

RELATIVITÉ ET RÉALITÉ NOTTALE, SIMONDON ET LE RÉALISME DES RELATIONS

Jean-Hugues BARTHÉLÉMY et Vincent BONTEMS

RÉSUMÉ : L'épuisement de la querelle du réalisme en physique, qui est la conséquence épistémologique de la divergence inexplicable entre mécanique quantique et physique relativiste, manifeste la nécessité d'un dépassement de l'opposition traditionnelle entre réalisme et antiréalisme. La Théorie de la Relativité d'Échelle de Laurent Nottale, dans la mesure où elle vise à réunifier microphysique et macrophysique grâce aux concepts d'espace-temps fractal et de dépendance d'échelle, opère le dépassement de cette opposition en postulant la valeur d'être des relations physiques. L'exigence d'un réalisme des relations en physique confirme ainsi les intuitions de la philosophie de l'individuation de Gilbert Simondon, qui jugeait nécessaire d'accorder à la relation une valeur ontologique pour fonder la « synthèse grandiose de la relativité et des quanta ».

MOTS-CLÉS : échelles, fractal, individuation, mécanique quantique, Nottale, réalisme des relations, relativité, Simondon, transduction.

ABSTRACT : The exhaustion of the controversy about realism in physics, which is an epistemological consequence of the radical discrepancy between quantum mechanics and relativity, indicates the irrelevance of the traditional opposition between realism and antirealism. Since its purpose is the reunification of microphysics and macrophysics by the means of fractal space-time and scale relativity, Laurent Nottale's theory of Scale Relativity gets over this opposition by postulating the ontological value of the physical relations. The physicist's relational realism hence confirms spontaneously the intuitions of Gilbert Simondon's philosophy of nucleation, which considers the necessary recognition of the ontological value of relations in order to establish the « great synthesis of relativity and quantum physics ».

KEYWORDS : scales, fractal, nucleation, quantum mechanics, Nottale, relational realism, relativity, Simondon, transduction.

ZUSAMMENFASSUNG : Die Erschöpfung des Streites um den Realismus in der Physik, die als epistemologische Konsequenz der radikalen Diskrepanz zwischen Quantenmechanik und Relativitätsphysik erscheint, legt die Notwendigkeit an den Tag, den Gegensatz zwischen Realismus und Antirealismus zu überholen. Laurent Nottales Theorie der Skalarelativität, insofern sie Mikro- und Makrophysik durch die Skala-Raum-Zeit- und Skalabedingtheitsbegriffe zu vereinigen beabsichtigt, schafft es, diesen Gegensatz zu überholen, indem sie den ontologischen Wert der physischen Verbindungen als Postulat annimmt. Die Forderung eines Realismus der Verbindungen in der Physik bestätigt auf diese Weise die Intuitionen von Gilbert Simondon's « Individuationsphilosophie », der es für notwendig hielt, der Verbindungen einen ontologischen Wert zu verleihen, um die « großartige Synthese von Relativität und Quanten » zu begründen.

STICHWÖRTER : Skala, Fraktal, Individuation, Quantenmechanik, Nottale, Verbindungsrealismus, Relativität, Simondon, Transduction.

RIASSUNTO : L'esaurirsi della polemica sul realismo in fisica, conseguenza epistemologica della divergenza inspiegabile tra meccanica quantistica e fisica relativistica, manifesta la necessità di un superamento dell'opposizione tradizionale tra realismo e anti-realismo. La Teoria della relatività di scala di Laurent Nottale, nella misura in cui cerca di riunificare microfisica e macrofisica grazie ai concetti di spazio-tempo frattale e di dipendenza di scala, esegue il superamento di quest'opposizione postulando i modi di essere profondi delle relazioni fisiche. L'esigenza di un realismo delle relazioni in fisica conferma dunque le intuizioni della filosofia dell'individuazione di Gilbert Simondon che giudicava necessario di accordare alla relazione un valore ontologico per fondare la « sintesi grandiosa della relatività e dei quanta ».

PAROLE-CHIAVE : scale, frattale, individuazione, meccanica quantistica, Nottale, realismo delle relazioni, relatività, Simondon, transduzione.

Jean-Hugues BARTHÉLÉMY, né en 1967, est professeur de philosophie et de psychologie au lycée Chaptal de Quimper. Il prépare actuellement son doctorat à l'université Paris-VII sur « Sens et connaissance. Comprendre et re-fonder sur l'œuvre de Simondon ».

Adresse : Lycée Chaptal, 35, chemin des Justices, F-29000 Quimper.

Courrier électronique : jh.barthelemy@wanadoo.fr

Vincent Karim BONTEMS, né en 1974, est élève-professeur de l'École normale supérieure de lettres et de sciences humaines de Lyon et agrégé de philosophie. Après avoir travaillé sur la spatialité géopolitique (« L'Amérique de Marx », maîtrise), il écrit actuellement son D.E.A. à l'École des hautes études en sciences sociales sur la Théorie de la Relativité d'Échelle de Laurent Nottale et sur sa mise en relation avec la philosophie de la nature de Gilbert Simondon. Il dirige, par ailleurs, l'association d'artistes peintres et poètes ORPHEE.

Adresse : 35, rue de Madrid, F-91190 Gif-sur-Yvette.

Courrier électronique : v.bontems@laposte.net

« La substance de l'infiniment petit est contemporaine de la relation. »
GASTON BACHELARD, *Études*.

LA QUERELLE DU RÉALISME EN PHYSIQUE

L'interprétation des théories physiques constitue l'enjeu d'un conflit récurrent entre deux tendances philosophiques opposées, le réalisme et l'antiréalisme ; cette querelle se prolonge jusqu'à nos jours avec le débat opposant Bernard d'Espagnat à Michel Bitbol¹. Aux yeux du réaliste, la science produit ses concepts afin d'étudier une réalité préexistante et indépendante ; il considère les lois qui forment la structure descriptive et prédictive de la physique comme étant la présentation mathématique des lois de la nature. En revanche, l'antiréaliste conteste la référence des concepts scientifiques à la réalité matérielle, le plus souvent pour lui substituer une référence à « l'expérience », faisant ainsi l'économie de la supposition d'une préconstitution et d'une indépendance de l'objet d'étude ; et il n'interprète pas les lois de la physique d'après leur correspondance avec d'hypothétiques lois naturelles, considérant que leur régularité nous renseigne davantage sur les structures formelles de notre pensée que sur une mythique réalité extérieure. Mais les acteurs de ce débat constatent eux-mêmes l'épuisement de cette querelle : ils s'accordent sur tout sauf sur leur position de principe. Dans ce contexte, le travail de Laurent Nottale, qui promeut un constructivisme fondé sur le principe de relativité et qui est destiné à réunifier la science physique, offre la perspective d'un dépassement vers une position tendanciellement réaliste. Ce dépassement ne va pas sans poser des difficultés d'ordre philosophique : le réalisme de Nottale ne porte point sur des entités matérielles mais sur des *relations* physiques. Nous proposons de chercher le fondement métaphysique de cette théorie dans la philosophie du réalisme des *relations* de Gilbert Simondon et de rendre ainsi raison de l'épuisement de la querelle du réalisme.

Historiquement, la tendance réaliste fut le plus souvent en situation dominante, d'une part en raison de son enracinement dans une attitude plus naturelle, celle qui caractérise le réalisme spontané du savant, en second lieu parce qu'elle permettait de penser le progrès scientifique comme un processus d'approximation croissante du réel. Larry Laudan² a proposé d'appeler « réalisme convergent » cette interprétation implicite ou explicite

1. BITBOL et LAUGIER, dir., 1997.

2. LAUDAN, 1981.

de l'évolution des idées en physique. La dimension transhistorique du réalisme lui confère le statut et les prétentions d'un cadre général des théories physiques, c'est-à-dire d'une perspective métaphysique visant à rendre raison de la dynamique de formation des théories scientifiques. Toutefois, pour demeurer cohérente, cette perspective doit pouvoir intégrer l'idée d'une convergence procédant par ruptures et non par affinement des symboles et des structures. Car ce qui caractérise les étapes cruciales de l'évolution des sciences physiques, ce sont bien de multiples ruptures momentanées de la chaîne typologique inscrite dans la sous-structure ontologique des modèles. L'effondrement répété de l'arrière-plan métaphysique des théories physiques fournit ainsi un argument récurrent à l'argumentation critique de l'antiréaliste dénonçant les illusions du réalisme, qui prétend à chaque période de stabilité disposer d'une appréhension de la réalité telle quelle.

