

Centro Studi Enriques
Momenti della filosofia scientifica
italiana del Novecento

Venerdì 9 Maggio 2003 ore 17,00
Biblioteca Labronica - via del Forte S. Pietro 15, Livorno

JEAN PETITOT
CREA, Ecole Polytechnique, Paris
petitot@poly.polytechnique.fr

Le rationalisme critique italien
et
l'historicité du transcendantal

Le principal intérêt du rationalisme critique italien est, selon moi, d'avoir défini *les conditions de possibilité d'une historicisation du transcendantal*. Je parlerai en particulier d'Antonio Banfi qui est un précurseur de courants épistémologiques aussi importants que *l'épistémologie évolutionniste* de Popper, Campbell, Hayek et Toulmin ou que la théorie des *themata* de Gerald Holton. Les themata sont des structures conceptuelles ni vérifiables ni falsifiables qui servent de cadre aux progrès scientifiques et constituent en général des paires *antithétiques* (cf. les notions de *Weltbild* chez Planck et d'*aporie fondatrice* chez Thom). Ils relèvent d'une Antithétique de la Raison.

Ces conceptions naturalistes et empiristes de l'épistémologie *descriptive* sont sans doute essentiellement valides mais je considère qu'il faut les relier aux traditions de l'épistémologie *prescriptive*, en particulier transcendantale, et pour ce faire le rationalisme critique italien constitue un excellent guide.

Le problème de la dialectique entre vérité objective et valeur historique était une préoccupation majeure de Federigo Enriques. Comme le rappelle Ornella Pompeo Faracovi dans son texte "Sul 'neokantismo' di Enriques" (*Filosofia e storia del pensiero scientifico*), Enriques connaissait bien Kant et défendait une *actualité* de la philosophie transcendantale.

Comme le rappelle Giorgio Israël dans son commentaire du texte espagnol de 1920 "La evolución del concepto de la geometría y la escuela italiana durante los

últimos cincuenta años", celle-ci était centrée sur le problème crucial de la *géométrisation de la physique* et de son enrichissement par la théorie des groupes de Lie, le programme d'Erlangen de Felix Klein, les travaux de Levi-Civita et la relativité générale (au-delà du conflit avec Einstein), le conventionalisme de Poincaré (au-delà des critiques), etc. Pour Enriques, la géométrie et la physique

"sono spiriti fratelli"

"La Fisica theorica è in definitiva – come la Geometria – una costruzione sintetica del pensiero"

et

"si contrappone a quella [la mentalità] analitica." (p. 25)

La géométrisation de la physique signifie qu'opèrent des éléments à la fois non empiriques et non logiques (analytiques) dans la constitution de l'objectivité physique et que ces éléments donnent une actualité au problème kantien du synthétique a priori.

Mais admettre l'actualité physique du transcendantal c'est automatiquement admettre, comme le rappelle Ornella Pompeo Faracovi, que la raison pure ne peut plus être pensée

"come immobile al modo di Kant"

mais

"come sviluppo del pensiero nella storia" (p. 63).

Mon plan sera le suivant.

- I. Reprendre les bases de la conception transcendantale de l'objectivité.
- II. Montrer comment la tradition italienne du rationalisme critique de Banfi à Geymonat et Preti permet philosophiquement d'historiciser le transcendantal comme le souhaitait Enriques.
- III. Comment, conformément à la thèse d'Enriques, la géométrisation de la physique fournit une actualité à ce transcendantal historicisé.

I. LA STRUCTURE TRANSCENDANTALE DE LA CONNAISSANCE

Commençons par nous interroger sur la structure transcendantale de l'objectivité physique. Je le ferai en montrant que, dans son souci de donner un statut philosophique correct à son propre concept opératoire d'objectivité, la physique moderne quantique a redécouvert toutes les dimensions caractéristiques du concept transcendantal d'objectivité.

1. La disjonction être/phénomène (différence critique)

Les physiciens de la mécanique quantique, par exemple Bernard d'Espagnat, insistent depuis longtemps (cf. *Une incertaine réalité*) sur la différence être/phénomène:

“c'est la science elle-même qui (...) fournit aujourd'hui au penseur de pressantes raisons d'accepter la dualité (philosophique) de l'être et du phénomène”.¹

La physique moderne démontre ce que le rationalisme critique dit depuis toujours, à savoir que le concept ontologique de réalité substantielle indépendante *n'est pas un concept physiquement admissible*.

Les contradictions de l'élémentarité quantique renvoient à la difficulté fondamentale qu'il y a à atteindre l'objectivité scientifique malgré le caractère insécable de l'interaction entre l'objet et l'appareil de mesure. Pour le résoudre, les physiciens ont dû repenser les concepts basiques de phénomène, d'observation, de système, d'état, d'objet, de causalité, etc. et *restreindre leur application aux phénomènes* (Bohr).

On reconnaîtra là la base du point de vue transcendantal. C'est presque mot à mot du Kant. On admet l'hypothèse qu'il peut éventuellement y avoir une réalité ontologique “en-soi” sous-jacente aux phénomènes. Celle-ci reste toutefois inobservable et donc inaccessible car toute observable est définie par les moyens y donnant accès. Elle ne saurait par conséquent être *objet* d'une *connaissance* physique possible. Les théories physiques portent et ne peuvent porter que sur les manifestations de cette réalité, c'est-à-dire sur des *observables* micro-physiques. Le concept de phénomène reste donc ici défini, comme en physique classique, par une *réceptivité*.

Mais la réceptivité n'est plus notre réceptivité sensorielle adaptée aux phénomènes macro-physiques. Elle s'identifie à l'ensemble des appareils d'observation. C'est une “réceptivité d'appareil”. Son effet est inéliminable. De même que l'espace et le temps en physique classique, il produit un “voilement” de l'être par le phénomène. *L'impératif quantique de la réduction aux observables est la traduction de l'impératif transcendantal de réduction au phénomène*.

Il faut insister ici sur le fait que, même découplé de toute ontologie sous-jacente, un phénomène n'est pourtant pas une apparence. Il est *donné* et il existe une différence fondamentale entre le donné (*gegeben*) et le pensé (*gedacht*). Il y a des *formes* de la donation phénoménale qui jouent un rôle constitutif dans l'objectivité (problématique kantienne de l'Esthétique transcendantale).

