

Colloque de Cerisy  
RATIONALITÉ ET OBJECTIVITÉS  
9-18 septembre 1988

\*\*\*\*\*

Logique transcendantale et ontologies régionales :  
L'objectivité morphologique entre le  
physico-mathématique et le cognitif

Jean Petitot  
CAMS, EHESS, Paris

1988

## 1 Position du problème

L'empirisme logique a réinterprété de façon formaliste et conventionnaliste les a priori des sciences objectives (et l'ensemble de la problématique associée de la constitution transcendantale) comme des méthodes permettant de subsumer les faits empiriques dans des langages théoriques de haut niveau. Cela a conduit à réduire la question de la vérité des énoncés possédant une valeur objective à des procédures effectives de contrôle empirique (critère vérificationniste et principe d'empirisme). D'où une analogie avec le rapport entre syntaxe et sémantique que l'on rencontre en théorie logique des modèles : les théories mathématiques y sont identifiées à une syntaxe logique et le donné empirique à une sémantique dénotative. Ainsi s'est développé un *idéalisme* "linguistique" et "grammatical" substituant un savoir des langages au savoir sur les objets accessibles à travers ces langages.

La prise de conscience progressive des limites d'un tel positivisme (impossibilité de réduire la vérité scientifique à une vérité-correspondance, inexistence d'un langage neutre d'observation, rapport uniquement global d'un ensemble théorique à un ensemble expérimental dans les procédures de confirmation-réfutation, etc.) a conduit à une épistémologie post-positiviste sceptique et relativiste déniautout contenu ontologique réel et toute valeur objective nécessaire aux théories scientifiques et concluant à l'arbitrariété de principe des constructions théoriques (et cela malgré leur opérativité).

Il y a là une *antinomie épistémologique* opposant un dogmatisme à un scepticisme et qui, des deux côtés, aboutit à des conceptions possédant la singulière caractéristique d'être devenues étrangères (voire même parfois incompatibles) avec les contenus effectifs des sciences concernées. Ce phénomène de divergence entre les sciences proprement dites et leurs descriptions épistémologiques n'est pas satisfaisant rationnellement parlant. En effet on doit exiger de l'auto-réflexion philosophique des sciences d'être en accord avec leurs contenus effectifs.

Il paraît donc pertinent de remettre au premier plan de l'épistémologie la problématique de la *constitution* des objectivités scientifiques, de leur "ontogénèse" dirait Bachelard. Le propre des sciences proprement dites est d'être des sciences d'*objet*, sciences intégrant dans leurs principes mêmes l'altérité de leurs objets relativement aux instances (conscience, perception, langage, appareils, etc.) y donnant accès. Ces sciences sont devenues sûres de leurs langages grâce aux mathématiques. Les mathématiques s'y trouvent impliquées – et non pas seulement appliquées – dans le processus même de constitution.

La réappropriation des traditions philosophiques et métaphysiques nécessaires au déploiement – au redéploiement – de cette problématique doit permettre de réarticuler la pensée de l'être sur la positivité scientifique de façon à y faire apparaître une "dialectique" de la vérité objective et de la valeur historique. En effet l'antinomie épistémologique oppose un dogmatisme de la vérité objective à un scepticisme nourri de la relativité de la valeur historique.

## 2 Actualité du transcendantal pour le problème de la constitution

La thèse est ici que, fort loin d'être obsolète, la logique transcendantale est non seulement adaptée mais même naturelle pour développer l'auto-réflexion philosophique des sciences actuelles. Une telle affirmation présuppose évidemment une prise de distance par rapport à la lettre de Kant. Kant est au transcendantal ce que Euclide est à l'axiomatique, Leibniz à l'analyse différentielle, Newton à la mécanique ou Pasteur à la biochimie, à savoir un initiateur. Que je sache, quand l'axiomatique s'est imposée comme approche d'excellence aux problèmes délicats posés par l'auto-fondation des mathématiques pures, personne n'a accusé Hilbert, Bernays, Artin, Herbrand ou Cavallès d'en rester à l'Antiquité. De même, après que l'analyse non standard ait montré le bien fondé de l'approche leibnizienne des infinitésimales, personne n'a accusé Robinson, Luxemburg, Reeb, Harthong, Nelson ou Cartier de vouloir dénier l'histoire de l'analyse moderne. Bien au contraire. De même, l'analyse transcendantale doit être considérée comme actuelle et riche d'avenir et être émancipée de l'oeuvre de son fondateur. Si cela n'a pas été le cas au cours de ce siècle malgré les travaux de penseurs aussi éminents que les néo-kantiens, Cassirer, Husserl, Becker, Weyl, Heisenberg, Cavallès, Lautman, etc., c'est pour des raisons en grande partie idéologiques, qui ont fait jouer l'évolution des sciences contre Kant, alors qu'on aurait tout aussi bien pu les faire jouer contre les traditions analy-

tiques et logico-sémantiques (traditions précritiques en grande partie issues de la scolastique).

Il s'agit donc de lever l'hypothèque anti-kantienne et de libérer à nouveau la puissance rationnelle du transcendantal. La lettre de Kant importe assez peu. Savoir si  $7 + 5 = 12$  est ou non un jugement synthétique a priori n'a plus guère d'intérêt... En revanche savoir pourquoi une théorie mathématique des connexions (au sens de Cartan et Ehresmann) peut être une théorie physique des particules élémentaires ou pourquoi une géométrie des stratifications des déploiements universels de singularités peut être une théorie structuraliste des paradigmes de valeurs positionnelles (au sens saussurien-hjelmslevien) reste du plus grand intérêt. Comme l'affirmait Albert Lautman dans [18] :

“il y a un réel physique et le miracle à expliquer, c'est qu'il soit besoin des théories mathématiques les plus développées pour l'interpréter. Il y a de même un réel mathématique et c'est un pareil objet d'admiration de voir des domaines résister à l'exploration jusqu'à ce qu'on les aborde avec des méthodes nouvelles (...). Une philosophie des sciences qui ne porterait pas toute entière sur l'étude de cette solidarité entre domaines de réalité et méthodes d'investigation serait singulièrement dépourvue d'intérêt”.

Cette solidarité entre objectivité scientifique et formalismes mathématiques devient incompréhensible si l'on pense les théories en termes d'énoncés et la réalité empirique en termes de référence, conformément à l'analogie avec le rapport entre syntaxe et sémantique qui existe en théorie logique des modèles. Le point de vue constitutif offre, nous semble-t-il, une alternative.

### **3 Brefs rappels d'éléments de théorie de la connaissance**

#### **3.1 La connaissance repose sur une base phénoménale (thèse empiriste)**

Aucune réalité en soi n'est accessible en tant que telle à un Dasein fini. D'où, depuis Kant, le partage principal entre phénoménal et nouménal. Il implique deux problèmes, du moins si l'on admet que la connaissance n'est pas un solipsisme et qu'il existe une séparation entre sujet et objet. Ils concernent les deux dimensions de la *phénoménalisation* de l'être.

Côté sujet, le problème est essentiellement cognitif et phénoménologique : comment les informations externes sont-elles traitées par le système cognitif (au moyen de quels types de représentations, de quels types d'algorithmes et de calculs neurologiquement implémentés) ? Comment se constitue à partir d'un tel traitement le monde phénoménologique de l'expérience, avec ses structures qualitatives, ses formes et ses événements perceptibles et linguistiquement descriptibles ? Comment s'édifie l'intentionnalité comme ouverture constitutionnelle de la conscience vers l'extériorité des transcendances objectives ?

Côté objet, le problème est tout aussi délicat et technique. Que l'être soit conçu comme réalité en soi ou comme objectivité (que l'ontologie soit métaphysique ou objective) il faut qu'il puisse se *manifester* comme phénomène, et se manifester stablement à travers un processus d'apparition, d'émergence. Qui plus est, cette manifestation doit être observée et détectée afin de pouvoir servir d'entrée sensorielle au dispositif cognitif.

Tout cela concerne la définition du concept primitif de "phénomène" et relève de la composante intuitive-réceptive de la connaissance et des synthèses cognitives de l'appréhension perceptive.

### 3.2 La connaissance est de nature discursive (thèse logico-linguistique)

Si, naïvement, on admet la possibilité d'un langage d'observation théoriquement neutre et si, tout aussi naïvement, l'on méconnaît le rôle constitutif des mathématiques, on en arrive d'une façon ou d'une autre à une conception des théories du type suivant. Les théories sont des constructions formelles, cohérentes et vérifiables, conduisant par palliers successifs des données d'observation (diversité des phénomènes) d'abord aux langages de description avec leurs concepts et leurs procédures opératoires, puis aux langages méthodologiques analysant et justifiant les descriptions et permettant la représentation théorique des objets, pour aboutir aux langages épistémologiques où les concepts primitifs indéfinissables et les principes constitutifs sont investigués afin d'être axiomatiquement organisés dans le cadre de langages formels exerçant une fonction grammaticale conventionnelle. À travers ces niveaux successifs, la description opératoire des phénomènes empiriquement *donnés* se transforme en la reconstruction rationnelle d'objets formels *construits*.

Une telle approche peut être qualifiée d'*analytique formelle*. Elle est d'orientation nominaliste. L'être donné s'y réduit à la phénoménalisation d'étants singuliers dont la singularité épuise l'ontologie. Et tout le reste : classifications, conceptualisation, abstraction, induction, analyse logique, "axiomatisation" des indéfinissables, etc. est identifié à une mise en ordre sémiotique (formelle) des descriptions.

Une analytique formelle peut être élaborée de façon profonde et technique. Mais elle demeure insuffisante pour penser le concept d'objectivité. Car le problème est : si la connaissance est phénoménale et discursive comment peut-elle être néanmoins objective, c'est-à-dire aller au-delà des phénomènes et du langage pour rejoindre des existences réelles ? On peut l'exemplifier de multiples façons et en proposer de nombreux analogues. Choisissons-en deux qui sont maximalelement différents.

- *Analogie psychologique : le problème de l'intentionnalité perceptive.* Si la perception est un traitement de sensations périphériques (par exemple visuelles) comment peut-elle rejoindre des objets externes possédant une existence indépendante ? Après la phénoménologie et la Gestalttheorie,

les sciences cognitives actuelles sont à leur tour affrontées à cette difficulté : comment dépasser le solipsisme et réfuter l'idéalisme (le "solipsisme méthodologique" à la Jerry Fodor est la thèse centrale de la plus grande partie du cognitivisme actuel) ? Tout point de vue réaliste fait l'hypothèse que la sensorialité est affectée par une projection de la réalité externe et, qu'à partir de cette projection, le système cognitif (re)construit des niveaux de représentation possédant des corrélats objectifs. Le collègue de David Marr, Tomaso Poggio, a fait le parallèle avec ce que l'on appelle en mathématiques la résolution d'un "problème inverse" : la vision doit reconstruire les positions, les mouvements et les formes d'objets dans  $\mathbb{R}^3$  à partir des seuls patterns rétiniens (donc bidimensionnels) d'intensité lumineuse. Le parallèle est judicieux. Toute connaissance objective doit être conçue comme la résolution d'un problème inverse : elle doit inclure a priori dans ses principes la possibilité de remonter à l'être objectif à partir des projections phénoménales (même si l'intériorité "en soi" de cet être est inaccessible). Cela est impossible dans le cadre d'un phénoménisme (faisant des phénomènes des apparences subjectives et non pas des formes d'un apparaître objectif) et d'un nominalisme (faisant des contenus conceptuels de simples entités sémiotiques).

- *Analogie physique : le problème de l'objectivité quantique.* Contrairement aux thèses admises (positivistes et opérationnalistes), le geste fondateur de la mécanique quantique est de nature transcendantale. La refondation de la mécanique par restriction aux seules quantités observables a conduit Heisenberg à *redéfinir* le primitif "phénomène" (non plus des mouvements mais des raies spectrales) et, donc, à repositionner la ligne de partage entre phénomène et noumène. Pour la microphysique (à cause des différences d'échelle et de la dualité onde/corpuscule) l'objectivité classique devient en partie "nouménale". Il faut donc refonder l'objectivité. Le phénomène doit être défini conformément aux moyens d'accès aux phénomènes (appareils d'observation et de mesure). Mais malgré cet "écranage" de l'être "en soi" par le phénomène (le "réel voilé" de Bernard d'Espagnat), la connaissance doit être néanmoins objective et ne pas se réduire au constat et à la systématisation de régularités empiriques. Comme y insistent Gilles Cohen-Tannoudji et Michel Spiro dans *La Matière-Espace-Temps*,

"toute la problématique de la physique des particules est d'atteindre l'objectivité scientifique malgré le caractère insécable de l'interaction de l'objet et de l'appareil d'observation".

La logique de la physique doit être objective (et non pas seulement formelle). Elle doit exprimer la légalité propre des phénomènes. Mais comment l'observateur peut-il être en même temps "spectateur" d'une nature externe et "acteur" dans une opérativité expérimentale ? La réponse est de poser que les fondements ontologiques de l'objectivité doivent être dans le même temps des conditions de possibilité de l'expérimentation. C'est bien la réponse que Kant fût le premier à concevoir.

### 3.3 La différence ontologique phénomène/objet

Pour penser la connaissance comme “problème inverse”, il est naturel d’introduire la thèse que les objets scientifiques sont certes des phénomènes, mais pas seulement des phénomènes. Ils ne sont insérables dans des dispositifs expérimentaux et théoriques que s’ils sont au préalable *qualifiés* comme objets. En plus de l’ordre descriptif, toute connaissance présuppose un ordre *prescriptif* (juridique) de légalité objective. Il existe donc une différence ontologique entre phénomène et objet d’expérience. Contrairement aux phénomènes, l’objet n’existe que qualifié conformément à des normes, à des règles eidético-constitutives définissant une essence objective. Le concept normatif d’objet est présupposé à titre de condition de possibilité par toute activité scientifique. Il définit une “ontologie régionale”. Il anticipe et prédétermine prescriptivement ce qui appartient en général et typiquement aux phénomènes de la région. Ainsi que l’explique Husserl dans les *Ideen I* [14], la région est l’unité *générique* et eidétique appartenant à un ensemble de phénomènes concrets. Elle détermine des vérités eidétiques de caractère synthétique a priori qui forment le contenu de l’ontologie régionale et définissent des catégories régionales. Ces catégories expriment en termes de généralité eidétique ce qui doit survenir a priori et synthétiquement à tout objet individuel de la région.