L'hypothèse du réalisme convergent ne peut donc se maintenir que sous la forme d'un réalisme convergent critique, qui restaure l'intelligibilité du passage d'un paradigme à l'autre par la notion de crise de la représentation ontologique. La crise, la séparation inexplicable d'un fait et de son sens, qui donne momentanément prise à l'argumentation antiréaliste, devient le signe de l'insuffisance de la théorie physique et de l'ontologie qui lui est associée; la résistance ainsi marquée par la réalité face à une théorie et à une ontologie ayant atteint leurs limites manifeste la nécessité d'un dépassement de leur problématique commune. Autrement dit, la crise d'un modèle théorique et de sa fondation ontologique met en évidence la nécessité d'une défondation, mais celle-ci ne devient intelligible qu'une fois le renouvellement théorique effectué : la défondation apparaît alors comme le préalable indispensable à une refondation qui lui donne sens. Nous appellerons « relativisation » ce processus par lequel une théorie antérieure se trouve refondée comme cas particulier d'une nouvelle théorie. Ce processus mérite doublement son nom, d'abord, en raison de l'approfondissement conceptuel qui relativise les fondations de la première théorie, ensuite, parce qu'il s'opère alors une modification de sa perspective historique³. Bitbol propose de décomposer ce moment « révolutionnaire » en trois étapes :

« (1) une étape d'ultime projection des modèles antérieurs, au prix d'altérations profondes de leurs caractéristiques ; (2) une étape de critique radicale des

3. Sur ces deux aspects, théorique et historique, de la relativisation, même si le concept n'apparaît pas en tant que tel, voir « Le nouvel esprit scientifique et la création de valeurs rationnelles », in BACHELARD, 1972, p. 95-97. La solidarité de ces deux aspects met en évidence la dimension sociale du processus : il faut un certain temps pour que la construction théorique se convertisse en une nouvelle perspective historique, et ce temps dépend des conditions sociales de réception et d'amplification de la théorie.

modèles antérieurs, et parfois de scepticisme quant à l'utilité de modèles allant au-delà de la structure prédictive; (3) une étape d'élaboration de nouvelles normes pour la constitution de modèles et de mise en place de nouveaux modèles non minimaux conçus dans la perspective d'une continuité partielle avec les types ontologiques prérévolutionnaires⁴. »

Au xx^e siècle, la révolution relativiste⁵ opérée par Albert Einstein illustre parfaitement ce schéma : à partir de l'échec inexplicable de l'expérience de Michelson-Morley (1887), la physique classique entre en crise, et la première phase du processus s'enclenche avec les recherches de Hendrik Antoon Lorentz visant à attribuer à l'éther les propriétés nécessaires pour rendre compte de ce résultat négatif. L'éther se révélant être une hypothèse *ad hoc*, c'est son abandon par Einstein qui conditionna la véritable résolution de la crise. Dans un premier temps, sa démarche consiste en une redéfinition opératoire des grandeurs spatiales, temporelles et cinématiques à partir de la mise en évidence du rôle joué par le groupe de Poincaré et les transformations de Lorentz; mais dans un second temps, cette nouvelle théorie algébrique prend un sens physique : celui de la « découverte » de l'espace-temps quadridimensionnel. Cette refondation théorique opérée grâce au principe de relativité prend donc le sens d'une refondation réaliste récurrente de la théorie physique : c'est la certitude de l'universalité des lois de la nature qui justifie aux yeux d'Einstein la formalisation des lois de la physique obtenue par leur invariance au travers des groupes de symétrie. Aux yeux d'un épistémologue antiréaliste comme Bitbol, c'est au contraire la tendance à hypostasier les invariants, au détriment des groupes de symétrie par rapport auxquels ils sont définis, qui caractérise cette phase finale de réélaboration de l'ontologie associée. L'antiréaliste préférera, en effet, concentrer son interprétation sur la phase la plus aiguë de la crise, celle de défondation, puisque c'est elle qui exige un abandon de la posture réaliste : la refondation ontologique ne sera pour lui qu'une retombée métaphysique. L'interprétation métaphysique de la théorie physique semble ainsi condamnée à une oscillation perpétuelle « entre l'extrémité du scepticisme au moment des révolutions scientifiques et l'extrémité de la recristallisation ontologique durant les périodes de consolidation post-révolutionnaire⁶ ».

4. BITBOL, 1998, p. 54.

5. La révolution théorique provoquée par la théorie de la relativité restreinte est « relativiste » en ce sens qu'elle opère en fonction du principe de relativité. Mais on peut aussi la dire « relativisante » puisqu'elle refonde la physique classique comme un cas particulier (où c possède une valeur infinie), c'est-à-dire qu'elle en opère la relativisation. Le lien entre principe de relativité et processus de relativisation n'est donc pas contingent, c'est une même récurrence historique et conceptuelle qui s'exerce à travers l'amplification du principe et la relativisation des structures théoriques.

6. BITBOL, 1998, p. 156.

Mais la crise la plus grave et la plus actuelle du réalisme ne fut pas entraînée par le développement de la relativité restreinte ou de la relativité générale, elle fut provoquée par l'apparition de la mécanique quantique⁷. En physique quantique, les sous-structures ontologiques (ondes et corpuscules) ne peuvent prétendre au statut de représentation ontologique universellement valable ; et cet abandon est effectué sans que le formalisme des fonctions d'onde offre la possibilité de penser un nouveau modèle universel de représentation spatio-temporelle des phénomènes microscopiques. Il semble donc que le processus révolutionnaire soit resté bloqué sur la deuxième phase sans parvenir à dégager la perspective du rétablissement d'une ontologie associée qui ne dépende pas du contexte expérimental. La nouveauté cruciale de la situation affrontée par le réaliste confronté à la mécanique quantique, c'est donc l'absence de compatibilité suffisante des contextes, et l'absence corrélative d'invariant unique transcontextuel des phénomènes qui autoriserait la procédure finale d'hypostase des invariants. Les formalismes y prennent de ce fait une importance décisive, et les modèles ontologiques associés restent soit minimaux, soit fragmentaires, soit hautement spéculatifs.

Comme le remarquent justement Bitbol et d'Espagnat⁸, la mécanique quantique à elle seule ne conduit cependant pas fatalement à adopter un point de vue antiréaliste, mais elle y invite fortement dans la mesure où elle décourage durablement les espérances du réaliste, dont les interprétations prennent une forme si baroque ou artificielle qu'elles apparaissent bien plus comme des régressions vers la phase première du processus révolutionnaire (celle des prolongements de l'ontologie traditionnelle par l'introduction d'hypothèses *ad hoc*) qu'une voie frayée vers le rétablissement d'une ontologie capable de refonder le formalisme, c'est-à-dire comme le terme de la relativisation. Ce qui fait obstacle à cette restauration de l'ontologie, c'est la rupture entre la mécanique quantique et la plupart des traits généraux qui assuraient la cohérence théorique et transhistorique de la physique classique relativiste : si la physique classique se concevait comme un système déductif découlant de principes (au premier rang desquels le principe de relativité), la mécanique quantique se fonde quant à elle sur des axiomes opératoires n'offrant par eux-mêmes aucune intelligibilité particulière⁹ ; la physique classique est une théorie descriptive et déterministe portant sur des entités spatio-temporellement définies, la mécanique quan-

7. La mécanique quantique n'est pas une « mécanique » à penser sur le modèle de la mécanique newtonienne. Nous emploierons donc aussi les expressions « physique quantique » et « microphysique » afin de souligner cette particularité de la physique des particules élémentaires. Ces dénominations n'englobent pas dans le présent article la chromodynamique.

8. ESPAGNAT, 1981, 1982 et 1994.

9. Il nous semble abusif de fonder l'intelligence de la physique sur la seule notion de symétrie. Les symétries indiquent l'intelligibilité des phénomènes plutôt qu'elles ne l'expliquent.

tique est une théorie indéterministe à fonction prédictive ne permettant une interprétation en termes de modèles spatio-temporels que sous certaines conditions expérimentales. L'absence d'interprétation réaliste de sa fondation, la disparition même de la visée d'une description de la réalité, enfin l'incohérence des modèles associés font de la mécanique quantique un véritable casse-tête pour le réaliste : il apparaît désormais impossible de restaurer l'image d'entités réelles par rapport auxquelles s'évaluerait la fidélité d'une modélisation théorique. Mais ce qui n'est pas remis en cause pour autant c'est la visée réaliste, qui ne dépend pas de telle ou telle théorie ; il est toujours possible d'accorder une valeur au concept de réalité indépendante en tant que limitation du pouvoir déterminant de l'activité technique et symbolique de l'expérimentateur.

C'est pourquoi un chercheur comme d'Espagnat peut maintenir l'exigence d'une visée réaliste minimale en science physique. Ce à quoi il faut renoncer, c'est le réalisme des objets, un réalisme des accidents, au profit d'une appréhension du réel dans son ensemble, d'une réalité indivisible. Cette tentative de retour à un réalisme convergent critique débouche sur l'affirmation que la réalité indépendante n'est pas immergée dans l'espace-temps, qu'elle n'est pas plurielle, et cela, afin de rendre compte du fait qu'elle n'est pas dans l'absolu organisée en une multiplicité de substances individualisées, stables et porteuses de déterminations variables. Comme à chacune de ses refondations récurrentes, le réalisme prétend ainsi se rétablir au moyen de la critique interne de son « substantialisme » : la relativité einsteinienne avait imposé la critique de la substantialité de corps matériels caractérisés par la conservation de la masse. Ce qui fait la particularité de la critique de d'Espagnat, c'est sa tournure à la fois kantienne et spinoziste : la réalité en-soi se situe au-delà de la phénoménalité (le Voile) et l'erreur est de substantifier les modes de la véritable substance (Dieu ou la Nature). Cette version minimale du réalisme est exprimée par la métaphore du « réel voilé » qui peut nous renvoyer selon l'auteur à la métaphysique néoplatonicienne ou à la non-ontologie bouddhiste.

La crise conjointe du réalisme et de la théorie physique, provoquée par l'autonomisation conceptuelle de la mécanique quantique (obtenue à travers sa réduction à la seule cohérence formelle et opératoire), a donc conduit à atténuer les différences d'approches entre réalistes et antiréalistes plutôt qu'à trancher le conflit qui les opposait. D'une part, le réalisme ne peut apparemment se maintenir que sous la forme d'un « réalisme du lointain », plaçant hors d'atteinte le réel tel quel et renonçant définitivement à prendre ses modèles pour la réalité même ; d'autre part, l'antiréaliste ne peut rendre crédible la convergence réflexive par laquelle il entend expliquer le progrès des sciences qu'en cautionnant une attitude « quasiréaliste ». Les épistémologues réalistes et antiréalistes sont ainsi parvenus à un

accord sur l'état de crise actuel et ne diffèrent guère dans leur attitude vis-à-vis de la pratique scientifique. Dès lors, on peut se demander si le débat n'est pas épuisé et si le problème de la réalité en science physique n'a pas cessé d'être un enjeu épistémologique majeur. La différence entre les uns et les autres semble, en effet, se réduire à la différence de visée existant entre l'idée d'univers et l'idée de l'idée de l'univers, qui seraient les deux pôles régulateurs de la théorie physique. Même s'il faut alors considérer comme exemplaire cette confrontation¹⁰ des interprétations réaliste et anti-réaliste de la mécanique quantique, elle n'aboutit qu'à une clarification partielle du problème. La discussion entre Bitbol et d'Espagnat a certes le mérite de désarmer les argumentations catégoriques quant au « sens » de la physique quantique et de dissiper ainsi d'inutiles polémiques, mais la démonstration d'un accord philosophique sur la position d'un problème épistémologique, par-delà l'antagonisme de principe, conserve un caractère énigmatique. Le risque serait de clore un champ problématique simplement parce que la dialectique historique opposant réalisme et antiréalisme est à son « point mort ».

