Philosophia Scientiæ

Travaux d'histoire et de philosophie des sciences

16-2 | 2012

Modal Matters

Sources et nature de la philosophie de la physique d'Henri Poincaré

João Principe

Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/philosophiascientiae/749>

DOI : 10.4000/philosophiascientiae.749

ISSN : 1775-4283

Éditeur

Éditions Kimé

Édition imprimée

Date de publication : 1 octobre 2012

Pagination : 197-222

ISBN : 978-2-84174-592-0

ISSN : 1281-2463

Référence électronique

João Principe, « Sources et nature de la philosophie de la physique d'Henri Poincaré », *Philosophia Scientiæ* [En ligne], 16-2 | 2012, mis en ligne le 01 octobre 2015, consulté le 02 novembre 2020. URL : <http://journals.openedition.org/philosophiascientiae/749> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/philosophiascientiae.749>

Tous droits réservés

Sources et nature de la philosophie de la physique d'Henri Poincaré

João Príncipe

Universidade de Évora – CEHFCi (Portugal)

Résumé : Cette étude montre que les réflexions épistémologiques de Poincaré émergèrent dans le cadre de ses recherches scientifiques et qu'elles furent en partie inspirées par sa lecture de savants philosophes comme Helmholtz et surtout Maxwell. Elle donne une analyse systématique des textes philosophiques publiés par Poincaré vers 1900, au moment où il juge que la physique des principes constitue le sommet de l'évolution des théories. Enfin, elle met en rapport certaines de ses thèses sur la physique avec l'Analytique et la Dialectique transcendantales kantienne.

Abstract: This study shows that the epistemological reflections of Poincaré emerged as part of his scientific researches and they were partly inspired by his reading of Helmholtz and especially Maxwell. It provides a systematic analysis of philosophical texts published by Poincaré about 1900, where he finds that the physics of principles is the culmination of the evolution of theories. Finally, it brings together some of his theses on physics with Kant's Transcendental Analytic and Dialectic.

Introduction

Cette étude est consacrée aux réflexions épistémologiques élaborées par Henri Poincaré à propos de la physique du XIX^e siècle. Après avoir montré comment ses thèses épistémologiques émergèrent dans le cadre de ses cours et de ses recherches scientifiques, nous analysons l'ensemble des réflexions de Poincaré sur la nature et l'évolution des théories physiques jusqu'à la physique des principes. D'une part, nous établissons la prégnance des thèses de Helmholtz et de Maxwell. D'autre part, nous montrons la possibilité d'une lecture kantienne dans

laquelle le plan transcendantal est constitué par des principes constitutifs et par des principes régulateurs. Le but n'est cependant pas d'élaborer un système philosophique rigoureux à partir d'idées que Poincaré n'a souvent fait qu'esquisser d'une manière heuristique.

1 La méthode des comparaisons et le *Treatise* de Maxwell

En août 1886, Poincaré succède à Gabriel Lippmann sur la chaire de physique mathématique et de calcul des probabilités de la Faculté des Sciences de Paris. Le cours du premier semestre 1887-1888 traite des théories mathématiques de la lumière. L'alternative entre éther moléculaire et éther continu était connue dès les années 1830, en raison de la compatibilité de la théorie de George Green avec un éther continu. Poincaré montre l'équivalence mathématique de six théories concurrentes, malgré les différentes hypothèses physiques de départ. Les théories mathématiques ne nous révèlent pas la « véritable nature des choses » ; elles sont des instruments dont le « but unique est de coordonner les lois physiques que l'expérience nous fait connaître » ; ces lois se traduisent analytiquement dans des équations, lesquelles « resteront vraies, au moins comme première approximation ». L'éther n'est qu'une hypothèse commode, comme l'est aussi celle de l'existence des objets matériels ; la dernière étant une hypothèse qui restera toujours commode. Les diverses théories de l'éther mécanique sont toutes « également plausibles ». Se borner à l'une d'entre elles produirait une confiance aveugle ; le plus instructif, c'est de les comparer. Il note que les hypothèses moléculaires, typiques des théories françaises, ne « jouent qu'un rôle secondaire [...] C'est ce qui explique pourquoi la plupart des conclusions de Fresnel subsistent sans changement quand on adopte la théorie électromagnétique de la lumière [celle de Maxwell] » [Poincaré 1889, I–III, 398–400] ¹.

Le cours du second semestre 1888 est dédié aux théories électrodynamiques et à la théorie électromagnétique de la lumière de Maxwell. En 1890, Poincaré s'occupera de la théorie de Helmholtz et des expériences de Hertz et au premier semestre 1891-1892, il comparera la théorie de Maxwell avec celles de l'éther élastique : « J'ai donc été conduit à traduire dans ce nouveau langage ce qu'avaient dit en d'autres termes les fondateurs de la théorie ondulatoire. » Il y exprime son engagement pluraliste : « J'ai voulu mettre le lecteur à même de manier avec la même facilité deux instruments qui peuvent être également utiles pour coordonner convenablement la multitude des faits observés » [Poincaré 1892b, VI]. En 1899, il présentera les théories électrodynamiques de Lorentz et de Larmor.

1. L'idée de coordination réapparaît dans [Poincaré 1897b, 734]. Voir sur les théories de l'éther [Schaffner 1972], surtout chapitre IV ; Pierre Duhem, s'opposant à la physique des modèles, critique Poincaré, voir [Duhem 1892, § 8] et [Duhem 1896].

De toutes ces lectures de Poincaré, celle de Maxwell a été la plus stimulante sur le plan philosophique. L'ensemble des mémoires de Maxwell sur l'électromagnétisme montre un pluralisme de fait, accompagné de réflexions épistémologiques. La méthode de l'analogie physique est théorisée dans "On Faraday's lines of force" (1855). Il s'agit d'une méthode intermédiaire entre deux pôles, celui des théories purement mathématiques et celui des théories qui partent des hypothèses physiques, à accent ontologique. L'analogie est comprise comme correspondance entre relations de systèmes différents. Elle est, en général, partielle car les deux systèmes ont des composantes (relations) qui ne sont pas similaires. La méthode a des avantages psychologiques nets : elle suscite l'attention et l'imagination et évite l'encombrement de la mémoire par l'excès de mathématiques difficiles. Dans "On physical lines of force" (1861-1862), Maxwell propose un modèle mécanique des interactions électromagnétiques. Il fait ici une hypothèse physique sur la nature tourbillonnaire du magnétisme, alors que justement il n'en faisait pas dans son mémoire précédent. En développant sa théorie dynamique du champ électromagnétique (1864), il remarque toutefois que son éther tourbillonnaire de 1861 n'est que « *a demonstration that mechanism may be imagined capable of producing a connexion mechanically equivalent to the actual connexion of the parts of the electromagnetic field*² » [Maxwell 1890, 452].

Dans "A dynamical theory of the electromagnetic field" (1864) et dans le *Treatise on Electricity and Magnetism*, Maxwell utilise la mécanique analytique de Lagrange, laquelle lui permet d'élaborer une théorie sans concrétiser le mécanisme du milieu qui permet les échanges énergétiques entre les corps. Le champ magnétique y est décrit comme un système mécanique à liaisons dont les mouvements sont cachés. Maxwell est convaincu de la supériorité de son approche, ce qui l'amène à considérer que cette méthode analytique correspond à la vraie méthode du raisonnement physique, qui évite les hypothèses non justifiées (qui abondaient dans les modèles mécaniques de l'éther optique). Dans le *Treatise*, Maxwell note qu'en principe il y a un nombre infini de modèles mécaniques capables de représenter le champ électromagnétique [Maxwell 1873, II, § 831]³.

En 1888, Poincaré affirme que le *Treatise* contient une idée fondamentale conduisant à un bouleversement du concept de réduction mécaniste des phénomènes :

Maxwell ne donne pas une explication mécanique de l'électricité et du magnétisme ; il se borne à démontrer que cette explication est possible [...] Si donc un phénomène comporte une explication mé-

2. Sur Maxwell, voir [Achard 1998], [Achard 2005], [Cat 2001], [Campbell & Garnett 1882], [Darrigol 2000], [Harman 1998], [Hesse 1974], [Moyer 1977], [Principe 2010], [Simpson 1970].

