Sur les sources néokantiennes de la pensée épistémologique de Henri Poincaré

João Príncipe
(Centro de Estudos de História e Filosofia da Ciência, Universidade de Évora)
jpps@uevora.pt

Introduction

Les réflexions épistémologiques d'Henri Poincaré débutent avec ses études sur les géométries non-euclidiennes. Dans son article fondateur 'Sur les hypothèses fondamentales de la géométrie' (1887) Poincaré affirme que l'Analyse (mathématique) "repose sur un certain nombre de jugements synthétiques *a priori*"; s'interrogeant sur le statut des axiomes de la géométrie il considère trois options: soit ils sont des faits d'expérience, soit des jugements analytiques, soit des jugements synthétiques *a priori*. Il argue qu'aucune des trois options n'est valable et, en 1891, il résume sa discussion en disant que les axiomes géométriques sont des conventions ou des définitions déguisées. Son conventionnalisme géométrique s'inspire des lectures de Helmholtz, dont la pensée s'inscrit dans le mouvement de retour à Kant. Son beau-frère, le philosophe Émile Boutroux, avait assisté aux leçons de Helmholtz à Heidelberg (1869) et certains historiens ont considéré l'interaction entre Boutroux et Poincaré comme une des sources de la pensée philosophique de Poincaré. Si pour Michael Heidelberger et pour Laurent Rollet la philosophie de Boutroux (surtout sa thèse de 1874, *De la contingence des lois de la nature*) est "une *source possible* de la pensée philosophique poincaréienne", pour Fabien Capeillères, qui dans ses études sur Boutroux montre l'ascension du néo-kantisme en France pendant la période de formation de Poincaré, cette influence est douteuse et il suggère que c'est Boutroux qui s'ouvre, à partir des années 1890, à l'épistémologie néokantienne de Poincaré. [1]

[1] Poincaré 1887, 203, 215; Poincaré 1891, 773. Rollet, 2001, 6-7 ; Capeillères 2010, 195, 208. Cet auteur affirme : "Whatever the sequence of their mutual influences…. Poincaré had a strong influence on Boutroux's ultimate position concerning science", Capeillères 2010, 228.

Dans cet article j'élargis la question: plutôt que de considérer le rapport Boutroux-Poincaré en particulier, je préfère traiter simultanément son rapport au mouvement néokantien, ce qui suppose d'examiner, en sus des écrits de Boutroux, ceux du plus influent néokantien français, Lachelier, et ceux de Helmholtz qui est le seul penseur néokantien cité par Poincaré. Leurs réflexions sur des thèmes kantiens et leur usage philologiquement idiosyncrasique du langage de Kant permettent de détecter, de manière assez plausible, des lectures qui ont pu inspirer le jeune Poincaré. Cette étude illustre historiquement les rapports entre philosophes et savants, à une époque où les grands savants n'étaient plus nécessairement des savants-philosophes.

1. Initiation philosophique

1.1 Émile Boutroux

On ignore les détails de la formation philosophique de Henri Poincaré (1854-1912) pendant sa jeunesse ; ses notices biographiques ne font pas mention de ses lectures initiales. Dans ses textes, les citations sont rares, surtout quant il s'agit de philosophes (Kant est une des rares exceptions) et la correspondance connue ne nous aide pas trop. En 1979, Mary Jo Nye, a attiré l'attention sur l'influence du philosophe Émile Boutroux (1845-1921) et de son 'cercle' intellectuel sur la culture philosophique de Poincaré. Nye s'inspirait de Dominique Parodi, lequel avait noté qu'une des deux conséquences majeures de la pensée de Boutroux est celle "du caractère toujours plus ou moins conventionnel des grands principes…de nos sciences".[2]

Émile Boutroux, normalien, agrégé de Philosophie (1868) enseigne à Nancy en 1876, année de sa rencontre avec les Poincaré (le père de Henri Poincaré étant professeur de médecine à Nancy). Boutroux, qui comptait parmi ces maîtres Félix

---

Dans la vaste littérature secondaire, multiples sources d'inspiration directe ont été identifiés, concernant surtout des travaux de scientifiques qui ont inspiré son 'conventionnalisme géométrique' ; voir Giedymin, 1977, 273 et 290 et Darrigol "Les préfaces… ".

[2] Parodi 1925, chapitre VII, "La critique du mécanisme scientifique », 216 ; voir aussi 202, 217. Lalande 1954, 597, affirme que Poincaré a lu la thèse de Boutroux ; voir aussi : Nye 1979, Rollet 1999, Rollet 2001, Fagot-Largeault, 2002, Heidelberger 2009, Capeillères, 1998, Capeillères, 2010.

En 1877, Boutroux devient maître de conférences à l'École normale supérieure (remplaçant Fouillée en 1877), puis chargé de cours à la Sorbonne (1888). Il fut président du jury d'agrégation et membre de l'Académie des sciences morales et politiques (1898) puis de l'Académie française (1914) ; voir Rollet, 1999, 104-107 et Soulié 2009, 67.

Ravaisson (1813-1900) et Jules Lachelier (1832-1918), est chargé par Victor Duruy, le ministre de l'Instruction Publique, de visiter l'Allemagne pour y observer l'organisation universitaire (1868). Il assiste, à Heidelberg, pendant l'année 1869-1870, aux leçons de Hermann Helmholtz (1821-1894) et de Eduard Zeller (1814-1908), son séjour étant interrompu par la guerre. Ce dernier, historien de la philosophie grecque et philosophe néo-kantien, a insisté, contre Hegel, sur le rôle de la contingence dans l'histoire, et a prolongé son rôle jusqu'à la nature. Influencé par Zeller et par les maîtres du néo-criticisme français spiritualiste (catholiques comme lui), Boutroux écrit sa thèse française *De la contingence des lois de la nature* (1874), dirigée par Ravaisson. On y trouve une critique du positivisme et du statut des explications mécaniques.[3]

Le chapitre premier de cette thèse, "De la nécessité", propose une analyse fouillée des divers types de rapport nécessaire entre deux choses. La nécessité analytique est exemplifiée par le syllogisme; ce dernier est basé dans un rapport entre genre et espèce, ou tout et partie, établissant un enchaînement purement formel (le caractère nécessaire ou contingent de la proposition générale se communique tel quel à la proposition particulière); le rapport entre sujet et attribut, lorsque ce dernier résulte de la décomposition du premier montre qu'une proposition analytique "laisse subsister un rapport synthétique comme contrepartie du rapport analytique…. Si A=a+b+c+ [où a, b, c sont des attributs de la chose A, pouvant résulter d'un processus de décomposition successive A=B+C+D+… avec B=a+b+… etc.]…sans doute le rapport entre A et ses parties est analytique, mais le rapport réciproque entre les parties et le tout est synthétique. Car la multiplicité ne contient pas la raison de l'unité". Ensuite il considère les rapports synthétiques a priori par lesquels des liaisons nécessaires (pour notre esprit) sont établies entre des choses, les éléments de la liaison ne pouvant pas être dérivés de l'expérience.[4]

Boutroux admet que la nécessité qu'on attache à des jugements sur les phénomènes dans le cadre de l'espace et du temps (des lois physiques par exemple) peut n'être que subjective : " Si par hasard le cours des choses ne se conformait pas exactement aux principes posés a priori par l'esprit, il en faudrait conclure, non que l'esprit se trompe, mais que la matière trahit sa participation au non-être par un reste de rébellion contre l'ordre". Boutroux met en cause la distinction nette entre synthétique a priori et synthétique a posteriori (découlant de l'expérience). Pour lui, il y a dans "les objets perçus eux-mêmes, un certain degré de systématisation" et :

[3] Voir: Heidelberger, 2009, 99; Rollet, 1999, 77 ; Fagot-Largeault, 2002, 962-9.
[4] Boutroux, 1874, 8-12.