L’impossibilité d’éliminer des sciences cette dimension de légalité irréductiblement juridico-prescriptive a été profondément pensée par Carnap et Wittgenstein. Mais le prescriptif ne se réduit pas, comme ils l’affirment pourtant, aux formes de l’objectivité logique. L’analytique doit être non seulement formelle mais transcendantale. Elle doit concerner non seulement la discursivité mais également l’objet comme phénoménalisation de l’être. Le geste transcendantal consiste – pour légaliser le donné et installer la différence ontologique – à réfléchir l’altérité de la réalité en soi dans la forme même de la connaissance. Il consiste à inclure dans les possibilités même de détermination objective la trace à la fois de l’en soi et de son inaccessibilité, autrement dit et en quelque sorte, à prendre pour fondement de l’objectivité “l’écrantage” de l’être par le phénomène. Le prescriptif n’est donc pas simplement logique. Il doit également comporter un pôle “intuitif” (une Esthétique transcendantale). Cela est décisif. La logique revient au sujet mais “l’intuitif” revient à l’être dans son opacité même et c’est pourquoi une analytique formelle (aussi développée soit-elle) n’est pas suffisante pour élaborer une doctrine de l’objectivité rationnellement satisfaisante. Ce point a été bien circonscrit par Jean Cavailles dans *Sur la Logique et la Théorie de la Science* [5]. Dans toute doctrine de l’objectivité, la logique formelle doit être reliée à une ontologie. Les concepts doivent donc acquérir un contenu transcendantal concernant l’objet de la connaissance et non pas simplement la forme logico-discursive des théories. Cela est possible si les catégories prennent pour “matière” (pour contenu) les “intuitions pures” d’une Esthétique transcendantale. C’est pourquoi une analytique formelle est, selon Cavailles, “irréremédiablement insuffisante”. C’est pourquoi il y a une “supériorité” des doctrines “matérielles” (des ontologies régionales).

Ainsi conçu, le transcendantal concerne bien, comme l’affirmait Kant, les

conditions générales sous lesquelles des phénomènes peuvent devenir des objets d'une connaissance expérimentale. Si alors on appelle connaissance *a priori* une connaissance concernant les conditions de possibilité d'objets compris dans ce sens prescriptif, on voit qu'un tel savoir n'a rien d'une obscure science infuse et, bien au contraire, est coextensif aux sciences effectives (en particulier physiques). L'une des erreurs majeures de l'empirisme est de confondre la différence ontologique phénomène/objet avec la différence rationnelle phénomène/noumène. Il est clair que si l'on confond objet et noumène, on s'interdit toute compréhension philosophique de la positivité scientifique. Ce n'est pas parce que l'objectivité est méta-empirique qu'elle représente pour autant une réalité transcendante "en soi" qui se voilerait "derrière" les phénomènes. Elle est méta-empirique parce que normative. C'est une conversion de l'altérité de l'être en normes qui est la clef du transcendantal. Une fois les règles ainsi produites, la connaissance devient analytique. Mais, à elle seule, une analytique formelle ne fournit aucun principe de production des règles. C'est pourquoi celles-ci peuvent y apparaître "conventionnelles".

La logique transcendantale reste une logique expérimentale. On y dépasse le phénomène et le langage vers l'objet à travers le concept "d'expérience possible" fonctionnant comme méta-référent. L'objet régional est le corrélat des actes expérimentaux. Autrement dit, c'est l'opérativité expérimentale qui est prise comme base pour la légalisation objective et sa juridiction rationnelle. C'est ainsi que la légalisation peut devenir un principe de détermination objective des phénomènes. Mais si elle s'effectue bien conformément à la différence ontologique, à partir d'un concept normatif d'objet qui objective les conditions de possibilité de l'expérience (le "principe suprême" de Kant), alors, comme détermination objective, la connaissance s'arrache à la phénoménalité. Elle renonce à sa valeur représentative. Elle *transpose* les moments phénoménologiques de l'expérience dans une reconstruction mathématique-rationnelle. Comme l'affirmait Bachelard, le réalisme scientifique est un "réalisme transplanté" "dé-réalisant progressivement l'objectivité immédiate". Les sciences sont des *ontogénèses* et non pas des descriptions (logiquement systématisées) qui possèderaient simplement une valeur représentative. Ces thèmes classiques sont spontanément retrouvés par un physicien contemporain comme Gilles Cohen-Tannoudji lorsqu'il affirme par exemple que "la physique ne produit pas des choses" (pas de valeur représentative), que "l'objet réel de la physique est le concept même de physique" (objet normatif régional) ou que "l'essence du physique" est la "rationalité expérimentale" (le concept d'expérience comme méta-référent).

### 3.4 Esthétique transcendantale

Il ne peut y avoir phénoménalisation de l'être qu'à travers un médium de manifestation. C'est le rôle des "formes de l'intuition" (par exemple l'espace et le temps, mais il y a d'autres formes de l'intuition). Leur "réalisme empirique" est évident (les phénomènes sont évidemment conformes aux formes qui conditionnent leur manifestation). Leur "idéalité transcendantale" signifie quant à elle que ce sont des méthodes de détermination objective (en physique

c'est le principe de géométrisation du physico-mathématique). Les "formes de l'intuition" sont en quelque sorte un encodage de la donation de l'être dans les conditions de la manifestation. À ce titre, il est essentiel qu'elles soient *données* et qu'elles possèdent des propriétés non conceptuelles, non "discursives" (comme par exemple les symétries de l'espace-temps). Comme donnée originaire, les formes de l'intuition ne sont pas susceptibles de définition réelle. En donner une définition nominale, ce serait réduire les phénomènes aux apparences. Elles ne sont susceptibles que de ce que Kant appelait une "exposition".

Il est ici important de souligner le fait qu'une sémantique ne peut pas donner accès aux conditions de possibilité de l'existence des référents. Elle présuppose toujours l'existence comme donnée. Pour qu'une connaissance soit fondée, il faut donc, nous l'avons vu, réfléchir dans ses principes la transcendance de l'être référent, autrement dit articuler entre elles une sémantique logique et une ontologie (comme l'affirmait Cavailles). L'Esthétique transcendantale kantienne est issue de la remarque qu'il y a un concept en lequel contenu et être, sémantique et ontologie, coïncident, à savoir le concept d'espace. Il s'agit là d'un fait contingent (expression de la finitude du Dasein) mais qui, pour nous, a valeur de nécessité absolue. En tant qu'axiomatisé, le concept d'espace est susceptible de définition réelle. En tant que donné (en tant que condition des phénomènes empiriques) il n'est susceptible que d'exposition.

L'"exposition" est double. "Métaphysique", elle concerne les propriétés des formes de l'intuition comme formes de la manifestation. "Transcendantale", elle concerne le problème de leur détermination mathématique, détermination soumettant le donné phénoménal aux mathématiques et permettant de convertir par là même ces formes en méthodes de détermination objective. Le sens de l'Esthétique transcendantale est que la détermination mathématique des formes de la manifestation phénoménale peut se convertir, à travers la schématisation des catégories, en principes de détermination mathématique des objets de l'expérience. Ainsi comprise, l'Esthétique transcendantale est profondément et exemplairement confirmée par le développement des sciences.

C'est ici que l'on peut lever l'une des plus lourdes hypothèses ayant pesé sur la tradition transcendantale, à savoir que les progrès mathématiques (géométries non euclidiennes, etc.) et physiques (relativités restreinte et générale, etc.) auraient invalidé l'a priori géométrique kantien. Cette critique n'est pas sérieuse. D'abord comme de nombreux auteurs l'ont souligné, Kant admettait parfaitement la possibilité *logique* d'autres géométries (comme la géométrie sphérique). En effet la négation d'un jugement synthétique comme le postulat des parallèles n'est jamais logiquement auto-contradictoire. Dans le cadre d'un nominalisme axiomatique on peut donc développer d'autres géométries. Mais Kant s'intéressait avant tout à la valeur objective, pour notre monde physique, de la géométrie, c'est-à-dire à la façon dont les mathématiques (qui relèvent d'une analyse des essences) peuvent acquérir un contenu transcendantal (qui concerne les objets et leur existence) et constitutivement s'impliquer dans l'expérience. Pour lui, la structure euclidienne de la géométrie était imposée par la mécanique (relativité galiléenne et principe d'inertie) : le mouvement inertial est géodésique et s'il s'effectue en ligne droite c'est que la géométrie de l'espace physique est eu-



clidienne. Selon lui, il pouvait en aller différemment dans d'autres mondes régis par d'autres lois. Qui plus est, la façon dont Beltrami a rendu opératoires les géométries non euclidiennes est très kantienne puisqu'il s'agit très précisément d'un modèle euclidien de leur possibilité logique...

Bref, le sens de l'Esthétique transcendantale est de permettre aux mathématiques de “franchir” la différence ontologique, du phénomène vers l'objet d'expérience. Considérons un exemple non classique, celui de la première mécanique quantique. Si l'on interprète philosophiquement celle-ci comme la constitution d'un nouveau niveau d'objectivité (l'objectivité microphysique) alors le rôle de l'Esthétique transcendantale n'y est plus du tout tenu par l'espace mais par le concept d'amplitudes de probabilité et par les relations d'incertitude. On y voit opérer avec une netteté particulière la façon dont :

(i) la manifestation (la restriction aux observables) inclut dans l'ontologie objective à la fois la trace de l'être “en soi” et son inaccessibilité (“écranage” de l'être par le phénomène), et

(ii) la détermination mathématique du conditionnement de cette manifestation devient un principe de détermination mathématique des objets microphysiques.

L'indéterminisme appartient à l'Esthétique transcendantale de la première mécanique quantique. Il est constitutif de son objectivité et, à ce titre, indépassable pour cette théorie. Il est prescriptif (a priorique) et non descriptif. C'est pourquoi, philosophiquement (et pas seulement scientifiquement), Bohr “avait raison” à l'époque et dans ce contexte contre Einstein, et cela sans préjuger de l'avenir.

Pour en revenir à l'objectivité classique, on peut considérer que tout ce qui concerne les *groupes d'invariance* fait partie de droit de l'Esthétique transcendantale. C'est ici qu'intervient le sens transcendantal du conventionnalisme : les formes de l'intuition sont *sous-déterminées* relativement à leur détermination mathématique (exposition transcendantale) et celle-ci doit donc être choisie dans un ensemble de possibles. Le conventionnalisme – en particulier en ce qui concerne le choix des groupes de Lie décrivant les symétries, tant externes qu'internes, des systèmes physiques – est la forme moderne de l'Esthétique transcendantale comme instance a priorique de détermination objective. Comme l'a bien montré Jerzy Giedymin dans *Science and Convention* [9], le conventionnalisme n'a rien d'un nominalisme. Il exprime la sous-détermination mathématique des a priori, i.e. des “vérités ultimes sur le monde”. C'est un “réalisme structural” (Michael Resnik). Même des arguments aussi techniques que, par exemple, le choix de  $SU(5)$  pour une théorie de jauge non abélienne (grande unification) en sont les héritiers directs.

### 3.5 Les catégories et l'existence

Comme y a beaucoup insisté Jules Vuillemin dans *Physique et Métaphysique kantienne* [39], les synthèses transcendantales transformant le phénomène donné en objet construit sont doubles : mathématiques et physiques. Cela correspond chez Kant à la différenciation des catégories respectivement “mathématis-

ques” et “dynamiques”. Les premières concernent l’essence et “l’intuition”, les secondes concernent l’existence et la “nature” (le principe d’existence) des objets physiques. Cette distinction est essentielle car elle permet d’éviter un idéalisme mathématique platonisant ou cartésianisant qui réduirait l’existence à un simple déploiement mathématique des essences.

C’est dans les catégories *dynamiques* (comme la causalité) que culmine le geste transcendantal de rétention de l’inconnaissable dans les principes mêmes du connaissable. Ces catégories (et les principes associés) posent l’existence. Elle la *conditionnent*, mais la laissent *indéterminée*. Elles ne fournissent, en tant que telles, que des conditions pour un objet *en général*. Elles doivent donc être spécifiées par des objets *régionaux* (cette dialectique du générique et du spécial est fondamentale). Une fois qu’un objet régional est donné, on peut passer de la simple position de l’existence externe à une détermination mathématique progressive. C’est ce que Kant appelle la “construction mathématique” des catégories régionales. Les catégories dynamiques ne sont pas constructibles en tant que telles, mais elles le deviennent à travers la donnée d’un objet régional.

La construction mathématique des catégories – qui approfondit le schématisme transcendantal, c’est-à-dire le rapport des catégories à l’Esthétique – est un processus historique (un télos) dépendant *hic et nunc* du progrès des mathématiques pures. Elle consiste à traduire le sémantisme catégoriel en des structures mathématiques objectivantes. Il y a là une méta-règle à l’œuvre : ces structures doivent être dérivées de l’univers mathématique défini par l’Esthétique transcendantale (c’est pourquoi celle-ci est si importante). Ce point décisif a également été profondément traité par Cavaillès. Dans le rationalisme cartésien l’objet demeure hétérogène à la pensée. L’ordre intelligible demeure extrinsèque au réel. La science est une mise en ordre “claire et distincte”. Elle n’est pas reconstruction. L’idéalisme mathématique ne rejoint pas l’altérité de l’être. Il en va de même dans l’idéalisme logique du logicisme où le “vide intérieur des formalismes” se trouve rempli par “une matière expérimentale”. Dans une doctrine transcendantale de l’objectivité, on part au contraire du fait que des “intuitions pures” sont données a priori, qu’elles servent de cadre à la possibilité d’être affecté par des objets et qu’elles encodent par conséquent l’altérité de l’être. L’“intuition” y est donc l’opposé de l’évidence conceptuelle et parler de “connaissance intuitive” à propos des “intuitions pures” (on le fait depuis le siècle dernier) est un grave contresens philosophique. Il n’y a aucune connaissance dans le synthétique a priori. À propos du schématisme transcendantal qui relie intuitions pures et concepts catégoriaux, Kant disait d’ailleurs dans la *Critique de la Raison pure* [16] qu’il est

“un art caché dans les profondeurs de l’âme humaine, et dont nous aurons de la peine à arracher à la nature les secrets du fonctionnement pour les mettre à découvert sous les yeux.” (A 141, B 180-181, AK III, 136)

Mais, à travers la détermination mathématique de ces intuitions pures, l’hétérogène ontologique se trouve en quelque sorte “rapatrié” dans l’analytique conceptuelle. À travers ce geste constitutif :

- (i) les mathématiques acquièrent un contenu transcendantal, et donc une valeur objective ;
- (ii) les catégories dépassent leur statut logique pour accéder au statut de prédicats transcendants de l'expérience.

