vigier J.-P.....	371, 417, 418, 419, 420, 464
Vitt A. A.	302
Vizgin V. P...	22, 25, 44, 149, 217-219, 221, 261, 286, 288, 293, 295, 296, 299, 300, 302, 307-309, 316, 317, 320- 326, 329-334, 337-342, 367, 380, 382, 390
Vladimirova L. F.	20-22, 25, 29, 33, 41, 48, 54, 68, 69, 72, 317
van Vleck J.....	426
Volta A.....	162
Vreden-Kovetskoj T. O.	41
Vucinich A.	218, 287, 333
Vul B. M.	300, 301, 328, 332, 355, 370
Vulpiani A.	120, 121, 122, 153
Vyshinsky A.	310

W

Weber J.	437
Weihardt	24
Weisskopf V.....	49, 426
Wentzel G.....	81, 174
Weyl H.....	45, 70, 220, 221, 223, 225, 231, 237, 407
Wheeler J. A.	158, 428, 436, 461
Wiener O.	23
Wigner E.	E.74, 82, 92, 106, 112-116, 405, 426, 485

Y

Yappa Yu. A.	72
Yudin P. F.	288

Z

Zaytsev	447
Zeldovitch Ya. B.....	96
Zener C.	84
Zharkov G.	446, 447
Zhdanov Yu. A.	333, 335, 337
Zimmer K. G.	127