> Pour qu'un terme puisse être considéré comme posé a priori, il faut qu'il ne provienne de l'expérience ni directement, par intuition, ni indirectement, par abstraction... Il ne suffit pas qu'il établisse, entre les intuitions, une systématisation quelconque, comme si l'expérience ne fournissait rien qui ressemblât à un système.

Plus loin, Boutroux arrive à affirmer que les concepts mathématiques n'ont pas un caractère *a priori,* indépendant de l'expérience; ils résultent de l'abstraction d'un réel bien plus riche :

> Une droite n'est autre chose que la trajectoire d'un mobile qui va d'un point vers un autre…. Un tronc d'arbre qui, vu de près, est tortueux, paraît de plus en plus droit à mesure qu'on le voit de plus loin. Quel besoin avons-nous de notions à priori, pour achever ce travail de simplification, et éliminer par la pensée tous les accidents, toutes les irrégularités…[nous acquérons] par là la réalité appauvrie, décharnée, réduite à l'état de squelette…. Ainsi la forme et la matière des éléments mathématiques sont contenues dans les données de l'expérience.

Boutroux diffère donc de Kant sur un point fondamental, en s'inscrivant plutôt dans la lignée de l'auteur des *Catégories* et de la *Métaphysique.* [5]

Son cours sur l'idée de loi naturelle, professé à la Sorbonne en 1892-93, montre une évolution de ce point de vue:

> Les lois mathématiques supposent une élaboration très complexe. Elles ne sont connues exclusivement ni *a priori* ni *a posteriori :* elles sont une création de l'esprit ; et cette création n'est pas arbitraire, mais a lieu, grâce aux ressources de l'esprit, à propos et en vue de l'expérience…. Les mathématiques [appliquées à la physique] sont ainsi une adaptation volontaire et intelligente de la pensée aux choses ; elles représentent les formes qui permettront de surmonter la diversité qualitative, les moules dans lesquels la réalité devra entrer pour devenir aussi intelligible que possible…. Nos mathématiques représentent une forme particulière de la mathématique ; d'autres sont possibles, et, si nous tenons à celles-ci, c'est uniquement parce qu'elles sont plus simples, ou plus commodes pour comprendre les phénomènes extérieurs.

Sur ce passage on trouve deux idées communes à Poincaré (et on peut y voir une influence de Poincaré sur Boutroux) : le rôle déclencheur de l'expérience et le fait que le choix d'une géométrie physique et d'autres conventions se fait d'après des considérations de commodité (simplicité comme principe régulateur). [6]

Dans sa thèse, Boutroux, en accord avec Hume, Kant et Stuart Mill, juge que la science ne fournit pas la connaissance de la chose-en-soi mais seulement des phénomènes, idée générale qui se retrouve chez Poincaré. Pour Boutroux les lois de la

---

[5] Boutroux 1874, 10, 11 et chap. IV, 'De la matière', 48. Boutroux, 1895, 3e leçon, 'Les lois mathématiques, 22-23, 27. Sur d'autres aspects néo-aristotéliciens de la thèse de Boutroux voir Nye, 1979,115 ; aussi Capeillères 2010, 222, qui note que Aristote est très présent chez Ravaisson, à qui la thèse française de 1874 est dédiée, notamment dans sa notion de 'habitude'.
[6] Boutroux, 1895, 3e leçon, 'Les lois mathématiques', pp. 22-23, 27.

nature ne sont pas nécessaires; elles pourraient être autres sans que par là la nature de la pensée humaine soit violée. Il y a des niveaux d'existence, les uns étant supérieurs aux autres. Les sciences sont hiérarchisées d'un point de vue structural. Il juge que chaque couche est irréductible à celle qui la précède et qui est plus basique. Donc, les lois physiques ne sont pas rigoureusement déterminantes, et le sont de moins en moins, quand on passe des faits physiques aux faits biologiques et humains. Cela permet de "sauver" la spontanéité de la vie et la liberté humaine.[7]

Boutroux, se marie, en 1876, avec Aline Poincaré, la sœur de Henri. Il nous reste une lettre (1877 ?) de Henri à Aline qui montre qu'Émile, Aline et Henri discutaient quelques questions épistémologiques. Voici un extrait de cette lettre, lequel concerne le problème typiquement poincaréen de la généralisation :

> À défaut de l'induction tu comptes, pour connaître le monde, sur l'abstraction métaphysique… Donc un seul procédé scientifique. L'observation et l'induction appliquée avec réserve. Mais diras-tu, l'induction ne peut nous donner que des connaissances de même nature que celles que nous donne l'observation elle-même ; L'observation ne nous apprend rien sur la substance, rien sur l'attribut (comme diraient les scolastiques) ; elle ne nous montre que le phénomène seul, et encore pas en lui-même ; mais seulement la sensation qu'il nous fait éprouver ; et l'induction peut tout au plus nous conduire à la loi des phénomènes. Ces procédés, diras-tu, ne peuvent donc être suffisants pour nous donner la généralité des connaissances ; eh que veux-tu que j'y fasse ; prenons toujours ce qu'ils nous apprennent, et quant au reste, résignons-nous à avouer qu'il restera à jamais lettre morte pour nous.[8]

La détection de lectures inspiratrices en partant de ce texte court est difficile. Peut-être, en décrivant les deux processus qui permettent la connaissance scientifique – l'abstraction et l'induction – reflète-t-il une connaissance de la thèse de Boutroux, qui souligne le rôle de l'abstraction, et aussi de la thèse de Lachelier sur l'induction.

1.2 Jules Lachelier

Jules Lachelier (1832-1918), élève et ami de Ravaisson, fut Maître de conférences à l'École Normale Supérieure (1864-1875), après avoir enseigné dans des lycées de province (Paul Tannery fut son élève à Caen). Il enrichit le panorama philosophique français par son enseignement, lequel participa au renouveau kantien, et par son influence institutionnelle. Il caractérisa sa pensée comme un idéalisme

[7] L'idée de que la chose-en-soi est une absurdité, de que la connaissance se limite aux phénomènes avait aussi été véhiculée par Charles Renouvier (1815-1903), dans ses *Essais de critique générale* (1854) ; pour lui les lois sont des rapports, et il juge que la relation elle-même est la première catégorie de la connaissance, voir Ferrari, 2001, 38-39.