3. Voir [Darrigol 1993, 221] ou [Darrigol 2000, 154-166]. Sur le *Treatise*, voir [Moyer 1977, 259-267], [Achard 1998] et [Achard 2005]. Sur le « *true method of physical reasoning* » voir [Maxwell 1890, II, 308-309], [Hesse 1974, 259-281], [Cat 2001, 219], [Principe 2010, 62-65].

canique complète, il en comportera une infinité d'autres. [Poincaré 1890, IV, VIII]⁴

Ce théorème de Maxwell, valable toutes les fois que les principes de l'énergie et de moindre action sont satisfaits, est démontré en détail par Poincaré. Les coordonnées généralisées correspondent à des paramètres observables. Ceux-ci peuvent être mis en rapport avec une myriade de systèmes de coordonnées moléculaires inobservables conduisant à la même fonction de Hamilton. Ce théorème justifie l'attitude de ceux qui trouvent inutiles les spéculations sur la structure ultime de l'éther. Aussi, le théorème met en valeur la dynamique abstraite, préférée par Maxwell. Selon Poincaré, l'idée fondamentale de Maxwell évacue les préoccupations ontologiques : « Le lecteur se trouve ainsi en présence d'une *forme presque vide de matière* qu'il est d'abord tenté de prendre pour une ombre fugitive et insaisissable » [Poincaré 1890, XVI]. Ce nonobstant, Poincaré constate que la tradition de la physique laplacienne, basée sur l'hypothèse de forces intermoléculaires qui deviennent insensibles à des distances sensibles, est encore très vivante en France et que son ontologie inconsciente constitue un obstacle épistémologique dans l'acceptation de nouvelles approches. Poincaré donne un cas concret d'application du théorème de Maxwell dans lequel il rejette la prétention des expériences d'Otto Wiener, faites en 1891, à décider entre les théories de Neumann et de Fresnel sur la polarisation de la lumière [Poincaré 1891b]⁵.

Dans ses leçons sur l'électrodynamique et l'optique, Poincaré adopte une présentation inductive, tout en fournissant des analogies expressives, notamment pour les propositions les plus difficiles. Il reconnaît la valeur didactique et heuristique des analogies mécaniques et les utilise de concert avec « l'idée fondamentale » de Maxwell. C'est aussi le cas dans *La théorie de Maxwell et les oscillations hertziennes*. Il commence par noter l'évolution des idées de Maxwell, de la construction d'un éther particulier jusqu'à l'idée de la suffisance de la *possibilité* d'une explication mécanique. Il note que Maxwell s'est éloigné de la tradition britannique de construction de modèles d'« apparence concrète » et il note que par, « ce chemin détourné », Maxwell a été conduit « aux plus grandes découvertes ». Poincaré montre comment on peut donner des phénomènes électriques une explication mécanique « sans déployer tout l'appareil de l'analyse mathématique » [Poincaré 1899a, 6]. Il fournit plusieurs images mécaniques pour les phénomènes électrostatiques, la résistance des conducteurs, l'induction et les attractions électrodynamiques, ce qui démontre que, malgré sa préférence pour la vision définitive de Maxwell, Poincaré concède aux analogies mécaniques et aux modèles concrets un important rôle heuristique et didactique⁶.

4. Sur les spécificités de la lecture poincaréenne des théories de Maxwell, voir [Darrigol 1993, 216–218, 220, 223].

5. Souligné par moi. Voir [Poincaré 1890, Introduction], [Darrigol 1993, 221–222], [Príncipe 2008, § 12.1], Langevin dans [Boutroux, Hadamard, Langevin *et al.* 1914, 73].

6. Des descriptions semblables de la physique des modèles anglaise se trouvent dans [Poincaré 1897a, 742] et dans la préface de [Poincaré 1913, 6]. Sur les analogies mécaniques dans [Poincaré 1890], voir [Darrigol 1995, 8].

2 Méthode et structure des théories physiques

Dans des textes écrits vers 1900 et destinés à des audiences disparates (allocutions prononcées lors de congrès internationaux, articles philosophiques) Poincaré présente d'une manière plus systématique, bien que très brève, ses réflexions sur la méthode, la structure et l'évolution des théories physiques jusqu'à la physique des principes. Je me limite aux textes où il parle de la physique du XIX^e siècle car les bouleversements des théories physiques au tournant du siècle (nouvelles radiations, quanta, relativité) l'amèneront à réfléchir sur un terrain bien différent de celui sur lequel Maxwell a vécu. En 1904, Poincaré juge que la physique des principes, dont Maxwell était l'un des pionniers, est en danger. Considérant l'état actuel de la physique mathématique, il parle d'une « débâcle générale des principes » [Poincaré 1904, 318], d'une seconde crise amenant à une troisième phase de la physique mathématique (les deux premières phases sont la physique des forces centrales et la physique des principes).

2.1 Généralisation et analogie

Pour Poincaré, la capacité de généraliser est une faculté de notre esprit qui est la condition de possibilité de la science [Poincaré 1892a, VI]. C'est l'intuition, la faculté qui est l'instrument de l'invention, qui produit le passage du particulier au général. L'intuition permet de saisir l'unité d'un tout (d'une démonstration, par exemple) et de trouver des rapports nouveaux en guidant l'esprit :

Pour comprendre un plan, il faut en apercevoir à la fois toutes les parties, et le moyen de tout embrasser dans un coup d'œil d'ensemble, c'est l'intuition seule qui peut nous le donner [...] Il nous faut une faculté qui nous fasse voir le but de loin [...] [Poincaré 1900b, 125]

L'intuition a plusieurs espèces : la généralisation par induction, celle qui fait appel au sens et à l'imagination et l'intuition du nombre pur (celle d'où sort le principe de l'induction mathématique qui engendre, par une voie synthétique, le raisonnement mathématique) [Poincaré 1902a, 127–128]. Cette dernière est celle des analystes et la deuxième est celle des géomètres. Ce nonobstant, Poincaré reconnaît que « l'intuition sensible est en mathématiques l'instrument le plus ordinaire de l'invention » [Poincaré 1900b, 129] ; il note aussi que l'élaboration logique des concepts est précédée par celle de notions plus intuitives.

Poincaré note que c'est la physique mathématique « qui doit guider la généralisation [en physique] de façon à augmenter [...] le rendement de la science » [Poincaré 1900a, 1164]. La Physique mathématique et l'Analyse partagent le même esprit et Poincaré en arrive à dire que les mathématiques sont la seule

langue que le physicien puisse parler ; il note que ce langage permet de saisir les analogies intimes des choses [Poincaré 1897b, 858]. Maxwell, en 1855, avait déjà associé l'analogie au caractère constitutif et nécessaire des mathématiques dans les sciences physiques ; pour lui « *the most universal of all analogies* », c'est que « *all the mathematical sciences are founded on relations between physical laws and laws of numbers* » [Maxwell 1890, I, 156]. Parmi les processus intuitifs permettant le guidage de l'esprit du savant dans son travail de généralisation, Poincaré accorde un rôle majeur à l'analogie et aux principes architectoniques (unité, simplicité, continuité)⁷.

L'analogie guide le raisonnement car elle permet de deviner, de pressentir les généralisations, les hypothèses. Elle est donc omniprésente. Et cela dès l'induction la plus élémentaire : en 1900, Poincaré note que la répétition est fondamentale pour qu'un fait soit considéré intéressant (en physique) ; mais les circonstances qui produisent un fait donné ne se reproduiront jamais à nouveau ; on peut seulement dire que dans des circonstances analogues un fait analogue aura lieu. Considérant l'élaboration théorique, il note que pour résoudre une nouvelle question on établit une analogie avec une autre dont la méthode de résolution est connue ; il faut ensuite s'apercevoir « en quoi cette nouvelle question diffère des autres » et déduire « les modifications qu'il est nécessaire d'apporter à la méthode » [Poincaré 1900b, 128]. Il distingue deux types d'analogie, lesquelles sont en correspondance avec les deux dernières espèces d'intuition : les analogies mathématiques font deviner les analogies physiques et, en Analyse, ces dernières aident l'analyste ; c'est-à-dire que l'intuition sensible a autant d'importance heuristique que celle des analystes, plus pure⁸.

Un exemple d'analogie est celui de « l'analogie véritable » (mathématique) consistant « à nommer du même nom des êtres qui ne diffèrent que par la matière, à nommer du même nom par exemple la multiplication des quaternions et celle des nombres entiers » [Poincaré 1897b, 858] ; celui-ci est aussi mentionné par Maxwell en 1870, dans son allocution à la British Association, quand il note que des quantités de nature physique différente ont le même caractère vectoriel [Maxwell 1890, II, 218]. Un autre exemple est l'invention du courant de déplacement par Maxwell qui, selon Poincaré, « était profondément imprégné du sentiment de la symétrie mathématique ». Ce sentiment résulte du fait « que Maxwell était habitué à penser en vecteurs ». Pour Poincaré, « Maxwell n'était peut-être pas un habile analyste [...] mais il avait au plus haut degré le sens intime des analogies mathématiques ». Si sur cet exemple l'analogie mathématique fait pressentir l'analogie physique, un autre exemple — celui où la même équation aux dérivées partielles (celle de Laplace) « se rencontre dans la théorie

7. Une première référence au besoin de simplicité, ordre et harmonie se trouve dans [Poincaré 1892a, VI–VII]. Sur analogie et intuition, voir [Paty 2008, 185].

8. Voir [Poincaré 1892a, VI], [Poincaré 1897b, 858], [Poincaré 1900a, 1163, 1167, 1169].

de l'attraction newtonienne, dans celle du mouvement des liquides, dans celle du potentiel électrique, dans celle du magnétisme, dans celle de la propagation de la chaleur » [Poincaré 1897b, 859] — montre que l'analogie mathématique fournit des méthodes de résolution des équations et permet un transfert de vocabulaire qui aide à bâtir des concepts intuitifs. Ce dernier exemple ne s'inspire pas seulement de Maxwell et de Kelvin (analogie entre l'équation de la chaleur et celle du potentiel électrostatique), mais aussi des travaux de Poincaré sur les équations aux dérivées partielles de la physique mathématique⁹.