DE LA RELATIVITÉ SELON NOTTALE AU RÉALISME SELON SIMONDON

En regard de ce problème à la fois irrésolu et épuisé, il nous semble pertinent de faire état des recherches de Laurent Nottale¹¹, et notamment de sa réflexion sur le problème de l'unification de la physique. Car l'autonomie théorique de la mécanique quantique rend problématique non seulement sa propre interprétation, et la notion de réalisme en microphysique, mais aussi l'idée même de Science, dans la mesure où sa relation avec le reste de la physique demeure incertaine. Le développement de la mécanique quantique correspond ainsi à une crise du réalisme, qui se double d'une crise du rationalisme, induite par la divergence entre physique quantique et non-quantique. Or l'exigence métaphysique d'unité rationnelle (et pas seulement opératoire et intersubjective) commande la dénonciation du « schisme » en physique :

« C'est tout un mode de pensée, une manière d'aborder les problèmes, le choix des outils mathématiques et les règles qui les régissent, qui diffèrent au niveau le plus fondamental. On pourrait dire, d'une manière provocatrice, que la physique actuelle est dans un état quasi "schizophrénique", n'étant pas une, mais

10. BITBOL et LAUGIER, 1997.

11. NOTTALE, 1998.

double : deux physiques presque contradictoires coexistent d'une manière rien moins que pacifique [...] ¹². »

Selon Nottale, on ne saurait donc espérer le renouvellement du problème de la réalité, et l'établissement en mécanique quantique d'une relation interne à une visée ontologique, que si l'on opère la résolution du problème de l'unité rationnelle de la science, c'est-à-dire l'intégration de la mécanique quantique dans une théorie réunifiée. Si le problème de la réalité en science physique révèle une certaine inconsistance, c'est parce que sa discussion, en se focalisant sur l'interprétation de la mécanique quantique, a imposé un dilemme sémantique : ou bien l'on considère la science comme l'expression mathématique de structures réelles, et le formalisme quantique devient inintelligible, puisque dépourvu de fondement ontologique ; ou bien l'on considère la science comme l'expression d'un projet rationnel sans dépendance vis-à-vis d'une quelconque extériorité, et alors l'idée de science entre en crise, puisque l'autonomie du formalisme quantique ne produit point la perspective d'une unification rétrospective. La complexité de cette difficulté épistémologique découle du fait qu'on y trouve inextricablement associés deux enjeux différents : d'une part, l'enjeu scientifique, celui de l'unification théorique, qui ne peut être résolu qu'au travers d'une percée théorique rendant raison de la divergence entre physique quantique et non-quantique, microphysique et physique des grandes échelles ; d'autre part, l'enjeu métaphysique, celui d'une visée ontologique, dont la résolution dépend de la possibilité de restaurer le réalisme convergent critique.

La théorie de la relativité générale d'Einstein fut la dernière théorie à avoir assumé cette ambivalence, le principe de relativité étant doublement valorisé par son rôle méthodologique de dégagement des structures mathématiques et par sa portée philosophique de dévoilement du perspectivisme inhérent à une situation dans l'univers ¹³. Face à cette double exigence, l'aménagement de la mécanique quantique dans le sens d'une interprétation quasiréaliste comme le retour à une théorie des « variables cachées » au fondement incontrôlable sont insuffisants car ils représentent deux tentatives de restauration d'une cohérence unilatérale des valeurs : du formalisme vers le réalisme et inversement. Il n'est donc pas exclu que la résolution de la crise du réalisme, indissolublement liée à celle de l'unité de la physique, passe par le retour à une démarche analogue à celle d'Einstein, c'est-à-dire à un travail de physique mathématique qui exprime aussi

12. NOTTALE, 1998, p. 97.

13. Le rôle méthodologique du principe de relativité consiste à rechercher l'invariance des lois de la physique, il implique le recours au principe de covariance. La portée philosophique, quant à elle, tient à ce qu'il s'autojustifie par référence à l'invariance des lois de la nature : c'est le postulat d'un monde absolu qui fonde la méthode universelle.

l'approfondissement d'une philosophie de la nature. Or l'intérêt du travail de Nottale est d'accorder justement cette double valeur, réaliste et méthodologique, au principe de relativité : « En 1916, Einstein énonçait ainsi le principe de relativité : " Les lois de la nature doivent être valides dans tous les systèmes de référence, quel que soit leur état " ¹⁴. » La notion de lois de la nature (et non de la physique) signifie son orientation réaliste, tandis que la notion d'état, une fois étendue aux états d'échelle, devient le fondement de la forme des équations de la physique par-delà la divergence quantique - non-quantique. La Théorie de la Relativité d'Échelle (TRE) vise ainsi à réaliser la troisième phase du processus révolutionnaire de relativisation, celle de l'unification et du rétablissement ontologique. Elle assume donc la tâche d'une relativisation des précédentes théories et d'une refondation réaliste de la visée ontologique associée à sa propre perspective. Nottale entend grâce à elle unifier le champ de la science physique et produire de nouvelles prédictions théoriques dans les domaines de la physique du chaos, de la microphysique et de la cosmologie.

La TRE trouve sa première motivation théorique dans une certaine idée de la Science, c'est-à-dire dans une aspiration métaphysique, et ce n'est donc pas le moindre mérite de la démarche de Nottale que de faire (re-)prendre conscience de l'enracinement de l'activité théorique au sein d'une insatisfaction intellectuelle : la coexistence de deux modes de pensée inconciliables est spontanément identifiée comme une anomalie, un état de fait paradoxal. Mais l'insatisfaction résulte aussi de l'absence de fondation théorique de la mécanique quantique : une théorie physique, aussi fiable soit-elle, si elle ne se confond plus avec une visée ontologique, ne remplit pas complètement le rôle d'élucidation rationnelle de l'univers que l'on peut escompter de la science. Le « geste théorique » de refondation de la physique autour du principe de relativité peut dès lors s'interpréter comme une prise de recul vis-à-vis d'une problématique centrée exclusivement sur la mécanique quantique, qui souligne les contraintes du formalisme, mais néglige l'importance d'un impératif de cohérence et d'intelligibilité auquel répondent le rationalisme et le réalisme. L'antiréaliste ne jure que par la cohérence formelle des théories scientifiques, tandis que le réaliste ne veut accorder de sens à la physique que dans la mesure où elle décrirait les structures de l'univers ; l'un se revendique du rationalisme, l'autre du réalisme. Dans la perspective de Nottale, les deux valeurs que représentent la rationalité des structures formelles et la réalité des structures matérielles se fondent en une seule, la valeur du principe de relativité. Le principe de relativité est ainsi élevé au rang de méthode : il fonde l'intelligibilité et l'unité de la physique en même temps qu'il constitue un « principe de réa-

14. NOTTALE, 1998, p. 7.

lité¹⁵ », une mise en relation de l'universalité de la science et des structures de l'univers. La méthode relativiste comprend l'exigence de cohérence interne de la science comme une tendance à s'universaliser pour mieux pouvoir comprendre les lois de l'univers. Or la thèse essentielle de la TRE consiste justement en une extension du principe de relativité einsteinien : les lois de la nature doivent être valides dans tous les systèmes de référence, quel que soit leur état de mouvement *et d'échelle*. Les équations différentielles de la physique classique relativiste et les équations complexes de la mécanique quantique diffèrent, bien qu'elles soient les approximations des mêmes lois, parce que l'opération de mesure se situe à des échelles différentes, mais elles ne sont pas divergentes en ce sens qu'elles reposent toutes sur un principe commun, celui de la relativité d'échelle. L'équation de Schrödinger¹⁶ devient interprétable en tant que description de la réalité. La TRE refonde une perspective relativiste, mais elle intègre le formalisme quantique en tant que cas général, car, paradoxalement, la recherche d'une fondation théorique à la mécanique quantique impose d'abandonner l'hypothèse (implicite) de dérivabilité de l'espace-temps qui détermine la viabilité des équations différentielles de la physique classique relativiste. Un espace-temps fractal se substitue alors à l'espace-temps riemannien et induit une dépendance d'échelle affectant la forme des équations.

La TRE constitue donc un événement majeur pour le renouvellement du problème de la réalité : l'affirmation d'un constructivisme, qui ne s'identifie pas au réalisme, mais justifie une orientation tendancielle réaliste ainsi que la résurgence récurrente du réalisme en science physique. Nottale n'hésite d'ailleurs pas à renouer avec la perspective du réalisme convergent : « Nos équations ne seront jamais que des approximations imparfaites, valables dans un cadre bien déterminé et toujours limité par une frontière (s'élargissant au cours du temps) au-delà de laquelle la représentation qu'elles donnent du monde se révèle de plus en plus infidèle. » On remarquera cependant que cette version du réalisme convergent demeure parfaitement compatible avec une posture quasiréaliste (elle est simplement mise entre parenthèses), dans la mesure où elle concède que « dans une telle conception de l'évolution de la science, la recherche des

15. Une telle interprétation du principe de relativité se trouve aussi dans certains textes d'Einstein, voir MERLEAU-PONTY, 1986, p. 244.