[8] Henri Poincaré à Aline Poincaré, Archives Poincaré, document non daté (1877 ?) ; cité d'après Rollet, 1999, 79.

objectif ou comme un spiritualisme, l'esprit ou la raison étant source de la validité objective. Son *Cours de Logique* a été suivi par Boutroux ; ce cours rédigé par des élèves de la promotion de 1866 (Bonnard, Liard) a été recopié par ceux de la promotion de 1888 (Brunschvicg, Cresson, Guyau) ce qui montre l'influence de ce texte dont les thèmes et instruments proviennent explicitement de Kant.[9]

Lachelier y expose les "conditions nécessaires pour qu'il y ait science" en suivant Kant. Il présente les formes de l'intuition sensible (espace, temps) et il montre comment il faut s'élever à la nécessité de la synthèse, acte de liaison de l'esprit, de composition, d'unification, de production d'un savoir cohérent à partir des éléments épars. Dans la Leçon 10, 'Des définitions mathématiques' Lachelier considère le caractère véritablement *a priori* des mathématiques. Il juge qu'elles n'ont pas un caractère inné :

> S'il est vrai que nous ayons l'esprit rempli d'idées de nombres et meublé de figures géométriques, comment se fait-il que chacun de nous soit resté jusqu'à ce jour sans se représenter beaucoup de figures, sans penser à beaucoup de nombres? Il est vrai que nous le faisons quand nous voulons : mais cela prouve seulement que nous avons le moyen de former ces idées, et non pas que nous les ayons toutes formées dans l'esprit.[10]

Les idées mathématiques sont le résultat d'une action de nous-mêmes, qui résulte de la puissance de notre esprit :

> Exemple : Je veux former le nombre 1 000 001. J'ajoute un million de fois l'unité à elle-même, et à ce million d'unités, j'ajoute encore l'unité (ou pour aller plus vite, j'opère sur des groupes de 10, 100, 1 000 unités). *Mais ce nombre, tant qu'il n'est pas fait, est-il dans mon esprit? Oui et non; il n'y est pas tant que je ne l'ai pas formé par une opération spéciale; mais il y est en puissance, en ce sens que j'ai tout ce qu'il faut pour le former*. De même d'un polygone de 1 000 côtés. Cette génération des nombres et des figures explique comment les démonstrations sont possibles, par cette raison que nous allons du simple au composé dont les propriétés résultent des propriétés du simple. Ainsi les notions mathématiques sont le résultat d'un travail propre de l'intelligence. Nous les formons nous-mêmes.[11]

Lachelier valorise donc le caractère constructif et a priori des mathématiques; pour lui la synthèse qui est en oeuvre dans les mathématiques est une sorte d'action-mouvement de l'aperception pure. Pour expliquer la formation des nombres entiers et des figures géométriques il considère la nécessité de trois éléments en rapport dialectique. Le premier est l'unité de la conscience; le second est l'image abstraite de

---

[9] Président du jury d'agrégation de philosophie ; inspecteur général de l'Instruction Publique (1879), membre de l'Académie des sciences morales et politiques. Voir Boutroux, 1921, Soulié, 2009, 68, Capeillères, 1998, 407, 418-424.

[10] Lachelier, 1866, 55.

[11] Lachelier, 1866, 56-57.

l'espace (notion a priori). Ces deux éléments s'opposent, et leur opposition se résout par l'introduction d'un troisième élément, le mouvement:

> Eh bien, avec ces deux éléments, pensée et espace, pouvons-nous engendrer le nombre et la figure? Ici, au lieu d'une pure unité qui ne pouvait pas même se reconnaître comme telle, faute de s'opposer à une pluralité, nous avons en plus l'espace, qui nous fournit les éléments cherchés, savoir : l'extériorité réciproque, la diversité des parties - du nombre et de la figure. Et pourtant la difficulté n'est que déplacée. Comment peuvent s'unir ces deux choses si étrangères l'une à l'autre : unité de conscience et diversité de l'espace? Je veux tracer une ligne et j'en ai les éléments : mais il faut relier entre eux ces éléments et transformer en quelque sorte chacun des deux dans l'autre. Pour qu'il y ait une ligne, il ne suffit pas que mon esprit ait devant lui une diversité de parties dans l'espace. Il faut que les éléments de cette diversité soient reliés entre eux. Le nombre 2 n'est pas 1 et 1, mais 1 + 1. Or entre la diversité de l'espace et l'unité de la pensée, tout rapport immédiat est impossible. Et si la pensée pouvait s'unir immédiatement à l'espace, elle s'unirait à toutes ses parties à la fois : ce qui ne donnerait ni nombre ni figure déterminée. Il faut donc admettre l'intervention d'un troisième élément. Ce sera le mouvement, qui contient tout ce qu'il faut pour franchir l'intervalle qui sépare l'unité de la diversité. Le mouvement en effet est comme la pensée; nous avons conscience de l'unité de notre effort, de l'unité de notre mouvement, considéré dans sa racine, qui est l'âme.[12]

Lachelier en niant le caractère inné des idées mathématiques veut valoriser l'aspect constructif des mathématiques qu'il juge être éminemment synthétique. Comme le note Miklos Vëto, la synthèse a priori est l'âme de l'oeuvre de Kant et:

> Ce qui distingue l'analyse de la synthèse, c'est que la première conçoit ce qui se trouve 'dans' le concept d'une chose tandis que la seconde concerne ce qui doit être joint pour que la chose soit effectivement…. L'esprit ne saurait se satisfaire d'une vocation d'archéologue de soi-même, ne voudrait pas se limiter à n'extraire que ce qui se trouve depuis toujours en lui-même d'une manière confuse et 'cachée'…. Dans la synthèse a priori l'esprit trouve bel et bien son 'autre', le sujet admet et accueil des prédicats 'étrangers', en un mot la raison procède à de 'nouvelles acquisitions'.[13]

Dans la thèse de 1871, *Du fondement de l'induction*, Lachelier considère la nature et justification de l'opération par laquelle on passe de la connaissance des faits à celle des lois qui les régissent. Lachelier sa thèse par des considérations historiques, présentant les points de vues d'Aristote, de l'école écossaise (Reid, Royer-Collard), de Claude Bernard, de Stuart-Mill et deVictor Cousin. Pour Lachelier, qui suit Kant, l'induction se résout en deux lois distinctes : le principe des causes efficientes (concernant les séries de phénomènes où un phénomène détermine un autre en le précédant) et le principe des causes finales (où un tout produit l'existence de ses propres parties). Il juge qu'il y a autant de manières de justifier le double principe que

---

[12] Lachelier, 1866, 57-58. Ce passage a une nette résonance fichtéenne.
[13] Vëto, 1998, 63-64.

de “concevoir la réalité et l’acte par lequel notre esprit entre en commerce avec elle” et il présente les “seules trois solutions”. Celle, empiriste, de Hume et Stuart Mill pour qui la réalité s’identifie avec les phénomènes, la principale source de connaissance étant la sensation ; celle de Victor Cousin, pour qui les phénomènes “ne sont que la manifestation d’un monde d’entités inaccessibles à nos sens”, la principale source de connaissance étant une sorte d’intuition intellectuelle (rationalisme transcendant) ; la troisième hypothèse, la favorite de Lachelier, est celle de Kant (idéalisme objectif), pour qui “quel que puisse être le fondement mystérieux sur lequel reposent les phénomènes, l’ordre dans lequel ils se succèdent est déterminée exclusivement par les exigences de notre propre pensée”. C’est l’existence d’un sujet doué d’unité, dans la diversité des sensations, simultanées ou successives, qui rend possible la connaissance (aperception pure). L’unité, la liaison interne des phénomènes résulte non “d’une liaison contingente, mais d’un enchaînement nécessaire”.[14]