L'allocution de 1897 partage avec celle de Maxwell de 1870 le thème du rapport entre physique et mathématiques. Maxwell note qu'une des principales caractéristiques du mathématicien est sa sensibilité à la symétrie et sa capacité d'exprimer la même chose de différentes manières, et de transformer « *a perplexing expression into another which explains its meaning in more intelligible language* » [Maxwell 1890, II, 217]. Mais si le mathématicien montre au physicien que les quantités qu'il mesure sont liées par des rapports nécessaires, ce dernier révèle au premier l'existence de formes de quantités qu'il ne pouvait point imaginer. Maxwell met en rapport la méthode des illustrations (analogies) avec ce qu'il nomme la *classification systématique des quantités*. Cette classification est motivée par la perception des ressemblances entre les processus et formes de raisonnement mathématiques utilisés dans deux sciences différentes, dont la raison ultime est l'identité des rapports mathématiques. Les deux auteurs distinguent les analogies physiques des analogies mathématiques (formelles/vraies) et valorisent le rôle et le statut des dernières. Maxwell note que les analogies mathématiques permettent de juger de la justesse et de la vérité d'une illustration ou analogie physique¹⁰.

Kant, dans sa *Logique*, distingue entre « jugement déterminant » et « jugement réfléchissant ». Le premier détermine un cas au moyen d'un concept général. Le second part du ou des cas tels qu'ils sont donnés et recherche le concept général capable de les subsumer. Les raisonnements par induction et par analogie sont les deux moyens dont se sert le jugement réfléchissant pour trouver le concept général en question. Poincaré considère l'induction et l'analogie comme fondamentales pour la généralisation, mais, contrairement à Kant, il semble assimiler l'induction à un type d'analogie. Les analogies sont donc des instruments omniprésents et à portée variable : elles sont présentes dans toute généralisation, fût-elle élémentaire ou correspondant à un grand changement théorique. L'établissement d'analogies entre théories permet leur éclaircissement mutuel et permet l'extension d'une théorie à un nouveau domaine de phénomènes. Poincaré reconnaît dans l'intuition sensible et dans les analogies physiques un

9. Dans les travaux qui débutent en 1887 avec la méthode du balayage, « on est toujours ramené à l'intégration d'une même équation aux dérivées partielles du second ordre avec des conditions aux limites qui seules varient suivant les problèmes », Langevin in [Boutroux, Hadamard, Langevin *et al.* 1914, 65–67].

10. Voir [Principe 2010, 60–62].

rôle important dans l'élaboration des théories, mais il valorise davantage les analogies mathématiques. En 1897, Poincaré considère l'avènement de la mécanique de Newton comme un exemple majeur de « changement de langage », lié à l'introduction de l'analyse mathématique [Poincaré 1897b, 858]. Poincaré n'essaie pas de réduire ce processus de généralisation de haute portée à des analogies.

2.2 Le plan transcendantal : principes heuristiques et constitutifs

Dans cette section, orientée par des distinctions kantienne, je m'occupe du méta-niveau des principes ayant des fonctions régulatrices et/ou constitutives.

Dans la préface de sa *Thermodynamique*, Poincaré note que les lois se forment « après des expériences relativement peu nombreuses et qui présentent certaines divergences ». Toute proposition pouvant « être généralisée d'une infinité de manières », le choix de la loi générale se fait d'après un critère de simplicité [Poincaré 1892a, VI–VII]. En 1900, Poincaré amplifie ses réflexions sur le besoin d'ordre, d'harmonie et de simplicité, lequel correspond à une nécessité, un instinct ou une habitude de l'esprit ; il note que « toute généralisation suppose [...] la croyance à l'unité et à la simplicité de la nature ». Il considère les rapports entre le simple et le complexe, montrant comment le progrès des théories présente des niveaux successifs d'organisation où le simple cache le complexe et inversement. Il affirme : « Il faut bien s'arrêter quelque part, et, pour que la Science soit possible, il faut s'arrêter quand on a trouvé la simplicité » [Poincaré 1900a, 1164–1167].

Dans l'article « Sur les hypothèses fondamentales de la géométrie », Poincaré, inspiré par Riemann et par Helmholtz, s'interroge sur l'origine du postulat des parallèles d'Euclide et sur la présence de jugements synthétiques *a priori* en mathématiques. Il établit le caractère conventionnel des postulats de la géométrie, soulignant qu'ils sont des conventions de langage, résultant de la décision libre de l'esprit mais motivées par l'expérience. En 1891, considérant les géométries non-euclidiennes et leur usage structurant dans la physique, il note que le test utilisant la parallaxe des étoiles admet que les rayons lumineux sont des lignes droites ; mais un résultat en apparence contraire à la géométrie euclidienne pourrait être interprété en modifiant les lois de l'optique et « tout le monde regarderait cette solution comme plus avantageuse » [Poincaré 1887, 213–214]. Poincaré croit donc que « la géométrie euclidienne est et restera la plus commode » [Poincaré 1891a, 774] ¹¹.

11. Sur ses premiers articles concernant le statut des géométries voir [Giedymin 1977, 271–272, 287]. Sur la perspective de Helmholtz et son inspiration sur Poincaré voir [Torreti 1978, 163, 166–168] et [Rollet 1999, 31, 35, 50].

Poincaré considère le cas hypothétique où les astronomes découvrent « que les astres n'obéissent pas exactement à la loi de Newton [gravitation universelle] » ; alors, soit on change la loi, soit on postule « que la gravitation n'est pas la seule force qui agisse », en gardant la loi de Newton comme une définition de la gravitation :

Dans le second cas ce sera l'attitude nominaliste. Le choix entre les deux attitudes reste libre, et se fait d'après des considérations de commodité, *quoique ces considérations soient le plus souvent tellement puissantes qu'il ne reste pratiquement peu de chose de cette liberté*. [Poincaré 1902a, 276]

L'attitude nominaliste est souvent inconsciente (voir plus-bas p. 211) ; c'est la critique qui peut la dégager. Elle est essentielle pour bâtir une Physique des principes. Avec celle-ci on obtient une unité supérieure : « [Les principes] sont peu nombreux, parce que chacun d'eux remplace à peu près un grand nombre de lois. On n'a donc pas intérêt à les multiplier » [Poincaré 1902a, 278] , [Poincaré 1900a, 1166]. Cet effort d'économie et de systématisation des lois en les hiérarchisant par subsomption (l'intégration de l'individu dans l'espèce, ou de l'espèce dans le genre est obtenue par voie mathématique) est guidé par le besoin d'unité, simplicité, ordre et harmonie¹².

Les règles ou principes généraux de la méthode associés à ce besoin peuvent être compris au sens kantien de « principes de *convenance* » que Kant définit comme des « règles de jugement auxquelles nous nous soumettons volontiers et adhérons comme à des axiomes, pour cette seule raison que, *si nous nous en écartions, notre entendement ne pourrait presque jamais émettre un jugement sur un objet donné* ». Ces principes « s'appuient sur des raisons *subjectives*, non point cependant sur les lois de la connaissance sensible, mais sur les lois de la connaissance intellectuelle elle-même, à savoir sur les conditions par lesquelles il paraît facile et rapide à cette connaissance d'user de sa propre perspicacité » [Kant 1770, § 30, II, 418]. Ces considérations, présentes à la fin de *Dissertation* de 1770, s'approfondissent avec la distinction constitutif/régulateur, développée dans les première et troisième *Critiques*¹³.

Dans l'Analytique transcendantale de la première *Critique*, Kant attribue une signification transcendantale aux catégories et aux principes purs de l'entendement. Kant distingue entre les principes mathématiques, lesquels autorisent d'appliquer les mathématiques aux phénomènes, et les principes dynamiques ou analogies de l'expérience. Les premiers sont constitutifs, donnant les conditions

12. La règle de ne pas multiplier les principes sans nécessité se trouve dans [Kant 1781-1787, A652].

13. Cité d'après [Ribeiro dos Santos 2008, 11]. Leibniz a fréquemment utilisé le nom « principes de convenance » pour « se référer aux principes métaphysiques qui, ne correspondant pas à une 'nécessité du type géométrique découlant de la nature de la chose ou de son concept, résultaient d'un besoin de la nature architectonique et esthétique de la raison », Ribeiro dos Santos dans la traduction portugaise de [Kant 1770, note 126].

a priori de l'intuition et étant absolument nécessaires ; un principe est constitutif quand il fonde, conditionne et détermine les objets scientifiques. Les seconds sont régulateurs, et, vu que l'existence des objets d'une intuition n'est que contingente, ils ont un caractère de nécessité *a priori* d'une manière médiate et indirecte [Kant 1783, § 13], fin de la Remarque III, [Kant 1781-1787, A180].