16. La mécanique quantique considère des « états » de système, c'est-à-dire une quantification dans l'espace des phases des relations potentielles entre position et vitesse. L'équation générale des ondes de Schrödinger permet de prévoir l'évolution de la fonction d'onde et donc l'état d'un système au cours du temps tant qu'aucune interaction (comme la mesure) ne vient le perturber. La représentation quantique des phénomènes est ainsi parfaitement déterminée tant que l'on s'en tient à l'information qui porte sur l'état du système et non sur telle ou telle observable (vitesse, position, etc.).

connaissances pourrait bien ne pas avoir de fin. Ces lois (hypothétiques) de la nature ne seraient alors qu'un concept asymptotique, un horizon, toujours entrevu mais jamais atteint¹⁷ » ; mais à la différence du quasi-réaliste, Nottale valorise la perpétuelle insatisfaction du réaliste. Toutefois, cette intention réaliste ne se heurte-t-elle pas à l'impossibilité de définir des « objets » consistants en mécanique quantique ? Ne serait-elle pas qu'une unification formelle des deux branches divergentes de la physique ?

C'est là sans doute l'originalité la plus remarquable de la TRE par rapport au problème de la réalité en physique : sa visée ontologique parvient à éviter l'ornière du réalisme des objets, à disjoindre réalisme et substantia-lisme, sans pour autant se contenter de l'affirmation vague d'un réalisme du lointain. Entre le réalisme « faible » de d'Espagnat, c'est-à-dire l'affirmation purement métaphysique d'un réel hors d'atteinte, et le réalisme « fort », mais impraticable, d'une correspondance entre concepts et objets, Laurent Nottale dégage une position inédite : la construction d'une visée réaliste qui se confond avec la représentation des phénomènes en tant que résultat d'une relation constitutive entre l'énergie et la géométrie de l'espace-temps. En tirant parti de certains travaux de Richard Feynman¹⁸, il réhabilite, à l'encontre de l'interprétation de Copenhague, la notion de trajectoire en mécanique quantique :

« Toutes les trajectoires possibles allant d'un point à un autre sont *a priori* prises en compte. Les chemins qui passent très loin de la trajectoire classique s'annulent entre eux par interférences destructives. En revanche, les chemins qui restent autour de la trajectoire classique (dans une zone qui peut être assez large) deviennent très probables car ils interfèrent constructivement¹⁹. »

Tandis que Feynman ne construisait qu'une représentation possible des phénomènes, la TRE, parce qu'elle dispose du concept d'espace-temps fractal, accorde à ces trajectoires une valeur ontologique, celle de relations constitutives entre espace-temps et énergie. Mais de la réalité des trajectoires, Nottale se garde bien de tirer l'hypostase de particules classiques : les trajectoires dont il s'agit sont des trajectoires fractales et la particule n'est en réalité, à une certaine échelle, qu'une famille de trajectoires. La valeur de réalité n'est donc pas accordée à la substance individuelle que serait en-soi une particule, mais à la relation entre énergie et géométrie

17. NOTTALE, 1998, p. 91.

18. Richard Feynman, *in* NOTTALE, 1998, p. 200 : « Les chemins importants pour une particule quantique ne sont pas ceux qui ont une pente (ou une vitesse) bien définie partout, mais ceux qui au contraire sont très irréguliers à toute petite échelle. [...] Ainsi, bien qu'une vitesse moyenne puisse être définie, la vitesse quadratique moyenne n'existe en aucun point. En d'autres mots, les trajectoires sont non différentiables. »

19. NOTTALE, 1998, p. 200.

fractale de l'espace-temps, relation qui rend compte des individuations possibles d'un système : « Le concept de particule ne concernerait plus un objet qui "posséderait" une masse, un spin ou une charge, mais s'identifierait aux géodésiques fractales d'un espace-temps non différentiable, géodésiques dont masse, spin et charge seraient des propriétés communes²⁰. »

Le réalisme de la TRE intègre donc la critique antirealiste rendue inévitable par la mécanique quantique, mais réintègre celle-ci dans l'horizon réaliste d'une théorie globale associée à une nouvelle visée ontologique. C'est là encore l'occasion pour Nottale de revendiquer sa fidélité au projet d'Einstein, et même de justifier ses réticences à l'égard de l'interprétation standard de la mécanique quantique. L'équation de Schrödinger, retrouvée par la TRE, ne permet qu'une description probabiliste de la réalité, mais la raison en est la nature fractale de l'espace-temps aux petites échelles : « Une telle théorie n'est donc pas, comme l'exigeait Einstein dans sa critique de la théorie quantique, statistique par essence, au niveau d'un principe premier, mais elle l'est par nécessité logique, comme conséquence d'un principe plus profond²¹. » La TRE parvient donc à opérer la relativisation de la mécanique quantique et des théories relativistes antérieures par leur intégration au sein de la perspective de la relativité d'échelle. Elle assure ainsi la cohérence de l'ensemble de la physique, et cette mise en relation des équations fondamentales de la physique des grandes échelles et de la physique des petites échelles ne demeure pas sur un plan formel puisqu'elle prend le sens d'une « découverte » de structures universelles, celles de la dimension d'échelle et de la nature fractale de l'espace-temps. De même donc que les néoréalistes ont pu, après le développement de la théorie de la relativité générale par Einstein, avancer que la seule substance était l'espace-temps courbe de Bernhard Riemann, nous pourrions dire que le réalisme de Nottale porte uniquement sur les structures de l'espace-temps fractal (ou plutôt sur l'espace-temps-djinn²²).

Un point ne manquera pas cependant d'être soulevé par l'antiréaliste : si la TRE ne verse pas dans le réalisme des objets parce qu'elle ne procède pas à l'hypostase d'invariants, et cela pour la bonne raison qu'elle ne dégage pas de nouvel invariant, alors dans quelle mesure est-elle vraiment réaliste ? Sur quel fondement repose sa visée ontologique ? Qu'est-ce qui a valeur d'être au sein de la relativité d'échelle ? C'est peut-être la partie la plus intéressante de la réflexion métaphysique qui peut être menée à partir

20. NOTTALE, 1998, p. 238.

21. NOTTALE, 1998, p. 237.

22. Le « djinn » est le nom donné par Nottale à la dimension d'échelle qu'il faut ajouter aux quatre dimensions d'espace et de temps pour obtenir l'ensemble de l'information possible sur un système physique. Dans des travaux antérieurs, elle était désignée sous le nom de « zoom ».

du travail de Nottale et l'originalité la plus prononcée de l'ontologie associée à la TRE par rapport aux théories relativistes antérieures. Comme dans le reste de la physique classique relativiste, les grandeurs qui caractérisent l'état du système de coordonnées (origine du système, orientation de ses axes, vitesse, etc.) ne peuvent jamais être définies de manière absolue, mais ne peuvent l'être que relativement à un autre système, si bien qu'elles « n'ont pas d'existence par elles-mêmes, seule possède un sens physique la relation deux à deux entre objets ou systèmes²³ ». Or, alors que l'on pourrait très bien concéder que la physique porte sur les relations et ne nous apprend rien sur la nature des êtres eux-mêmes sans remettre en cause pour autant le statut des êtres en tant que termes des relations, ou qu'au contraire l'on pourrait tirer parti de cette primauté de la relation sur l'être pour désubstantialiser radicalement la physique et critiquer le réalisme, Nottale estime qu'il convient d'accorder valeur d'être aux relations elles-mêmes :

« Si les choses n'existent pas de manière absolue, mais existent néanmoins, leur nature est à rechercher dans les relations qui les unissent. Seuls existent les rapports entre les objets, non les objets par eux-mêmes. Ceux-ci sont donc vides en soi, et doivent se réduire à l'ensemble de leurs rapports avec le reste du monde. Ils sont ces rapports²⁴. »

Le dépassement de la position du réalisme du lointain et du quasi-réalisme aboutit donc à une position antirealiste mais tendanciellement réaliste. L'interprétation de la TRE proposée par Nottale lui-même, comme théorie visant le réel en tant que relationnel, répond ainsi à la nécessité d'accorder un sens physique à la « résolution », c'est-à-dire au rapport d'échelle qui constitue la variable essentielle de ces équations, et qui n'est en elle-même qu'une relation. Nous qualifierons alors volontiers le réalisme de Nottale de « réalisme des relations ». C'est parce que la relation a valeur d'être que les équations fondamentales de la TRE, notamment les fonctions d'onde quantiques, qui mettent en rapport la structure de l'espace-temps fractal et l'énergie, prennent le sens d'une description de la réalité. Enfin, l'interprétation du principe de relativité comme principe de réalité s'impose dès lors que la science physique est conçue à son tour comme la relation analogique des structures mathématiques inventées par le physicien et des structures réelles de l'univers.

Or il existe déjà en philosophie une doctrine du réalisme des relations, c'est la philosophie de Gilbert Simondon²⁵, une réflexion puissante sur

23. NOTTALE, 1998, p. 100.

24. NOTTALE, 1998, p. 107.

25. L'œuvre publiée de Gilbert Simondon ne compte que trois titres : voir SIMONDON, 1958, 1989 et 1995.

l'individualité, d'ordre à la fois métaphysique et épistémologique, qui démontre la nécessité d'accorder valeur d'être aux relations plutôt qu'aux individus qui se constituent à travers elles et qui n'ont d'existence que relative. Elle se développe en une ontologie de l'individuation qui recèle sans doute le potentiel conceptuel nécessaire à une explicitation de la TRE : l'individuation d'un système se réalise déjà selon Simondon en fonction de relations avec des ordres de grandeurs inférieur, égal et supérieur. Davantage, son ontologie relationnelle explique les difficultés du réalisme en microphysique par la constatation que se joue à ce niveau l'appréhension d'un milieu « préindividuel » de l'être. Il est donc légitime d'envisager que la philosophie de Simondon puisse produire l'explicitation de la métaphysique sous-jacente de la TRE.