La loi des causes efficientes rend possible notre connaissance des phénomènes, compris comme “une diversité dans le temps et dans l’espace” dont l’unité “ne peut être qu’un changement continu et uniforme de position…un mouvement”. C’est la mécanique qui donne l’objectivité aux phénomènes, en les organisant par une détermination nécessaire: “le mécanisme de la nature est, dans un monde soumis à la forme du temps et de l’espace, la seule expression possible du déterminisme de la pensée…. Les phénomènes doivent nous offrir…une sorte de réalisation de l’unité de la pensée : et cette unité ne peut pas se réaliser que dans une diversité homogène, qui soit…une en puissance comme celle du temps et de l’espace”.[15]

Le point de vue mécaniste, associé au principe des causes efficientes, pose le problème de “la spontanéité de la vie et la liberté des actions humaines”, pour lequel Lachelier invoque la loi des causes finales, principe d’existence d’ensembles dont les parties se conditionnent mutuellement, c'est-à-dire des systèmes où les phénomènes s’organisent, par intervention des idées, en touts harmonieux, irréductibles à la quantité. Le mécanisme ne suffit pas à la pensée et doit être complété par la finalité. Cette problématique de la conciliation entre science et liberté, essentielle pour le

[14] Lachelier, 1871, 37-8, 42, 46, 51 ; voir Fagot-Largeault, 2002, 960-2. “Lachelier médita longuement sur le point de départ de la démonstration des principes de la connaissance. Longtemps devant lui, sur la table de travail, la *Critique de la raison pure* resta ouverte à la page où on lit cette phrase : ‘il faut nécessairement que le *je pense* puisse accompagner toutes mes représentations : autrement, celles-ci ne seraient pas pour moi’ ”, Boutroux, 1921, 7-8.

[15] Lachelier, 1871, 47, 51-2, 54-58.

spiritualisme rationaliste français, est centrale dans la thèse de Boutroux, mais elle est presque absente des réflexions de Poincaré.[16]

2. L'occasion de l'expérience

Dans ses réflexions initiales sur la géométrie, Poincaré s'interroge sur l'origine du postulat des parallèles d'Euclide et sur la présence de jugements synthétiques a priori en mathématiques. Il reformule la pensée kantienne et établit le caractère conventionnel des postulats, soulignant qu'ils sont des conventions de langage, résultant de la décision libre de l'esprit, motivée par l'expérience. Ces questions lui font noter le caractère symbolique du discours scientifique et l'importance de la traduction entre langages scientifiques.[17]

2.1 Helmholtz

Les réflexions de Poincaré sur la réalité de la géométrie ont été motivées par celles de Bernhard Riemann (1826-1866), pour qui "la courbure de l'espace dans lequel nous vivons doit être déterminée par des mesures empiriques", et par celles de Hermann von Helmholtz (1821-1894). Si Helmholtz fut "la voix la plus autorisée qui, au cours des années 1850, s'élève en faveur d'un retour à Kant" il n'est resté fidèle qu'à l'esprit du kantisme. Dans la *Critique de la Raison Pure* on lit : "La solidité des mathématiques repose sur des définitions, des axiomes et des démonstrations… Les axiomes sont des principes synthétiques *a priori*, dans la mesure où ils sont

[16] Voir Lachelier 1871, 58, 64, 73, 101 ; voir aussi Boutroux, 1921, 9-10. Sur la position de Renouvier voir Parodi, 1925, 65-6 ; sur celle de Ravaisson voir Parodi, 1925, 167 ; aussi Capeillères 2010, section 'The philosophical crisis of spiritualism (1840-1874)', 196-213.
Poincaré, à la fin de la IV section du Poincaré, 1900, montre que les méthodes de la physique mathématique (l'usage des équations différentielles) ne peuvent pas servir aux naturalistes. Le chapitre VIII des *Dernières pensées*, 'La morale et la science', contient une réponse, paradoxale, à la question déterminisme/liberté : on agit comme un homme libre, on est déterministe en tant que scientifique, Poincaré, 1913, 46.

[17] Poincaré 1887 et Poincaré 1891. L'expression 'occasion de l'expérience' apparaît en plusieurs textes des années 1890 ; par exemple : "La notion de ces corps [solides] idéaux est tirée de toutes pièces de notre esprit et l'expérience n'est qu'une occasion qui nous engage à l'en faire sortir", Poincaré, 1895, 645 ; voir Heinzmann 1993, § III.

immédiatement certains" (A726 et A732) ; cette conviction sera la cible de la critique de Helmholtz. [18]

Les études de Helmholtz sur la sensation l'ont conduit à un 'kantisme physiologique'. Dans sa critique à la représentation de l'espace, Helmholtz s'est penché vers une interprétation empiriste, soulignant sa genèse à travers l'expérience et l'exercice et valorisant l'aspect physiopsychologique ; considérant les "faits" qui sont le fondement des constructions géométriques (1868 et 1870), il nota que les recherches géométriques étaient parties d'un fait d'expérience – l'existence de corps rigides et libres de se déplacer ; les axiomes de la géométrie concerneraient les relations entre corps rigides. Dans son allocution à Heidelberg, 'Sur l'origine et signification des axiomes géométriques' de 1870, il cite la thèse de Kant selon laquelle ces axiomes sont des principes synthétiques a priori, et note que l'existence de plusieurs géométries à courbure constante réfute le caractère "transcendantal a priori des axiomes de la géométrie, au sens kantien". Mais Helmholtz souligne qu'on pouvait aussi considérer " 'transcendantal' [c'est à dire indépendant de l'expérience] le concept de 'construction géométrique rigide de l'espace' : en ce cas…la géométrie ne serait pas construite sur une synthèse *a priori*, mais serait plutôt déduite de ce postulat fondamental par voie analytique". Torretti note que cette allocution "contains what is perhaps the first statement of a conventionalist position… restricted to a choice of two geometries". [19]

Helmholtz considère les lois psychophysiologiques primaires de la perception comme étant des formes a priori de l'intuition, et, dans ce sens, l'espace est constitué a priori. En 1878, dans son texte 'L'espace peut être transcendantal sans que les axiomes le soient' Helmholtz affirme:

> La doctrine kantienne des formes de l'intuition données *a priori* est une expression très heureuse et très claire de l'état des choses. Mais ces formes doivent rester suffisamment libres et vides de contenu pour pouvoir recueillir tout contenu pouvant, d'une manière générale, se présenter dans la forme respective de la perception. Cependant, les axiomes de la géométrie limitent tellement la forme d'intuition de l'espace que tout contenu pensable ne peut plus désormais y être recueilli, pour autant que la géométrie doive être applicable au monde effectif. Laissons-les de côté, et la doctrine de la transcendentalité de la forme de l'intuition de l'espace n'est plus choquante.

Ce sont des formes *a priori* qui permettent la représentation des objets externes ayant des rapports spatiaux, mais comme le note Torreti "this not imply that certain

[18] Helmholtz 1878, traduction de Bienvenu 2002, 405; Ferrari, 2001, 13. Sur l'inspiration de Helmholtz sur Poincaré voir Poincaré 1891, 769, Heinzman 2001 et Darrigol 2007.