2. La légalisation des phénomènes

La question se pose alors immédiatement : comment rejoindre l'objectivité? Pour y répondre, les physiciens ont retrouvé spontanément la thèse transcendantale : *il existe*

¹ d'Espagnat [1985], p.VII.

une légalité propre des phénomènes observables en tant que tels. Il n'y a pas à chercher une explication objective aux phénomènes à partir d'une inaccessible réalité ontologique sous-jacente. *On doit définir l'objectivité comme un ordre de légalité.* Ainsi prescriptivement définie comme légalité, l'objectivité se distingue de toute ontologie.

Les phénomènes 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 donc dans son principe un ordre *prescriptif* normatif (juridique) de légalité objective. Il existe par conséquent non seulement une différence critique entre être et phénomène, mais également une différence "objective" entre phénomène et objet d'expérience. Contrairement aux phénomènes, l'objet n'existe que qualifié conformément à des *normes*, à des *règles* éidético-constitutives définissant une essence objective régionale. Le concept normatif d'objet est présupposé à titre de condition de possibilité par toute activité scientifique. Il *anticipe* et *prédétermine* prescriptivement ce qui appartient en général et typiquement aux phénomènes de la région considérée. *Corrélat* de l'expérience, il possède une nature procédurale.

L'erreur récurrente des réalismes ontologiques est de confondre la dimension prescriptive de l'objet avec une dimension ontologique sous-jacente, dimension supplémentaire qui existerait en soi "derrière" les phénomènes et serait tout à la fois expérimentalement inaccessible, théoriquement inconnaissable et malgré tout causalement efficace. En mécanique quantique son avatar est fourni par les tentatives d'élaborer des théories à *variables cachées*.

Comment peut s'opérer la légalisation? L'idée directrice est assez simple. Elle consiste essentiellement à *interpréter les catégories de l'objectivité à partir des instances de donation des phénomènes*, c.a.d. à partir des formes de la manifestation. Comme l'interprétation n'est opératoire que si elle est mathématique, il faut que ces formes soient elles-mêmes mathématisées. Dans toute objectivité au sens transcendantal opère donc *une herméneutique mathématique des catégories objectives*. Elle est la forme mathématique de l'impératif de restriction des catégories aux observables (ce que Kant appelait la "Dédution" c.a.d. la justification de la restriction de l'application des catégories aux phénomènes).

Chez Kant, la problématique des formes de donation et de leur mathématisation correspond à l'Esthétique transcendantale. Quant à l'interprétation des catégories elle s'effectue à un double niveau : d'abord leur "schématisation" puis, à un niveau beaucoup plus profond, leur "construction" mathématique. En général la construction mathématique transforme de façon radicale *le sens* des catégories. *D'où une disjonction caractéristique entre connaissance scientifique et sens commun.*

3. L'Esthétique transcendantale et ses conséquences dans l'Analytique des Principes

De façon générale, la fonction d'une Esthétique transcendantale dans une stratégie transcendantale de constitution d'objectivité est caractérisée par quatre exigences :

- (i) déterminer des formes de la manifestation qui permettent de mettre entre parenthèses le contenu “subjectif” du concept, par définition *relationnel* (au sens d'une relation sujet-monde), de phénomène;
- (ii) manifester une *relativité* violant les principes de toute ontologie substantialiste;
- (iii) fournir une base mathématique pour la *construction* des catégories dynamiques (physiques) de substance, de causalité et d'interaction;
- (iv) conduire à une interprétation non plus absolue (métaphysique) mais seulement relative (physique) des catégories *modales* de possibilité (potentialité, virtualité), de réalité (actualité) et de nécessité.

Ce dernier point est épistémologiquement crucial. Ce sont en effet les catégories modales qui font en général le plus question et la plupart des problèmes philosophiques posés par le réalisme proviennent d'une méconnaissance *du caractère modal de la catégorie de réalité*. Celui-ci se manifeste entre autres par le fait que certaines “propriétés” objectives ne résistent pas à la contrafactualité et peuvent, sans contradiction logique, être à la fois affirmées et niées (i.e. ne peuvent pas être possédées par des objets substantiels individués au sens “ontologique” des verbes “posséder” ou “avoir”).

C'est la relativité de la position et de la vitesse en mécanique classique. En mécanique quantique, les amplitudes de probabilité expriment des potentialités qui sont actualisées par des opérations de mesure. Ce statut relationnel (souvent souligné par Bohr) du concept d'état quantique ainsi que son interprétation en termes d'une extension du concept de relativité, ont été fort bien formulés par Vladimir Fock.

“The probabilities expressed by the wave function are the probabilities of some result of the interaction of the micro-object and the instrument (of some reading on the instrument). The wave function itself can be interpreted as the reflection of the potential possibilities of such an interaction of the micro-object (prepared in a definite way) with various types of instruments. A quantum mechanical description of an object by means of a wave function corresponds to the relativity requirement with respect to the means of observation. This extends the concept of relativity with respect to the reference system familiar in classical physics.”²

² Cité par Max Jammer (1974), p. 202.

En micro-physique quantique, l'Esthétique transcendantale a muté de nature. *Elle n'est plus esthésique mais instrumentale* (et d'ailleurs, notons-le, la perception aussi est une mesure). Sa place reste toutefois occupée et de nombreuses difficultés épistémologiques de la première mécanique quantique venaient précisément de la difficulté qu'il y avait à reconnaître le caractère *strictement objectif*, c.a.d. ni ontologique, ni subjectif, de l'indéterminisme lié au concept d'amplitude de probabilité. *Le problème est l'exact analogue pour la micro-physique de celui de l'ambivalence du réalisme empirique et de l'idéalité transcendantale de l'espace en mécanique classique.*

Bref, la relation entre phénomène et réalité n'est pas binaire. Elle est ternaire : en plus du phénomène observable, et de la réalité indépendante inconnaissable qui en est le fondement, elle implique le concept d'objet en tant que concept légal et normatif. L'objet n'est pas donné dans la donation du phénomène. Il est la position objectale des actes de légalisation des phénomènes. Il est prescriptif. Il est le corrélat des conditions de possibilité de l'expérience. Cette thèse transcendantaliste typique a également été retrouvée par les physiciens. On pourra par exemple lire de fort belles pages de Gilles Cohen-Tanoudji sur le fait 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 corrélatif des actes objectivants) ou que “l'essence du physique” est la “rationalité expérimentale” (le concept d'expérience comme méta-référent).³

4. L'antinomie dialectique entre le réalisme ontologique et le phénoménisme mentaliste

Etant donné la structure transcendantale de l'objectivité, il faut dépasser le conflit dialectique opposant un réalisme ontologique physicaliste (la science parle de la réalité indépendante) à un idéalisme phénoméniste mentaliste (la science n'est qu'une construction sémiotique sans contenu objectif).