Dans l'appendice à la Dialectique transcendantale, Kant considère l'usage régulateur des idées de la raison pure, revenant à l'intérêt des principes de convenance pour la systématisation de la connaissance obtenue par l'entendement [Kant 1770, § 30, II, 418]. Celui-ci, utilisant les catégories, constitue l'objet (donnant forme à l'intuition sensible), mais ne fournit pas le lien systématique permettant d'organiser la diversité des objets dans une science. Pour les grouper de façon systématique il faut une idée qui nous guide pour constituer une totalité. Les idées doivent être prises de façon analogique et non comme des objets, car elles ne s'appliquent pas à une intuition (sensible) mais à l'entendement, en structurant le système de la connaissance. Ces idées heuristiques constituent un ensemble ouvert, évoluant historiquement. En guidant l'élaboration théorique, elles se clarifient, changent et sont révisées. Leur usage régulateur correspond à l'usage hypothétique de la raison, présent dans l'induction ; cet usage demande que les hypothèses soient unies systématiquement avec leurs conséquences et qu'elles soient systématiquement unies avec d'autres hypothèses et sous des hypothèses de niveau supérieur¹⁴.

Bien que Kant ait distingué les deux fonctions, constitutive et régulatrice, des principes, il reconnaît qu'un même principe peut être utilisé des deux façons. Aussi, la notion de constitutif peut être séparée de celle de nécessaire au sens d'unique ; c'est-à-dire un cadre de principes est constitutif dans un certain contexte théorique. Un même principe peut être jugé régulateur du point de vue de la logique de la découverte, de l'*ars inveniendi*, et peut être jugé constitutif du point de vue de la « légitimation de la science [...] déjà constituée et établie », de l'analyse structurelle des théories [Ribeiro dos Santos 2008, 8].

De son côté, Poincaré s'est efforcé de mettre en évidence les présupposés du travail créateur de l'esprit du scientifique (concernant l'usage de l'entendement, de l'imagination, de la raison), ce qu'on peut nommer heuristique transcendantale [Ribeiro dos Santos 2008, 8]. Une idée centrale de cette heuristique transcendantale poincaréenne est la quête d'analogies permettant l'extension et la comparaison des théories. Cela est lié à l'engagement pluraliste, d'inspiration maxwellienne, qui favorise la prolifération de « langages », et le conséquent conflit et besoin d'explicitation d'hypothèses, en nous forçant « à envisager les choses sous différents aspects » [Poincaré 1900a, 1164]. Par là même on arrive à découvrir l'harmonie cachée :

Il en est des symboles mathématiques comme des réalités physiques ; c'est en *comparant les aspects différents des choses* que nous

14. Kant considère les principes régulateurs comme des maximes : [Kant 1781-1787, A666-667]. Voir [Philonenko 1993, § 25], [Krausser 1988, § 4-6].

pourrons en comprendre l'harmonie intime, qui seule est belle et par conséquent digne de nos efforts. [Poincaré 1897b, 859]¹⁵

Dans la terminologie kantienne, on peut dire que Poincaré attribue un rôle régulateur « aux principes généraux tels que le principe de moindre action ou celui de la conservation de l'énergie ». Il note que ce dernier principe est lié à l'idée d'invariant et à l'incapacité de donner une définition générale de l'énergie :

Quelles que soient les notions nouvelles que les expériences futures nous donneront sur le monde, *nous sommes sûrs d'avance* qu'il y aura quelque chose qui demeurera constant et que nous pourrons appeler énergie.

Les principes, bien qu'issus de l'expérience (et donc représentant dans des cas concrets des rapports réels), ont une puissance d'extension qui semble indéfinie ; l'expérience ne peut pas les contredire directement. Leur genèse montre leur appartenance à un méta-niveau parmi les lois physiques :

Ces principes ont une très haute valeur ; on les a obtenus en cherchant ce qu'il y avait de commun dans l'énoncé de nombreuses lois physiques ; ils représentent donc comme la quintessence d'innombrables observations. [Poincaré 1900a, 1170]

Le méta-statut des deux principes résulte de leur souplesse, du fait qu'ils sont des « formes presque vide de matière », puisque $U = T + V$ et $L = T - V$, sont des fonctions à concrétiser pour chaque domaine de phénomènes. La fécondité des principes peut néanmoins s'éteindre au moment où ils ne nous permettent plus de « nous faire prévoir sans nous tromper des phénomènes nouveaux » [Poincaré 1900a, 1170].

Les principes régulateurs sont pris comme des règles heuristiques de guidage vers une systématisation optimale, un contrôle, une extension et une unification de l'ensemble des lois empiriques. Par là ils finissent par devenir, de façon assez indirecte, une condition de possibilité de l'expérience. Les grands principes de la physique de la fin du XIX^e siècle n'ont pas le même « rang hiérarchique », dans une perspective transcendante, que le besoin d'unité, de simplicité, d'ordre et d'harmonie. Ces derniers sont des formes plus vastes, vagues et durables. Les principes de la physique ont une fonction épistémique semblable aux postulats/axiomes des géométries mais ont une base empirique mouvante qui peut les rendre inutiles/révisables. Aussi, la subsumption de lois physiques à un système de principes est historiquement changeante comme l'est aussi la hiérarchie interne de ce supposé système. Les différents principes peuvent ne pas avoir le même degré de généralité. En 1904, parlant de la menace qui pèse sur la validité des principes, Poincaré note que :

15. Les analogies de l'expérience sont des principes régulateurs de l'intuition mais sont constitutifs par rapport à l'entendement, [Kant 1781-1787, A664]. Sur l'*a priori* relativisé voir [Friedman 1999]. Sur le pluralisme maxwellien voir [Principe 2010, 65–69].

Le principe de moindre action est intact jusqu'ici, et Larmor paraît croire qu'il survivra longtemps aux autres ; il est en effet plus vague et plus général encore. [Poincaré 1904, 318]

Le mélange des deux fonctions, constitutive et régulatrice, se trouve dans le concept poincaréen d'hypothèses naturelles (1900). Celles-ci, « auxquelles on ne peut guère se soustraire », sont constitutives et en même temps guident la recherche en physique mathématique :

Il est difficile de ne pas supposer que l'influence des corps très éloignés est tout à fait négligeable, que les petits mouvements obéissent à une loi linéaire, que l'effet est une fonction continue de sa cause. J'en dirai autant des conditions de symétrie. Toutes ces hypothèses forment [...] le fond commun de toutes les théories de la Physique mathématique. Ce sont les dernières qu'on doit abandonner. [Poincaré 1900a, 1166]

Dans la section « Origines de la Physique mathématique », Poincaré identifie « les conditions qui ont permis le développement de la physique mathématique » basée sur les équations différentielles. Ces conditions se divisent en deux niveaux, le premier systématise les façons de décomposer un phénomène complexe en un nombre très grand de phénomènes élémentaires, le second concerne le fondement de cette décomposition. Les méthodes de décomposition sont décrites comme des hypothèses, qui, ne résistant pas à l'épreuve, doivent donner lieu à d'autres hypothèses. Sur la physique des milieux continus, Poincaré élabore des considérations proches de celles de Joseph Boussinesq : la simplicité des lois est liée au fait « que nous observons des effets moyens où les discordances individuelles disparaissent et se neutralisent en vertu de la *loi des grand nombres* » [Boussinesq 1879, 28 et 33]. Un autre exemple est le principe de superposition, dans lequel l'interaction simultanée de corps se décompose parce que leurs actions (représentées, par exemple, par des vecteurs) sont indépendantes, le fait élémentaire étant l'action d'un seul corps. Considérant la décomposition par rapport au temps, la loi de Newton s'obtient en postulant que l'état actuel ne dépend que du passé plus proche : « Au lieu d'étudier directement toute la succession des phénomènes, on peut se borner à en écrire l'équation différentielle, aux lois de Képler, on substitue celle de Newton » [Poincaré 1900a, 1167] ¹⁶.

La connaissance du fait élémentaire permet d'écrire l'équation et le complexe se déduit par combinaison. Sur les conditions transcendantales, constitutives, permettant que la généralisation prenne la forme mathématique, Poincaré note que l'homogénéité, l'indépendance relative des parties éloignées, la simplicité du fait élémentaire, permettent la décomposition du complexe (seul observable) en phénomènes élémentaires dans l'espace et dans le temps. Poincaré note que le principe de superposition est applicable là où « le phénomène observable est dû à la superposition d'un grand nombre de phé-

16. Voir [Darrigol 2002, 131] et [Príncipe 2008, 139].

nomènes élémentaires *tous semblables entre eux* » et conclut : « Ainsi s'introduisent tout naturellement les équations différentielles » [Poincaré 1900a, 1168]. Les faits élémentaires sont simples et obéissent tous à la même loi. Leur combinaison implique une répétition d'opérations que seule l'induction mathématique rend possible.