### 3.6 Le schématisme-construction et l'épistémologie.

La possibilité de redéployer dans l'épistémologie actuelle les concepts de schématisation et de construction des catégories permet de clarifier nombre de problèmes délicats.

#### (a) Schématisation et modélisation.

Étant donnée la générativité des mathématiques, la schématisation-construction des catégories transforme le conditionnement catégoriel de l'objet en source de modèles pour les phénomènes. Autrement dit, la subsomption du divers empirique sous l'unité des synthèses catégoriales se trouve redéployée en une diversité construite de modèles. L'exemple type en est fourni par les équations fondamentales de la physique. Leur forme traduit des a priori (schématisation-construction) mais leurs solutions modélisent une grande diversité empirique. La différence entre schématisation-construction et modélisation précise, pour ce qu'il en est des rapports entre mathématiques et expérience, la différence ontologique objet/phénomène (i.e. prescriptif/descriptif).

Ce point de vue permet de confirmer les thèses de Wittgenstein et de Carnap sans pour autant sacrifier l'objectivité mathématique. Dans *La force de la règle* [3], Jacques Bouveresse insiste sur la thèse wittgensteinienne : les mathématiques fournissent bien une vérité, non pas toutefois sur des objets idéaux autonomes qui seraient des composantes des phénomènes, mais sur des règles, des prescriptions, des normes d'usage de concepts (antiplatonisme radical, cf. également Stuart Shanker [37], *Wittgenstein and the Turning-Point in the Philosophy of Mathematics*). Mais Wittgenstein méconnaît la différence ontologique c'est-à-dire le fait que la fonction normative-prescriptive de la légalisation scientifique est de nature esthétique-catégoriale (dénégation du synthétique a priori). Seul reste en lice le phénomène. Et comme il est évidemment impossible que des idéalités mathématiques puissent être des composantes des phénomènes, l'applicabilité des mathématiques à l'expérience ne peut être que celle de formes logiques sans contenu, ce qui implique (en accord avec la thèse fondamentale de l'empirisme) une dénégation nominaliste de tout réel mathématique.

Dans une doctrine transcendantale, en revanche, un conventionnalisme de la syntaxe des règles devient parfaitement compatible avec l'existence d'idéalités mathématiques. Celles-ci peuvent en effet parfaitement faire partie des contenus catégoriaux légalisant les phénomènes (schématisation-construction). Et comme la fonction de ceux-ci est précisément normative et prescriptive, les mathématiques, dès qu'impliquées, satisfont à la thèse wittgensteinienne.

Sur ce point on peut donc dire que la Logique transcendantale est ce qui permet d'unifier un conventionnalisme grammatical (à la Wittgenstein) avec un

réalisme des idéalités mathématiques. C'est pourquoi elle peut prétendre être la Logique objective "naturelle" des sciences authentiquement mathématisées.

### (b) De l'existence à l'essence

La construction des catégories au moyen de mathématiques déterminant une Esthétique transcendantale résorbe progressivement l'existence dans l'essence (le "dynamique" dans le "mathématique"). Il s'agit là d'un télos qui reste très problématique chez Kant. Il dépend des progrès des mathématiques : pensons, par exemple, à la géométrisation de la gravitation en relativité générale, ou encore à la géométrisation des interactions dans les théories de jauge. La construction des catégories est une *herméneutique mathématique de l'objectivité*. Dans la mesure où les a priori sont faits pour être interprétés mathématiquement, il existe une dimension *interprétative* constitutive des objectivités. Cela résout l'antinomie épistémologique exposée dans la section *I*. En effet des recatégorisations successives et des transformations de l'interprétation sont parfaitement compatibles avec la valeur objective des théories. Les a priori de l'expérience sont historiques parce qu'ils ne sont pas de nature logique et que les mathématiques y fonctionnent comme des traductions. Comme Lautman l'avait profondément compris, une "phénoménologie" quasi-hégélienne ou une "historialité" quasi-heideggerienne anime l'histoire des sciences.

### (c) Abductions fondatrices, déduction et induction

Si une dialectique historique de l'objectivité est ainsi compatible avec le concept rationnel de vérité, c'est que les gestes fondateurs de la constructibilité des catégories ne sont ni déductifs, ni inductifs, mais en quelque sorte *abductifs*. On pourrait parler à leur propos "d'abductions fondatrices".

Le mouvement d'abduction est bien représenté dans une lettre d'Einstein à Maurice Solovine du 7 Mai 1952 (figure 1). Dans une théorie hypothético-déductive, on dérive d'axiomes  $A$  des conséquences  $S$  que l'on met en correspondance avec des observations empiriques (des expériences sensorielles)  $E$ . Comme il n'existe pas de voie logique de  $E$  à  $A$ , les concepts axiomatisés sont logiquement conventionnels. Mais il existe une flèche "abductive" remontant de la correspondance  $S - E$  à  $A$  (processus de formation d'hypothèses).

La Logique transcendantale est la logique de ces abductions fondatrices. "Weltbild" à la Planck, "paradigmes" à la Kuhn, "themata" à la Holton en sont des versions psychologiques ou sociologiques. Il n'y a aucune raison d'en conclure à une quelconque relativité historico-culturelle de la vérité objective. Bien au contraire.... La connaissance relève éminemment de la *faculté de juger* et il est donc normal que la dialectique kantienne du jugement "déterminant" (dimension hypothético-déductive) et du jugement "réfléchissant" (dimension abductive) y soit à l'œuvre.

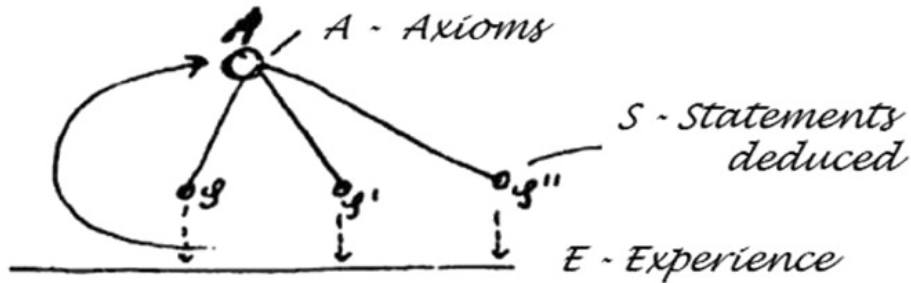


Figure 1: Le schéma de l'abduction selon Einstein.

#### (d) Vérité-correspondance/vérité-cohérence

Le conflit classique et récurrent entre la thèse de la vérité correspondance (cf. Moritz Schlick : les énoncés protocolaires, les constatations empiriques, etc.) et la thèse opposée de la vérité-cohérence (cf. Otto Neurath et la thèse de Duhem-Quine : les théories du consensus, etc.) est dépassé par le rapport entre construction et modélisation. La construction relève du prescriptif et de la vérité-cohérence alors que la modélisation relève au contraire du descriptif et de la vérité-correspondance.

#### (e) Le problème de l'éliminabilité des termes théoriques

Dans une optique empiriste et instrumentaliste, le seul contenu descriptif doit être observationnel. Le bon développement d'un point de vue nominaliste exige l'éliminabilité sémantique (et pas seulement syntaxique) des termes théoriques (Ramsey). En effet, comme y a insisté Wolfgang Stegmüller, la non éliminabilité sémantique plaide en faveur d'un réalisme théorique. Il y a là un problème technique fondamental (cf. Joseph Sneed, Carl Hempel, Herbert Simon, Terence Horgan, etc.). Habituellement, on considère, à la Ramsey, que les faits d'expérience sont exprimables dans un "système primaire" (langage observationnel  $L_0$ ) et organisés à travers un "système secondaire" (langage théorique  $L_t$ ). Il existe un dictionnaire permettant de traduire  $L_0$  dans  $L_t$ . Une fois retraduits, les théorèmes de  $L_t$  deviennent des "lois". Les constantes non-logiques  $C(L_0)$  et  $C(L_t)$  de  $L_0$  et de  $L_t$  forment des ensembles disjoints. Le dictionnaire permet de définir les  $a \in C(L_0)$  par des formules de  $L_t$ . Les constantes non logiques de  $L_t$  sont donc conventionnelles et il est absurde de poser à leur propos des problèmes ontologiques. Selon Sneed, une application d'une théorie  $T$  (exprimée dans  $L_t$ ) est un modèle de  $L_0$  qui peut s'étendre à un modèle de  $L_t$ .  $C(L_t)$  sera éliminable (élimination sémantique) si et seulement si il existe un énoncé de  $L_0$  qui définit la classe des modèles de  $L_0$  ainsi prolongeables en modèles de  $L_t$ . L'éliminabilité sémantique est nécessaire car si  $\tau$  est un terme  $T$ -théorique inéliminable, alors ses déterminations ne sont possibles qu'en utilisant la théorie  $T$  elle-même et il existe donc un cercle vicieux dans les tests de

falsifiabilité de  $T$ .

Quel que soit l'intérêt des problèmes de théorie des modèles ainsi posés, ce point de vue empiriste sur l'éliminabilité n'est pas réellement pertinent pour l'analyse philosophique des sciences. En effet, il repose sur la thèse qu'une théorie est un ensemble d'énoncés formels muni d'une sémantique observationnelle empirique, autrement dit que l'applicabilité d'une théorie  $T$  s'identifie à la donnée d'un modèle de  $T$  (au sens de la théorie logique des modèles). Mais cette thèse présuppose que le travail scientifique soit toujours-déjà effectué. Or une philosophie des sciences doit pouvoir (avant tout nous semble-t-il) penser la *genèse* des théories et la façon dont elles arrivent à résorber progressivement l'empirique dans l'a priori, i.e. le descriptif dans le développement mathématique du prescriptif. C'est donc l'élimination progressive de la contingence empirique qui constitue le problème central. Que, réciproquement, il y ait dans l'autre sens une éliminabilité sémantique des termes théoriques ne fait que confirmer après-coup le bien fondé des théories. D'ailleurs l'éliminabilité n'a plus grand sens dès que l'on remarque (cf. Quine, Laudan) que dans les sciences formalisées comme la physique il n'existe pas de langage d'observation qui ne soit pas "ontologiquement engagé" (on parle d'"ontological commitment") dans des formalismes mathématiques proprement théoriques. Il existe dans les sciences objectives une sorte de "complémentarité épistémique" entre le prescriptif et le descriptif (la vérité-cohérence et la vérité-correspondance, la construction des concepts et la modélisation des phénomènes, etc.) et, comme dans toute complémentarité ou toute dualité, il est vain d'essayer d'isoler l'un des termes et de le privilégier.

#### (f) Le problème du réalisme

C'est pourquoi il est justifié de défendre des thèses réalistes comme le font des épistémologues de plus en plus nombreux (cf. Richard Boyd, par exemple). Selon ces thèses, les termes théoriques dénotent, les théories interprétées de façon réaliste sont empiriquement confirmables, les théories successives sont des approximations successives d'une vérité objective et la réalité ainsi décrite est indépendante des théories.

Le réalisme s'oppose ici aussi bien à l'empirisme strict qu'aux idéalismes de l'interprétation (pour lesquels la méthodologie de confirmation-réfutation porte sur des constructs théoriques idéaux) ou qu'aux relectures pragmatiques des critères de scientificité. Il fait l'hypothèse – conforme au sentiment profond (à la dite "philosophie spontanée") de la majorité des savants – que les nouvelles théories sont confirmées-refutées par un monde réel certes construit mais construit par des traditions théoriques qui sont autant d'approximations de la vérité. D'où un authentique progrès dans la valeur objective.

Tout le problème est alors d'élaborer une épistémologie réaliste plausible en évitant la rechute dans les apories séculaires du réalisme métaphysique. On peut le faire semble-t-il de deux façons. Soit en posant, dans une optique *évolutionniste* et naturaliste, que la connaissance est un fait évolutif d'adaptation cognitive à la réalité extérieure (épistémologie évolutive à la Stephen Toulmin)

soit, comme nous le proposons ici, en historicisant la doctrine transcendantale de la constitution. Ce faisant, on intègre à une doctrine rationnelle “forte” de l’objectivité et de la vérité scientifiques le fait que les sciences sont des interprétations partielles et révisables (réfutation du scepticisme relativiste).

### 3.7 Le synthétique a priori

Des remarques comme celles-ci devraient permettre de lever l’autre hypothèque majeure ayant jusqu’ici grévé la tradition transcendantale, à savoir la querelle du synthétique a priori. Dès que l’on pose une différence ontologique phénomène/objet et dès que l’on noue une Esthétique avec un conditionnement catégoriel de l’objectivité (ce que font effectivement toutes les sciences mathématisées même si elles ne le thématisent plus), on rétablit la fonction du synthétique a priori. Il faut bien comprendre que le synthétique a priori s’oppose à l’évidence conceptuelle. Il convertit en normes des “mystères naturels”, des “abîmes de l’entendement” (cf. plus haut). Ainsi que l’affirme à juste titre J. Vuillemin dans [39],

“il y a dans le dogmatisme métaphysique et logique une volonté d’ignorer tout ce qui dans les principes mêmes de la connaissance est incompréhensible à l’entendement et dépasse l’horizon de la logique et des jugements analytiques”.

On concentre alors ce qui est irréductiblement illogique et contingent (l’altérité du réel) dans la donnée empirique originaire des étants singuliers et, à partir de là, on cherche à traiter analytiquement la connaissance. Le donné matériel demeure “confus”, opaque, mais, au moins, son traitement cognitif est quant à lui absolument “transparent” (“clair et distinct”). D’où des idéalismes géométriques ou logiques qui identifient les raisons de l’existence des objets avec l’analyse mathématique des moyens d’accès aux objets (espace ou langage). Répétons que le synthétique a priori consiste au contraire à inclure dans les principes mêmes de la connaissance ce qui transcende la connaissance, et cela sans pour autant poser que cette transcendance est accessible “en soi”. Faire ainsi d’une limite radicale (finitude du Dasein) le fondement des règles de détermination objective est un geste qui a été exemplifié plusieurs fois dans l’histoire des sciences modernes.