Le concept d'objectivité *faible* en épistémologie quantique “démontre” en quelque sorte le bien fondé du concept transcendantal d'objectivité : des composantes épistémiques (les conditions théoriques et expérimentales d'observabilité, i.e. d'accès) sont, comme le disait Bohr, un “élément intrinsèque” — i.e. *constitutif* — “de tout phénomène auquel l'expression “réalité physique” peut s'appliquer”.⁴

Bref, on peut dire que, dans la microphysique quantique, *l'épistémologie transcendantale devient en quelque sorte physiquement démontrable.*

³ Cohen-Tannoudji, Spiro [1986].

⁴ Bohr [1935], p. 696.

5. Le conflit dialectique entre la description physique objective de la réalité empirique et la logique naturelle

La logique naturelle du sens commun est associée à la langue naturelle et décrit spontanément une réalité supposée être indépendante en termes de substances, d'accidents, de propriétés et de relations. Lui accorder un contenu ontologique conduit à des antinomies dialectiques.

En particulier, indépendamment d'une mesure, on ne peut pas dire qu'une grandeur observable A possède ("a") telle valeur bien définie et que celle-ci serait une propriété du système S considéré. Une des principales caractéristiques de la coupure galiléenne a été d'effectuer cette opération pour la localisation des corps matériels. Chez Aristote (théorie des lieux naturels), la localisation est une propriété des corps: un corps a a une position bien définie en tant que propriété. Chez Galilée, le principe de relativité disjoint localisation et propriétés. La théorie quantique a généralisé cette dimension de l'objectivité.

Selon Bernard d'Espagnat, la logique naturelle est donc *mentale et non objective*. Le problème sous-jacent est, comme nous l'avons vu plus haut, que la *réalité* attribuée aux propriétés est en fait une *modalité*. A ce titre elle est entièrement dépendante d'une procédure de constitution d'objectivité. En traiter de façon absolue (i.e. métaphysique, non dépendante d'une telle procédure) conduit à des antinomies dialectiques. Un tel conflit entre objectivité physique et dogmatisme logique est également caractéristique de l'approche transcendantale.

II. BANFI ET LA QUESTION THEORIQUE DES *PRINCIPI* : COMMENT HISTORICISER KANT SANS L'HEGELIANISER ?

1. Vérité et devenir

J'aimerais maintenant expliquer dans une seconde partie pourquoi je m'intéresse à Antonio Banfi, sans conteste la plus puissante pensée rationaliste italienne d'avant-guerre. Son œuvre maîtresse : *Principi di una teoria della ragione* me paraît être encore d'une grande actualité. Il expose les éléments d'un rationalisme critique permettant de synthétiser les divers aspects du problème gnoséologique tel qu'il se posait en son temps : du positivisme phénoméniste de Mach et du réalisme logique de Russell à l'aporétique de Hartmann, du rationalisme idéaliste de Brunschvicg et de Hamelin au néo-kantisme de l'Ecole de Marbourg, pour ne pas parler de la phénoménologie husserlienne.

Les *Principi* tentent de généraliser la doctrine transcendantale (kantienne) de la constitution de l'objectivité bien au-delà de l'objectivité physique en tenant compte aussi des "objectivités" culturelles et symboliques. On pourrait formuler ainsi leur question

centrale : *comment actualiser la Logique transcendantale de la constitution des objectivités en la pluralisant et en l'historicisant mais sans l'affaiblir ?* L'enjeu est crucial car c'est de lui que dépend toute l'actualité du rationalisme critique.

Le problème est compliqué car il exige de "désobjectiver" le transcendantal. En effet, il faut satisfaire deux impératifs:

- (i) toute constitution transcendantale doit déboucher lors de sa spécification mathématique sur un arrachement aux données immédiates de l'expérience vécue, c'est-à-dire sur ce que Banfi appelait avec Cassirer une *résolution fonctionnelle*, et
- (ii) toute pluralisation des procédures transcendantales de constitution doit être solidaire du *devenir historique* des objectivités.

Or, il est impossible de satisfaire à ces deux impératifs dans le cadre d'une philosophie de la conscience comme par exemple la phénoménologie (qui pluralise le kantisme) où les ontologies régionales possèdent un fondement originaire dans la conscience.

Si l'on approfondit philosophiquement cette question, on en arrive à la nécessité de penser une dialectique à la fois transcendantale *et* historique qui serait *immanente aux a priori eidético-constitutifs* des objectivités et aux formalismes mathématiques qui les spécifient. Cela est évidemment fort difficile car une Dialectique historique et une Logique transcendantale s'opposent apparemment d'une façon telle que si l'on veut les unifier — de façon par exemple hégélienne —, ce ne peut être, semble-t-il, qu'en sacrifiant toute possibilité d'édifier une théorie de la connaissance digne de ce nom compatible aux contenus et aux développements des sciences effectives. En effet, comme l'ont montré de nombreux auteurs, en particulier Alexis Philonenko et Jürgen Habermas, Hegel n'a pu dégager la vérité "spéculative" de la Dialectique kantienne — à savoir que la contradiction (par exemple les antinomies) est intérieure, rationnelle et concrète et non pas extérieure, formelle et abstraite — qu'en la disjoignant de la question de *l'applicabilité* des catégories, donc des conditions formelles de l'objectivité et de la mathématisation de la nature.

Peut-on, par conséquent, *historiciser* Kant sans pour autant l'hégélianiser ? Peut-on historiciser la Logique transcendantale et la façon dont les mathématiques s'impliquent constitutivement dans l'expérience objective sans pour autant effacer la ligne de démarcation entre Analytique et Dialectique ? Comment pluraliser et dialectiser les principes eidético-constitutifs des ontologies régionales tout en maintenant la transcendance des vérités objectives, autrement dit sans les dissoudre spéculativement ni les réduire pragmatiquement à de simples maximes operationalistes. La difficulté semble insurmontable. C'est elle que visent à résoudre les *Principi*.

2. Quelques points de la doctrine de Banfi

2.1. La théoricité comme autonomie et universalité du rationnel

Le point de départ des *Principi* se trouve dans le postulat d'une *autonomie* de la théoricité. "Autonomie" signifie ici un arrachement au sens commun perceptif, linguistique et pragmatique ainsi qu'à l'abstraction métaphysique, et cela au profit d'une *universalité* possédant un contenu proprement objectif. C'est selon Banfi le mouvement de la résolution de l'empirique à travers la synthèse transcendantale. La théoricité s'y autonomise relativement à la multiplicité des contenus empiriques et des méthodes particulières. Elle devient un *moment* de toute science qui doit se dépasser dans une unité systématique et formelle. Dans les sciences de la nature, ce mouvement conduit du moment expérimental au moment rationnel. Dans les sciences de la culture, il conduit du moment normatif au moment historique.