En résumé, les réflexions méthodologiques de Poincaré sont susceptibles d'une lecture kantienne qui en fait une analyse de la fonction régulatrice des principes de convenance et de la fonction constitutive des mathématiques. La modélisation mécanique des phénomènes, la hiérarchisation des lois et l'évolution de leur statut sont des thèmes poincaréens apparentés.

2.3 Objectivité, composition et évolution des théories

Le thème de la faillite de la science était à la mode dans la France de la fin du XIX^e siècle. Le prétendu anti-intellectualisme bergsonien a favorisé le nominalisme radical d'Édouard Le Roy, auquel Poincaré s'est crû obligé de répondre. Pour Poincaré, l'histoire de la physique n'est pas une accumulation de ruines sur des ruines, parce que quelques éléments, ancrés dans le sol de l'expérience, survivent au changement. Ces résidus sont fondamentaux car ils expriment des rapports vrais :

Ce qui succombe ainsi, ce sont les théories proprement dites, celles qui prétendent nous apprendre ce que sont les choses [...] Si l'une d'elles a fait connaître un *rapport vrai*, ce rapport est définitivement acquis et on le retrouvera sous un déguisement nouveau dans les autres théories qui viendront successivement régner à sa place. [Poincaré 1902a, 292]¹⁷.

Les réflexions de Poincaré suggèrent une stabilisation structurelle de la toile de fond puisque les théories physiques présupposent le continu, le cadre spatio-temporel, une géométrie commode, et utilisent, depuis Newton, l'Analyse. Cela va déjà contre le nominalisme de Le Roy. De surcroît, Poincaré admet certainement une notion de progrès. En 1897, considérant le système des deux principes de l'énergie et de la moindre action (système énergétique), Poincaré note qu'il représente un progrès par rapport au système classique, celui des lois de Newton (basé sur les notions de masse, force et accélération, lequel comporte des définitions déguisées). Dans son allocution de 1900, il conclut son jugement sur l'état actuel de la physique en affirmant : « Tout compte fait, on s'est rapproché de l'unité [...] en définitive on a gagné beaucoup de terrain » [Poincaré 1900a, 1175]. En 1902, il note que « le progrès est lent, mais continu » et que « les syn-

17. Une pensée similaire se trouve dans [Poincaré 1900a, 1168–1169].

thèses scientifiques [...] tendent à absorber en elles les synthèses partielles » [Poincaré 1902a, 293]¹⁸.

Cette idée de progrès s'accorde avec l'esquisse, faite en 1904 devant le Congrès à Saint-Louis, des grandes lignes de l'évolution des théories physiques jusqu'à la physique des principes :

Une loi, pour nous [...] c'est une relation constante entre le phénomène d'aujourd'hui et celui de demain ; en un mot, c'est une équation différentielle. Voilà la forme idéale de la loi physique [...] c'est la loi de Newton qui l'a revêtue la première [...] Néanmoins il est arrivé un jour où la conception des forces centrales n'a plus paru suffisante [...] Que fit-on alors ? On renonça à pénétrer dans le détail de la structure de l'Univers [...] et l'on se contenta de prendre pour guides certains principes généraux qui ont précisément pour objet de nous dispenser de cette étude minutieuse. [Poincaré 1904, 304-305]

Cette évolution est un grand pas en avant dans la direction de l'unité car :

Ces principes sont des résultats d'expériences fortement généralisés ; mais ils semblent emprunter à leur généralité même un degré éminent de certitude. Plus ils sont généraux [...] plus on a fréquemment l'occasion de les contrôler et les vérifications, en se multipliant, en prenant les formes plus variées et les plus inattendues, finissent par ne pas laisser de place au doute. [Poincaré 1904, 306]

La vérification des principes est complexe et le plus souvent indirecte. Par exemple, les principes de la mécanique « sont des vérités [...] vérifiées d'une façon très approchée » pour des systèmes isolés qui deviennent des conventions commodes, des « postulats applicables à l'ensemble de l'univers » [Poincaré 1902b, 151]. Dans sa critique à Le Roy, Poincaré décrit un processus assez idéalisé, correspondant à une attitude nominaliste, par lequel une loi peut être convertie dans un principe :

Par un nominalisme inconscient, les savants ont élevé au-dessus des lois ce qu'ils appellent des principes. Quand une loi a reçu une confirmation suffisante de l'expérience, nous pouvons adopter deux attitudes ; ou bien laisser cette loi dans la mêlée ; elle restera soumise alors à une incessante révision [...] Ou bien on peut l'ériger en *principe*, en adoptant des conventions telles que la proposition soit certainement vraie [...] La loi primitive énonçait une relation entre deux faits bruts A et B ; on introduit [...] un intermédiaire abstrait C, plus ou moins fictif [...] Et alors nous avons une relation entre A et C que nous pouvons supposer rigoureuse et qui est

18. Le système de Newton nécessite l'hypothèse des forces centrales et de celle des atomes et il est compatible avec des mouvements que la Nature ne réalise jamais, voir [Poincaré 1897a, 738].

le principe ; et une autre entre C et B qui reste une loi révisable. Le principe, désormais cristallisé pour ainsi dire, n'est plus soumis au contrôle de l'expérience. Il n'est pas vrai ou faux, il est commode. [Poincaré 1902a, 276]

Cette description semble très simplifiée quand on la compare à la discussion de la conservation de l'énergie dans la *Thermodynamique* ou à celle des principes de la mécanique dans l'article sur la *Mécanique* de Hertz [Poincaré 1892a, VII–XIII], [Poincaré 1897a]. Elle sert surtout à montrer l'élément de décision dans le choix de l'attitude nominaliste (par laquelle on souligne la fonction régulatrice des principes) et le fait que la physique des principes reste une science expérimentale :

Toute loi peut se décomposer en un principe et une loi, mais il est bien clair par là que, si loin que l'on pousse cette décomposition, il restera toujours des lois. [Poincaré 1902a, 276]

Venons-en aux rapports vrais. Un rapport vrai commence par être une hypothèse :

Les hypothèses de la troisième catégorie sont les véritables généralisations. Ce sont elles que l'expérience doit confirmer ou infirmer. Vérifiées ou condamnées, elles seront toujours fécondes. [Poincaré 1900a, 1167]

Celles-ci diffèrent des hypothèses naturelles (voir ci-dessus) et des hypothèses indifférentes (voir plus bas). Poincaré ne définit pas ce qu'est un rapport vrai mais il en donne plusieurs exemples ; il souligne qu'il est une relation entre des choses, et cela en inscrivant son analyse dans le cadre du criticisme qui refuse l'accès à la chose en soi. Ce sont les rapports qui, s'organisant en système, rendent compte de l'objectivité : « La science [...] est un système de relations » [Poincaré 1902a, 290]. Un exemple de rapport vrai est celui des lois qui permettent de prévoir les phénomènes d'un certain domaine ; c'est le cas de quelques équations différentielles de la théorie optique de Fresnel qui restent valables dans le cadre de la théorie de Maxwell ; l'œuvre de Fresnel n'a pas été vaine :

Car le but de Fresnel n'était pas de savoir s'il y a réellement un éther, s'il est ou non formé d'atomes [...] c'était de prévoir les phénomènes optiques [...] Les équations différentielles sont toujours vraies [...] Ces équations expriment des rapports et, si les équations restent vraies, c'est que ces rapports conservent leur réalité [...] Mais ces appellations n'étaient que des images substituées aux objets réels que la nature nous cachera éternellement. [Poincaré 1900a, 1168–1169]

Un autre exemple, plus complexe, est celui de l'analogie mathématique entre différents phénomènes, par exemple quand il s'agit de divers phénomènes périodiques. Cette analogie relève d'une unité supérieure en ce qu'il est une conséquence des principes :

Qu'il y ait entre l'oscillation électrique, le mouvement du pendule et tous les phénomènes périodiques une parenté intime qui corresponde à une réalité profonde ; que cette parenté, cette similitude, ou plutôt ce parallélisme se poursuive dans le détail ; qu'elle soit une conséquence de principes plus généraux, celui de l'énergie et celui de la moindre action ; voilà ce que nous pouvons affirmer : voilà la vérité qui restera toujours la même sous tous les costumes dont nous pouvons juger utile de l'affubler. [Poincaré 1900a, 1169]

L'évolution historique des théories physiques ne nous fournit pas seulement une accumulation de lois mais des niveaux de généralité nouveaux. Cet exemple suggère qu'un principe général peut être un exemple de rapport vrai. Un autre exemple confirme cette hypothèse :

Carnot a établi [son principe] en partant d'hypothèses fausses ; quand on s'aperçut que la chaleur n'est pas indestructible [...] on abandonna complètement ses idées ; puis Clausius y revint et les fit *définitivement* triompher. La théorie de Carnot, sous sa forme primitive, exprimait, à côté de rapports véritables, d'autres rapports inexacts, débris de vieilles idées [...] Clausius n'a eu qu'à les écarter comme on émonde des branches mortes. Le résultat a été la seconde loi fondamentale de la Thermodynamique. [Poincaré 1900a, 1170]

Pour qu'un rapport puisse être saisi comme vrai il faut d'abord qu'il soit saisi comme simple, et il n'est simple, c'est-à-dire intelligible, que d'après un cadre expérimental et théorique qui rend intéressant ce rapport ; si l'on n'a pas un bon cadre théorique « les progrès des observations ne serviront qu'à faire croire au chaos » [Poincaré 1897b, 858]. Un rapport vrai ne peut pas être une relation mathématique à validité absolue, car les lois ne sont qu'approchées, dépendant de la précision des moyens d'observation, les vérifications se limitant à augmenter la vraisemblance (probabilité subjective) d'une loi ; sa validité découle aussi d'un système d'idées scientifiques dont l'organicité est changeante. Sa discussion sur les relations entre le simple et le complexe suggère qu'un « rapport simple » s'appuie sur une base empirique qui étant élargie (pour des raisons théoriques) précisera les limitations d'une loi, inconnues au départ. Il suffit de penser à la loi de Boyle-Mariotte et aux corrections successives, mélange complexe de considérations théoriques et d'améliorations expérimentales, de l'équation qui veut représenter un gaz réel. La simplicité d'une loi peut être réelle et profonde, « cas où elle résisterait à la précision croissante de nos moyens de mesure » [Poincaré 1900a, 1166]¹⁹.