DE LA RELATIVITÉ SELON SIMONDON AU RÉALISME SELON NOTTALE

Il s'agit donc de déterminer si cette hypothèse est correcte²⁶, et si le réalisme des relations de Simondon est bien apte à fonder la perspective ontologique de la relativité d'échelle de Laurent Nottale. En premier lieu, il convient de montrer comment Simondon dissocie la notion de réalité de celle de substance en élaborant, à l'instar de Henri Bergson, la perspective d'une pensée de l'ontogenèse, c'est-à-dire d'une pensée de l'être qui n'oublie pas les opérations génétiques des êtres au profit de leurs structures génériques. Cependant, cette pensée de l'être comme devenir dépasse et corrige celle de Bergson, révélant que l'ontologie désormais indissociable de l'épistémologie impose le paradigme de la « transduction » pour penser l'opération par laquelle s'actualise le réel à partir d'un milieu préindividuel²⁷. En second lieu, cette théorie de l'individuation des êtres prend le sens de ce que Simondon nomme « relativisme » par analogie avec la relativité einsteinienne et qui se développe en tant que réalisme des relations. Simondon prolonge ainsi l'effort bachelardien de construction d'une

26. En adoptant une formulation de Simondon, nous dirons que la constitution de la convergence entre Nottale et Simondon, que tend à établir le présent travail en tant qu'analogie réelle, repose sur le postulat qu'*une relation entre relations ayant rang d'être est elle-même une relation*.

27. L'exceptionnelle richesse de l'ontologie et de l'épistémologie simondoniennes, dont les centres de gravité respectifs sont les notions d'individuation et de relation que nous nous proposons d'exposer en éclairant la seconde par la première, ne saurait être restituée dans les limites d'un article. L'Introduction à la Thèse principale de SIMONDON, constituée de *L'Individu et sa genèse physico-biologique* et de *L'Individuation psychique et collective*, est publiée dans chacun de ces deux tomes, et sera citée ici tantôt dans un tome tantôt dans l'autre, selon le thème abordé.

« Relativité philosophique²⁸ » dans sa distinction d'avec un relativisme ordinaire. L'idée de relativité philosophique consiste alors non pas à dévaloriser l'être des phénomènes en ce qu'ils seraient relatifs, mais à justifier leur valeur d'être en tant que relations, explicitant ainsi la métaphysique implicite de la TRE et ses implications ontologiques. Enfin, il restera à montrer que les concepts de réalité préindividuelle, d'opération transductive et de relations ayant rang d'être sont adéquats pour penser les résultats de la mécanique quantique. Or Simondon lui-même, poursuivant la tendance croissante²⁹ déjà chez Maurice Merleau-Ponty à accorder un statut de paradigme méthodologique à la mécanique quantique, s'est confronté en son temps au problème de la dualité onde - corpuscule et y a éprouvé la validité de ses concepts. C'est en expliquant ces trois points que se révélera la capacité d'anticipation de Simondon à l'égard du réalisme des relations de la TRE et la possibilité d'un dépassement philosophique de l'alternative opposant réalisme et antiréalisme.

Dans sa volonté de dépasser les alternatives traditionnelles, Simondon s'est réclamé de Merleau-Ponty, comme en témoigne la dédicace de *L'individu et sa genèse physico-biologique* : il a voulu, comme les phénoménologues, dépasser l'opposition du sujet et de l'objet qui fait le sol de ces alternatives. Mais au lieu de pratiquer une réduction transcendantale qui fournirait à la fois la vérité et l'au-delà de la révolution copernicienne de Kant, il porte un diagnostic bergsonien sur l'insuffisante radicalité du criticisme. Si ce dernier est resté ce que Edmund Husserl nommait une « mythologie des facultés » fondée sur l'opposition entre un *a priori* non-constitué et un divers *a posteriori*, c'est parce qu'il n'a pas pensé le devenir de l'être dans lequel s'inscrivent les conditions de possibilité de la connaissance elle-même : « La pensée philosophique, avant de poser la question critique antérieurement à toute ontologie, doit poser le problème de la réalité complète, antérieure à l'individuation d'où sort le sujet de la pensée critique et de l'ontologie³⁰. » Par « individuation », il faut entendre le processus de genèse de l'individu. Or l'originalité de Simondon consiste à remarquer que l'on peut penser une genèse radicale de l'être à partir de ce

28. Sur cette idée de Relativité philosophique, voir « La dialectique philosophique des notions de la Relativité », in BACHELARD, 1972, ainsi que BACHELARD, 1929, p. 98, dans *La Valeur inductive de la relativité* : « La Relativité s'est [...] constituée comme un franc système de la relation. Faisant violence à des habitudes (peut-être à des lois) de la pensée, on s'est appliqué à saisir la relation indépendamment des termes reliés, à postuler des liaisons plutôt que des objets, à ne donner une signification aux membres d'une équation qu'en vertu de cette équation, prenant ainsi les objets comme d'étranges fonctions de la fonction qui les met en rapport. » Voir également ALUNNI, 1999.

29. Cette évolution est particulièrement sensible chez Maurice MERLEAU-PONTY entre *La Structure du comportement* et *Le Visible et l'invisible* en passant par *La Nature*, le cours de 1956-1957 au Collège de France.

30. SIMONDON, 1989, p. 137.

qui n'est pas lui sans pour autant tomber dans un réductionnisme. Il faut pour cela cesser de penser l'individuation comme produisant seulement l'individu, et la concevoir comme un « déphasage » d'une réalité antérieure en l'individu et son milieu associé. Le tort du substantialisme est ainsi de ne pas avoir évalué la dépendance de l'individu vis-à-vis de son milieu : l'idée de substance, c'est-à-dire d'un être qui se suffit à lui-même indépendamment de toute relation, est inadéquate pour comprendre l'individualité réelle, qui ne se peut concevoir qu'en relation avec le milieu associé. Mais, réciproquement, cette mise en relation n'évite le réductionnisme que si elle est pensée comme individuation produisant les deux termes de la relation, au lieu que l'un des termes produise l'autre, comme c'est le cas même dans un rapport dialectique.

La réalité première requise pour une telle ontogenèse ne saurait donc préfigurer en quoi que ce soit l'individualité qu'il s'agit d'expliquer, et doit être considérée comme « préindividuelle » : « [...] *au lieu de saisir l'individuation à partir de l'être individué, il faut saisir l'être individué à partir de l'individuation et l'individuation, à partir de l'être préindividuel* ³¹. » Simondon entend donc s'opposer ici, non seulement au substantialisme atomiste, mais aussi à l'hylémorphisme, auquel il accorde le statut d'un substantialisme subtil s'étant imposé d'Aristote à Kant et même à Bergson : « [...] tout ce qui peut être support de relation est déjà du même mode d'être que l'individu, que ce soit l'atome, particule insécable et éternelle, la matière prime, ou la forme ³². » En fondant la genèse de l'individu sur la rencontre d'une matière et d'une forme, l'hylémorphisme ne fait que raffiner le substantialisme, puisque tantôt la matière tantôt la forme constitue un principe d'individuation qui comme tel « sort dans une certaine mesure d'une genèse à rebours, d'une ontogenèse *renversée* ³³ ». Ainsi, par exemple, la distinction kantienne entre *a priori* et *a posteriori*, en tant qu'elle oppose une forme relevant du sujet à une matière relevant de l'objet, n'est que le « retentissement du schème hylémorphique dans la théorie de la connaissance » et « voile de sa zone obscure centrale la véritable opération d'individuation qui est le centre de la connaissance ³⁴ ». Dans son examen des conditions de possibilité de la connaissance, la critique implique une relation du sujet et de l'objet qui n'est qu'un « rapport », c'est-à-dire « une relation dans laquelle les termes préexistent comme réalités individuées » ³⁵.

L'ontologie de l'individuation, ou ontogenèse, dégage à partir de la réalité préindividuelle trois grands régimes d'individuation successifs dont le

31. SIMONDON, 1995, p. 29-30 (souligné par l'auteur).

32. SIMONDON, 1995, p. 21.

33. SIMONDON, 1995, p. 21 (souligné par l'auteur).

34. SIMONDON, 1989, p. 21.

35. SIMONDON, 1989, p. 221.

dernier seul rend possible un sujet connaissant : l'individuation physique, l'individuation vitale et l'individuation psycho-sociale ou « transindividuelle », répondant aux trois ordres physique, vital et humain de *La Structure du comportement*. Nous ne traiterons pour l'heure que de l'individuation physique : l'actualisation de l'être y correspond à la résolution de ses potentiels préindividuels. L'opération constitutive de l'ontogenèse est alors désignée comme « transduction » : l'information, c'est-à-dire la prise de forme, du réel n'est pas le résultat de la rencontre d'une forme et d'une matière, mais la propagation d'une structure à sa propre frontière dans un champ préindividuel. Outre que cette notion de transduction assure l'intelligibilité métaphysique de la notion d'ontogenèse, Simondon revendique « la dérivation à partir d'un certain nombre de schèmes de pensée scientifique, particulièrement de pensée physique³⁶ ». En premier lieu, la thermodynamique qui permet de penser une énergie potentielle comme énergie nécessaire à la prise de forme technique, ou modulation. L'énergie potentielle y est une résonance interne définissant un « état de système³⁷ » qui n'est ni stabilité ni instabilité, mais « métastabilité ». Simondon y détecte la marque d'une rémanence de la préindividualité, une manière d'être plus qu'un sur le mode d'une sursaturation comparable à celle qui préside à la genèse des cristaux, la cristallisation devenant ainsi le paradigme de l'individuation physique. L'être physique se révèle ainsi à sa propre frontière, par la nature transductive de ses relations à son milieu associé, relations par lesquelles il s'actualise en résolvant son potentiel initial de préindividualité, en passant de l'état métastable à l'état stable définitif, c'est-à-dire à l'état inerte.