La thèse qui permet à Banfi d'historiciser le transcendantal est que l'autonomie rationnelle de la théoricité est celle d'un *principe régulateur* systématique se manifestant à travers des *Idées* dialectiques *problématiques*. Ici Banfi fusionne la Dialectique transcendantale kantienne de la *Critique de la Raison pure* avec ce que Kant dit au début de la *Critique du jugement* sur le système des lois de la nature, l'Idée régulatrice de système et le jugement réfléchissant. Il y a une *problématicité* du transcendantal qui n'est pas une négativité hégélienne mais interdit néanmoins une reconstruction de la connaissance qui serait essentielle, indépendante des pratiques scientifiques effectives.

Ce point est crucial chez Banfi car *c'est en tant que problématicité infinie que la théoricité acquiert la forme infinie d'un développement historique*. Libérée des contenus empiriques concrets, la synthèse gnoséologique est formelle et transcendantale. Mais cela ne l'empêche en rien d'être essentiellement incomplète et inachevée, et donc historiquement ouverte. *La connaissance n'étant pas une adéquation représentative à un être en soi, elle demeure en devenir*. Elle constitue un *horizon rationnel* dont l'effectuation relève d'une tâche infinie.

Banfi insiste avec force sur le fait que la connaissance rationnelle est une "*résolution*" des contenus empiriques. Dans le mouvement de la rationalité scientifique, les déterminations empiriques se trouvent reconduites à travers une *légalisation rationnelle* à la *corrélation transcendantale* Sujet/Objet. Cette corrélation se distingue de toute relation réelle entre un ego psychologique et un monde empirique. Elle fonctionne comme une loi régulatrice selon laquelle

"la complessità dell'esperienza tende a *trasparsi* in un sistema unitario in cui si giustifichi il divenire stesso della sua verità" (p. 77).⁵

⁵ La pagination des citations des *Principi* sera indiquée dans le texte.

La "trasposizione" permet de penser ensemble *le devenir et la vérité*. La "risoluzione" opérée par la synthèse gnoséologique dissout le contenu réaliste ontologique des concepts scientifiques. *En les mathématisant elle en fait des fonctions* (au sens de Cassirer) *relativement à une loi transcendantale*. C'est pourquoi les sciences peuvent, dans un même mouvement, *créer continûment leurs systèmes catégoriaux tout en s'y subordonnant*. Les concepts catégoriaux ne sont pas des formes a priori *fixes* de la réalité mais des *facteurs de transposition* des déterminations empiriques dans une universalité gouvernée par une loi fonctionnelle unitaire.

Banfi radicalise ainsi la différence critique fondamentale entre phénomène donné-présenté et objet légalisé-construit. Il distingue fort nettement :

- (i) d'un côté, les moments phénoménologiques de la connaissance actualisée, c'est-à-dire ses modes de détermination concrète sur le plan de l'expérience; et
- (ii) d'un autre côté l'analyse transcendantale de l'Idée de connaissance, c'est-à-dire

“il momento di legalità *autonoma* che fonda la struttura *unitaria* dell'esperienza ed è indipendente dagli aspetti determinati di questa”(p. 9).

Il faut insister sur l'irréductibilité de la corrélation Sujet/Objet à toute relation empirique entre une conscience concrète et une réalité indépendante (transcendante). L'objet ne s'identifie *ni* au phénomène donné *ni* à l'être en soi. En tant que construction catégoriale il constitue une *norme méthodologique* pour la détermination théorique des phénomènes.

2.2. Critique de certaines mésinterprétations possibles

A partir de ces idées de base un certain nombre d'erreurs épistémologiques deviennent évidentes.

- (a) La croyance qu'en tant que synthèse transcendantale, la connaissance peut s'obtenir *par abstraction* à partir des connaissances empiriques. Cela consiste à éliminer la nature *transpositive* de la résolution rationnelle, autrement dit à effacer la différence critique phénomène/objet.
- (b) La connaissance comme adéquation. Si le savoir scientifique dépasse le sens commun (en résolvant fonctionnellement les moments phénoménologiques de l'expérience), il ne possède pas *de valeur représentative*. Cela ne l'empêche en rien d'être empiriquement valide puisque ses structures catégoriales législatrices n'ont de légitimité qu'appliquées à l'expérience (cf. la Dédution métaphysique kantienne des catégories). Le réalisme interprète l'autonomie rationnelle comme une réalité en soi possédant un contenu absolu. Comme il est intenable comme tel, il engendre toujours par contrecoup un scepticisme tout aussi intenable :

“ogni forma di scetticismo è l'immediata risoluzione negativa di una posizione dogmatica”.

(c) La version phénoménologique du réalisme dogmatique. Elle consiste non plus à projeter la corrélation Sujet/Objet dans l'être mais à se la donner dans la *conscience*. En conséquence, la conscience devient le principe réel de la connaissance. S'il s'agit d'une conscience formelle, il devient alors impossible de comprendre le devenir historique de la connaissance comme processus indéfini de production d'ontogénèses. S'il s'agit d'une conscience concrète où devrait s'actualiser la synthèse transcendantale (psychologisme), il devient alors impossible de comprendre l'universalité objective de la connaissance. Pour dépasser ce conflit, il faut comprendre que la corrélation

“è posta come limite ideale, come legge immanente e termine infinito di un processo in cui la particolare determinazione extraconoscitiva dei due termini deve essere risolta” (p. 25)

et que, par conséquent, la conscience

“nella sua universalità formalmente astratta, non è che la forma fenomenologica secondo cui la sintesi trascendentale del conoscere ha nell'io la sua attualità” (p. 35).

2.3. La problématicité et le devenir

Banfi revient de façon récurrente sur la *problématicité* de la corrélation transcendantale pour dénoncer son hypostase soit dans l'être, soit dans la conscience.

Comme nous l'avons déjà indiqué, cette problématicité est celle d'Idées dialectiques et sa loi est *l'antinomie*. Pour Banfi, les antinomies fonctionnent comme “delle leggi di risoluzione trascendentale dell'essere”. Sur ce point Banfi rejoint l'aporétique de Nicolai Hartmann et non pas la dialectique de Hegel.

On voit ainsi coexister chez Banfi — ce point est capital — un système d'ontologies régionales *et* un système d'Idées problématiques exprimant respectivement la positivité et la négativité de la connaissance. Leur solidarité est celle des deux moments de la rationalité que sont respectivement l'universalité et l'autonomie.