Évidemment, l’ensemble de cette problématique devient incompréhensible et absurde si l’on pose que les a priori et “l’intuition” relèvent d’une quelconque connaissance “intuitive”, d’une évidence apodictique ou d’une nécessité logique. Les a priori sont radicalement contingents ! Comme l’expérience. Leur nécessité est conditionnelle, relative à l’expérience possible. Ils ne sont pas “subjectifs” mais normatifs, ou bien s’ils sont “subjectifs” c’est en tant “qu’enfouis dans les profondeurs de l’âme” et le transcendantalisme devient alors un innéisme (au sens évolutionniste de la maxime de Ernst Haeckel disant que les a priori de l’ontogenèse récapitulent des a posteriori de la phylogenèse).

Les a priori sont conventionnels et grammaticaux, mais sans pour autant être ni arbitraires ni vides de contenu. Ils spécifient “grammaticalement” des contenus transcendants, ce qui est tout autre chose. La fonction du synthétique a priori est de fournir la source des algorithmes de l’objectivation. Encore une fois, les groupes de Lie des symétries externes et internes des systèmes physiques en constituent un exemple princeps.

Une des raisons principales du discrédit jeté sur le concept de synthétique a priori vient de l’orientation “linguistique” de l’épistémologie anti-kantienne. La tradition logico-sémantique remonte à Bolzano. Avec Frege et Russell, puis Wittgenstein et Carnap elle a repensé le transcendantal en termes de syntaxes logiques de façon à conjurer les obscurités du subjectivisme transcendantal. Dans *Questions de forme* [33], Joëlle Proust a bien montré comment se succèdent les “tactiques” subjectivistes, objectivistes, puis syntactico-sémantiques du transcendantal (cf. également les travaux d’Alberto Coffa sur l’interprétation en termes de synthétique a priori du syntaxisme de Carnap). Mais le recours à l’objectivisme logique et à la tradition logico-sémantique exigeait que l’on identifîât les jugements d’expérience à des énoncés et (cf. plus haut) l’application des théories à une dénotation sémantique. On a par conséquent naturellement été conduit à chercher à caractériser les jugements synthétiques a priori par une structure particulière d’énoncé. Cela était évidemment voué à l’échec et l’on en a conclu que le synthétique a priori était une pathologie de l’épistémologie. Le problème est que la différence ontologique implique que les théories ne dénotent pas (elles n’ont pas de valeur représentative). Comme les phénomènes ne sont pas donnés comme *objets*, les théories déterminent. Le rapport de dénotation “expressions symboliques  $\rightarrow$  états de choses” y est remplacé par le rapport de construction-modélisation “principes  $\rightarrow$  structures mathématiques  $\rightarrow$  modèles  $\rightarrow$  données empiriques”.

Ce point étant particulièrement délicat, insistons-y un peu. Pour la tradition empiriste nominaliste le principe interne concret des choses (les essences réelles) étant inaccessible, la connaissance est nominale et elle ne peut être claire et distincte que parce nominale. D’où la thèse de l’analyticité : la nécessité cognitive ne peut être que d’ordre logique. Le sens étant de nature psychologique, seule la valeur logique des énoncés scientifiques est objective. Les théories sont des ensembles de propositions et leur légalité a priori est donc purement analytique. Par grammaticalisation, la question du transcendantal devient celle de la caractérisation des propriétés logiques objectives qu’un ensemble de propositions doit posséder pour constituer une science. Il ne peut donc exister (thèse carnapienne) d’énoncés dont la validité soit indépendante de l’expérience et qui, dans le même temps, soient des énoncés possédant un contenu. Les énoncés a priori sont vides de contenu. Ce ne sont que des formes logiques dont la vérité repose sur une règle linguistique. Cela n’est pas incompatible avec leur caractère mathématique car, précisément, les énoncés mathématiques sont des tautologies. Ils sont réductibles eux-mêmes à de pures formes syntaxiques. Les seuls contenus possibles pour des énoncés sont empiriques et leur application est une dénotation.

À cela, le point de vue transcendantal objecte que :



- (i) le rapport syntaxe/sémantique est valable pour les mathématiques et non pas pour les théories à contenu empirique ;
- (ii) pour celles-ci il y a une interprétation mathématique des contenus transcendants ;
- (iii) les jugements synthétiques a priori ne sont pas caractérisables par la syntaxe spécifique d'une classe d'énoncés ;
- (iv) ils ne sont pas "indépendants" de l'expérience mais normatifs pour l'expérience ;
- (v) ils possèdent bien un contenu, issu des formes intuitives de la manifestation : ils spécifient grammaticalement des "intuitions pures" ;
- (vi) à travers eux une connaissance qui est bien nominale dans ses procédures acquiert néanmoins un contenu réel.

### 3.8 Ontologie formelle/ontologies régionales

Il existe plusieurs types d'objectivités. Ces types sont définis par un noyau empirique. Cette donnée minimale qui consiste à n'emprunter à l'expérience que ce qui est nécessaire pour se donner un objet est selon Kant la "voie royale de la science". Elle doit être insérée dans le dispositif catégoriel pour servir de principe, par schématisation-construction, à la modélisation de la diversité empirique subordonnée au type considéré. C'est le concept d'ontologie régionale (cf. plus haut).

La question se pose alors d'unifier les diverses ontologies régionales. Cela peut se faire de deux façons.

- (i) Soit l'on cherche à développer une ontologie formelle qui leur impose une législation commune (c'est la voie analytique, mais également la voie husserlienne) ;
- (ii) soit l'on cherche à investiguer les rapports mathématiques entre les a priori régionaux (c'est la voie synthétique, beaucoup plus exigeante et difficile).

## 4 L'ontologie régionale de la mécanique rationnelle classique

Un point de vue transcendantal "revisité" permet de penser philosophiquement l'évolution des théories physiques en accord avec leurs contenus réels. Pour le voir, commençons par rappeler brièvement – en nous en tenant à l'essentiel – la façon dont Kant pense la mécanique de Newton dans *Les premiers principes métaphysiques de la science de la nature* [17] (cf. l'ouvrage de Jules Vuillemin [39] déjà cité). Ce traité génial est notre référence princeps.

### 4.1 Objet en général et objet régional

Comme telles, les intuitions pures, les catégories et les principes investigués dans la *Critique de la Raison pure* [16] ne définissent que le concept d'objet d'expérience *en général*, comme pure forme consistante de pensée (un peu comme

en mathématiques la théorie des ensembles définit le cadre général des structures d’objet). Pour que les catégories et les principes puissent acquérir, au-delà de leur valeur objective (normative), une “réalité objective”, une “signification” et une “vérité”, elles doivent s’“appliquer” comme dit Kant “à une détermination supplémentaire”, à savoir à ce que Husserl appellera plus tard un objet *régional*. Pour la mécanique classique, le “phénomène noyau” à objectiver est le *mouvement* comme manifestation spatio-temporelle (phénoménale) d’une intériorité substantielle de la matière. Comme nature et existence, la matière possède une intériorité inaccessible en tant que telle (débat avec Leibniz) mais qui s’extériorise, s’externalise, dans le mouvement mécanique. Le synthétique a priori est la condition d’intelligibilité (elle-même inintelligible) de cette externalisation phénoménale d’une intériorité substantielle. D’où une dialectique subtile entre le “mathématique” (extériorité) et le “dynamique” (intériorité).

## 4.2 Phoronomie (Cinématique)

Dans la cinématique, spécifiant les catégories de la quantité et les principes, dits “Axiomes de l’intuition”, qui règlent la fonction des grandeurs extensives, deux problèmes sont traités.

(a) La façon dont la mesure advient sous forme de métrique à l’espace et au temps phénoménologiques. L’espace comme médium de manifestation devient géométrie en vue de la physique, et sa structure euclidienne est inséparable des principes de la mécanique. Comment un espace phénoménologique devient un espace objectivant déterminant mathématiquement l’externalisation d’une intériorité dynamique est bien le titre d’un problème encore très actuel.

(b) Le groupe d’invariance de la relativité galiléenne. Cela recouvre d’une part les symétries de l’espace-temps galiléen (translations temporelles, translations et rotations spatiales). Et il est bon d’insister ici sur le fait que Kant est le premier philosophe à avoir affirmé, contre les dogmatismes logiques leibniziens, que l’existence de symétries spatiales était constitutive pour l’objectivité physique. Cela recouvre d’autre part le groupe proprement cinématique des transformations galiléennes (mouvements rectilignes uniformes). D’où, contre Newton lui-même, la réfutation de tout espace absolu (un tel espace n’est qu’une “Idée”) et l’affirmation du rôle fondateur du principe de relativité.

Pour Kant, la loi d’addition des vitesses dans la relativité galiléenne n’avait rien d’évident et constituait même un problème central. En effet, les vitesses sont des grandeurs intensives et non pas extensives. Leur additivité (leur vectorialité) doit donc être démontrée en accord avec leur intensivité et cela ne pas de soi. Le mouvement n’est pas un mode de l’espace (anti-cartésianisme) et l’additivité n’est pas que géométrique. On connaît l’étonnant héritage moderne de cette question.

## 4.3 Dynamique.

Comme qualité (et non plus comme quantité), la matière est “remplissement” de l’espace. Ce remplissement est très différent d’une simple “occupation”

(anticartésianisme). C'est un processus dynamique et énergétique propre à "l'intériorité" substantielle de la matière. C'est ici l'un des points où le débat avec Leibniz est le plus serré. Pour Leibniz l'espace est imaginaire. L'intériorité substantielle est hors espace (cf. la *Monadologie*). Il y a donc un conflit d'ontologies entre l'ontologie mécaniste et l'ontologie monadologique (cf. l'ouvrage fondamental d'André Robinet [35] *Architectonique disjonctive, Automates systémiques et Idéalité transcendantale dans l'œuvre de G.W. Leibniz*). Kant maintient cette intériorité substantielle. Mais, comme elle est d'ordre nouménal, elle ne peut pas être introduite dans l'objectivité (d'ailleurs sa réintroduction spéculative dans les idéalismes post-kantiens conduira aux vitalismes du siècle dernier). Elle doit être traduite à travers son extériorisation. C'est là que les catégories de la qualité se disjoignent du concept traditionnel (métaphysique, d'Aristote à Leibniz) de substance. Le remplissage de l'espace-temps par la matière est une tension dynamique pour l'occupation. Il est le résultat d'un conflit de forces attractives externes et de force répulsives internes engendrant la cohésion des corps, leurs phases matérielles et leurs relations. Ces forces fondamentales ne sont pas des nécessités logiques mais des conditions de l'expérience physique. Leur être est opaque ("en soi"). Il s'exprime phénoménologiquement par des qualités ("écranage" de l'être par le phénomène), c'est-à-dire par des grandeurs intensives.

Il s'agit donc d'élaborer dans la *Dynamique* le traitement mathématique des grandeurs intensives. Mais l'on voit que cela laisse entièrement ouvert le problème de la "construction mathématique" du concept dynamique de matière. L'intériorité substantielle génératrice des qualités demeure en fait hors construction. C'est un problème central intensément repensé par Kant dans l'*Opus Postumum* mais en fait légué à l'avenir (comme celui de la Chimie et celui de la Biologie que Kant ne voyait pas comment soumettre à une construction mathématique des concepts). Dans la *Mécanique*, la matière se trouve réduite à la masse. Cela simplifie considérablement le problème puisque la substance classique se trouve réduite à un scalaire. Par là-même, cela permet la construction mathématique du mouvement tout en faisant l'économie de celle, dynamique, de la substantialité.

Cette conception de la mécanique est clairement anti-atomiste, c'est-à-dire, en fait, anti-mécaniciste. Un dynamisme énergétique y est sous-jacent, mais sans pouvoir y devenir un principe de détermination mathématique des phénomènes. La genèse des intensités et l'action des forces fondamentales y demeurent des énigmes physiques. Rien n'est donc plus étranger au point de vue transcendantal qu'un fixisme a-historique. Assigner Kant à la science de son temps est une aberration car il a été l'un des philosophes les plus hardis dans l'imagination de progrès scientifiques en microphysique, en chimie, en biologie ou en cosmologie.

Les catégories de la qualité et les principes associés que sont les "Anticipations de la perception" se spécifient ici par le principe que l'être physique s'externalise à travers des grandeurs intensives comme la vitesse ou l'accélération. Le lien organique, systématique, avec la cinématique s'exprime alors comme un principe de *covariance* relativement au groupe d'invariance de l'espace-temps. Ainsi apparaît, après le principe de relativité, l'autre principe promis à la plus

grande des postérités, à savoir que l'être physique doit être décrit par des données différentielles variant de façon covariante. (Cela donnera plus tard les descriptions en termes de formes différentielles). Bref, la *Dynamique* nous explique que c'est pour des raisons *transcendantales* que la *Mécanique* doit être une géométrie différentielle (et non pas, par exemple, une logique des qualités).

#### 4.4 Mécanique.

La Mécanique, qui spécifie les catégories de la relation et les principes associés dits "Analogies de l'expérience", explique la genèse des objets physiques proprement dits. Elle repose sur une réduction déterminante, la réduction de la matière à la masse (cf. plus haut). La masse devient "sujet ultime dans l'espace" et le mouvement devient son "prédicat déterminant". Et comme ce prédicat est spatio-temporel, la matière se trouve bien traitée scientifiquement à partir de sa seule phénoménalité (réduction à l'observable). La matière n'est plus, comme encore chez Leibniz, une matière physique "seconde" animée par en-dessous par une *materia prima* extrinsèquement spatiale. Elle devient en quelque sorte une unité matière-espace-temps.

La "coupure épistémologique" (la rupture radicale des sciences galiléennes-newtoniennes avec les métaphysiques substantialistes, de l'hylémorphisme aristotélicien jusqu'à la monadologie de leibnizienne) se trouve donc mis au principe de l'approche transcendantale de la *Mécanique*. Ce geste permet de construire mathématiquement les catégories "dynamiques" (i.e. non "mathématiques"). Nous avons vu quel est le prix à payer.

La construction commence par une réinterprétation complète de la catégorie de substance. À travers son schématisme temporel qui en fait un principe de permanence, elle s'identifie aux principes physiques de *conservation* des grandeurs physiques. En particulier, elle commande les principes de conservation de la masse et de la quantité de mouvement. Le principe d'inertie en est un aspect.