[19] Helmholtz 1870 in Helmholtz 1883, 4, 22, 30. Voir Torreti, 1978, 166; Ferrari, 2001, 22. Sur l'affirmation de Torreti voir aussi Helmholtz 1878, dans Bienvenu, 2002, 403 (avant-dernier paragraphe).

spatial perceptions must go together, e. g., that if a triangle is equilateral its angles must be equal to $\pi/3$. Helmholtz emphasizes that the general form of extendedness that we may regard as given a priori must be quite indeterminate”.[20]

2.2 Le synthétique a priori et les conventions

En 1887, Poincaré détermine les hypothèses qui sont nécessaires et suffisantes pour servir de fondement aux géométries planes métriques, c'est-à-dire celles qui prennent “pour point de départ la possibilité du mouvement ou plutôt l’existence d’un groupe de mouvements qui n’altèrent pas les distances”. Pour cela il utilise les travaux du savant norvégien Marius Sophus Lie (1842-1899) sur les groupes continus.[21]

Poincaré affirme que ces hypothèses (postulats ou axiomes) ne sont ni des faits expérimentaux, ni des jugements analytiques, ni des jugements synthétiques *a priori*. Dans le premier cas ces hypothèses devraient être soumises à une incessante révision, et dans les deux derniers cas “il serait impossible de s’y soustraire et de rien fonder sur leur négation”. [22]

Le *postulatum* des parallèles d’Euclide ne peut pas être considéré vrai au sens d’être testable par la physique, car il résulte d’un choix parmi plusieurs possibles :

> La géométrie n’est autre chose que l’étude d’un groupe et, en ce sens, on pourrait dire que la vérité de la géométrie d’Euclide n’est pas incompatible avec celle de la géométrie de Lobatchevski, puisque l’existence d’un groupe n’est pas incompatible avec celle d’un autre groupe. Nous avons choisi, parmi les groupes possibles, un groupe particulier pour y rapporter les phénomènes physiques, comme nous choisissons trois axes de coordonnées pour y rapporter une figure géométrique. [23]

---

[20] Helmholtz, 1878, in Bienvenu, 2002, 409-410 ; Torreti, 1978, 163, 166-168.Voir: Rollet, 1999, chap. 1, 31, 35, 50 ; Bienvenu 2002, 395.

[21] Poincaré, 1887, 213-4. Pour Gyedimin ces réflexions sont à la base du conventionnalisme géométrique ; Le mémoire de Sophus Lie de 1871, ‘Sur une classe de transformations géométriques’, “contains explicit ideas which could clearly have suggested to Poincaré’s a *conventionalist philosophy of geometry whose emphasis…[is] on the intertranslability* (in a sense) *of various geometries*”; Gyedimin, 1977, 271-2, 287. Jammer note que “Les recherches de Helmholtz ont trouvé une élaboration mathématique rigoureuse dans les travaux de Lie”, Jammer 1993, 170.

[22] Poincaré, 1887, 203, 215. Kant est cité à propos du synthétique *a priori* dans Poincaré, 1891a, 773. Voici un jugement analytique : deux quantités égales à une même troisième sont égales entre elles, Poincaré 1891, 769.

[23] Poincaré, 1887, 215. L’idée qu’une géométrie est essentiellement caractérisée par un groupe de transformations (et ses invariants) se trouve dans des travaux de Félix Klein (1849-1895) des années 1870 ; voir Kline, 1972, chap. 38, ‘Projective and metric geometry’, 917-921.

Le groupe euclidien a été choisi à cause de sa simplicité et commodité motivé par l'observation des corps solides, dont les mouvements correspondent "à fort peu près" aux opérations du groupe choisi. Le caractère des hypothèses qui fondent la géométrie euclidienne utilisée en physique est donc celui des conventions, de "définitions déguisés":

> Les axiomes géométriques ne sont donc ni des jugements synthétiques *a priori* ni des faits expérimentaux. Ce sont des *conventions* ; notre choix, parmi toutes les conventions possibles est *guidé* par des faits expérimentaux ; mais il reste *libre* et n'est limité que par la nécessité d'éviter toute contradiction. C'est ainsi que les postulats peuvent rester *rigoureusement* vrais quand même les lois expérimentales qui ont déterminé leur adoption ne sont qu'approximatives. En d'autres termes, *les axiomes de la géométrie* (je ne parle pas de ceux de l'arithmétique) *ne sont que des définitions déguisées*.[24]

La comparaison entre le choix d'une géométrie et le choix d'un système de coordonnées, est élargie en devenant explicite dans la partie de l'article de 1891 qui s'occupe du problème de la consistance des géométries non-euclidiennes. Après avoir invoqué les travaux d'Eugenio Beltrami (1835-1900) donnant un modèle Riemannian de la géométrie de Lobatchevski, Poincaré montre comme le même problème peut être résolu en établissant une sorte de dictionnaire reliant les objets d'une géométrie à ceux d'une autre. Il montre ainsi qu'à chaque théorème de la géométrie de Lobatchevski correspond un théorème de la géométrie ordinaire. Et il note que ces multiples traductions ont des applications inouïes :

> Cette interprétation n'est d'ailleurs pas unique, et l'on pourrait établir plusieurs dictionnaires analogues à celui qui précède et qui tous permettraient par une simple « traduction » de transformer les théorèmes de Lobatchevski en théorèmes de géométrie ordinaire. La géométrie de Lobatchevski, susceptible d'une interprétation concrète, cesse d'être un vain exercice de logique et peut recevoir des applications… M. Klein et moi en avons tiré parti pour l'intégration des équations [différentielles] linéaires.[25]

Poincaré associe le caractère conventionnel de la géométrie à l'intertraductabilité des géométries, ce qui défavorise la prétention ontologique des empiristes. Le teste utilisant la parallaxe des étoiles admet que les rayons lumineux

[24] Poincaré, 1891, 773.
[25] Poincaré, 1891, 771. Poincaré se réfère à ses travaux sur les groupes fuchsiens, réalisés dans la période 1881-1884, en particulier aux cinq mémoires fondamentales publiés en 1884 dans *Acta mathematica*. Kline note : "In this work on Fuchsian groups Poincaré used non-euclidean geometry and showed that the study of Fuchsian groups reduces to that of the translation group of Lobatchevskian geometry", Kline, 1972, chap. 29, p. 729. Les géométries non-euclidiennes sont un des ingrédients des articles de la période de Caen (1879-1881) qui ont fait la célébrité du jeune Poincaré (études sur les formes quadratiques et ternaires, la théorie qualitative des équations différentielles, les fonctions automorphiques) ; voir Mawhin, 2004, § 4.

sont des lignes droites ; mais un résultat en apparence contraire à la géométrie euclidienne pourrait préférablement être interprété en modifiant les lois de l'optique : "Inutile d'ajouter que tout le monde regarderait cette solution comme plus avantageuse". Poincaré croit donc que "la géométrie euclidienne est et restera la plus commode".[26]

En 1887, Poincaré note que l'étude de la Géométrie suppose comme connues l'Algèbre et l'Analyse. Or "on peut montrer que l'Analyse repose sur un certain nombre de jugements synthétiques *a priori*", des jugements ayant caractère constitutif, nécessaire et universel, permettant de bâtir sur eux un édifice théorique ; En 1891 il explicite un de telles principes: celui de récurrence (Si un théorème est vrai pour le nombre 1, si on a démontré qu'il est vrai de n+1 pourvu qu'il le soit de n, il sera vrai de tous le nombres positifs). Dans l'article de 1894 "Sur la nature du raisonnement mathématique", Poincaré note que le principe de récurrence permet d'enfermer une infinité de syllogismes dans une seule formule. Il est un instrument indispensable pour les démonstrations en arithmétique et en analyse, permettant de passer du fini à l'infini. Pour lui, il s'agit d'une règle inaccessible à la démonstration analytique et à l'expérience" ; n'étant pas une convention elle "est le véritable type du jugement synthétique *a priori*", dans lequel s'affirme "la puissance de l'esprit qui se sait capable de concevoir la répétition indéfinie d'un même acte dès que cet acte est une fois possible. L'esprit a de cette puissance une intuition directe et l'expérience ne peut être pour lui qu'une occasion de s'en servir et par là d'en prendre conscience."