L'universalité correspond au moment — spécifiquement *scientifique* — d'une résolution du divers empirique conformément à l'essence objective d'une ontologie régionale. D'où un premier système (positivité). Quant à l'autonomie, elle correspond au moment — spécifiquement *philosophique* — d'une systématisation indépendante des contenus. D'où un deuxième système (négativité). En rester à l'universalité c'est en rester à un empirisme positiviste. En rester à l'autonomie c'est en rester à un dogmatisme métaphysique. Toute la difficulté est d'unifier rationnellement les deux systèmes en comprenant que l'universalité résolutive de l'expérience se fait conformément à des ontologies régionales *non données* mais *constituées* et admettant comme *horizon* la téléologie d'une systématicité autonome. C'est ici que se joue la Raison et qu'il devient

capital de ne plus définir les ontologies régionales eidétiquement et abstraitement — à la Husserl — , mais bien constructivement et transcendantale — à la Kant.

Le système rationnel ainsi défini à la fois analytiquement et dialectiquement possède un statut *interprétatif*. L'Idée problématique fournissant une unité de signification pour la résolution de l'expérience, il fonctionne en quelque sorte comme une *herméneutique* des objectivités transcendantalelement constituées. C'est d'ailleurs pourquoi il est dogmatique de le projeter dans l'être.

3. L'actualité des *Principi*

Les thèses banfiennes sont d'une remarquable actualité. Nous venons de voir que chez Banfi la résolution fonctionnelle du donné empirique est à la fois théorétique (moment scientifique de l'universalité et système des ontologies régionales) et dialectique (moment philosophique de l'autonomie et système des Idées problématiques). Mais quel rapport s'y établit-il *entre le constitutif et l'interprétatif*, entre le déterminant et le réfléchissant ? Nous rencontrons ici une difficulté inhérente à toute historicisation non hégélienne du kantisme. Jusqu'ici deux voies semblent avoir été prospectées.

(i) Une voie phénoménologique cherchant à dégager des ontologies régionales immanentes à la conscience. Malgré les efforts de Husserl, elle est demeurée totalement séparée du devenir effectif des sciences particulières et de leur mouvement résolutoire, théorético-mathématique, de l'expérience.

(ii) Une voie “réfléchissante” cherchant à affaiblir la problématique de la constitution, par exemple en généralisant la *Critique du Jugement* pour la hausser au rang d'une épistémologie. Elle conduit à concevoir les essences régionales comme des *quasi*-ontologies relevant d'autant de Critiques du jugement régionales. Elle permet évidemment d'introduire une problématique des horizons interprétatifs et de la résolution dialectique. Mais au prix d'un renoncement à l'objectivité au profit de *l'intersubjectivité*.

La voie banfienne paraît intermédiaire. Pour la préciser, revenons un instant sur son rapport, si profond, à Kant.

3.1 Les catégories et le jugement

Comme nous l'avons vu, Banfi définit *fonctionnellement*, comme Cassirer, les concepts scientifiques théoriques : fonctionnellement c'est-à-dire non pas par abstraction mais comme moment proprement rationnel de la connaissance. Ainsi conçue, la fonction méta-empirique du concept est *d'actualiser* la théoricité comme forme universelle de l'autonomie de la synthèse gnoséologique. Le concept

“è la posizione del contenuto del conoscere per l'universale sistema della ragione” (p. 66).

Il n'est pas abstrait et c'est pourquoi la connaissance scientifique n'est pas représentative.

On ne saurait trop insister sur ce point. D'abord, c'est à partir de lui que Banfi critique le logicisme et le formalisme dans leur prétention à se substituer à une authentique Logique transcendantale. En fixant le concept comme entité *abstraite idéale* — et donc en niant sa nature fonctionnelle — on le réduit à une simple unité formelle normative pour le donné empirique. Dans ce cas — et c'est l'empirisme logique —

“il momento razionale è posto come *estrinseco* alla determinazione concreta del conoscere” (p. 68).

(i) L'idéalisme psychologique met en relief le moment *intuitif* du concept, mais en le réduisant aux seules données sensibles (absence d'Esthétique transcendantale), ce qui le conduit à lui dénier toute portée véritablement objective;

(ii) l'idéalisme logique met en relief le moment *rationnel* du concept, mais en le pensant sous la catégorie de l'être purement formel (absence de Logique transcendantale), ce qui le conduit à lui dénier tout contenu spécifiquement régional.

Pour Banfi, le concept théorique doit donc être conçu de façon kantienne, *ni empirique ni logico-formelle*, comme *loi* de résolution. Le *jugement scientifique* est irréductible à la fois à sa forme logique et à son contenu empirique. Si on l'y réduit, *alors l'autonomie rationnelle s'identifie à la nécessité psychologique ou logique* et il devient *impossible* de penser l'autonomie *historiquement et dialectiquement* comme “sfera della libertà et della produttività infinita” (p. 87).

4. Geymonat et Preti

Ce qui précède montre clairement que Banfi est bien un précurseur de courants épistémologiques comme l'épistémologie évolutionniste ou la théorie des themata de Holton. En fait, avec ses successeurs, en particulier Ludovico Geymonat et Giulio Preti, le rationalisme critique qu'il représente est celui qui est allé le plus loin dans la compréhension *de la dialectique entre la vérité objective et la valeur historique*.

Geymonat a repris (et a même introduit avant guerre en Italie) la doctrine logico-linguistique du néo-positivisme. Mais il en a rapidement dénoncé la négligence à l'égard de l'histoire et sa méconnaissance d'une

“storicità della scienza in quanto scienza, non della scienza in quanto filosofia”,

Pour lui le problème théorique fondamental était :

“di riuscire a inserire, all'interno della concezione neo-positivistica, l'istanza della storia”.ⁱ

L'appel à la dimension historique permet de dépasser les prétentions du conventionnalisme naïf (lequel voudrait réduire les théories à des hypothèses arbitraires privées de portée cognitive et ontologique) en reconnaissant le caractère *évolutionniste* (et donc sélectif au sens des théories de l'évolution) du savoir scientifique au cours de son histoire. Mais les thèses évolutionnistes ne sont pourtant pas suffisantes car il faut aussi comprendre *les conditions de possibilité* d'une évolution de la vérité objective et de la valeur historique. Et c'est le plus difficile.