On ne saurait trop insister sur l'importance épistémologique de cette réinterprétation. Elle rompt radicalement avec toutes les approches d'orientation logico-linguistique qui considèrent que la science est une *prédication* (avec sujets, prédicats et, éventuellement, relations) sur des choses et des états de choses, autrement dit au rapport de type syntaxe/sémantique entre un langage (formalisé) et des données empiriques fonctionnant comme dénotation. Ici le rapport substance/prédicat devient la source des lois de conservation, lois qui, une fois traduites en équations, épuisent l'essentiel du contenu théorique des théories physiques, et qui déterminent des modes infiniment variés de transformation des grandeurs physiques. Faire subir au concept classique de prédication une telle transmutation donne tout son sens à la perspective critique.

Quant au principe de causalité, il se trouve retraduit par la loi de Newton.

Enfin, quant au principe de communauté, il se trouve retraduit d'abord par le principe de l'égalité de l'action et de la réaction (controverse sur les forces d'inertie) puis par le principe de l'interaction universelle qui spécifie le schème de la *simultanéité*. La simultanéité pose pour Kant un problème difficile. En effet, on doit en garantir l'objectivité. Or, pour cela, il faut coordonner les temps

locaux en un temps *cosmologique* global. L'espace et le temps sont donnés comme infinis au niveau de l'Esthétique transcendantale. Mais comme espace et temps de l'objectivité physique, ils sont, si on les considère globalement, de nature cosmologique. Or l'univers ("le monde") *n'est pas* un concept objectif pour Kant (cf. les antinomies dites cosmologiques de la Dialectique transcendantale). Ce n'est qu'une Idée de la raison. Cela a même conduit Kant à renier ses considérations cosmologiques pré-critiques que l'on s'accorde pourtant à juger visionnaires.

#### 4.5 Phénoménologie

Ce que les *Premiers principes* développent sous le titre de *Phénoménologie* concerne les catégories de la modalité (possible, réel, nécessaire) et les principes associés que sont les "Postulats de la pensée empirique".

Cinématiquement parlant, le mouvement *n'est pas* un prédicat *réel* mais seulement *possible*. C'est pourquoi, en accord avec le principe de relativité, on peut à la fois l'affirmer et le nier sans aucune contradiction logique. Position (spatiale ou temporelle) absolue ainsi que vitesse (d'un mouvement rectiligne uniforme) absolue ne sont pas des observables. C'est pourquoi le "réalisme empirique" de l'espace ne peut pas se doubler d'un "réalisme transcendantal". La thèse, si souvent mécomprise, de "l'idéalité transcendantale" de l'espace ne fait qu'exprimer philosophiquement le principe de relativité.

La dynamique fournit en revanche des critères de réalité du mouvement, car les forces sont réelles. Cette réalité est gouvernée par des lois mécaniques qui sont nécessaires, la nécessité n'étant pas ici une nécessité logique (contingence radicale de l'expérience) mais une nécessité conditionnelle, relative à l'expérience.

### 5 Diversification et unification des ontologies physiques

Principe de relativité et groupe d'invariance, remplissage dynamique de l'espace par la matière à travers des forces fondamentales tant internes qu'externes, traduction de l'intériorité substantielle par des données différentielles (grandeurs intensives) covariantes, rapport masse-métrique, problème cosmologique de la simultanéité, voilà autant de titres de problèmes dont il semble difficile de ne pas admettre la pertinence post-newtonienne. C'est pourquoi il paraît légitime de prolonger le réalisme critique kantien à la physique moderne. Une telle reconstruction rationnelle fait apparaître une *histoire transcendantale* de l'objectivité (quasi-hégélienne ou quasi-heideggerienne, cf. plus haut). Elle est possible si l'on étudie soigneusement des opérations du type suivant :

- (i) approfondissements de la structure du système catégorial ;
- (ii) rectifications des spécifications régionales (des phénomènes "noyaux") à partir de nouvelles données empiriques cruciales ;

- (iii) dégagement d'un télos de réduction du "dynamique" au "mathématique" (de l'existence à l'essence) par *géométrisation* du physique ;
- (iv) exploration de l'intériorité dynamique de la matière par introduction d'autres grandeurs "internes" que la masse ;
- (v) schématisation-construction des recatégorisations nécessaires à cela.

## 5.1 Formalisme lagrangien, théorème de Noether

Un approfondissement mathématique remarquable de ce qui se trouve pensé métaphysiquement dans les *Premiers principes* de Kant est fourni par le formalisme *lagrangien*. En effet ce dernier permet d'engendrer les grandeurs proprement physiques d'un système à partir de ses grandeurs cinématiques extensives (positions) et intensives (vitesses). Un lagrangien est en quelque sorte une fonction génératrice du physique (du "dynamique") à partir du cinématique (du "mathématique").

Soit  $M$  l'espace de configuration (de coordonnées  $q$ ) du système mécanique envisagé et  $TM$  l'espace fibré tangent (de coordonnées  $(q, \dot{q} = \frac{dq}{dt})$ ) de  $M$ . Le *théorème de Noether* affirme que si  $L : TM \rightarrow \mathbb{R}$  est un lagrangien invariant par un sous-groupe à un paramètre de difféomorphismes de  $M$ ,  $\varphi_s \in Diff(M)$ , alors l'application  $I : TM \rightarrow \mathbb{R}$  définie par

$$(q, \dot{q}) \rightarrow I(q, \dot{q}) = \left. \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \cdot \frac{d\varphi_s(q)}{ds} \right|_{s=0}$$

est une intégrale première du mouvement. Ce théorème couple principes de relativité (non observabilité de grandeurs cinématiques absolues), symétries (invariance du lagrangien) et lois de conservation (observabilité et conservation de grandeurs physiques). Les exemples les plus classiques corrént :

- (i) la conservation de l'énergie au groupe d'invariance des translations temporelles ;
- (ii) la conservation de l'impulsion au groupe d'invariance des translations spatiales ;
- (iii) la conservation du moment angulaire au groupe d'invariance des rotations spatiales.

Ainsi se trouve unifiée la spécification mécanique du système catégorial. On atteint ici à une sorte de quintessence du point de vue transcendantal en physique classique : dans le formalisme lagrangien, la réduction de la substance à des lois de conservation physiques devient l'expression matérielle des principes de relativité de l'Esthétique transcendantale. Comment rêver meilleure exemplification de la fonction du synthétique a priori ?

Au-delà du formalisme lagrangien, le formalisme *hamiltonien*, c'est-à-dire symplectique, approfondit encore plus l'unité a priorique de la mécanique. En élargissant l'espace de configuration à l'espace de phase et en prenant pour base la dualité entre géométrie (positions) et physique (moments conjugués) il fait apparaître une nouvelle structure dont l'analyse géométrique enrichit de façon considérable le déploiement mathématique des contenus transcendantsaux de la

mécanique rationnelle. Si l'on songe à l'extraordinaire destin de la géométrie symplectique, on voit à quel point ce qui s'inaugure dans les *Premiers principes* n'a pas été invalidé après Kant mais, bien au contraire, approfondi.

## 5.2 Relativité restreinte

Un exemple princeps de rectification de l'Esthétique transcendantale et de la Cinématique associée est donné par la relativité restreinte. Mais il faut être prudent lorsque l'on prétend en tirer des arguments positivistes anti-transcendants. Car la démarche d'Einstein (plus encore que celle de Poincaré) est superbement a priori et constitue en fait une magnifique exemplification du synthétique a priori.

Avec l'électromagnétisme, le noyau empirique de la physique s'élargit. On peut développer une ontologie régionale des phénomènes correspondants, et le problème se pose alors de la relier à l'ontologie mécanique. Ce qui s'est produit est un conflit d'Esthétiques transcendantales et de cinématiques associées. Une donnée empirique cruciale (constance de la vitesse de la lumière) a permis de choisir parmi plusieurs possibilités mathématiques (conventionnalisme). Mais il faut bien voir que l'électromagnétisme pré-einsteinien ne satisfaisait pas aux principes transcendants de l'expérience. Il inclut des notions comme celles d'espace absolu et d'éther qui sont des "Idées" au sens de Kant. La relativité restreinte répète le geste transcendantal de constitution pour l'électro-magnétisme. Elle reformule pour ce faire l'exposition transcendantale (mathématique) de l'Esthétique. Elle change le groupe d'invariance pour sauver le principe constitutif de relativité. On pourrait dire qu'avec la relativité restreinte l'argumentation transcendantale se transforme en une argumentation physique. Mais le fait que, par exemple, les grandeurs intensives que sont les vitesses ne satisfassent plus à la loi d'additivité ou que la simultanéité soit remise en cause n'invalident pas l'argumentation. Elle la rectifie dans sa lettre en restant fidèle à son esprit.

## 5.3 Physique et géométrie

Il semble qu'un télos anime l'histoire de la physique moderne, celui de la géométrisation. On a l'impression qu'une partie importante de cette science a consisté :

(i) à construire progressivement (au sens de la schématisation-construction mathématique) le concept dynamique de matière en ajoutant à la seule masse d'autres déterminations internes ;

(ii) à résorber le physique ainsi approfondi dans de puissantes généralisations mathématiques de l'Esthétique transcendantale.

Il y a là une sorte de revanche du "cartésianisme" (nous parlerons plus bas également d'une sorte de revanche du "leibnizianisme"), mais à l'intérieur de l'horizon transcendantal lui-même.

Un bel exemple de géométrisation en mécanique classique est celui du traitement du mouvement du solide (théorie d'Euler-Poinsot) comme principe d'inertie non commutatif. Considérons la façon dont le développe Vladimir Arnold

dans *Méthodes mathématiques de la Mécanique classique* [2]. Si  $S$  est un solide avec un point fixe, l'espace de configuration est le groupe de Lie non commutatif  $G = SO(3)$  des rotations qui est compact de dimension 3. Si le mouvement est libre, le lagrangien  $L : TG \rightarrow \mathbb{R}$  se réduit à l'énergie cinétique qui définit une métrique riemannienne sur  $G$ . Comme  $L$  est  $G$ -invariant, il existe 4 intégrales premières d'après le théorème de Noether (l'énergie et les 3 composantes du moment cinétique  $M$ ). Si  $S$  ne possède pas de symétries particulières, ces intégrales premières sont indépendantes. Comme  $G$  est parallélisable (i.e. isomorphe au produit direct  $G \times \mathbb{R}^3$ ),  $TG$  est orientable et donc les variétés invariantes  $V_c$  le sont aussi. Elles sont de dimension 2. Comme l'énergie  $E$  y est constante, elles sont compactes. Si  $E > 0$  alors le champ de vitesses sur  $V_c$  est partout  $\neq 0$  et est donc sans points singuliers. Cela implique que  $V_c$  soit un tore. On obtient ainsi un cas particulier du théorème fondamental de Liouville-Arnold sur les systèmes intégrables : les mouvements sont des mouvements quasi-périodiques sur des tores invariants. Comme le dit Arnold cela

“permet sans effectuer le moindre calcul de tirer les conclusions nécessaires sur le mouvement”.

On peut pousser plus loin ici la réduction du physique à l'a priori. Explicitons-le brièvement (en supposant connus du lecteur des rudiments de géométrie symplectique). La théorie d'Euler-Poinsot du mouvement libre du solide autour d'un point fixe est en fait celle du mouvement inertial (géodésique) sur le groupe de Lie non commutatif  $G$  muni (par l'énergie cinétique) d'une métrique invariante à gauche. La courbure de cette métrique exprime en termes de métrique la non commutativité de  $G$  et la distribution des masses dans le solide. Sur le fibré cotangent  $T^*G$  de  $G$  il existe une structure symplectique naturelle. D'après un théorème dû à Kirillov elle se transporte dans les orbites de la représentation co-adjointe de  $G$ . Les classiques équations d'Euler consistent à descendre, au moyen de l'application moment  $J : T^*G \rightarrow \mathfrak{g}^*$  (où  $\mathfrak{g}^*$  est l'algèbre de Lie duale de l'algèbre de Lie  $\mathfrak{g}$  de  $G$ ), les équations de Hamilton (définies sur  $T^*G$ ) sur  $\mathfrak{g}^*$ . Elles sont hamiltoniennes sur les orbites de la représentation co-adjointe munies de leur structure symplectique. Cela est valable pour tout groupe de Lie. Et, comme le remarque Arnold, si l'on généralise cette réduction a priori au groupe de Lie de dimension infinie qu'est le groupe des difféomorphismes d'un domaine  $D$  de  $\mathbb{R}^3$ , on peut dériver a priori l'essentiel de la théorie eulérienne de l'écoulement des fluides.

Mais l'exemple prototypique de géométrisation de la physique est évidemment celui de la relativité générale comme théorie de jauge pour la force gravitationnelle. On a souvent dit que la cosmologie einsteinienne discréditait définitivement le point de vue critique. Mais, là encore, l'argumentation n'est guère convaincante (pas plus que si l'on disait que les géométries non euclidiennes invalidaient l'axiomatique). Comme l'a montré Pierre Kerzberg dans ses analyses des débats entre Albert Einstein, Willem de Sitter, Hermann Weyl et Arthur Eddington, on peut au contraire suivre en détails la façon dont l'univers se constitue en *objet* (au sens de Kant) d'une cosmologie physique objective qui *évalue*



les antinomies cosmologiques de la Dialectique transcendantale. L'unification de la physique et d'une cosmogenèse présuppose une série d'opérations *critiques* mathématiquement spécifiées comme, par exemple, le principe de Weyl permettant de définir un temps cosmologique global par la seule prise en compte des objets dont la genèse est compatible à l'observation actuelle, ou comme l'exclusion des modèles d'univers à la Gödel possédant des lacets de genre temps. Moritz Schlick, Hans Reichenbach, Émile Meyerson ont donc fait preuve de quelque dogmatisme lorsqu'ils ont affirmé que la relativité générale devait être interprétée de façon positiviste. Il semble que sa bonne interprétation philosophique soit celle de la géométrisation i.e. de la réduction des mouvements en général à des mouvements *inertiaux*. Le physique (où le remplissage dynamique de l'espace par la matière est classiquement réduit au rapport entre masse et métrique) se trouve ramené à une "Esthétique transcendantale cosmologique" à travers l'extension du concept de géométrie que fournit la géométrie riemannienne. Il s'agit là d'un principe général. Chaque conquête mathématique fondamentale dans l'analyse du concept d'espace (catégories "mathématiques") permet de résorber un aspect de la construction mathématique du concept de matière (catégories "dynamiques") dans de la géométrie. Après la relativité générale, les théories de jauge feront de même avec la construction quantique du concept de matière.