À cette ontologie de l'individuation se rattache pour Simondon la possibilité de « donner peut-être un sens nouveau au relativisme³⁸ ». Ce nouveau sens repose sur la postulation du réalisme de la relation et s'inscrit pleinement dans le cadre de l'appel bachelardien à l'élaboration d'une Relativité philosophique. Il ressort en effet de ce qui précède que l'individu est relation : « Individuation et relation sont inséparables ; la capacité de relation fait partie de l'être, et entre dans sa définition et dans la détermination de ses limites : il n'y a pas de limite entre l'individu et son activité de relation³⁹. » Ainsi le sens profond de l'ontologie de l'individuation consiste-t-il à disjoindre substantialisme et réalisme en fondant la réalité du réel et l'individualité de l'individu sur la relation, de sorte que désubstantialiser l'individu ne revient pas à le déréaliser : « [...] l'individu n'est pas à proprement parler en relation ni avec lui-même ni avec d'autres réalités ; il est

36. SIMONDON, 1989, p. 232.

37. SIMONDON, 1989, p. 43.

38. SIMONDON, 1989, p. 68.

39. SIMONDON, 1995, p. 141.

l'être *de* la relation, et non pas être *en* relation, car la relation est opération intense, centre actif⁴⁰ ». En ce sens, si l'individu est relation, il ne faut pas dire qu'il n'est que relatif en sous-entendant qu'il n'a pas d'être propre. La formule du relativisme classique dans sa forme vulgarisée énonçant que « tout est relatif » doit, dans une philosophie de l'individuation, être remplacée par l'idée que tout est relation, puisque la relation est en un sens absolue, à l'image de *c* dans la relativité einsteinienne, la vitesse de la lumière n'étant pas à proprement parler une vitesse, toujours relative, ni une donnée empirique liée à l'existence des photons, mais une relation absolue, car invariante d'un référentiel à l'autre, sur le fondement de laquelle s'édifie la relativité de l'espace et du temps comme relativité de l'espace-temps au champ électromagnétique. Le caractère autoréfutant du relativisme classique est dû selon Simondon à son substantialisme : il est inévitable de conclure de la relativité du vrai à son inconsistance, dans la mesure où l'on conçoit encore la vérité comme un terme subsistant par lui-même et que l'on n'accorde pas de statut ontologique à la relation. Ainsi la doctrine simondonienne est-elle :

« [...] réaliste, sans être substantialiste, et postule que la connaissance est une relation à l'être ; or, dans une pareille doctrine, la relation a rang d'être. Seulement, le réalisme de la connaissance ne doit pas être conçu comme une substantialisation du concept ; le réalisme est la direction de cette connaissance comme relation ; ici, avec la théorie de la relativité, nous la voyons aller du rationnel au réel ; dans d'autres cas, elle suit la direction inverse, et c'est alors la rencontre et la compatibilité de ces deux directions épistémologiques qui consacre [*sic*] la validité de la relation sujet-objet. Le réalisme de la connaissance est dans l'accroissement progressif de la densité du rapport qui relie le terme sujet et le terme objet⁴¹. »

Qu'en est-il dès lors de la querelle du réalisme et de l'antiréalisme, c'est-à-dire, à l'époque de Gilbert Simondon, du débat entre Louis de Broglie et Niels Bohr sur la physique quantique ? En 1958, année de soutenance de ses thèses, Simondon prend position dans le débat opposant Bohr et de Broglie, débat dont il convient de préciser la teneur, car il n'est nullement inactuel, l'arbitrage simondonien annonçant un dépassement dont Nottale fournit aujourd'hui la mathématisation. Selon Simondon, la physique contemporaine rencontre des difficultés du fait qu'elle aborde la réalité préindividuelle sans disposer des concepts adéquats : « La nécessité de corriger et de coupler les concepts de base en physique traduit peut-être le fait que *les concepts sont adéquats à la réalité individuée seulement*, et non à la

40. SIMONDON, 1995, p. 61 (souligné par l'auteur).

41. SIMONDON, 1995, p. 126.

réalité préindividuelle⁴². » Et c'est en traitant de la crise fondamentale provoquée par l'inintelligible dualité onde-corpuscule que Simondon va s'attacher à démontrer la valeur heuristique du réalisme des relations et des concepts d'individuation et de transduction. La première étape de ses analyses consiste à suggérer que le quantum d'action (h , la constante de Planck) est moins un facteur de la crise qu'un élément de sa résolution, laquelle établira la valeur du réalisme de la relation en tant que méthode :

« La relation a pu être mise au rang de l'être à partir du moment où la notion de quantité discontinue a été associée à celle de particule ; une discontinuité de la matière qui ne consisterait qu'en une structure granulaire laisserait subsister la plupart des problèmes que soulevait la conception de l'individu physique dans l'Antiquité. [...] Le quantum d'action est le corrélatif d'une structure qui change par sauts brusques, sans états intermédiaires. [...] Une particule est particule non pas en tant qu'elle occupe spatialement telle place, mais en tant qu'elle n'échange que quantiquement son énergie avec d'autres supports d'énergie. La discontinuité est une modalité de la *relation*⁴³. »

D'abord découvert comme attestant de la nature granulaire du rayonnement du corps noir, et appliqué comme tel par Einstein aux ondes lumineuses, le quantum d'action est en fait la manifestation d'une discontinuité relationnelle, et non pas granulaire, de l'énergie. Dès lors, il ne suffit pas de dire, comme le fait l'école de Copenhague, que la perturbation expérimentale insuppressible représentée par le quantum d'action ne limite pas la connaissance de l'objet microphysique mais redéfinit la physique classique comme une approximation valable pour les seuls objets macroscopiques, h étant alors négligeable. Il faut encore considérer l'objet microphysique comme tenant son individualité de sa relation, et celle-ci comme tenant son actualité de l'individu. Or, si la position de Bohr reconnaît bien une réalité objective à la relation objet-appareil, jusqu'à redéfinir l'objectivité comme cette relation, c'est aux dépens cependant de l'individualité et de l'actualité de la relation constitutive de l'objet. C'est donc parce qu'il ne conçoit pas l'individualité comme relationnelle mais comme substantielle que Bohr est conduit à dénier respectivement à l'individu comme acte relationnel et à la relation comme individuation la réalité et l'actualité qu'il accorde pourtant séparément à l'individu et à la relation. D'où le caractère probabilitaire par essence de l'interprétation bohrienne : « Dans la conception probabilitaire, on postule que l'individu peut être seul et il se trouve ensuite incapable d'incorporer la relation, qui paraît accidentelle et indéterminée⁴⁴. »

C'est la notion de complémentarité qu'il s'agit alors de réviser. La complémentarité bohrienne prétend lever la contradiction entre les aspects

42. SIMONDON, 1995, p. 25.

43. SIMONDON, 1995, p. 99-100 (souligné par l'auteur).

44. SIMONDON, 1995, p. 141.

corpusculaire et ondulatoire par la seule nomination de cette contradiction et l'adoption d'un principe d'exclusion réciproque des représentations ondulatoire et corpusculaire⁴⁵. Ce qui en soi est un paradoxe, si ce n'est une contradiction. En revanche, pour Simondon, « la dualité onde-corpuscule ne serait pas du tout la saisie de deux “ faces complémentaires de la réalité ” au sens que Bohr donne à cette expression, mais bien la saisie de deux réalités également et simultanément données dans l'objet. [...] Car la dualité onde-corpuscule est aussi un couple onde-corpuscule⁴⁶ ». D'où l'intérêt porté par Simondon à la théorie de la double solution, qui aux yeux de Bohr « cherche à parvenir à l'impossible » par un « mélange des aspects complémentaires de la chose »⁴⁷. Mais la complémentarité n'interdit le mélange que lorsqu'elle reste une contradiction, et c'est pourquoi Simondon opte en un premier temps pour de Broglie :

« [...] à la base de la théorie de la double solution, il y a l'idée que la relation a valeur d'être, est attachée à l'être, fait réellement partie de l'être. À l'individu appartient cette onde dont il est centre et singularité ; c'est l'individu qui porte l'instrument par lequel s'établit la relation, que cette relation soit celle d'une mesure ou quelque autre événement qui comporte un échange d'énergie. La relation a valeur d'être ; elle est opération individuante⁴⁸. »

Ce que Simondon envisage et trouve conforté par les travaux de de Broglie n'est ainsi rien d'autre que la conception d'un champ potentiellement discontinu comme réciproque de celle d'un corpuscule non-substantiel. La discontinuité relationnelle introduite par le quantum d'action n'implique, en effet, une redéfinition de la complémentarité bohrienne que parce que l'indissociabilité de l'onde et du corpuscule repose sur le caractère échangeable du continu de l'onde et du discontinu du corpuscule :

« [...] si l'on conçoit que la relation a valeur d'être, elle apparaît comme prolongeant dans les états du corpuscule l'énergie de l'onde, et traduisant dans les niveaux d'énergie de l'onde la réalité individuelle du corpuscule. Le fait que cette relation soit asymétrique, c'est-à-dire mette en rapport un champ électromagnétique (pensable selon le continu) et un corpuscule (pensable selon le discontinu), entraîne pour la relation la nécessité d'exprimer simultanément la discontinuité en termes énergétiques et la continuité en termes structuraux. [...] L'onde ne serait plus nécessairement une onde continue. Par là se comprendrait cette singulière atomicité de l'action qui est le fondement de la théorie des quanta⁴⁹. »

45. Voir Catherine Chevalley, *in* BOHR, 1991, p. 399. C. Chevalley semble, elle, considérer que « nommer cette contradiction » c'est en effet déjà « éviter les contradictions ».