Quant à Giulio Preti il a repris lui aussi le problème critico-phénoménologique de Banfi en essayant de l'articuler aux thèses de l'empirisme et du positivisme logiques. Pour lui les contenus transcendants sont de nature logique. Ce sont des règles formelles permettant, en la transposant et en la systématisant, de conférer une intelligibilité à l'expérience en opérant la *traduction* entre, d'un côté, des protocoles empiriques exprimés dans un langage d'observation et, d'un autre côté, des langages théoriques formalisés. A ce titre, les catégories spécifiques des ontologies régionales sont des a priori formels, conventionnels et historiques possédant le statut de cadres pour l'interprétation théorique des phénomènes.

La relation entre les théories scientifiques formalisées et les langages de choses dénotatifs est celle d'une *traduction* — d'une transposition au sens de Banfi — opérée à travers les catégories régionales. Il y s'agit de *l'interprétation formelle (logico-mathématique) de la légalisation catégoriale des objets*.

Pour *l'unité* de la science est celle de la traduction progressive et indéfinie du langage de choses dans des langages scientifiques formalisés, celle de la transposition *fonctionnelle* et de la résolution *rationnelle* des moments phénoménologiques de l'expérience.

Ici réapparaît, comme chez Banfi, la question de *l'historicité* des objectivités scientifiques. Comment développer

“la dinamica storica della scienza nella sua unità formale”.

III. LA GEOMETRISATION DE LA PHYSIQUE : LES PRINCIPES DE SYMETRIE ET LA CONSTRUCTION DES CATEGORIES “DYNAMIQUES” DE SUBSTANCE, DE CAUSALITE ET D'INTERACTION

1. La téléologie transcendantale des théories physiques

Mon hypothèse de travail est qu'il existe une structure transcendantale des théories physiques postérieures à la Mécanique classique et une *histoire transcendantale* de ces théories. Celle-ci correspond à la *géométrisation de la physique* dont parlait Enriques et possède trois aspects:

- (i) L'approfondissement des moments transcendants de la Mécanique classique tels que Kant les avait développés dans *Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft*.
 - (ii) La théorisation du système des forces fondamentales *primitives internes* à la matière (et non pas seulement dérivatives externes comme les forces mécaniques).
 - (iii) La géométrisation proprement dite, c'est-à-dire la *construction en un sens mathématique radical* des catégories dynamiques de substance, de causalité et d'interaction, leur engendrement à partir d'un *élargissement des principes de relativité*.
- J'ai étudié ailleurs trois exemples particulièrement spectaculaires.

2. Le théorème de Noether et la construction de la catégorie de substance

Le premier exemple d'approfondissement de moment transcendantal est fourni par le théorème de Noether. Ce théorème fondamental possède selon moi un sens non seulement physique, mais également transcendantal éminent. Il montre en effet que, sous la double condition :

- (i) de pouvoir décrire mathématiquement la relation entre Cinématique et Dynamique par l'action d'un groupe de relativité sur l'espace de phases du système physique considéré;
 - (ii) de disposer d'une formulation variationnelle (lagrangienne ou hamiltonienne) de la Mécanique (i.e. des lois du mouvement),
- alors il existe *une corrélation explicite entre les symétries et les grandeurs conservées*. Cela correspond à la *construction* (au sens fort) de la catégorie de substance, déjà réduite par Kant aux lois de conservation.

De façon plus précise, le formalisme lagrangien-hamiltonien qui domine la physique permet d'engendrer les grandeurs physiques d'un système à partir de ses grandeurs cinématiques extensives (positions) et intensives (vitesses). Il permet en quelque sorte de *convertir* du “mathématique” en “dynamique”. Le théorème de Noether dit que si un lagrangien est invariant sous un groupe de relativité à un paramètre (i.e. de dimension 1), alors il existe une grandeur physique conservée au cours du mouvement (une intégrale première). Il relie donc:

- (i) principes de relativité (inobservabilité de grandeurs cinématiques absolues),
- (ii) symétries (invariance du lagrangien) et
- (iii) lois de conservation (observabilité) de grandeurs physiques corrélatives.

C'est en quelque sorte *le* théorème qui donne raison à Kant au-delà de tout ce qu'il pouvait imaginer et espérer.

Les exemples les plus classiques corrélerent :

- (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.

J'ai exposé ailleurs ⁶ les aspects modernes de ce théorème en géométrie symplectique et en particulier le formalisme de l'application moment, c.a.d. la façon dont on peut associer à un groupe de Lie qui opère symplectiquement sur un espace de phases des intégrales premières a priori et cela de façon indépendante de tout hamiltonien (mais si un hamiltonien est invariant sous l'action du groupe alors il possède ces intégrales premières). Ces résultats renforcent considérablement le contenu *synthétique a priori* du théorème de Noether.

3. La relativité générale et la construction de la catégorie de cause (du concept de force)

Mon deuxième exemple est celui de la Relativité Générale (RG). On a souvent dit que la RG avait rendu impossible une lecture transcendantale de la physique moderne. Je pense toutefois que c'est exactement le contraire qui est vrai. La structure transcendantale de la RG est manifeste et remarquable. Mais elle change profondément le contenu kantien des moments transcendants. Comme l'a bien vu Cassirer dans son ouvrage de 1921 *Zur Einsteinschen Relativitätstheorie*, elle les approfondit. Ce n'est que si l'on interprète ces contenus de façon fixiste dans le cadre d'une interprétation cognitive innéiste que l'on peut conclure à l'obligation d'abandonner une lecture transcendantale. En fait, transcendantalement parlant, la RG correspond à la *construction de la catégorie de cause (de force)*.

Dans l'interprétation transcendantale, cette construction consiste à ramener la force à un principe de relativité, c'est-à-dire à une généralisation de l'Esthétique transcendantale. C'est bien ce que fait la RG. En RG, les moments transcendants que sont les Axiomes de l'intuition (avec la Cinématique correspondante) et les Anticipations de la Perception (avec la Dynamique correspondante) sont passés du niveau *global et métrique*, qui était le leur en mécanique newtonienne, au niveau *local et différentiable* sous-jacent. Cela n'était évidemment possible qu'après la conquête mathématique de ce niveau par Riemann. Le groupe de relativité de la théorie devient alors le groupe des *difféomorphismes* de l'espace-temps. Les contraintes de covariance deviennent par conséquent beaucoup plus importantes et cela permet de ramener la force, donc la catégorie de cause, à un principe d'inertie généralisé. Les a priori géométriques ne sont plus dès lors de nature métrique mais de nature différentielle et concernent, par exemple, la cohomologie des formes différentielles. ⁷

⁶ Petitot [1992a].

⁷ Dans Petitot [1992a] j'ai analysé en détail dans cette perspective la géométrie-dynamique de Wheeler et son débat avec Grünbaum (pour ce dernier, cf. aussi plus bas section V).