#### 5.4 La première mécanique quantique comme recatégorisation de l'objectivité physique

La première mécanique quantique fournit un exemple spectaculaire de constitution d'un nouveau niveau d'objectivité, constitution rendue nécessaire par le changement d'échelle des phénomènes microphysiques. Tous les gestes et éléments transcendantsaux s'y trouvent repris avec une netteté particulière. On peut légitimement parler, semble-t-il, d'ontologie régionale quantique.

(a) Il faut d'abord redéfinir l'objet régional comme noyau empirique à partir d'un empirisme radical. Il faut partir de la façon dont les phénomènes microphysiques se manifestent : non plus par des trajectoires dans des espaces de configuration ou des espaces de phases mais par des données discrètes comme des fréquences spectrales. Cette phénoménalisation est évidemment celle d'un être sous-jacent. Elle possède son double aspect, ontologique côté objet et observationnel côté sujet. Mais l'être sous-jacent est "en soi" (nouménal). Il faut donc se borner à légaliser les données phénoménales. Pour cela, il faut (cf. plus haut) inclure dans la forme même de la connaissance les conditions de possibilité de l'opérationnalité expérimentale en microphysique. C'est "l'écrantage" de l'être pris comme fondement de la connaissance objective.

(b) Il devient donc nécessaire de recatégoriser l'objectivité ou, plus précisément, de respécifier les catégories et les principes relativement au nouvel objet régional considéré. C'est ainsi que s'imposent de nouveaux a priori prescriptifs (normatifs, non descriptifs) comme les relations d'incertitude et la non commutativité, le principe d'exclusion, etc. Ils vont permettre de construire mathématiquement un nouvel ordre de légalité et de détermination objective.

(c) Mais les moments catégoriaux de toute constitution sont, bien que spécifiques, toujours présents.

L'Esthétique transcendantale devient fondée sur le concept *d'amplitude de probabilité* et les lois statistiques deviennent donc des principes de détermination objective. Si l'on réécrit à partir de là les "Axiomes de l'intuition" on aboutit à une formulation philosophique naturelle du problème quantique de la mesure et, en particulier de son incompatibilité avec la définition classique des grandeurs et des états physiques.

Pour cette nouvelle Esthétique transcendantale, le principe de superposition (selon lequel, s'il existe plusieurs voies *indiscernables* de transition, l'amplitude de probabilité est la somme des amplitudes associées aux différentes voies) est un principe "cinématique" de relativité. Par adjonction de degrés de liberté internes, l'espace d'objectivité "permettant d'appréhender les propriétés intrinsèques" des systèmes microphysiques (Gilles Cohen-Tannoudji [7]) devient l'espace de Hilbert. La complémentarité y généralise la covariance et les ensembles complets d'observables commutantes y généralisent les référentiels (ce qu'avait bien vu déjà Vladimir Fock).

L'introduction de paramètres internes permet évidemment une percée considérable dans la construction du concept dynamique (et pas seulement mécanique) de matière. Ce qui était chez Kant – au-delà de l'*Opus Postumum* – laissé à l'avenir (comment aller au-delà de la réduction de l'intériorité substantielle de la matière à la simple masse) commence à trouver un début de réponse.

(d) Le débat sur la mécanique quantique est épistémologiquement fondamental. Il paraît pouvoir être clarifié si l'on pose que, avec les fondateurs, se met en place la constitution d'une nouvelle objectivité et que le problème se pose donc d'articuler entre elles les *deux* ontologies régionales, respectivement classique et quantique. Le débat entre Einstein et la mécanique quantique (Niels Bohr en particulier), débat bien analysé par John Stachel, trouve sans doute ici sa signification rationnelle. Einstein pensait (comme ses collègues) la mécanique quantique en termes positivistes-opérationnalistes et, du coup, rappelait à ses collègues les exigences de la rationalité. Une théorie rationnelle ne doit pas être seulement une systématisation conceptuelle et formelle des données empiriques. Elle doit pouvoir assurer une intelligibilité en déduisant les faits empiriques de principes formels universels (fonction de l'a priori). Pour Einstein, les principes quantiques ne possédaient pas de valeur fondationnelle : la mécanique quantique était empiriquement valide, opératoire et explicative, mais trop éloignée des principes a priori (les groupes d'invariance et les principes de covariance : "group invariance (...) the most important theoretical source of knowledge"). D'où son souci de la dériver des principes a priori classiques. D'où son exigence de "détermination complète" (paramètres cachés), son refus d'un contenu proprement objectif des probabilités, etc. Mais dans cette quête de la réalité, Einstein est subrepticement passé de l'objectivité physique à l'ontologie métaphysique. Car, pour l'objectivité microphysique, l'objectivité classique est métaphysique. D'où la nécessité d'une recatégorisation et d'une reconstitution.

Contrairement aux apparences, dans ce débat c'est Bohr (le "positiviste" et "l'opérationnaliste") qui occupe de fait la position du rationaliste. Il répète le

geste constitutif (avec ce qu'il a toujours de révolutionnaire) et renvoie Einstein à la Dialectique transcendantale. Il est philosophiquement tout à fait acceptable que les théories à paramètres cachés soient réfutées.

## 5.5 Les rapports entre ontologies'

Mais le problème de l'articulation entre l'ontologie classique et l'ontologie quantique demeure. Plusieurs moments essentiels de la physique récente y sont évidemment impliqués.

(a) La nécessité de faire opérer le groupe d'invariance cinématique (de la relativité galiléenne ou de la relativité restreinte) sur l'espace interne des états d'un système microphysique.

(b) L'unification du formalisme lagrangien et du formalisme quantique dans les intégrales de chemin de Richard Feynman  $\int \exp\left(\frac{iS(\gamma)}{\hbar}\right) d\gamma$ , le principe fondamental de la *phase stationnaire* reliant entre eux les niveaux quantiques et classiques. Le geste est particulièrement profond pour l'intelligibilité qu'il procure et le calcul qu'il permet de développer (graphes de Feynman, développements perturbatifs, renormalisation). Les intégrales de chemin développent une analogie entre mécanique quantique et optique ondulatoire qui généralise l'analogie bien connue entre mécanique hamiltonienne et optique géométrique. Elles permettent de calculer les amplitudes de probabilité mais en se heurtant à des problèmes de divergence qui nécessitent une renormalisation.

(c) Le mouvement d'*unification* opéré par l'unité des formalismes est ici particulièrement frappant. Dans leur forme, les intégrales de Feynman sont analogues à des fonctions de partition de systèmes thermodynamiques (où les configurations seraient des chemins). D'où une admirable synthèse de la théorie quantique des champs et de la physique statistique (en particulier en ce qui concerne le groupe de renormalisation). Ainsi vient au premier plan l'existence d'une infinité d'échelles des phénomènes microphysiques. On pourra se référer à l'ouvrage de Michel Le Bellac *Des phénomènes critiques aux champs de jauge* [19].

(d) A partir de l'articulation des ontologies classiques et quantiques (par exemple à la Feynman) le mouvement de géométrisation amorcé par la relativité générale peut être généralisé. C'est là qu'interviennent les théories de jauge qui déduisent, par réduction à l'a priori, les interactions en rendant les symétries *internes* des systèmes quantiques dépendantes de l'espace-temps externe, i.e. en en faisant des symétries non plus globales mais *locales*. On voit ainsi une Esthétique transcendantale toujours plus élaborée (incluant ici la dialectique interne/externe) et toujours plus mathématiquement développée résorber toujours plus avant l'empirique et sa contingence dans la géométrie et sa nécessité (conventionnelle et conditionnelle). L'énigme des forces fondamentales commence ainsi à être percée dans la plus grande fidélité à l'esprit des principes constitutifs : les forces deviennent associées à des *conservations locales*.

La base de l'objectivité qu'est le rapport relativité-symétrie-conservation se trouve ainsi considérablement approfondie. On introduit, en plus de l'espace ex-

terne, des fibrés décrivant des degrés de liberté internes. La formulation lagrangienne dans les fibres va alors relier la relativité dans les fibres, les symétries internes et la conservation de nombres quantiques. Par exemple en électromagnétisme, la relativité de la phase est corrélée à la conservation de la charge. Si l'on impose alors une invariance par changement spatio-temporel *local* de la phase on obtient (Hermann Weyl) une interprétation géométrique de la force d'interaction électromagnétique comme échange de photons. Les théories de jauge traitent de cette façon trois propriétés de symétrie : le changement de phase en électrodynamique, le changement de couleur des quarks en chromodynamique et le changement d'un lepton chargé en son neutrino en interaction faible.

Les symétries locales introduisent des “torsions” dans les espaces fibrés de description (ce que l'on appelle des “connexions”) qui traduisent géométriquement l'émission de quanta de forces.

On peut donc affirmer que le stade classique des principes physiques, loin d'avoir été invalidé par les développements ultérieurs a au contraire été consolidé et enrichi.

## 6 Mathématiques et Objectivité

Le point de vue esquissé ci-dessus confère une importance déterminante à l'implication (plus que l'application) des mathématiques dans l'expérience. Dans une certaine mesure on peut même dire que la philosophie critique représente la philosophie naturelle des sciences (que Kant appelait “proprement dites”) où le rôle des mathématiques pures est constitutif.

C'est pourquoi cette philosophie a d'ailleurs connu une longue période de récession. Car, comme nous l'avons vu, la physique mathématique a redéployé – et avec quelle profondeur ! – sa fondation transcendantale mais de façon purement intra-physique et a donc pu en considérer le principe comme définitivement acquis. L'auto-réflexion philosophique était pour elle devenue superflue. Et d'un autre côté, les sciences empiriques purement expérimentales dont les concepts théoriques n'étaient pas mathématisés et fonctionnaient de façon descriptive n'arrivaient pas à accéder à un stade authentique de formalisation et n'avaient donc pas besoin, elles non plus, mais pour des raisons opposées à celles de la physique mathématique, de fondations transcendantales. Ce n'est que relativement récemment que les choses ont commencé à changer et que la situation scientifique s'est à nouveau mise à exiger une auto-réflexion proprement philosophique.

Avant que d'y venir, disons d'abord un mot sur les rapports entre mathématiques et objectivité.

### 6.1 Axiomatique structurale

En ce qui concerne les mathématiques “pures” dans leur “solidarité inaliénable” (comme disait Jean Cavailles) avec la théorie de la connaissance, l'approche

philosophique la plus idoine nous paraît être celle de l'axiomatique structurale telle que l'ont développé d'abord Jean Cavaillès et Albert Lautman à la suite de Hilbert, puis Jean-Toussaint Desanti. Cette approche axiomatique, structurale et conceptuelle, des idéalités mathématiques est la forme moderne de la “construction de concepts” sur laquelle nous avons beaucoup insisté. Elle dépasse le réductionnisme logiciste vers une analyse des objets mathématiques et, plus précisément, vers une analyse des corrélations (en un sens assez proche de celui de la corrélation noèse-noème, actes-sens-objets, chez Husserl) entre les actes opératoires syntaxiquement légalisés, le sens idéal et les structures-objets. Conçue en ce sens, l'axiomatique est créatrice de *contenus idéaux* (qui peuvent s'impliquer dans une herméneutique catégoriale de l'objectivité). Une dialectique du concept (Cavaillès-Lautman) y opère, ce qui dialectise (au sens d'une “Aufhebung”) l'antinomie de la vérité objective et de la valeur historique (cf. plus haut). En mathématiques pures le devenir est compatible avec l'intelligible.

## 6.2 Axiomatique et synthétique a priori

L'axiomatique a pour fonction d'abord de déterminer des données originaires, intuitives (géométrie) ou catégoriales (théorie des ensembles), puis des types universels de structures (algébriques, topologiques, ordonnées, etc.) et également des structures plus particulières mais fondamentales (axiomatique cohomologique, axiomatique des stratifications, etc.). Nulle part n'est plus claire la façon dont l'*altérité* de transcendances objectives se trouve réfléchie, encodée, dans l'immanence d'une discursivité transparente normée par des règles grammaticales. L'axiomatique structurale et conceptuelle est le lieu où s'affirme en mathématiques la fonction du synthétique a priori. La réduction à une analytique formelle n'est pas satisfaisante car elle met entre parenthèses le fait décisif que la genèse des axiomes est une ontogenèse de structures.

## 6.3 Contenus formels, théorie des modèles et modèles non standard

Les théorèmes fondamentaux de la théorie logique des modèles montrent qu'il existe un écart irréductible entre la syntaxe des actes opératoires (analyse syntaxique des théories, démontrabilité, etc.) et les structures objectales corrélatives (analyse sémantique, validité des énoncés, etc.). La plupart des théories intéressantes (évidemment parmi celles possédant des modèles infinis) ne sont ni finiment axiomatisables, ni catégoriques. La syntaxe logique qui permet de maîtriser les *langages* d'objets – autrement dit la formalisation – ne permet pas de rejoindre une caractérisation, une “détermination complète”, des *objets*. C'est pourquoi, dès que l'on dépasse des définitions proprement constructives (dans le cadre d'un empirisme strict régi par la thèse d'analyticité) on rencontre une transcendance objective des idéalités. La non catégoricité des théories et l'existence de modèles non standard manifeste un excès de l'objectal sur le discursif. La corrélation entre d'un côté des actes opératoires axiomatiquement dominés et d'un autre côté des structures objectales n'est pas une identité. L'objectal

déborde l'opérateur et, comme l'affirme Gilles Gaston Granger [11], il existe des *contenus formels*.

Cette existence de contenus formels est cruciale. Elle formule dans des termes modernes l'irréductibilité de "l'intuitif" au logique. Cela est particulièrement fondamental pour le *continu* comme "infini originellement donné" (Kant). Ici, un point clé est l'étude des modèles *non standard* de l'Analyse comme théorie du premier ordre, hiérarchisée en types, de l'univers ensembliste  $U$  construit sur  $\mathbb{R}$  (cette théorie du premier ordre de  $U$  étant la théorie d'ordre supérieur de  $\mathbb{R}$ ). Ces modèles non standard existent en vertu du théorème de Löwenheim-Skolem.