Pour le principe de conservation de l'énergie, Poincaré note que : « Les différentes choses auxquelles nous donnons le nom d'*énergie* sont liées par une

19. Voir aussi [Poincaré 1889, II], [Poincaré 1900a, 1164], [Poincaré 1902a, 268, 273, 289].

parenté véritable ; le principe affirme un rapport réel [...] il est assuré d'avance d'être vérifié dans l'acception stricte du mot » [Poincaré 1900a, 1170]. La contradiction apparente avec son affirmation nominaliste de l'invérifiabilité du principe de l'énergie résulte en partie du fait que ce principe a une puissance d'extension de ses applications qui semble indéfinie. Celle-ci est fonction de la créativité qui crée des conventions adaptant les principes aux lois expérimentales de niveau inférieur. Un principe physique est une convention d'un type spécial car l'expérience peut le condamner « sans le contredire directement » ; c'est le cas où on n'arrive qu'à l'utiliser de façon *ad hoc* [Poincaré 1905, 146]. Dans sa *Thermodynamique*, il valorise la souplesse du principe de conservation de l'énergie : « La loi de Meyer est une forme assez souple pour qu'on y puisse faire rentrer presque tout ce que l'on veut. » Sa souplesse « est une raison de croire à sa longue durée » [Poincaré 1892a, XIII]. La souplesse et la fécondité des principes sont liées à leur usage quasi nominaliste en tant que principes régulateurs, favorisant l'inclination phénoménologique. L'attitude opposée, qui affirme une ontologie particulière (par exemple : tout réduire à des interactions entre atomes centres de force) est bien plus rigide. La physique des principes reflète le pluralisme épistémologique de Poincaré, qui reconnaît le rôle de la multiplicité des représentations et leur intertraductibilité. Et elle reste compatible avec l'idée d'une vérification expérimentale (indirecte) des principes. Il suffit de considérer l'attention que prête Poincaré à la complexité de la détermination de l'équivalent mécanique de la chaleur ou aux expériences concernant le vent d'éther²⁰.

Dans la réplique à Le Roy de 1902, Poincaré essaie d'harmoniser sa notion de rapports vrais avec le fait que les théories scientifiques ont une structure complexe, liant des éléments disparates, des sensations, des perceptions et des expériences par un mélange de langage naturel et de langage mathématique. Ses discussions antérieures montraient l'importance des conventions, particulièrement en ce qui concerne le choix de la géométrie en fonction de laquelle les lois de la physique s'expriment. L'univocité des rapports vrais enchassés dans les théories est garantie par l'intertraductibilité, basée sur l'intersubjectivité ; même si deux groupes de chercheurs « ayant des sens analogues aux nôtres et sensibles aux mêmes impressions, et d'autre part admettant les principes de notre logique » mais appartenant à des mondes différents (mais pas incommunicables), bâtissent leurs conceptions physiques de manière assez diverse, en commençant par des choix différents du cadre géométrique, le fait qu'une partie de leurs langages soit traduisible permettra de tout traduire.

Dans sa critique de la notion de fait, Poincaré montre que bien qu'il soit caractérisé essentiellement par son rapport aux sens, qui décident de sa vérité ou fausseté, le fait scientifique présuppose des synthèses et un système de conventions (langage). Les faits scientifiques, à partir desquels on extrait les lois, sont obtenus par des synthèses successives à partir de faits plus bruts, par exemple

20. Voir [Darrigol 2000, 357].

des données élémentaires des sens. Cette synthèse est opérante, de manière paradigmatique, dans la construction des objets de la perception :

Les objets extérieurs [...] ce ne sont pas seulement des groupes de sensations, mais des groupes cimentés par un lien constant. C'est ce lien, et ce lien seul qui est objet en eux, et ce lien c'est un rapport.
[Poincaré 1902a, 290–291]

Parmi les « composantes » du système de conventions on trouve une langue naturelle (le français, l'allemand, etc.) et les mathématiques. La première est constituée d'un nombre fini de termes qui servent à classer en catégories les faits plus bruts ; ce premier langage est confronté au besoin « d'exprimer les nuances en nombre infini que mes impressions pourraient revêtir » ; cette possibilité n'étant actualisée que par l'interposition des mathématiques. La conclusion de la discussion ressemble plus à un postulat, à une croyance bien fondée, qu'à une proposition apodictique : « Les lois invariantes ce sont les relations entre les faits bruts, tandis que les relations entre les “faits scientifiques” restaient toujours dépendantes de certaines conventions » [Poincaré 1902a, 208]²¹.

Dans l'introduction à *La Valeur de la science* de 1905, Poincaré considérera que l'objectivité est une propriété essentiellement architectonique et intersubjective, basée sur la construction d'un système de lois mathématiques portant sur les phénomènes : « La réalité objective [...] ce ne peut être que l'harmonie exprimée par des lois mathématiques. C'est donc cette harmonie qui est la seule réalité objective » [Poincaré 1905, 23]. Cela traduit le caractère complexe des systèmes théoriques et aussi le but de systématisation qui se manifeste dans le progrès scientifique.

Poincaré note que les théories ne sont pas, habituellement, des tous complets et logiquement cohérents, obéissant strictement au principe d'économie qui empêche la multiplication des hypothèses. Elles peuvent contenir des branches qui vont se révéler mortes et qu'il faudra émonder ; les rapports vrais y surgissent souvent déguisés. Un même rapport vrai peut apparaître dans deux théories qui semblent contradictoires :

Quand un physicien constate une contradiction entre deux théories [...] il dit quelquefois : Ne nous inquiétons pas de cela mais tenons fermement les deux bouts de la chaîne bien que les *anneaux intermédiaires nous soient cachés* [...] Il peut se faire qu'elles expriment l'une et l'autre des rapports vrais et qu'il n'y ait de *contradiction que dans les images* dont nous avons habillé la réalité. [Poincaré 1900a, 1169]

21. Igor Ly discute amplement, dans sa thèse, les rôles de ces deux systèmes linguistiques. Il arrive à la conclusion que se sont les mathématiques qui permettent de bien saisir l'infinité des nuances données aux sens : « C'est la notion mathématique de grandeur continue qui permet d'exprimer les rapports entretenus par les nuances que prennent les impressions sensibles », [Ly 2008, 217, § 4.2 : « La catégorie “espace sensible” et le continu physique »].

Dire que les théories sont des images veut d'abord signaler que les théories sont des analogies partielles pour le champ phénoménal :

Les rapports véritables entre ces objets réels sont la seule réalité que nous puissions atteindre, et la seule condition, c'est qu'il y ait les mêmes rapports entre ces objets qu'entre les images que nous sommes forcés de mettre à leur place. [Poincaré 1900a, 1169]

La distinction entre rapports vrais et images veut signaler que les théories déguisent les rapports vrais, en les présentant vêtus de « costumes ». Ceux-ci peuvent correspondre soit à des modèles au sens des Britanniques, soit à des théories qui postulent l'existence d'identités physiques non-observables, maintes fois à portée ontologique. Ces costumes deviennent superflus du point de vue de la critique, œuvre de la physique mathématique.