De façon un peu plus précise, soit \mathcal{E} l'espace-temps muni de sa métrique localement Minkowskienne $g_{\mu\nu}$. Si e_α est une base de l'espace vectoriel tangent à \mathcal{E} en $x \in T_x\mathcal{E}$ et si ω^α est la base duale de l'espace cotangent $T_x^*\mathcal{E}$, le tenseur de courbure de Riemann est défini en termes de composantes par $R^\alpha{}_{\beta\gamma\delta} = \langle \omega^\alpha, [\nabla_\gamma, \nabla_\delta] e_\beta \rangle$ (où ∇ est la dérivation covariante, où $[\bullet, \bullet]$ est à la fois le crochet de Lie de l'algèbre de Lie des champs de vecteurs et le commutateur des opérateurs différentiels et où, pour $\omega \in T_x^*\mathcal{E}$ et $v \in T_x\mathcal{E}$, $\langle \omega, v \rangle = \omega(v)$).

Pour $\omega \in T_x^*\mathcal{E}$ et $u, v, w \in T_x\mathcal{E}$, on a $R(\omega, u, v, w) = \langle \omega, R(v, w)u \rangle$ avec $R(v, w) = [\nabla_v, \nabla_w] - \nabla_{[v, w]}$.

Par contraction du tenseur de courbure de Riemann, on construit le tenseur de courbure de Ricci $R_{\mu\nu} = R^\alpha{}_{\mu\alpha\nu}$. Par une seconde contraction, on construit la courbure scalaire $R = R^\mu{}_\mu$. Le tenseur de courbure d'Einstein est donné par $G = \text{Ricci} - 1/2gR$ ($g = \text{ldet}(g_{\mu\nu})$). Il satisfait *pour des raisons a priori* — purement géométriques, en fait cohomologiques —, les identités de Bianchi $\nabla G \equiv 0$.

Dans les équations d'Einstein $G = 8\pi T$ (où T est le tenseur d'impulsion énergie), l'identité $\nabla T \equiv 0$ formule le principe de la conservation de l'énergie (l'expression de la catégorie de substance). Elle devient une *conséquence* de la géométrie de l'espace-temps car elle dérive de *l'a priori synthétique* $\nabla G \equiv 0$.

Comme Hilbert l'a montré dès 1921 et comme cela a été développé dans les années 60 par Wheeler, Arnowitt, Deser et Misner,⁸ il est possible de dériver la métrique $g_{\mu\nu}$ de l'espace temps \mathcal{E} d'un principe variationnel en prenant la courbure scalaire R comme densité lagrangienne. L'action est alors :

$$S = \frac{1}{16\pi} \int_{\mathcal{E}} R \sqrt{|g|} d^4x.$$

On déduit de cette formule un système hamiltonien (de dimension infinie) sur l'espace fonctionnel des métriques.

Cela montre qu'en RG la métrique ne relève plus, comme cela était le cas en mécanique rationnelle, des catégories mathématiques, mais bien des catégories dynamiques. Elle devient une entité physique qui doit elle-même être déterminée. Mais cela ne signifie pas pour autant l'invalidation de la logique transcendantale. Bien au contraire. Cela signifie seulement que l'Esthétique Transcendantale est passée du niveau métrique global au niveau différentiable local. Comme nous l'avons dit plus haut, le groupe de relativité n'est plus désormais le groupe de Galilée ou le groupe de Lorentz mais le groupe $\text{Diff}(\mathcal{E})$ des difféomorphismes de \mathcal{E} . C'est donc à ce niveau que se situe

⁸ Cf. Misner, Thorne, Wheeler [1973].

désormais le synthétique a priori. Ce déplacement de niveau permet d'absorber la catégorie de force dans un principe de relativité élargi et, par là-même, de la construire.

4. Les théories de jauge et la construction de la catégorie d'interaction

L'exemple est encore plus spectaculaire avec les théories de jauge où c'est non seulement la catégorie de force (comme dans la relativité générale) mais aussi *la catégorie d'interaction* qui se trouve ramenée à des principes de symétries élargis.

Depuis les travaux pionniers de Chen Ning Yang et Robert Mills (1954) sur l'invariance de jauge concernant l'isospin, il existe dans les théories de jauge *deux classes* de champs.

1) *Les champs fermioniques de matière* qui sont interprétés comme des *sections* de fibrés sur l'espace-temps. Les coordonnées des fibres sont les degrés *internes* de liberté. Le groupe structural (i.e. le groupe de symétrie des fibres) exprime les *symétries internes* des particules.

2) *Les champs bosoniques de jauge* qui sont des champs d'interactions véhiculées par des particules virtuelles d'échange (des bosons) et sont interprétés comme des *connexions* sur ces fibrés. Les particules véhiculant les interactions sont par conséquent les quanta des champs de connexions sur les fibrés de matière.

Le Lagrangien de Yang-Mills est *la norme de la courbure* des connexions. Il est invariant sous l'action du groupe de jauge et l'espace-temps y contribue comme champ de jauge à travers la courbure scalaire de sa connexion. Les *dérivations covariantes* permettent d'exprimer géométriquement les interactions.

Plus précisément, rappelons qu'en théorie quantique des champs, on dispose d'une chaîne de procédures de déterminations objectives conduisant de principes constitutifs à des modèles explicites.

Les principes de relativité et de symétrie fournissent des Lagrangiens L , ou mieux, des densités de lagrangien $\mathcal{L}(\varphi, \partial_\mu \varphi)$ dépendant des champs $\varphi(x, t)$ considérés et de leurs dérivées premières $\partial_\mu \varphi$. Cela permet de définir des actions $S(\Gamma)$ sur des chemins Γ conduisant d'un état initial $\varphi_i = \varphi(x, t_1)$ à un état final $\varphi_f = \varphi(x, t_2)$:

$$S(\Gamma) = \int \mathcal{L} d^4x = \int_{t_1}^{t_2} \int_{\mathbb{R}^3} \mathcal{L}(\varphi, \partial_\mu \varphi) d^3x dt$$

Les axiomes de la mécanique quantique conduisent alors de l'action $S(\Gamma)$ à la formule d'intégrale de chemin de Feynman pour l'amplitude de probabilité de transition (\hbar est la constante de Planck):

$$\langle \varphi_f | \varphi_i \rangle = \int_{\Gamma} \exp\left(\frac{2i\pi}{\hbar} S(\Gamma)\right) d\Gamma .$$

Il s'agit d'une intégrale fonctionnelle dans l'espace fonctionnel des chemins. Elle n'est pas bien définie comme objet mathématique (c'est l'un des principaux problèmes de la théorie quantique des champs), mais elle fournit néanmoins un algorithme de calcul extraordinairement puissant.