Cette puissance de l'esprit qui confère la spécificité aux concepts mathématiques évoque directement la pensée de Lachelier, si présente chez les philosophes néokantiens qui fondent en 1893 la *Revue de métaphysique et de morale* (*RMM*), à laquelle Poincaré participe dès le premier numéro.[27]

L'article de Poincaré sur le continu mathématique, contient des passages qui sont en résonance avec ses réflexions sur la géométrie et les théories physiques. Un texte de Helmholtz y est cité, *Zählen und Messen* ('Compter et mesurer') de 1887, qui pose la question de la représentabilité des grandeurs physiques par des nombres. Poincaré souligne la motivation empirique de l'introduction du continu et la puissance de l'esprit qui permet la construction du continu :

[26] Poincaré, 1891, 774.

[27] Poincaré 1887, 215; Poincaré 1891, 773; Poincaré, 1894, 381-382 ; L'effort d'arythmétisation de l'Analyse mathématique, fait par Dedekind et par Peano montra la centralité de l'induction mathématique, raison probable pour laquelle Poincaré a donné un rôle d'archétype à ce principe d'inférence, Detlefsen, 1992, 373. Igor Ly note l'importance de ce concept de puissance de l'esprit, sans en analyser sa généalogie, voir Igor Ly, 2008, § 2.3.2 et deuxième partie.

[La notion du continu] a été créée de toutes pièces par l'esprit, mais c'est l'expérience qui lui a fourni l'occasion…. L'esprit a la faculté de créer des symboles, et c'est ainsi qu'il a construit le continu mathématique, qui n'est qu'un système particulier de symboles. Sa puissance n'est limitée que par la nécessité d'éviter toute contradiction.

Poincaré note que le continu devient une grandeur mesurable après l'établissement d'une convention qui permet de comparer la longueur de deux intervalles. [28]

La genèse de l'espace géométrique est l'objet d'une série de textes, le premier étant publié en 1895, dans la *RMM.* Poincaré montre que l'espace à trois dimensions est construit par l'esprit, librement, mais à l'occasion de l'expérience. Il résulte de la comparaison entre plusieurs espaces sensibles (visuels, tactiles, moteurs). La géométrie euclidienne est une des géométries qui s'occupe de solides idéaux, absolument invariables ; elle est choisie à cause de sa commodité. La notion de groupe a caractère *a priori,* constitutif et nécessaire :

> Ce qui est l'objet de la géométrie, c'est l'étude d'un groupe particulier ; mais le concept général de groupe préexiste dans notre esprit au moins en puissance. Il s'impose à nous, non comme une forme de notre sensibilité, mais comme forme de notre entendement.[29]

Comme le note Igor Ly:

> L'adoption d'une géométrie est conventionnelle en ce qu'elle repose sur le choix d'un certain groupe, mais la mise en œuvre nécessaire de la notion *a priori* de groupe pour instituer un ordre spatial au sein de l'expérience sensible ne l'est pas.[30]

Poincaré affirme, en termes kantiens, que l'espace sensible gagne son intelligibilité à partir de l'œuvre de l'entendement, fonction de l'esprit qui relie les sensations en systèmes cohérents.

[28] Poincaré,1893, 29-30, 32-33. Darrigol note: "Poincaré's conception of measurement had much similarity with Helmholtz's. He believed that any measurement required conventions of equality and addition, and that the arbitrarieness of these conventions was only limited by arithmetic properties such as transitivity, commutativity, and associativity", Darrigol 2003, § 3.1.6, 563.
[29]Poincaré, 1895, 645.
[30] Ly, 2008, 94.

Epilogue et Conclusion

Depuis Cassirer, des philosophes néo-kantiens ont encadré la pensée de Poincaré dans le néo-kantisme, mais sans chercher sa généalogie historique concrète. Le rapport à Boutroux et à son cercle a été proposé en suggérant que son conventionnalisme est lié à l'idée de la contingence des lois. La littérature plus récente sur le néokantisme spiritualiste français inscrit Boutroux dans ce mouvement et motive l'enquête sur les sources françaises de la pensée de Poincaré.[31]

L'interaction entre Poincaré et Boutroux a favorisé l'intérêt du jeune Poincaré par des questions épistémologiques et a pu lui fournir des renseignements précieux sur Helmholtz, et sur le mouvement de retour à Kant (en France et en Allemagne); à travers Boutroux, Poincaré a plausiblement eu vent de la pensée spiritualiste néokantienne dont Jules Lachelier était la figure majeure, par son enseignement et son influence institutionnelle. Boutroux a accompagné le développement de la pensée de son beau-frère et l'a mis en contact avec des cercles philosophiques. C'est par l'entremise de Boutroux que Poincaré devient un collaborateur régulier de la *RMM*, la revue fondé par Xavier Léon en 1893. Poincaré était philosophiquement immergé dans le milieu néokantien français, qui domina la philosophie universitaire française, et dont la *RMM* est un des organes. [32]

Boutroux, comme ses maîtres français spiritualistes et néo-kantiens, s'intéressait à la science, dans la bonne tradition philosophique française de Pascal et Descartes. Dans ce contexte philosophique français dominé par des thèmes kantiens le mécanisme et le déterminisme étaient mis en cause pour des raisons essentiellement extrascientifiques. L'influence de l'idée de contingence de Boutroux sur le noyau des idées de Poincaré semble douteuse, mais sa discussion initiale sur les divers types de nécessité et ses idées épistémologiques (issues d'Aristote, de Leibniz et de Kant), de même que ses probables lectures de Lachelier, ont pu le motiver à réfléchir sur le

[31] Voir : Cassirer, 1910, chapitre III, section IV, qui reprend la critique poincaréienne de la notion d'espace ; Le principe de récurrence comme jugement synthétique *a priori* est étudié dans Cassirer, 1948, vol. IV, fin du chap. IV du Livre I, p. 101. Voir aussi : la préface de J. Vuillemin à *La Valeur de la Science*, p. 11 ; Friedmann, 1999, chap. 3 et 4. Friedmann montre comment le synthétique a priori de l'arythmétique est condition du conventionnalisme géométrique puisque le choix d'une géométrie est le choix d'un groupe continu de transformations et il y a une hiérarchie des disciplines (la physique préssupose la géométrie, celle-ci l'analyse), Friedmann 1999, 74.
C'est tardivement, dans sons débat avec le nominaliste Le Roy (1902), dans les pages de la *RMM*, que Poincaré parlera explicitement de "la contingence des lois naturelles", voir Poincaré, 1902a, § 5. – 'Contingence et déterminisme' ; Poincaré y note la pluralité d'acceptions du thème.