46. SIMONDON, 1995, p. 132.

47. Bohr, lettre à Pauli du 13 août 1927, cité par Françoise Balibar, *in* SIMONDON, 1995, p. 251.

48. SIMONDON, 1995, p. 140-141.

49. SIMONDON, 1995, p. 131-132.

Ainsi l'intelligibilité est-elle restaurée, Simondon n'écartant pas tant la prise en compte du quantum d'action qu'il ne s'attache dès le début à lui donner un sens plus profondément réaliste. C'est l'asymétrie évoquée de la relation qui rend compte de l'incompatibilité expérimentale des phénomènes corpusculaire et ondulatoire au lieu d'y trouver un obstacle :

« Le principe de complémentarité, indiquant que l'individu physique se conduit tantôt comme onde et tantôt comme corpuscule, mais non des deux manières à la fois dans le même phénomène, serait, dans la doctrine que nous présentons, à interpréter comme le résultat de l'asymétrie de toute relation⁵⁰. »

C'est pourquoi également la conception simondonienne transcende déjà la théorie de la « double solution » dont elle s'inspirait. D'une part, en effet, la notion d'un champ métastable proprement quantique se situant au-delà de l'opposition continu-discontinu, donc pour ainsi dire « sur-continu » comme le préindividuel était « plus-qu'un », représente pour Simondon un approfondissement de la notion einsteinienne de champ, et c'est dans l'optique d'une « glorieuse synthèse de la Relativité et des Quanta » qu'il conçoit son dépassement de l'interprétation de l'école de Copenhague. Non que ce dépassement soit purement einsteinien, puisque le champ se découvre de nouvelles propriétés. Mais c'est bien d'un dépassement relativiste qu'il s'agit, au sens du principe de relativité qui traverse la physique moderne depuis Galilée et dont il faut élargir à nouveau le sens. D'autre part Simondon remarque que « la théorie de la double solution n'est pas aussi bien servie par l'état actuel du développement du formalisme mathématique⁵¹ » que ne l'est « la théorie indéterministe et probabilitaire » de Bohr, et formule le vœu d'une « refonte de ce que l'on pourrait nommer la topologie et la chronologie de l'axiomatique physique »⁵². Lors donc qu'il semble s'en tenir à la position de broglienne en affirmant qu'il « faut dissocier la perfection formelle et la fidélité au réel », il ne dévalorise pas tant la mathématisation du réel qu'il n'anticipe sur une mathématisation future qui permettra à nouveau cette fidélité au réel, parce que cette mathématisation reformera l'intuition en élaborant un espace-temps proprement quantique⁵³.

50. SIMONDON, 1995, p. 108.

51. Même si Benoît Mandelbrot avait déjà élaboré le concept de fractale, sa pensée ne fut popularisée en France que lorsque fut publié *Les Objets fractals* (1995), et encore le concept d'espace-temps fractal n'y figure pas.

52. SIMONDON, 1995, p. 140 et 142.

53. SIMONDON, 1995, p. 140. Nous ne suivons donc pas Françoise Balibar, qui estime que Simondon ignore « qu'il puisse exister quelque chose qui s'appelle un quantum d'action », voir « Note sur le chapitre III, 1^{re} Partie », in SIMONDON, 1995, p. 251. Au nom de la fidélité au réel, Simondon ne renonce pas tant à la mathématisation et au formalisme de la mécanique

Champ sur-continu en direction d'une synthèse de la relativité einsteinienne et de la physique quantique d'une part, mathématisation réformatrice de l'espace-temps en direction d'un espace-temps proprement quantique d'autre part, telles sont justement les deux premières exigences par lesquelles le réalisme simondonien de la relation anticipe sur le réalisme de la relation dont peut se revendiquer la TRE. La première exigence est révélatrice d'une possibilité de filiation, dans la mesure où la « synthèse de la Relativité et des Quanta » est conçue par Simondon comme par Nottale au sein d'un champ d'espace-temps quantique. Que cette idée leur soit commune, cela tient aux notions sur lesquelles elle ouvre chez Simondon et par lesquelles se précise son anticipation des notions nottaliennes. Simondon demande une pensée du sur-continu et Nottale pense un continu non-différentiable sous la forme d'un espace-temps fractal. Or le champ sur-continu de Simondon est le lieu d'une transduction, opération dont le paradigme factuel est un processus de structuration fractale : la cristallisation, « image la plus simple de l'opération transductive⁵⁴ ». La transduction devient alors elle-même paradigme, mais cette fois-ci méthodologique, dans la mesure où elle désigne encore « l'opération analogique en ce qu'elle a de valide⁵⁵ » et permet de penser le processus d'individuation. La physique quantique est donc pour Simondon le véritable paradigme méthodologique, puisqu'elle fournit les moyens de penser l'unité transductive de l'être, ce qui suppose cependant une redéfinition de la complémentarité des ordres de grandeurs corrélés par cette opération transductive. En appelant à la construction d'une « théorie du temps transductif⁵⁶ », c'est-à-dire d'un temps cristallisant à sa propre frontière et selon le quantum d'action, Simondon tend déjà intuitivement⁵⁷ à établir la nécessité d'une nouvelle mathématisation, de nature fractale, de l'espace-temps. Il prolonge et radicalise ainsi la proposition bachelardienne, établie d'après l'inférence métaphysique de la physique mathématique, selon laquelle le cristal « est peut-être la cellule solide de l'espace-temps⁵⁸ ». Sans doute peut-on avancer que

quantique, qu'il n'anticipe une nouvelle mathématisation qui serait porteuse d'un sens plus profond du quantum d'action parce que réformatrice de l'espace-temps lui-même.

54. SIMONDON, 1995, p. 31.

55. SIMONDON, 1995, p. 31.

56. SIMONDON, 1995, p. 142.

57. La notion d'intuition vaut chez Simondon dans son sens courant (« confusément ») comme dans son sens technique (l'intuition est la transduction elle-même comme opération analogique). Les textes simondoniens procurent souvent cette impression d'intuitivité, car ils ne sont ni linéaires ni parfaitement achevés. Bien qu'elle soit systématique, la pensée de Simondon s'exprime dans un réseau de relations si dense et par des notions si synthétiques qu'il n'est pas évident d'en produire une élucidation analytique. Sans doute cela a-t-il nui à l'appréhension de la profondeur de son ouvrage *Du mode d'existence des objets techniques*, dont le succès de publication fut aussi éphémère que retentissant.

58. BACHELARD, 1972, p. 119. La citation complète porte sur la transduction sans la nommer : « Quand on se rend compte que le phénomène de la propagation multiplie ses caractères

cette mathématisation nouvelle serait analogique, et là encore Nottale abonde dans ce sens. L'épistémologie requise par la TRE est une réhabilitation de l'analogie dont Simondon a posé les premières pierres.

LES PERSPECTIVES DU RÉALISME DES RELATIONS

Le principe de relativité, interprété par Nottale comme principe de réalité, constitue le fondement rationnel du développement de la TRE, mais implique la reconnaissance du réalisme des relations. Car cette prise de position métaphysique n'est ni arbitraire ni contingente, elle est solidaire de l'attribution d'un sens physique à la théorie : la forme des équations n'est pas interprétable en tant qu'expression de rapports virtuels entre des objets individuels préexistants, mais seulement en tant qu'elles expriment des relations potentielles premières, et ce sont les formes actualisées des phénomènes qui en dérivent. De son côté, Simondon présente une théorie de l'individuation dont la métaphysique confirme les intuitions du physicien et dont les schèmes physiques préfigurent la résolution mathématique par Nottale du problème de l'interprétation de la fonction d'onde. La convergence analogique des perspectives scientifique et philosophique vers le réalisme des relations permet alors de formuler un dépassement des positions antagonistes du réaliste et de l'antiréaliste, en soulignant les mérites et les insuffisances de l'une et l'autre position : au réaliste revient le mérite d'avoir saisi que les virtualités mathématiques ne deviennent science physique que du moment où elles sont le support d'une visée du réel en tant que tel, mais l'affirmation purement métaphysique de la validité du concept de réalité extérieure demeure insuffisante pour opérer une détermination réelle et féconde de la nature de ce réel ; à l'antiréaliste revient en revanche le mérite d'avoir mis en évidence l'impossibilité d'interpréter le formalisme quantique dans le sens d'un réalisme des accidents, cependant que l'attachement à la valeur opératoire de ce formalisme a occulté l'absence de fondation rationnelle de celui-ci. L'explicitation de la métaphysique latente de Nottale exige donc une réactualisation du réalisme des relations de Simondon, et ce mouvement commun d'explicitation et de réactualisation subvertit l'opposition traditionnelle du réalisme et de l'antiréalisme.

La résolution de la crise de la mécanique quantique permet du même coup à la TRE de prétendre au statut de nouvelle théorie unifiée, c'est-à-

d'accord avec les multiplications symétriques du milieu, on finit par avoir l'impression que le cristal impose une certaine solidarité de l'espace et du temps. Il est peut-être la cellule solide de l'espace-temps. »

dire de dégager une perspective de relativisation des théories précédentes, permettant ainsi un rétablissement du réalisme convergent sous une nouvelle forme. La première caractéristique de ce nouveau réalisme convergent repose sur l'intégration implicite de la nature transductive de son accomplissement : le réalisme ne révèle véritablement son sens que poussé à ses limites, lorsqu'il entre en crise. Le moteur de l'activité théorique tient dans l'insatisfaction de ne pouvoir universaliser la valeur d'une théorie (et du modèle ontologique associé) au-delà de la frontière qui délimite les conditions de son application valide : « Cette frontière, qui limite le domaine d'applicabilité fiable d'une théorie à une époque donnée, est repoussée beaucoup plus loin par les théories ultérieures, et dans ce processus tous les succès et les acquis de la théorie précédente sont conservés⁵⁹. » Le renouvellement des structures doit donc être compris comme un approfondissement structurel des virtualités, un progrès dans la structuration de la science. Cet approfondissement se manifeste par un changement de statut des lois physiques conservées d'une théorie à l'autre : « Des lois qui apparaissent comme fondamentales à une époque donnée se révèlent, dans un cadre élargi, n'être plus que des lois phénoménologiques (c'est-à-dire restreintes à des phénomènes particuliers)⁶⁰. » Il appert donc que la déstabilisation relative des structures théoriques s'opère en réalité d'après un plan supérieur de stabilité qui n'est autre que la structuration résultant d'une nouvelle théorie.