Il est bien connu que cette formule (qui est l'analogue des fonctions de partition Z de la mécanique statistique) encode une quantité énorme d'information. Il est possible d'en dériver un nombre considérable de modèles explicites, quantitatifs et prédictifs des phénomènes en utilisant des outils mathématiques appropriés comme par exemple:

- (i) les développements perturbatifs;
- (ii) le théorème de Wick disant que tous les moments d'une loi de probabilité gaussienne peuvent s'exprimer en fonction de ses moments d'ordre 2;
- (iii) le théorème de la phase stationnaire disant qu'une intégrale oscillante $e^{i\tau\varphi(x)}$ se concentre pour $\tau \rightarrow \infty$ sur les points critiques de la phase $\varphi(x)$;
- (iv) le groupe de renormalisation.

On rencontre ici un splendide exemple d'une détermination objective conduisant de principes constitutifs à des modèles spécifiques et diversifiés: les principes constitutifs (groupes de relativité, symétries) fournissent des Lagrangiens, qui fournissent à leur tour des intégrales de Feynman, qui fournissent elles-mêmes les modèles:

A priori constitutifs \rightarrow Groupes de relativité et symétries \rightarrow Lagrangiens \rightarrow
Action \rightarrow Intégrales de chemins \rightarrow Modèles spécifiques de phénomènes.⁹

Dans ce contexte, les théories de jauge ont réussi à construire *a priori* les interactions en faisant dépendre les symétries *internes* des systèmes (qui sont des symétries globales apparemment non spatio-temporelles associées aux nombres quantiques des particules) de la *position* spatio-temporelle. Si on localise ainsi ces symétries internes et si l'on exige que les théories demeurent invariantes, on doit introduire des termes correctifs. On constate alors que ceux-ci redonnent exactement les termes d'interaction. Les forces et les interactions apparaissent ainsi de façon générale comme dérivables de principes de conservation *locaux*.¹⁰

Le cas le plus simple (découvert par Hermann Weyl) est celui du "couplage minimal" entre un électron et un champ électromagnétique F . Soit ψ la fonction d'onde de l'électron. Son évolution est régie par l'équation de Dirac.

⁹ Cf. par exemple Itzykson, Zuber [1985] et Le Bellac [1988].

¹⁰ Cf. par exemple Quigg [1983].

- Le Lagrangien de Dirac \mathcal{L}_D est invariant sous la symétrie interne globale $\psi \rightarrow e^{-ie\vartheta}\psi$ (où le e en exposant est la charge de l'électron et ϑ une phase). Le groupe des symétries internes est le groupe des phases, i.e. le groupe *commutatif* $U(1)$ des rotations du cercle.
- D'autre part, le Lagrangien de Maxwell (champ électro-magnétique) \mathcal{L}_M est invariant sous une transformation de jauge $A \rightarrow A + d\Lambda$, où A est le potentiel vecteur du champ électro-magnétique F , Λ une fonction sur l'espace-temps \mathcal{E} et $d\Lambda$ la différentielle de Λ .
- Si l'on admet que le facteur de phase *interne* ϑ peut dépendre de la *position* spatio-temporelle *externe* $x \in \mathcal{E}$, alors le Lagrangien de Dirac \mathcal{L}_D *n'est plus* invariant. Mais le terme de correction qui apparaît peut être *exactement compensé* par la transformation de jauge $A \rightarrow A + d\vartheta$. Il s'agit là d'une sorte de "miracle" dont la signification tant physico-mathématique que transcendantale est remarquable.

Géométriquement, le potentiel vecteur A s'interprète comme une *connexion* définie sur un fibré vectoriel F au-dessus de l'espace temps \mathcal{E} et le champ F s'identifie à la *courbure* de cette connexion. Le groupe de relativité est maintenant *encore plus large* que le groupe $Diff(\mathcal{E})$. C'est le groupe — dit groupe de jauge — des automorphismes du fibré F de base \mathcal{E} . Cet élargissement permet de ramener la catégorie dynamique d'interaction à un principe de relativité, et donc de la construire. Dans le cas *non abélien*, le groupe des symétries internes G ($G = SU(2), SU(3), \text{etc.}$), n'est plus commutatif. Cela introduit des difficultés profondes dans la théorie, mais les idées principales subsistent.

Le cas est encore plus spectaculaire avec la théorie des supercordes.¹¹ En fait, toute symétrie supplémentaire enrichit de façon considérable le contenu mathématique des théories physiques. Par exemple, en théorie des supercordes, la simple reparamétrisation des cordes conduit à introduire la théorie des surfaces de Riemann et, plus particulièrement, la théorie de Teichmüller des espaces de modules qui classifient les différentes structures complexes compatibles à une même structure différentiable. Il en va de même avec l'interprétation donnée (1994) par Edward Witten de la symétrie électrique \leftrightarrow magnétique de Montonen-Olive (1977). Elle conduit à l'introduction de formes modulaires et a déjà eu des conséquences considérables pour la compréhension de la structure des variétés différentiables de dimension 4.¹²

Ce sont ces stratégies remarquables de détermination objective des phénomènes qui font dire aux physiciens, par exemple à Michio Kaku: ¹³

¹¹ Cf. par exemple, Kaku [1988] et Bailin, Love [1994], ainsi que Petitot [1992b].

¹² Cf. Witten [1994] et Donaldson [1996].

¹³ Kaku [1988].

“the secret of this mystery [celui des théories unifiées] most likely lies in the power of *gauge symmetry*”.

“Nature *demande* symmetry”.

“Symmetry, instead of being a purely aesthetic feature of a particular model, now becomes its most important feature” (p. 8).

Bref, au moyen des formalismes variationnels, du théorème de Noether, des intégrales de Feynman et des théories de jauge, il a été possible de construire une véritable *ontogenèse formelle* de la réalité physique. Une telle construction convertit le synthétique a priori en règles d’engendrement de modèles explicites diversifiés. Les contraintes mathématiques sont si fortes (renormalisabilité, élimination des anomalies, mécanisme de Higgs et ruptures spontanées de symétries conférant une masse aux bosons de jauge, etc.), qu’il est souvent possible d’inférer le bon choix du groupe de symétrie de la théorie à partir d’un tout petit nombre de données empiriques significatives.

ⁱ Geymonat [1956], p. 125. Cf. aussi Geymonat [1985b], p. 149.