[32] Sur les rapports entre Boutroux et les fondateurs de la *RMM*, voir Soulié, 2009, 67-68.

synthétique a priori, sur le rôle déclencheur de l'expérience et sur l'importance de principes de convenance ou régulateurs (simplicité, unité, systématicité). Lachelier, Boutroux et Poincaré valorisent tous le rôle constructif, synthétique de la pensée. Lachelier est plus strictement kantien que Boutroux en ce qui concerne les mathématiques et Poincaré le suit dans la mesure où il spécifie des principes synthétiques a priori qui permettent de bâtir l'arithmétique, l'analyse et la géométrie (récurrence, notion de groupe de transformations). Ceux-ci exhibent la puissance de l'esprit affirmée par Lachelier. Poincaré diffère des néo-kantiens français par la profondeur de ses réflexions sur le territoire des sciences mathématiques ; ce sont des arguments intérieurs à ce territoire qui permettent à Poincaré, en accord avec Helmholtz, d'argumenter contre le caractère a priori des axiomes géométriques et aussi d'envisager le caractère nécessaire et constitutif de la notion de groupe et du principe de récurrence ; cela ne contredie pas le rôle constitutif des conventions, dont le choix est réglé par des principes de convenance au sens kantien de la dissertation de 1770 (thèmes pour lesquels Poincaré n'utilise pas une terminologie kantienne).[33]

Ces auteurs profondément influencés par Kant n'utilisent pas la terminologie kantienne d'une manière orthodoxe. Poincaré s'inspire de Helmholtz, mais n'utilise jamais la terminologie idiosyncrasique du savant allemand, lequel, comme le néo-kantien Alois Riehl nota en 1904, confond constamment "les concepts a priori, de propre au sujet et de transcendantal"; Poincaré, bien que par son intuitionnisme valorise le rôle des synthèses, restreint l'usage du terme synthétique a priori aux principes (uniques) qui permettent de fonder les disciplines et les lie à la puissance de l'esprit. Sa terminologie s'inspire plutôt de Lachelier et est en harmonie avec le cours de Boutroux sur Kant de 1896 qui débute avec la centralité des jugements synthétiques a priori.[34]

La singularité de Poincaré dans le paysage philosophique français résulte du fait que ses réflexions philosophiques sont suscitées par des problèmes éminemment scientifiques et apparaissent au moment de ses recherches ou de sa présentation critique des théories d'autres savants. Cela est reconnu par Boutroux dans l'étude publiée juste après le décès de Poincaré. Boutroux note que Poincaré "était en philosophie un autodidacte, et il éprouvait à l'égard des systèmes une méfiance

[33] Cette connaissance profonde des sujets scientifiques est absente par exemple dans la thèse de Louis Liard, *Des définitions géométriques et des définitions empiriques* (1873). Liard, sans pour autant suivre scrupuleusement la terminologie de Kant, souligne le rôle a priori des définitions géométriques ; il ne cite que, parmi les savants récents, Beltrami. Liard (1846-1917), qui est un disciple de Lachelier, deviendra très influent comme directeur de l'enseignement supérieur français.

[34] Voir Riehl 1904, 586 ; aussi : « [Helmholtz] utilise improprement 'transcendantal' à la place de 'a priori'», Bienvenu 2002, 397.

particulière”. Sur le début des réflexions de Poincaré il note que “c’est la géométrie non-euclidienne qui conduisit Henri Poincaré à ses premières réflexions philosophiques…. C’est l’étude des axiomes géométriques qui, de bonne heure, avait amené Poincaré à repousser la théorie kantienne de l’espace…. Les recherches de Poincaré sur les ‘fonctions fuchsiennes’ le conduisirent, d’une manière tout à fait inattendue, à un nouveau mode de traduction des théorèmes non-euclidiens en propriétés de figures euclidiennes”. Ce nonobstant, la critique de Poincaré de la théorie kantienne de l’espace, se situe dans le cadre du kantisme. En dessous des conventions il y a un niveau constitutif et nécessaire qui, permettant en puissance un ensemble de constructions possibles, s’actualise à l’occasion de l’expérience. La commodité guide le choix d’un certain langage, mais ce langage peut se traduire dans un autre langage, ce qui quelquefois est utile pour le savant.[35]

Pour résumer, c'est sur un terrain scientifique et mathématique que Poincaré ressent le besoin d'une réflexion philosophique originale; mais c'est son immersion précoce dans le milieu néokantien français qui permet d'inscrire sa pensée dans le mouvement général des idées ; mais il est vain de chercher une relation causale simple entre des lectures philosophiques éventuelles de Poincaré et ses propres réflexions épistémologiques, pour au moins trois raisons : on ne sait pas vraiment ce qu'il a lu et ce qu'il a discuté de littérature philosophique; on sait qu'il était hostile à la philosophie de systèmes et l'on sait que la principale motivation de sa réflexion philosophique était scientifique. On peut simplement constater certaines affinités, une certaine communauté thématique avec des penseurs néokantiens de son époque et juger vraisemblable que cette convergence ne soit pas le fait du hasard.

[35] Collectif, 1914, 100-2, 116. Boutroux note que Poincaré « médite seul et presque dans le secret », ce qui implique une incertitude dans la détection des inspirations non explicitées.

Bibliographie

Andler, Daniel; Fagot-Largeault, Anne; Saint-Sernin, Bertrand, *Philosophie des sciences* II. Paris: Gallimard, 2002.
Barot, E. et Servois, J. (Dir.), *Kant face aux mathématiques modernes.* Paris: Vrin, 2009.
Bienvenu, Alexis, "Helmholtz, critique de la géométrie kantienne". In: *Revue de métaphysique et de morale,* nº 3, 2002, 391-410.
Boutroux, Émile, *De la contingence des lois de la nature,* 2ème édition de 1895, lib. Félix Alcan, 1874.
Boutroux, Émile, *De l'idée de loi naturelle dans la science et la philosophie contemporaines*, Cours professé à la Sorbonne en 1892-1893, Paris : lib. Félix Alcan, 1895.
Boutroux, Émile, *La philosophie de Kant ; cours professé à la Sorbonne en 1896-97,*Paris : Vrin, 1968.
Capeillères, Fabien, "Généalogie d'un néokantisme français à propos d'Émile Boutroux". In: *Revue de métaphysique et de morale,* nº 3, 1998, 405-442.
Capeillères, Fabien, "To Reach for Metaphysics: Émile Boutroux's Philosophy of Science". In: Makkreel and Luft, 2010, 192-252.
Cassirer, Ernst, *Subbstanzbegriff und Funktionsbegriff*, Berlin, 1910; *Substance and Function,* traduction anglaise par W. C. Swabey et A. M. C. Swabey, Open Court Publishing Company, Chicago, 1923.
Cassirer, Ernst, *Das Erkenntnisproblem in der Philosophie und Wissenschaft der neuren Zeit,* vol. IV (ouvrage posthume). Traduction espagnole, *El Problema del conocimiento*, par Wenceslao Roces, éditions FCE, 1948.
Collectif (Pierre Boutroux, Jacques Hadamard, Paul Langevin, Vito Volterra) *Henri Poincaré, L'œuvre scientifique, l'œuvre philosophique,* Librairie Félix Alcan, 1914 ; Je cite de l'édition on-line de 2003 des éditions Vigdor (on-line).
Darrigol, Olivier, "La mesure au tournant critique: quelques réflexions de Hermann von Helmholtz", résumé de la séance du 27 novembre 2001 du séminaire d'histoire et philosophie de la mesure, 2001; disponible sur http://www.metrodiff.org/activit/rehseis/o-darrigol.htm.
Darrigol, Olivier, "Number and measure: Hermann von Helmholtz at the crossroads of mathematics, physics, and psychology". In: *Studies in History and Philosophy of Science,* vol. 34, 2003, 515-573.
Darrigol, Olivier, "A Helmholtzian approach to space and time". In: *Studies in History and Philosophy of Science,* vol. 38, 2007, 528-542.
Detlefsen, Michael, "Poincaré against the logicians". In: *Synthèse* vol. 90, 1992, 349-378.
Fagot-Largeault, Anne "L'émergence", dans Andler 2002, 951-1048, 2002.
Ferrari, Massimo, *Retours à Kant*, traduction de l'italien par Thierry Loisel. Paris, les Éditions du Cerf, 2001.
Giedymin, Jerzy, "On the origin and significance of Poincaré's conventionalism". In: *Studies in History and Philosophy of Sciences,* vol. 8, n° 4, 1977, 271-300.
Heidelberger, Michael, "Contingent laws of nature". In: Heidelberger et Schiemann, 2009, 99-144.
Heidelberger, Michael et Schiemann, Gregor, *Significance of the hypothetical in the natural sciences*. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 2009.
Heinzmann, Gerhard, "Poincaré's Okkasionalismus in der Geometrie" in *Drei Vorträge zu Poincaré, Semantical Aspects of Spacetime theories,* Bielefeld: Zentrum für interdiszciplinäre Forshung, 1993 ; version française sur poincare.univ-nancy2.fr/digitalAssets/74757_occasionnalisme_poincare.pdf.
Heinzmann, Gerhard, The foundations of geometry and the concept of motion: Helmholtz and Poincaré". In: *Science in Context,* vol. 14, 2001, 457-470.