Parmi les « costumes », Poincaré décrit ce qu'il nomme les hypothèses indifférentes. Bien que superflues, du point de vue de l'économie finale, elles ont néanmoins un rôle :

Elles peuvent être utiles, soit comme artifices de calcul, soit pour soutenir notre entendement par des *images concrètes* [...] Il n'y a donc pas lieu de les proscrire [...] Les hypothèses de ce genre n'ont qu'un *sens métaphorique*. [Poincaré 1900a, 1166–1167, 1169–1170]

Les hypothèses indifférentes sont invérifiables car elles postulent des identités ou des rapports non-observables. Elles ont des concurrentes et illustrent le théorème de Maxwell sur la pluralité des représentations. Un exemple typique est la physique moléculaire laplacienne où les forces intermoléculaires deviennent insensibles à des distances sensibles. La connaissance de la loi d'interaction élémentaire, inaccessible à l'observation, est inutile à cause de l'effet des moyennes et l'hypothèse de la matière continue permet d'obtenir les mêmes résultats. Tout cela dépend intimement des mathématiques qui montrent comment on bâtit l'état moyen et qui permettent de comparer les différentes théories et de montrer l'équivalence de différentes représentations. Poincaré note que « ces hypothèses indifférentes ne sont jamais dangereuses, pourvu qu'on n'en méconnaisse pas le caractère » [Poincaré 1900a, 1166]. L'ontologie de la tradition de la physique laplacienne (réductionnisme par forces centrales) constitue un obstacle épistémologique car elle empêche de bien saisir le rôle de ces hypothèses de base (surtout heuristique) et annihile l'intérêt pour des alternatives plus souples. Si on revient à la classification des stades des théories physiques, on peut dire que les hypothèses indifférentes sont typiques de la physique des forces centrales. Puisque la physique des principes écarte la connaissance des mécanismes inobservables, elle semble dépourvue de ce genre d'hypothèses, ce qui représente un progrès dans le sens de l'économie et de l'unité²².

22. Sans les nommer explicitement, Poincaré en avait déjà parlé dans [Poincaré 1889, III].

Conclusions

Les réflexions philosophiques de Poincaré sont suscitées par des problèmes scientifiques et la subtilité de ses arguments découle de sa connaissance profonde des sciences mathématiques. Les inspirations directement détectables sont celles de savants philosophes comme Helmholtz ou Maxwell. Ses textes étaient destinés à des audiences disparates, ce qui rend difficile l'harmonisation de la totalité de ses considérations épistémologiques.

On note habituellement que la pensée épistémologique de Poincaré commence avec son conventionnalisme géométrique (1887). Dans son analyse du statut des postulats géométriques, il montre que les prétentions ontologiques de quelques empiristes et le cadre kantien de l'esthétique transcendantale ne sont pas acceptables. Le choix d'un groupe spécifique de transformations géométriques est conventionnel, en raison de l'intertraductibilité des géométries et de l'intrication entre géométrie et physique. Par ailleurs, il signale les liens profonds entre arithmétique, analyse et géométrie et affirme le caractère synthétique *a priori*, constitutif et nécessaire, du principe de récurrence et de la notion de groupe. Poincaré partage avec Helmholtz un intérêt pour une relecture de Kant dans laquelle la machinerie transcendantale est assouplie. Helmholtz admet qu'on peut considérer « transcendantal le concept de construction géométrique rigide de l'espace », mais note que les formes de l'intuition *a priori* kantienne doivent être « si vides et libres qu'elles puissent recevoir tout contenu qui apparaît dans la forme correspondante de perception » [Helmholtz 1878]. De même pour Poincaré, il y a, en dessous des conventions, des principes constitutifs et nécessaires qui définissent un ensemble de constructions possibles dont certaines s'actualisent à l'occasion de l'expérience²³.

Les réflexions initiales de Poincaré sur la physique sont contemporaines de celles sur la géométrie. Il s'est vivement intéressé aux théories électromagnétiques de Maxwell et à leur signification générale. Les réflexions du savant écosais anticipent une idée centrale de la pensée de Poincaré, celle d'une pluralité de langages et de leur intertraductibilité. Les deux savants valorisent les analogies, sont favorables à une méthodologie pluraliste et soulignent le rôle fécond des différences psychologiques et de style scientifique des savants. Tous deux dénoncent les dangers de l'adhésion prématurée à des cadres ontologiques qui postulent l'existence d'identités inobservables et restreignent les méthodes admissibles. Pour tous deux, les analogies permettent à l'esprit de saisir des rapports d'une façon convenable, commode et concrète. L'évaluation d'une analogie se fait par voie mathématique, si bien que pour le Maxwell du *Treatise* et pour Poincaré les analogies formelles peuvent prendre le pas sur les images géométriques, les analogies mécaniques et les modèles. Les deux savants signalent le rôle heuristique et didactique de ces dernières analogies et ne nient pas leur valeur cognitive. La formulation lagrangienne de l'électromagnétisme

23. Cité d'après [Torreti 1978, 166]. Voir [Torreti 1978, 163, 166–168].

par Maxwell, avec le théorème qui en découle de l'existence d'un nombre infini de modèles mécaniques compatibles, est mise en valeur par Poincaré qui y voit un argument de sous-détermination des théories par l'expérience, et un remède contre la réification d'hypothèses indifférentes. Il faut toutefois noter que la lecture poincaréenne de l'électromagnétisme maxwellien est peu fidèle à d'autres égards.

L'établissement d'analogies formelles entre théories suggère que Maxwell et Poincaré ne songent pas à la possibilité de théories absolument incommensurables : « *It is the glory of a true science that all legitimate methods must lead to the same final results* » [Maxwell 1890, II, 301]. Ils reconnaissent le progrès de la connaissance scientifique, le caractère en général révisable des théories, et le caractère contingent de leur développement historique. Contrairement aux philosophes des sciences du milieu du ^{xx}^e siècle, très influencés par le positivisme viennois, ils ne distinguent pas entre contexte de la découverte (alogique) et contexte de la justification (logique). Ils valorisent l'idée d'une psychologie de l'invention où principes de convenance et stratégies dépendent de la nature des sujets cognitifs.

Un éclairage kantien des considérations de Poincaré sur la méthode les rattache aux fonctions constitutives et/ou régulatrices de principes ayant des degrés de généralité divers. Les plus généraux sont les grands principes de convenance et les vrais principes synthétiques *a priori*, nécessaires et uniques, qui sont à la base des mathématiques utilisées par les physiciens. Parmi les grands principes de convenance, on trouve la quête de simplicité qui mène le savant à faire des choix commodes. Ces considérations de commodité sont le plus souvent si puissantes qu'il ne reste pratiquement que peu de chose de la liberté dans le choix des conventions. Souligner le libre choix des conventions sans noter ces restrictions rend inexplicable la hiérarchie des domaines des sciences mathématiques, reconnue au ^{xix}^e siècle, et le fait que le pluralisme théorique est limité (on démontre qu'il n'y a que trois géométries à courbure constante mais on préfère celle d'Euclide ; il y a plusieurs théories *mécaniques* de l'éther, en attendant une théorie mûre, etc.). Cette hiérarchie définit la structure de *La Science et l'Hypothèse* (1902).

Poincaré dégage une partie de ces principes de l'examen des théories physiques disponibles jusqu'à la fin du ^{xix}^e siècle, pour la plupart utilisant des équations différentielles. Ces principes ont des fonctions régulatrices du point de vue de l'*ars inveniendi* mais peuvent être vus comme constitutifs du point de vue de l'analyse des théories déjà élaborées. Par ailleurs, Poincaré s'intéresse aux grands principes de la physique de la fin du ^{xix}^e que sont le principe de l'énergie et le principe de moindre action. L'aspect nominaliste de la pensée de Poincaré permet de mieux comprendre son intérêt pour la physique des principes, dont les principaux avocats sont Helmholtz et Maxwell. L'analyse que donne Poincaré de cette physique souligne son pouvoir d'éviter la réification des hypothèses indifférentes, et montre la structure complexe du système de lois et de principes,

impliquant le choix d'une géométrie et l'usage de mathématiques. Elle met aussi en valeur le rôle médiateur des conventions qui lient les principes de la physique au sol de l'expérience.

Poincaré croit au progrès scientifique par accumulation de faits et de lois, bien qu'il soit conscient des problèmes de l'induction. Il voit les sciences comme des systèmes de relations, le progrès correspondant à une extension de l'ensemble des rapports vrais et à sa systématisation conduisant à des degrés supérieurs d'unité. L'objectivité de la physique est donc une propriété architectonique et intersubjective, intimement liée à l'existence d'harmonies mathématiques qui découlent d'un processus historique où le changement n'est jamais totalement discontinu. La notion de rapport vrai est complexe et Poincaré n'en donne aucune définition ; une loi particulière ou un principe peuvent être conçus comme des rapports vrais, bien que leur degré de généralité et leur rapport avec l'expérience puissent être divers. Ces rapports sont pensés dans un cadre criticiste où l'accès à la chose en soi est nié. Les faits scientifiques présupposent des synthèses (perceptions) et des langages (naturels et mathématiques) ; ils s'obtiennent par synthèse de faits plus bruts, bien que Poincaré ne semble pas croire à la possibilité de connaître des faits absolument bruts. On accède aux rapports entre les choses par l'intermédiaire de rapports entre images qu'on est forcé de mettre à leur place ; ces images ce sont des analogies partielles. Les théories, avec leurs images, peuvent receler les rapports vrais. Son criticisme le porte à dénoncer les adhésions à des ontologies prématurées (hypothèses indifférentes) et lui fait voir que les théories physiques ne sont presque jamais des tous complets et logiquement cohérents. L'engagement pluraliste émerge comme une maxime régulatrice qui est condition d'un progrès historiquement contingent.