L'évolution des idées en physique met ainsi en jeu trois critères de validité scientifique : d'une part, une équation est d'autant plus vraie qu'elle offre plus de précision dans ses prédictions ; d'autre part, une équation n'est vraie que dans la mesure où elle s'applique à un domaine déterminé par des conditions de vérité : plus le domaine d'application est universel, plus la loi est vraie ; enfin, la théorie offre une certaine intelligibilité dans sa structure, et peut idéalement s'identifier à un système déductif obtenu à partir de principes rationnels. Une théorie serait donc d'autant plus stable qu'elle répondrait à ces trois critères : précision, universalité, intelligibilité. La valeur d'une structure théorique s'apparenterait alors à son degré de stabilité. Ce constat n'est pas simplement le fruit d'une réflexion sur l'évolution des idées en physique, pas une simple donnée historique, mais manifeste un second caractère déterminant du nouveau réalisme convergent. La science physique se structure en tant que mise en relation de structures mathématiques avec les données de l'expérience, mais cette structuration ne s'opère pas selon une correspondance des concepts et des individus, mais d'après une relation d'analogie réelle entre le domaine des relations

59. NOTTALE, 1998, p. 91

60. NOTTALE, 1998, p. 91.

virtuelles (les équations mathématiques) et celui des relations matérielles (celles du processus d'ontogenèse). On peut alors estimer que la science physique est fondamentalement une structure analogique : de nouveaux instruments mathématiques (comme l'invention des fractales par Mandelbrot) ou de nouveaux résultats d'expérience (comme l'irréductibilité de la fonction d'onde au concept d'un quelconque être individué) modifient sa structure sans remettre en question la réalité de sa structuration analogique. Le réalisme de la science physique converge analogiquement avec le réel.

Là encore les concepts de Simondon rendent intelligible la succession des phases de crise et de consolidation réaliste des théories physiques :

« La connaissance vraie est une relation, non un simple rapport formel, comparable au rapport de deux figures entre elles. La connaissance vraie est celle qui correspond à la stabilité la plus grande possible dans les conditions données de la relation sujet-objet. Il peut y avoir différents niveaux de la connaissance comme il peut y avoir différents degrés de stabilité d'une relation. Il peut y avoir un type de connaissance le plus stable possible pour telle condition subjective et telle condition objective ; si une modification ultérieure des conditions subjectives (par exemple la découverte de nouvelles relations mathématiques) ou des conditions objectives survient, l'ancien type de connaissance peut devenir métastable par rapport à un nouveau type de connaissance. Le rapport de l'inadéquat à l'adéquat est en fait celui du métastable par rapport au stable. La vérité et l'erreur ne s'opposent pas comme deux substances, mais comme une relation enfermée dans un état métastable. La connaissance n'est pas un rapport entre une substance-objet et une substance-sujet, mais *relation entre deux relations* dont l'une est dans le domaine de l'objet et l'autre dans le domaine du sujet. Le postulat épistémologique de cette étude est que la relation entre deux relations est elle-même une relation⁶¹. »

Or si la relation entre deux relations est elle-même une relation, de nouvelles perspectives de travail conceptuel s'ouvrent à partir de la convergence entre Nottale et Simondon. En premier lieu, la réactivation fructueuse de la philosophie de Simondon doit recevoir une motivation d'un point de vue strictement philosophique : comment les concepts simondoniens s'imposent à la conscience philosophique en tant que constitutifs du sens, tel est le problème, proprement métaphysique, d'une auto-fondation de la philosophie transductive. Il s'agit alors d'interroger la capacité de l'ontogenèse simondonienne à être philosophie première⁶². Dans une pers-

61. SIMONDON, 1995, p. 81 (souligné par l'auteur).

62. Une telle entreprise a déjà été menée à bien dans ses grandes lignes par Jean-Hugues BARTHÉLÉMY dans son mémoire de D.E.A. de philosophie « L'idée de Relativité philosophique chez Simondon » (Paris, Galilée, à paraître), et sera approfondie sous un autre angle dans sa thèse « Sens et connaissance. Comprendre et re-fonder l'œuvre de Simondon ».

pective plus historique, l'évaluation de la pensée de Simondon réclame qu'on en établisse la généalogie plurielle dans sa relation de récupération comme de critique de la tradition philosophique. On ne peut à ce titre que souhaiter la publication rapide des nombreux écrits demeurés inédits de Simondon (notamment le texte intitulé *Histoire de la notion d'individu*). D'un autre côté, la TRE doit être étudiée pour elle-même, dans son ensemble et dans le détail afin d'établir si l'analogie de raisonnement entre Nottale et Simondon n'est qu'une analogie de surface ou si au contraire le raisonnement transductif est bien l'opération qui structure la théorie dans les deux cas⁶³. Enfin, la philosophie de Simondon doit être mise en œuvre pour baliser et structurer les tentatives d'exportation de la relativité d'échelle de Nottale dans d'autres domaines. Cette perspective de « l'analogie quantique »⁶⁴ n'est pas par principe une errance abusive du physicien, mais elle ne doit pas méconnaître la spécificité de chaque régime d'individuation. Cette dernière piste de travail laisse présager un enrichissement mutuel : Nottale offrant peut-être les outils d'une quantification de la théorie de l'individuation de Simondon, qui en retour permet de comprendre et de contrôler l'extension analogique de la théorie en dehors du champ de l'individuation physique. Signalons encore, à propos de cette dernière perspective, que Simondon ne s'en tient pas à la théorisation de la seule individuation physique, sa philosophie rend aussi intelligible l'individualisation des êtres vivants et la personnalisation, ou individuation psychologique et sociale, des êtres humains. La pensée du philosophe semble donc pouvoir accompagner celle du physicien jusque dans ses extrapolations. La mise en relation méthodique de la Théorie de la Relativité d'Échelle de Laurent Nottale et de la doctrine du réalisme des relations de Gilbert Simondon ouvre ainsi l'horizon d'une collaboration inédite et prometteuse des sciences entre elles et avec la philosophie.

Jean-Hugues BARTHÉLÉMY et Vincent BONTEMS
(novembre 2000).

63. Cette tâche incombe au D.E.A. de philosophie et d'histoire des sciences de Vincent Bontems : « Essai sur les implications philosophiques de la Théorie de la Relativité d'Échelle de Laurent Nottale. »

64. Cette perspective est notamment celle de NOTTALE, CHALINE et GROU, 2000.

LISTE DES RÉFÉRENCES

- ALUNNI (Charles), 1999, « Relativités et puissances spectrales chez Gaston Bachelard », *Revue de synthèse*, 4^e S., 1, janv.-mars, p. 73-110.
- BACHELARD (Gaston), 1929, *La Valeur inductive de la relativité*, Paris, Vrin.
- BACHELARD (G.), 1970, *Études*, Paris, Vrin.
- BACHELARD (G.), 1972, *L'Engagement rationaliste*, Paris, Presses universitaires de France.
- BITBOL (Michel), 1998, *L'Aveuglante Proximité du réel*, Paris, Flammarion.
- BITBOL (Michel) et LAUGIER (Sandra), dir., 1997, *Physique et réalité. Un débat avec Bernard d'Espagnat*, Paris, Frontières-Diderot.
- BOHR (Niels), 1991, *Physique atomique et connaissance humaine*, Paris, Gallimard.
- ESPAGNAT (Bernard d'), 1981, *À la recherche du réel*, Paris, Gauthier-Villars.
- ESPAGNAT (B. d'), 1982, *Un atome de sagesse*, Paris, Seuil.
- ESPAGNAT (B. d'), 1994, *Le Réel voilé*, Paris, Fayard.
- LAUDAN (Larry), 1981, « A confutation of convergent realism », *Philosophy of Science*, 48.
- MANDELBROT (Benoît), 1995, *Les Objets fractals*, Paris, Flammarion.
- MERKER (Joël), 1999, « Deux infinis cousus main », *Revue de synthèse*, 4^e S., 1, janv.-mars, p. 165-174.
- MERLEAU-PONTY (Jacques), 1986, *Einstein*, Paris, Flammarion.
- MERLEAU-PONTY (Maurice), 1942, *La Structure du comportement*, Paris, Presses universitaires de France.
- MERLEAU-PONTY (M.), 1964, *Le Visible et l'invisible*, Paris, Gallimard.
- MERLEAU-PONTY (M.), 1995, *La Nature. Cours du Collège de France*, Paris, Seuil.
- NOTTALE (Laurent), 1998, *La Relativité dans tous ses états. Au-delà de l'espace-temps*, Paris, Hachette Littératures.
- NOTTALE (Laurent), CHALIN (Jean) et GROU (Pierre), 2000, *Les Arbres de l'évolution*, Paris, Hachette.
- SIMONDON (Gilbert), 1958, *Du mode d'existence des objets techniques*, Paris, Aubier.
- SIMONDON (G.), 1989, *L'Individuation psychique et collective*, Paris, Aubier.
- SIMONDON (G.), 1995, *L'Individu et sa genèse physico-biologique*, Grenoble, Jérôme Millon.