Helmholtz, Hermann von, „Ueber den Ursprung und die Bedeutung der geometrischen Axiome“, 1870 (Allocution faite à la *Docentverein* à Heidelberg en 1870) in Helmholtz 1883 vol. 2, 1-31; aussi dans Helmholtz 1968 pp. 1-31. Disponible sur http://www.ub.uniheidelberg.de/helios/fachinfo/www/math/txt/Helmholtz/geo2.pdf.
Helmholtz, Hermann von, *Vortrage und Reden*. Braunschweig : Vieweg, 1883.
Helmholtz, Hermann von, „Ueber den Ursprung und Sinn der geometrischen Sätze: Antwort gegen Herrn Professor Land“, version allemande de l'article „The Origin and meaning of geometrical axioms“, *Mind*, vol. 3, 212-225, 1878 in (1968) pp. 1-31. Les annexes II „L'espace peut être transcendental sans que les axiomes le soient“ et III „L'applicabilité des axiomes au monde physique“ (contenus dans l'article de *Mind*) se trouvent en traduction française dans Bienvenu 2002.
Helmholtz, Hermann von, *Ueber Geometrie.* Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1968.
Jammer, Max, *Concepts of Space. The History of Theories of Space in Physics.* Trad. française par Laurent Mayet et Yvahan Smadja: *Concepts d'espace une histoire des theories de l'espace en physique.* Paris: Vrin.
Kant, Emmanuel, *Critique de la raison pure*, trad. de Jules Barni revue par P. Archambault. Paris: Flammarion, 1781, 1787 ; reédition moderne, 1976.
Kline, Morris, *Mathematical thought from ancient to modern times*. Oxford : Oxford University Press, 1972.
Lachelier, Jules, *Cours de Logique.* Disponible sur internet chez éditions Vigdor, 1866.
Lachelier, Jules, *Le fondement de l'induction.* Thèse de doctorat soutenue devant la Faculté des Lettres de Paris au mois de décembre 1871, Paris, Félix Alcan, 1871, 2e édition de 1896.
Lalande, André, “From Science and Hypothesis to Last Thoughts of H. Poincaré”. In: *Journal of the History of Ideas,* vol. 15, nº 4, 1954, 596-598.
Ly, Igor, *Mathématique et physique dans l'œuvre philosophique de Poincaré*, Thèse, Université Nancy 2, 2008.
Makkreel, Rudolf A. et Luft, Sebastian (eds.), *Neo-kantianism in contemporary philosophy.* Bloomington and Indianapolis: Indiana University Press, 2010.
Martin-Lof, Per, “Les jugements synthétiques et analytiques dans la théorie des types”, in Barot et Servois, 2009, 49-60.
Mawhin, Jean, “Henri Poincaré. A life at the service of science”. In *Proceedings of the Symposium Henri Poincaré*, Brussels, 8-9 October 2004, International Solvay Institutes for Physics and Chemistry, 2004.
Nye, Mary Jo, “The Boutroux Circle and Poincaré's Conventionalism”. In: *Journal of the History of Ideas*, vol. 40, 1979, 107-120.
Parodi, Dominique, *La philosophie contemporaine en France, essai de classification des doctrines,* Paris, Félix Alcan, 1925.
Poincaré, Henri, “Sur les hypothèses fondamentales de la géométrie”, *Bulletin de la Société Mathématique de France,* XV, 203-216, 1887.
Poincaré, Henri, “Les Géométries non euclidiennes”, *Revue Générale des Sciences Pures et Appliquées,* vol. 2, 769-774, 1891.
Poincaré, Henri, “Le continu mathématique”, *Revue de métaphysique et de morale,* vol. 1, 26-34, 1893.
Poincaré, Henri, “La nature du raisonnement mathématique”, *Revue de métaphysique et de morale,* vol. 2, 371-384, 1894.
Poincaré, Henri, “L'espace et la géométrie”, *Revue de métaphysique et de Morale,* vol. 3, 631-646, 1895.
Poincaré, Henri, “Relations entre la physique expérimentale et de la physique mathématique”, *Rapports présentés au Congrès international de physique réuni à Paris en* 1900, tome 1 : 1-29, 1900.

Poincaré, Henri, "Sur la valeur objective de la science", *Revue de métaphysique et de morale,* 10 : 263-293, 1902a.
Poincaré, Henri, *La Science et l'hypothèse*, préface de Jules Vuillemin. Paris : Flammarion, 1902 ; reédition 1968.
Principe, João, "Sources et nature de la philosophie de la physique de Henri Poincaré". *Philosophia Scientiae,* vol.16, été 2012. À paraître.
Ravaisson, Félix, *La Philosophie en France au XIXe siècle.* Paris: Librairie Hachette (4ème edition de 1895), 1867.
Riehl, Alois, "Helmholtz et Kant", *Revue de métaphysique et de morale,* vol. 12, nº 3, 579-603, 1904.
Rollet, Laurent, *Henri Poincaré Des Mathématiques à la philosophie*, thèse présentée pour l'obtention du Doctorat de Philosophie de l'Université Nancy 2. Nancy : Archives – Centre d'Études et de Recherche Henri-Poincaré, 1999.
Rollet, Laurent, "Henri Poincaré sur la scène philosophique française", *Annales de l'Est*, vol. 51, nº 1, 137-151 ; version online, pp. 1-9, 2001.
Soulié, Stéphan, *Les philosophes en République, l'aventure intellectuelle de la Revue de métaphysique et de morale et de la Société française de philosophie* (1891-1914). Rennes : Presses universitaires de Rennes, Rennes, collection Histoire, 2009.
Torreti, Roberto, *Philosophy of geometry from Riemann to Poincaré*. Dordrecht: Holland, D. Reidel publishing Company, 1978.
Vëto, Miklos, *De Kant à Schelling Les deux voies de l'Idéalisme allemand*. Grenoble: Millon, 1998.