Bibliographie

ACHARD, FRANCK

1998 La publication du *Treatise on Electricity and Magnetism* de James Clerk Maxwell, *La Revue de Synthèse*, 119, 511–544.

2005 James Clerk Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, dans *Landmark Writings in Western Mathematics 1640-1940*, édité par GRATAN-GUINNESS, I., Amsterdam : Elsevier, 564–587.

BOUSSINESQ, JOSEPH

1879 *Étude sur divers points de la philosophie des sciences*, Paris : Gauthier-Villars.

BOUTROUX, PIERRE, HADAMARD, JACQUES, LANGEVIN, PAUL & VOLTERRA, VITO (ÉD)

1914 *Henri Poincaré, L'œuvre scientifique, l'œuvre philosophique*, Félix Alcan, Je cite de l'édition en ligne de 2003 des éditions Vigdor.

CAMPBELL, LEWIS & GARNETT, WILLIAM

1882 *The life of James Clerk Maxwell*, London : MacMillan.

CAT, JORDI

2001 On understanding Maxwell on the methods of illustration and scientific metaphor, *Studies in history and philosophy of modern science*, 32(3), 395–441.

DARRIGOL, OLIVIER

1993 The electrodynamic revolution in Germany as documented by early German expositions of 'Maxwell's theory', *Archive for the history of exact sciences*, 45, 189–280.

1995 Henri Poincaré's criticism of fin de siècle electrodynamics, *Studies in history and philosophy of modern physics*, 26(1), 1–44.

2000 *Electrodynamics from Ampère to Einstein*, Oxford : Oxford University Press.

2002 Between hydrodynamics and elasticity theory : The first five births of the Navier-Stokes equation, *Archive for History of Exact Sciences*, 56, 95–150.

DUHEM, PIERRE

1892 Quelques réflexions au sujet des théories physiques, *Revue des questions scientifiques*, 31, 139–176.

1896 L'évolution des théories physiques, *Revue des questions scientifiques*, 40, 463–498.

FRIEDMAN, MICHAEL

1999 *Reconsidering Logical Positivism*, Cambridge : Cambridge University Press.

GIEDYMIN, JERZY

1977 On the origin and significance of Poincaré's conventionalism, *Studies in history and philosophy of science*, 8(4), 271–300.

HARMAN, PETER M.

1998 *The Natural Philosophy of James Clerk Maxwell*, Cambridge : Cambridge University Press.

HELMHOLTZ, HERMANN VON

1878 Über den Ursprung und Sinn der geometrischen Sätze : Antwort gegen Herrn Professor Land, *Mind*, 3, 212–225, version allemande de l'article “The Origin and meaning of geometrical axioms”, cf. [Helmholtz 1968, 1–31].

1968 *Über Geometrie*, Darmstadt : Wissenschaftliche Buchgesellschaft.

HESSE, MARY

1974 *The Structure of Scientific Inference*, London : MacMillan Press.

KANT, IMMANUEL

1770 De mundi sensibilis atque intelligibilis Forma et Principiis (Dissertation de 1770), traduction portugaise préface et notes par Leonel Ribeiro dos Santos : Kant, E. (1985) *Dissertação de 1770*, Estudos Gerais, Lisbonne : Imprimerie nationale (INCM) .

1781- *Critique de la raison pure*, Flammarion, traduction française par

1787 Jules Barni revue par P. Archambault, 1976.

1783 *Prolégomènes à toute métaphysique future*, Paris : Vrin, traduction française par J. Gibelin. 1974.

KRAUSSER, PETER

1988 On the antinomies and the appendix to the dialectic in Kant's critique and philosophy of sciences, *Synthèse*, 77(3), 375–401.

LY, IGOR

2008 *Mathématique et physique dans l'œuvre philosophique de Poincaré*, Thèse de doctorat, Université Nancy 2.

MAXWELL, JAMES CLERCK

1873 *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Oxford : Clarendon Press, 2 vol.

1890 *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, Cambridge : Cambridge University Press, réédité par Dover editions en 1952.

MOYER, DONALD FRANKLIN

1977 Energy, dynamics, hidden machinery : Rankine, Thomson and Tait, Maxwell, *Studies in History and Philosophy of Science*, 8(3), 251–268.

PATY, MICHEL

2008 Les analogies mathématiques au sens de Poincaré et leur fonction en physique, dans *Le statut de l'analogie dans la démarche scientifique. Perspective historique*, Paris : L'Harmattan, 171–193.

PHILONENKO, ALEXIS

1993 *L'Œuvre de Kant*, t. 1, Paris : Vrin.

POINCARÉ, HENRI

1887 Sur les hypothèses fondamentales de la géométrie, *Bulletin de la Société Mathématique de France*, 15, 203–216.

1889 Leçons sur la théorie mathématique de la lumière I, Nouvelles études sur la diffraction. — Théorie de la dispersion de Helmholtz, leçons professées pendant le premier semestre 1887-1888, Cours de la Faculté des Sciences de Paris publiés par l'association amicale des élèves et anciens élèves de la faculté des sciences.

1890 *Electricité et optique I – Les théories de Maxwell. Leçons professées pendant le second semestre 1888-89*, Paris : Georges Carré.

1891a Les géométries non-euclidiennes, *Revue générale des sciences pures et appliquées*, 2, 769–774.

1891b Sur l'expérience de M. Wiener, *Comptes-Rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences*, 112, 325–329.

1892a *Thermodynamique, leçons professées pendant le premier semestre de 1888-1889*, Paris : Georges Carré, 2e édition 1908.

1892b *La théorie mathématique de la lumière II, Nouvelles études sur la diffraction. — Théorie de la dispersion de Helmholtz, leçons professées pendant le premier semestre 1891-1892*, Paris : Gauthier-Villars.

1897a Les idées de Hertz sur la mécanique, *Revue générale des sciences pures et appliquées*, 8, 734–743.

1897b Les rapports de l'analyse et de la physique mathématique, *Revue générale des sciences pures et appliquées*, 8, 857–861, publié également dans SH, chapitre XI.

1899a *La théorie de Maxwell et les oscillations hertziennes*, Paris : Carré et Naud.

1900a Relations entre la physique expérimentale et de la physique mathématique, *Rapports présentés au Congrès international de physique réuni à Paris en 1900*, 1, 1–29, publié également dans SH, chapitres IX et X.

1900b Du rôle de l'intuition et de la logique en mathématiques, dans *Compte-rendu du deuxième Congrès international de mathématiciens tenu à Paris du 6 au 12 août 1900*, Paris : Gauthier-Villars, 115–130, publié également dans VS, chapitre I.

1902a Sur la valeur objective de la science, *Revue de métaphysique et de morale*, 10, 263–293.

- 1902b *La Science et l'Hypothèse [SH]*, Flammarion, Je cite d'après l'édition de 1968, avec une préface de Jules Vuillemin.
- 1904 L'état actuel et l'avenir de la physique mathématique. Conférence lue le 24 septembre 1904 au Congrès d'Art et de Science de Saint-Louis, *Bulletin des sciences mathématiques*, 23, 302–324, publié également dans VS, chapitre IX.
- 1905 *La Valeur de la science [VS]*, Flammarion, Je cite d'après l'édition de 1970, avec une préface de Jules Vuillemin.
- 1913 *Foundations of Science (Science and Hypothesis, The value of science, science and method)*, New York : The Science Press, traduction anglaise par G. B. Halsted avec une préface par Henri Poincaré.

PRINCIPE, JOÃO

- 2008 *La réception française de la mécanique statistique*, Épistémologie et histoire des sciences et des techniques, Université Paris 7, thèse présentée pour l'obtention du Doctorat d'Épistémologie et Histoire des Sciences et des Techniques.
- 2010 L'analogie et le pluralisme méthodologique chez James Clerk Maxwell, *Kairos Journal of philosophy and science*, 1, 55–74.

RIBEIRO DOS SANTOS, LEONEL

- 2008 L'apport de Kant au programme de l'*ars inveniendi* des modernes, conférence dans *Kant and the philosophical tradition — Kant Today, Brazilian-Italian-Portuguese Kant Conference 22-23 January 2008 Università degli Studi di Verona*.
<ftp://www.cle.unicamp.br/pub/kant-e-prints/Vol-3-2-2008/Santos-2-3-2-2008.pdf>.

ROLLET, LAURENT

- 1999 *Henri Poincaré – Des mathématiques à la philosophie*, Thèse de doctorat, Université Nancy 2.

SCHAFFNER, KENNETH F.

- 1972 *Nineteenth-Century Aether Theories*, Oxford : Pergamon Press.

SIMPSON, THOMAS K.

- 1970 Some observations on Maxwell's Treatise on electricity and magnetism, *Studies in History and Philosophy of Science*, 1(3), 249–263.

TORRETI, ROBERTO

- 1978 *Philosophy of Geometry from Riemann to Poincaré*, Dordrecht : Reidel.