Sur cette base, l'Analyse non standard a non seulement réhabilité les infinitésimales leibniziennes mais confirmé le bien fondé du point de vue de Véronèse (auquel des néo-kantiens comme Natorp accordaient une grande importance). Le continu est une donnée intuitive originelle (une "forme fondamentale" chez Véronèse) – autrement dit une "intuition pure" – que l'on cherche à reconstruire symboliquement (à la Dedekind par exemple). Mais cela peut se faire à une infinité d'échelles différentes. Le modèle standard de  $\mathbb{R}$  correspond au choix d'une échelle *unique*. C'est pourquoi (cf. [31]) il existe des extensions strictes  $*U$  de l'univers ensembliste  $U$  de base  $\mathbb{R}$  (par exemple des ultra-puissances dont l'existence est garantie par un théorème de Jerzy Łoś, ou, mieux, des "enlargements" à la Abraham Robinson) dont la théorie est *indiscernable* de celle de  $*U$  (on sait que la complétude n'est pas ici en contradiction avec le théorème de Gödel à cause de la distinction entre les sous-ensembles internes et les sous-ensembles externes de  $*U$ ).

On peut donc, avec des néo-intuitionnistes comme Georges Reeb et Jacques Harthong, considérer que la réalité du continu transcende les langages mathématiques, que c'est une réalité objective "extérieure" que la théorie de l'analyse a pour vocation de modéliser. D'après ce point de vue, le réductionnisme logiciste (le "formalisme") apparaît comme un dogmatisme logique (au sens rigoureux du terme) qui identifie la réalité avec son analyse conceptuelle.

On sait d'ailleurs que c'est dans une perspective réaliste et objectiviste (platonisante) que Gödel lui-même interprétait le sens philosophique du théorème d'incomplétude (cf. les ouvrages de Hao Wang, et en particulier *Reflections on Kurt Gödel* [40]). L'incomplétude révèle un écart entre d'un côté le concept de démontrabilité formelle (conçue "computationnellement" à la Turing) et d'un autre côté la vérité mathématique. Selon Gödel, le "principe heuristique" de son théorème était d'opposer le concept logique de démontrabilité au concept "hautement transfini de vérité mathématique objective".

## 6.4 Le statut des idéalités mathématiques

La question si débattue du statut des idéalités mathématiques est donc encore très largement ouverte. Dans ses versions nominalistes, le formalisme non seulement rend la physique mathématique incompréhensible mais de plus est invalidé par l'existence de contenus formels. Les mathématiques sont des sciences d'*objets*. Un certain type de platonisme est donc parfaitement légitime. Mais, évidemment, le platonisme ne veut pas dire qu'il existe des êtres mathématiques

qui se donneraient dans leur être “nu” avec toutes leurs propriétés. Ce platonisme naïvement réaliste présuppose en effet, comme le remarquait Abraham Robinson, que les théories soient catégoriques et que tout soit décidable en mathématiques (par exemple l’hypothèse du continu). Or cela est précisément faux. Le platonisme dont il est question ici repose tout au contraire sur les propriétés de non catégoricité, d’incomplétude, d’indécidabilité, etc. Il repose sur le fait que l’excès de l’objectal sur l’opérateur est un excès “intuitif” qui doit être déterminé, dominé axiomatiquement, mais que cette détermination ne peut pas être une “détermination complète”. Autrement dit, ce platonisme est l’équivalent pour les mathématiques pures d’une doctrine transcendantale pour l’objectivité.

Comme l’a noté Michael Resnik, les apories classiques du platonisme tombent dès que l’on considère que les objets mathématiques sont des structures. Ces structures ont le statut d’objets intentionnels (au sens husserlien) c’est-à-dire de corrélats d’actes légalisés. Une pensée de la corrélation permet, nous semble-t-il, de comprendre comment les idéalités mathématiques peuvent à la fois dépendre des langages y donnant accès et posséder une autonomie. Elle permet d’éviter les pièges à la fois d’un réalisme platonicien naïf (les êtres mathématiques comme entités indépendantes) et d’un nominalisme logiciste (les êtres mathématiques comme êtres de langage).

Les idéalités appartiennent au “troisième monde” de Karl Popper. Le platonisme adapté à leur étude est aussi un “platonisme constructif”. Beaucoup de thèmes de la philosophie des mathématiques se nouent ici. Avec Charles Parsons (cf. par exemple *Mathematics in Philosophy* [22]) et Paul Benacerraf on peut insister sur le fait que les objectivités mathématiques n’étant pas de nature chosique mais de nature structurale, leur existence n’est pas celle d’objets actuels (cf. également les thèses d’Hilary Putnam). Elle est celle d’objets possibles (cf. Kant : les mathématiques relèvent d’une analyse des essences et non de l’existence). D’où le problème central de l’accès épistémique à ces structures : présentation “intuitive” (Kant, Parsons), corrélation noèse-noème (Husserl, Cavailles, Desanti), constructivisme intensionnel à la Bishop-Feferman (reprise du projet de métalogue finitiste de Hilbert : les entités mathématiques doivent être explicitement présentées par des expressions symboliques finies computationnelles), etc.

La position de Kurt Gödel, déjà évoquée plus haut, est ici particulièrement pertinente. Les résultats de complétude vont dans un sens anti-réaliste car la notion non constructive de validité sémantique se trouve alors remplacée par la notion syntaxique purement combinatoire de dérivabilité (démontrabilité). Ce sont plutôt les propriétés d’incomplétude et d’indécidabilité qui manifestent la “transcendance” des objets. La réalité mathématique n’est pas maîtrisable exhaustivement par des règles mécaniques (à la Turing). On doit donc renoncer au rêve hilbertien d’une auto-fondation auto-justifiable purement symbolique et combinatoire (métalogue finitiste). Mais, dans la mesure où cette réalité se *donne*, il doit exister une “faculté” de donation. C’est elle que Gödel appelle “intuition”, en insistant à son tour sur le fait que, comme faculté d’être affecté par un donné, “l’intuition” est l’*opposé* d’une connaissance conceptuelle cer-

taine. Selon Gödel, elle est plutôt analogue à une réceptivité perceptive. Dans une tradition kantienne-husserlienne, Gödel en est arrivé ainsi à ce réalisme conceptuel qu'on lui a tant reproché. Il opposait la logique symbolique aux mathématiques pures. Selon lui la logique s'appliquait à la métaphysique plutôt qu'aux mathématiques et à la physique. Elle était même à la métaphysique ce que les mathématiques sont à la physique.

## 6.5 L'intertraduction mathématique

Quand on analyse l'activité mathématique effective, l'on se rend très vite compte que la déduction n'y joue un rôle que *local*. La plus grande partie de la pratique réelle consiste à traduire des propriétés de certaines structures dans d'autres propriétés de structures associées de façon à pouvoir y "lire" ce que l'on conjecture. Les déductions sont des interventions locales permettant d'obtenir des théorèmes à partir de ce jeu extrêmement dense d'intertraductions. On pourrait donner de très nombreux exemples : associer à un groupe de Lie simple (géométrie différentielle + algèbre) la structure discrète ("cristallographique") de son système de racines ; associer à un espace topologique ses groupes d'homotopie, d'homologie et de cohomologie pour y lire sa non trivialité globale ; associer, à travers le principe de la phase stationnaire, un système hamiltonien de caractéristiques aux intégrales oscillantes solutions d'une équation aux dérivées partielles de type équation des ondes ; associer des nœuds aux structures symplectiques pour y lire leur non trivialité globale ; associer à une singularité la stratification de son déploiement universel, etc., etc. Il y a là une activité synthétique hautement conceptuelle qui mérite d'être prise comme donnée de base pour l'auto-réflexion philosophique des mathématiques. Cela conduit à des considérations voisines de celles d'Albert Lautman.

## 6.6 L'applicabilité des mathématiques

Comme nous l'avons déjà noté plus haut, la thèse wittgensteinienne (nominaliste, anti-platonicienne) du caractère tautologique des mathématiques avait pour fonction de permettre de comprendre l'applicabilité des mathématiques à l'expérience. Pour pouvoir être applicables à la réalité empirique, les mathématiques doivent être *sans* objets propres. Elles doivent se réduire à des formes grammaticales (normes, règles) pour la description de la réalité et, par conséquent, ne posséder aucun contenu descriptif autonome.

Mais cette position radicale provient d'une méconnaissance également radicale de la différence ontologique phénomène/objet. Dès que l'on admet que, pour être convertis en objets, les phénomènes doivent être doublement conditionnés à la fois par des formes de l'intuition et par des principes catégoriaux, l'on peut comprendre comment des mathématiques objectives peuvent s'y appliquer. Les mathématiques vont en effet déterminer les formes de conditionnement, et cela doublement :

- (i) par axiomatisation des formes de l'intuition (géométrie par exemple),
- (ii) par schématisation-construction des catégories.



Autrement dit, les mathématiques s'appliquent et s'impliquent en transformant les conditionnements objectifs des phénomènes en sources de détermination mathématique (de modélisation) de ces mêmes phénomènes. Il n'y a là rien d'une obscure participation d'idéalités à des choses empiriques. Car les conditionnements objectifs ne sont évidemment pas des choses. Ils appartiennent eux aussi au "troisième monde" popperien, c'est-à-dire au même monde que les idéalités mathématiques elles-mêmes.

En tant que déterminant des conditionnements objectifs, les mathématiques "appliquées" sont bien prescriptives comme l'affirmait Wittgenstein. Mais c'est leur réel (au sens de Lautman), et non pas seulement leur forme logique, qui est législateur pour l'expérience. Une herméneutique de l'objectivité ainsi conçue permet de développer une doctrine grammaticale-transcendantale de l'objectivité, mais sans pour autant sacrifier le réel (platonicien) mathématique à une thèse nominaliste d'analyticité. Ainsi couplée au réel mathématique, la célèbre thèse wittgensteinienne de l'autonomie de la grammaire revient à la thèse transcendantale.

## 7 L'ontologie morphologique-structurale : de la biologie à la cognition

### 7.1 Le concept de discontinuité qualitative

Nous avons considéré jusqu'ici prioritairement le physico-mathématique. Reste un problème complémentaire. Comme nous l'avons noté d'emblée, l'une des caractéristiques de l'objectivité moderne est d'avoir mis entre parenthèses la question phénoménologique du contenu *objectif* de la structure qualitative du monde sensible. Cette question s'est trouvée soit psychologisée (de la Gestalttheorie aux sciences cognitives actuelles), soit simili-objectivée mais alors au prix d'une refonte de l'objectivité si radicale que, du coup, elle rendait incompréhensible le physico-mathématique. Il y a là une antinomie de la raison. Affirmer le primat de l'objectivité physique conduit à sacrifier ce que Husserl appelait le "flux héraclitéen" des "essences morphologiques vagues", c'est-à-dire l'apparaître morphologique du monde. Affirmer au contraire le primat de celui-ci et subjectiver la phénoménalité conduit à s'interdire l'accès à la réalité de l'objectivité. Comment sortir de cette impasse qui obsède la pensée depuis la coupure galiléenne ?

Dans le cadre d'une approche constitutive, on peut poser la question de façon tout autre et, ce faisant, formuler une voie de sortie. En effet on peut se proposer de constituer transcendantalement une ontologie régionale qui soit celle des phénomènes sensibles en tant qu'ils se donnent originellement dans leur apparaître. Pour cela il faut redéfinir le primitif "phénomène" et prendre cette redéfinition comme *nouveau noyau empirique*. On appliquera alors l'Analytique catégoriale et l'on en cherchera une nouvelle schématisation-construction. Si cela est possible, on sera ainsi arrivé à élaborer les "Premiers principes" d'une objectivité mathématique de la manifestation phénoménologique elle-même !

C'était le rêve de Kant dans l'*Opus Postumum* où il a introduit le concept étonnant de "phénomène du phénomène" et spéculé sur la possibilité de prendre la phénoménalité elle-même comme nouvel objet scientifique.

Pour redéfinir le primitif "phénomène", on peut suivre Husserl (en particulier la troisième *Recherche Logique* et les *Ideen*). Un phénomène sensible s'identifie à l'occupation d'un domaine spatio-temporel par des qualités sensibles (les "qualités secondes" d'autrefois). Celles-ci varient continûment sauf à la traversée de *discontinuités qualitatives*. Ces discontinuités sont à l'origine de la "saillance" du phénomène. Elles le constituent comme apparaître. Elles en définissent le contenu proprement morphologique.

Nous avons donc trouvé un noyau empirique permettant de constituer un nouvel objet régional. Il ne s'agit plus du mouvement comme en mécanique classique, ni des raies spectrales de la mécanique quantique, mais des discontinuités – des différenciations – qualitatives. La question se pose alors de savoir si l'on peut développer une science proprement dite de cet objet régional, ce que l'on pourrait appeler une *morphodynamique*. Pour cela il faut des mathématiques très particulières permettant de développer une géométrie, une dynamique et une physique des discontinuités qualitatives. Pendant longtemps, une telle morphodynamique a radicalement fait défaut, et c'est pourquoi s'est développée cette scission physique/phénoménologie si caractéristique de notre modernité.

Il y a une vingtaine d'année la situation a changé du tout au tout avec l'œuvre de René Thom (même si la communauté scientifique n'a pas toujours apprécié ce qui était en jeu).

J'ai longuement montré ailleurs comment se développait techniquement l'objectivité morphodynamique. Je me borne donc à quelques indications. Une géométrie pure de l'émergence de discontinuités qualitatives dans des espaces substrat peut s'élaborer à partir du concept de *stratification*. Pour comprendre comment de tels espaces décomposés en domaines par ces discontinuités (i.e. catégorisés) peuvent être remplis par des qualités sensibles, on introduit des dynamiques "internes" définissant des régimes locaux (attracteurs) se manifestant à travers ces qualités. Les stratifications sont alors engendrées par le *déploiement des singularités* de ces dynamiques internes. On développe ainsi une subtile dialectique entre des stratifications dans des espaces externes et des singularités de dynamiques internes génératrices, dialectique qui fonde une morphodynamique pure satisfaisant à tous les requisits transcendants d'une science morphologique "proprement dite".

On constate alors que cette schématisation-construction originale mathématise des concepts qui sont très exactement ceux du *structuralisme* théorique qui, à travers la phénoménologie et la Gestalttheorie, a migré de la biologie structurale (pensons à d'Arcy Thompson et Conrad Waddington) vers les sciences humaines (en particulier la linguistique avec Ferdinand de Saussure, Roman Jakobson, Louis Hjelmslev et l'anthropologie avec Claude Lévi-Strauss). L'ontologie régionale morphodynamique est une ontologie morphologique-structurale. Sa constitution transcendantale représente une authentique "rupture épistémologique" dans la mesure où elle vient bouleverser notre conception des rapports entre sciences de la nature et sciences humaines et reposer de façon neuve le

problème, si cher aux Viennois, de l'unification des sciences.

Mais à partir du moment où l'on dispose d'une nouvelle ontologie régionale, on peut s'interroger sur les rapports constitutifs qu'elle peut entretenir avec les ontologies déjà disponibles.

## 7.2 Les phénomènes critiques entre le physique et le morphologique

L'articulation entre la morphodynamique pure et la physique concerne avant tout les *phénomènes critiques*. Si l'on analyse en détails quelques exemples comme les caustiques en optique ondulatoire (variétés lagrangiennes, intégrales oscillantes et généralisation du principe de la phase stationnaire, approximation de l'optique géométrique), les transitions de phases en thermodynamique (groupe de renormalisation, théorie de Landau et approximation du champ moyen), les intégrales de Feynman en mécanique quantique, etc., ou encore la théorie des défauts des cristaux liquides, on s'aperçoit d'un certain nombre de choses.

(i) Il existe (au moins) deux niveaux d'observation : un niveau macroscopique "grossier" ("squelette" hamiltonien de l'optique géométrique, théorie de Landau du champ moyen pour les transitions de phases magnétiques, etc.) et un niveau microscopique "fin" (catastrophes de diffraction associées aux singularités génériques des caustiques, groupe de renormalisation, etc.).

(ii) On peut (à l'aide de formalismes comme ceux évoqués ci-dessus) modéliser morphodynamiquement le niveau "grossier". Celui-ci est phénoménologiquement dominant.

(iii) On peut insérer cette modélisation dans les formalismes physiques fondamentaux régissant le niveau "fin". Cela permet de contrôler mathématiquement le changement de niveau.

Le concept de singularité est ici fondamental. Il est en effet de nature à la fois physique et phénoménologique et permet de relier l'ontologie physique à l'ontologie phénoménologique. À travers lui, l'analyse morphodynamique permet de saisir l'émergence du morphologique hors de la physique des substrats. Autrement dit, pour la première fois, on peut envisager de traiter la *phénoménalisation* sensible de l'être physique comme un authentique processus *naturel* (non psychologique) et donner un début de contenu scientifique au rêve de Kant dans l'*Opus Postumum* d'une nouvelle "physique" du "phénomène du phénomène" .

## 7.3 Biologie structurale

L'analyse morphodynamique repose sur les théories mathématiques de l'organisation et de la structuration méréologique des substrats. La biologie se trouve par conséquent concernée au premier chef. Il s'agit en effet pour elle d'arriver à unifier la description physicaliste du métabolisme avec les descriptions structurales, systémiques, de l'organisation et de la régulation. Ce problème est absolument central. On ne saurait se satisfaire d'un réductionnisme qui admettrait

que, par une sorte d'harmonie préétablie, la matière vivante est toute prête (par simple auto-organisation thermodynamique) à incarner des schèmes abstraits et formels d'organisation et de régulation. Il faut, d'une façon ou d'une autre arriver à engendrer ces "cinématiques formelles" (Thom) systémiques à partir des dynamiques métaboliques sous-jacentes. Il faut donc arriver à schématiser-construire en termes morphodynamiques (i.e. en termes de la théorie qualitative des systèmes dynamiques) les concepts fondamentaux de la théorie des systèmes. Il y a là un programme de recherche d'une difficulté et d'une ampleur considérables.

#### 7.4 Phénoménologie et sciences cognitives

Bien souvent, la dynamique interne génératrice des morphologies externes est inobservable et inaccessible (le substrat est une "boîte noire"). Si l'on met entre parenthèses cette "intériorité substantielle", on retrouve alors, dans sa pure extériorité morphologique, le phénomène sensible. Mais l'on peut considérer néanmoins celui-ci comme la phénoménalisation de l'être physique sous-jacent.

Cela est d'une importance fondamentale pour le débat actuel sur les sciences cognitives, en tant qu'héritières de la phénoménologie et de la Gestalt. En effet, l'impossibilité jusqu'ici de comprendre le morphologique en tant qu'émergence d'un niveau qualitatif à partir du niveau physique, a conduit à comprendre celui-ci en termes psychologiques, comme projection d'une élaboration cognitive d'informations externes n'ayant quant à elles aucune signification cognitive (ce que l'on appelle le "solipsisme méthodologique"). Mais dans une optique morphodynamique, l'information servant d'entrée au système cognitif est morphologique et pas seulement physique. Elle est donc *pré*-organisée de façon cognitivement significative. Cette thèse permet d'approfondir le débat actuel sur la cognition et sur le contenu ontologique des représentations cognitives, que celles-ci soient linguistiques ou perceptives. Que, à travers l'ontologie morphologique-structurale, la phénoménologie devienne compatible avec l'objectivité physique représente un "tournant" (un "turning point") de l'épistémologie. Ce que nous appelons son "tournant morphologique".

#### 7.5 Vers un néo-aristotélisme morphodynamique

Insistons sur un dernier point, particulièrement important pour l'histoire des idées. Avec le "tournant morphologique", c'est le concept aristotélicien de "substance" qui se trouve constitué en objet. Autrement dit, ce qui avait été expulsé pour que puisse se constituer l'objectivité physique de la mécanique classique fait retour, mais à l'intérieur même d'une objectivité élargie. Ce point est particulièrement délicat. Depuis au moins Leibniz on sait qu'il existe un conflit métaphysique entre une mécanique de l'extériorité et une dynamique de l'intériorité (cf. plus haut). D'un point de vue mécaniste-atomiste (cf. Hobbes par exemple), les corps sont des agrégats et les qualités secondes ne sont que des apparences subjectives-relatives. Si l'on veut penser les essences morphologiques sensibles du côté de l'objet (et non pas comme des projections

psychologiques), alors d'une façon ou d'une autre, il faut se réappropriier la tradition aristotélicienne de la substance et des "formes substantielles".

Or, d'Aristote à Leibniz, il existe une logique assez prégnante de cette problématique qualitative. Les formes substantielles sont des principes dynamiques internes d'individuation, de stabilité et d'organisation morphologique des substrats matériels (cf. l'immense tradition métaphysique indexée par des termes comme "entéléchie", "eidos", "logos", "ousia", "morphé", etc.). Leur fonction est de rendre compte de la façon dont un substrat peut devenir le "sujet" de qualités et "d'accidents" prédicables. Autrement dit, elles font passer de la nature (physique + dynamique) au langage et à la perception. Elles relient le morphologique et l'intelligible. Leur statut est en quelque sorte "sémio-physique".

Le problème est que, jusqu'à la constitution de l'ontologie morphologique-structurale, ce concept de forme substantielle manquait de fondement ontologique. Soit on considérait les formes substantielles comme des entités abstraites et on en revenait à des conceptions nominalistes, soit on les traitait comme un fondement métaphysique (non objectif) et on aboutissait à des dynamismes vitalistes. D'où la liquidation de toute la tradition "entéléchique" de l'hylémorphisme et la scission subséquente entre physique et phénoménologie.

C'est ce hiatus transcendantal qui se trouve actuellement en train d'être comblé par le néo-aristotélisme thomien. D'où une nouvelle réflexion sur la catégorie de substance et le concept d'hylémorphisme. L'ontologie substantialiste des formes – qui, comme l'a bien expliqué Ernst Cassirer dans [4], avait été la grande victime de l'idéalisme transcendantal – se trouve enfin, après deux siècles de progrès incessants des disciplines mathématiques et physiques, elle-même objectivée.

## Bibliographie

- [1] ABRAHAM, R., MARSDEN, J. 1978, *Foundations of Mechanics*, Benjamin Cummings, New-York, Reading, 1978.
- [2] ARNOLD, V., 1976, *Méthodes mathématiques de la mécanique classique*, Mir, Moscou, 1976.
- [3] BOUVERESSE, J., 1987, *La Force de la règle*, Ed. de Minuit, Paris, 1987.
- [4] CASSIRER, E., 1983, *Les systèmes post-kantiens. Le problème de la connaissance dans la philosophie et la science des temps modernes*, Presses Universitaires du Septentrion, 1983.
- [5] CAVAILLES, J., 1938, *Sur la Logique et la théorie de la Science*, Presses Universitaires de France, Paris, 1938.
- [6] CHATELET, G., 1985, "Le retour de la monade", *Fundamenta Scientiae*, 6, (1985), 327-345.

- [7] COHEN-TANNOUJJI, G., SPIRO, M., 1986, *La Matière-Espace-Temps*, Fayard, Paris, 1986.
- [8] DESANTI, J.T., 1968, *Les idéalités mathématiques*, Le Seuil, Paris, 1968.
- [9] GIEDYMIN, J., 1981, *Science and Convention: Essays on the Origin and Significance of the Conventionalist Philosophy of Science*, Pergamon Press, Oxford, 1981.
- [10] GIL, F., 1988, *Preuves*, Aubier, Paris, 1988.
- [11] GRANGER, G., 1988, *Pour la connaissance philosophique*, Odile Jacob, Paris, 1988.
- [12] GRÜNBAUM, A., 1973, *Philosophical Problems of Space and Time*, Reidel, Dordrecht, 1973.
- [13] HARTHONG, J., REEB, G., 1989, "Intuitionnisme, 1984", *MNS* [1989], 213-252.
- [14] HUSSERL, E., 1913, *Ideen zu einer reinen Phänomenologie und phänomenologischen Philosophie*, (Husserliana III-IV), Max Niemeyer, Halle. *Idées Directrices pour une Phénoménologie*, (trad. P. Ricoeur), Gallimard, Paris, 1950.
- [15] ITZYKSON, C., ZUBER, J.B., 1985, *Quantum Field Theory*, Mc Graw-Hill, Singapour, 1985.
- [16] KANT, E., 1781-1787, *Critique de la Raison pure*, (trad. A.J.L. Delamarre et F. Marty), Pléiade, Gallimard, Paris, 1980.
- [17] KANT, E., 1786, *Premiers principes métaphysiques de la science de la Nature*, (trad. J. Gibelin), Vrin, Paris, 1971.
- [18] LAUTMAN, A., 1937-1939, *Essai sur l'unité des mathématiques*, Bourgois, Paris, 1977.
- [19] LE BELLAC, M., 1988, *Des phénomènes critiques aux champs de jauge*, InterEditions-C.N.R.S., Paris, 1988.
- [20] MISNER, C.W., THORNE, K.S., WHEELER, J.A., 1973, *Gravitation*, Freeman, San Francisco, 1973.
- [21] MNS, 1989, *La Mathématique non-standard*, (H. Barreau, J. Harthong, eds.), Éditions du C.N.R.S., Paris, 1989.
- [22] PARSONS, C., 1984, *Mathematics in Philosophy: Selected Essays*, Cornell University Press, 1984.
- [23] PATY, M., 1988, *La Matière dérobée*, Éditions des Archives Contemporaines, Paris, 1988.

- [24] PEIFFER-REUTER, R., 1989, “L’infini relatif chez Véronèse et Natorp. Un chapitre de la préhistoire de l’analyse non-standard”, *MNS* [1989], 117-142.
- [25] PETITOT, J., 1979-1982, “Infinitesimale”, “Locale/globale”, “Unità delle matematiche”, *Enciclopedia Einaudi*, VII, 443-521 ; VIII, 429-490 ; XV, 341-352 ; XV, 1034-1085, Einaudi, Turin, 1979-1982.
- [26] PETITOT, J., 1986, *Épistémologie des phénomènes critiques*, Document du C.A.M.S., Paris, École des Hautes Études en Sciences Sociales, 1986.
- [27] PETITOT, J., 1987a, “Refaire le ”Timée”. Introduction à la philosophie mathématique d’Albert Lautman”, *Revue d’Histoire des Sciences*, XL, 1, (1987), 79-115.
- [28] PETITOT, J., 1987b, “Mathématiques et ontologie”, *La scienza tra filosofia e Storia in Italia nel Novecento* (F. Minazzi, L. Zanzi, eds.), 191-211, Edizione della Presidenza del Consiglio dei Ministri, Rome, 1987.
- [29] PETITOT, J., 1988a, “Logique transcendantale, synthétique a priori et herméneutique mathématique des objectivités” (à paraître dans *Fundamenta Scientiae*).
- [30] PETITOT, J., 1988b, “Logique transcendantale et herméneutique mathématique’ : le problème de l’unité formelle et de la dynamique historique des objectivités scientifiques”, *Colloque ”Giulio Preti”*, Université de Milan (à paraître dans la *Rivista di Storia della Filosofia*).
- [31] PETITOT, J., 1989a, “Rappels sur l’analyse non standard”, *MNS* [1989], 187-209.
- [32] PETITOT, J., 1989b, “Le problème du physico-mathématique. Actualité de la doctrine transcendantale”, *Colloque “Un siècle de géométrie”*, Institut Henri Poincaré, Paris (à paraître chez Springer).
- [33] PROUST, J., 1986, *Questions de forme*, Fayard, Paris, 1985.
- [34] QUIGG, C., 1983, *Gauge Theories of the Strong, Weak, and Electromagnetic Interactions*, Benjamin-Cummings, Reading, 1983.
- [35] ROBINET, A., 1986, *Architectonique disjonctive, Automates systémiques et Idéalité transcendantale dans l’œuvre de G.W. Leibniz*, Vrin, Paris, 1986.
- [36] SALANSKIS, J.M., 1989, “Le potentiel et le virtuel”, *MNS* [1989], 275-303.
- [37] SHANKER, S.G., 1987, *Wittgenstein and the Turning-Point in the Philosophy of Mathematics*, State University of New-York Press, 1987.
- [38] SOURIAU, J.M., 1975, *Géométrie symplectique et physique mathématique*, Colloque International du C.N.R.S., 237, Paris, 1975.

- [39] VUILLEMIN, J., 1955, *Physique et métaphysique kantienne*, Presses Universitaires de France, Paris, 1955.
- [40] WANG, H., 1987, *Reflections on Kurt Gödel*, M.I.T. Press, Cambridge-MA, 1987.
- [41] WEINSTEIN, A., 1977, *Lectures on Symplectic Manifolds*, C.B.M.S., Conference Series, American Mathematical Society, 29, Providence, 1977.
- [42] WEYL, H., 1919, *Raum-Zeit-Materie: Vorlesungen über allgemeine Relativitätstheorie*, Springer, Berlin. Trad. anglaise H.L. Brose, *Space-Time-Matter*, Dover, New-York, 1922.
- [43] WILLARD, D., 1984, *Logic and the Objectivity of Knowledge*, Ohio, University Press, 1984.