

Poincaré visionnaire : La Physique mathématique

(*La Valeur de la Science*, pp.123-147)

Jamil Alioui

décembre 2011

Introduction

La physique mathématique

Henri Poincaré (1854-1912) – grand mathématicien, physicien et philosophe français – se penche dans ces chapitres, tirés de *la valeur de la science* (1905), sur l'histoire, le développement et les problématiques de la physique mathématique telle qu'elle était alors envisagée, osons le dire, juste avant la révolution qu'Einstein allait lui imposer.

Au-delà de l'intéressant exposé, à valeur proprement historique, que constitue ce chapitre, il est passionnant d'y observer aussi, et surtout, comment Poincaré était si près d'être celui qui changera la face de la physique telle qu'elle était pensée alors depuis plusieurs centaines d'années.

Qu'est-ce que Poincaré appelle « physique mathématique » ? Disons que les débuts de cette physique sont marqués notamment par la découverte de Kepler : le mouvement des planètes peut être prédit par des calculs mathématiques. L'auteur explique :

La Physique mathématique, nous le savons, est née de la Mécanique céleste qui l'a engendrée à la fin du XVIII^e siècle, au moment où elle venait elle-même d'atteindre son complet développement. (p.124)

On peut aussi illustrer cette physique par les équations différentielles érigées par Newton, grâce auxquelles des abstractions mathématiques, telles qu'une dérivée ou un vecteur, épousent et résolvent des problèmes physiques, comme celui de la force de gravité ou du mouvement circulaire. L'usage de techniques proprement

mathématiques pour résoudre des problèmes de physique, en opposition à la physique purement empiriste, caractérise ce dont on parle lorsqu'on dit « physique mathématique ».

La thèse principale de Poincaré est de dire – à juste titre, nous le verrons – que cette physique mathématique est en pleine crise. Ses arguments principaux gravitent autour de la nécessité de remettre profondément en question des principes, qui étaient jusque là considérés comme « vrais » universellement, face à de nouvelles découvertes qui ne leur permettent alors plus de tenir la route avec l'aisance qui leur était familière.

Organisation de l'exposé

Le passage se compose de trois chapitres dont je reprendrai exactement les titres et la structure interne pour rythmer mon commentaire. Le premier chapitre (pp.123-128) retrace dans les grandes lignes le paysage physique théorique du début du siècle passé. Poincaré nous y présente l'état actuel de la recherche, et une liste de principes qui firent jadis (et qui font encore pour les plus robustes d'entre eux) les fondements de la recherche physique.

Le second chapitre (pp.129-140) présente ce qui est appelé la « crise actuelle de la physique mathématique ». Poincaré y reprend des sujets présentés dans le chapitre précédent et met en lumière un ensemble de problèmes que la loi ou le principe en question rencontre alors face aux nouvelles découvertes et expériences de l'époque. Poincaré y présente aussi de parts et d'autres ses idées personnelles quant aux solutions possibles, mais c'est surtout dans le dernier chapitre (pp.141-147) qu'il développe point par point le champ des possibles qui, rappelons-le, était celui qui précédait de quelques heures le bouleversement d'Einstein.

La thématique qui fera office de toile de fond à ce commentaire sera celle des « prophéties » de Poincaré. Le mot peut sembler quelque peu extrême, mais nous verrons qu'il n'est pas du tout inadapté au texte, qui reflète l'esprit éclairé d'un homme décidément passionné par sa discipline et pleinement au fait des difficultés de son époque. Chacun des exemples choisis et présentés dans ce chapitre est pertinent et annonce une nouveauté d'ordre fondamental imminente (1905 est l'*annus mirabilis* d'Einstein) ou plus tardive (le paradigme quantique n'est pas encore né). Poincaré, comme nous le verrons, met immédiatement, et toujours, le doigt sur « la bonne question », et c'est dans cet esprit que nous présenterons les exemples, en indiquant de quel(s) principe(s) ils annoncent la venue prochaine.

1 L'histoire de la physique mathématique

Poincaré entame sa réflexion sur l'état de la physique mathématique par une série de questions dont les réponses feront l'objet du prochain chapitre, c'est à dire de la partie suivante de ce commentaire. Citons néanmoins ces questions, et remarquons combien elles sont pertinentes :

Quel est l'état actuel de la Physique mathématique ? Quels sont les problèmes qu'elle est amenée à se poser ? Quel est son avenir ? Son orientation est-elle sur le point de se modifier ? Le but et les méthodes de cette science vont-ils apparaître dans dix ans à nos successeurs immédiats sous le même jour qu'à nous-mêmes ; ou au contraire allons-nous assister à une transformation profonde ? Telles sont les questions que nous sommes forcés de soulever, en abordant aujourd'hui notre enquête. (p.123)

Afin de pouvoir établir correctement la nature des « indices d'une crise sérieuse » (p.123), Poincaré doit d'abord dresser un bilan historique de l'état de la recherche :

Cette crise en effet n'est pas la première et il importe, pour la comprendre, de se rappeler celles qui l'ont précédée. Pardonnez-moi donc un court historique. (pp.123-124)

Poincaré met en exergue deux paradigmes qui se succèdent dans l'histoire :

1. le paradigme de la physique des lois ;
2. le paradigme de la physique des principes.

Voyons en quoi ils consistent et en quoi ils diffèrent, et posons ensuite la question de savoir ce qu'ils nous apportent dans le présent débat

La Physique des lois

Poincaré nous présente pour commencer la loi universelle de la gravitation selon Newton, dont l'équation est $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$, avec G la constante universelle de la gravitation, m_1 et m_2 les masses des corps en jeu et r la distance entre les deux corps (ou le rayon de l'orbite terrestre dans le cas de la Terre et du Soleil). Le principe incarné par cette formule bien connue est celui de la physique dite des forces centrales, que nous généraliserons dans le passage à la « physique des lois ». Poincaré propose pour poursuivre une analogie intéressante, qu'il qualifiera plus bas de « conception primitive dans toute sa pureté » :

Mais si nos sens étaient assez subtils pour nous montrer tous les détails des corps qu'étudie le physicien, le spectacle que nous y découvririons différerait à peine de celui que contemple l'astronome. (p.124)

Il entend par là que les atomes peuvent être considérés comme des astres infiniment petits. Il précise son idée :

[...] [les atomes] s'attirent ou se repoussent, et cette attraction ou cette répulsion, dirigée suivant la droite qui les joint, ne dépend que de la distance. La loi suivant laquelle cette force varie en fonction de la distance n'est peut-être pas la loi de Newton, mais c'est une loi analogue ; au lieu de l'exposant -2 , nous avons probablement un exposant différent, et c'est de ce changement d'exposant que sort toute la diversité des phénomènes physiques, la variété des qualités et des sensations, tout le monde coloré et sonore qui nous entoure, toute la Nature en un mot. [...] Il ne reste plus qu'à chercher dans les différents cas quelle valeur il convient de donner à cet exposant afin de rendre compte de tous les faits. (p.124)

Comprenons que l'auteur nous présente ici un paradigme de pensée suivant lequel le physicien se persuade à priori de la cohérence mathématique interne absolue de la Nature et se persuade qu'il résoudra l'ensemble des énigmes qui se posent à lui « à coups d'exposants », c'est à dire avec des équations très simples comme celle de la gravitation citée plus haut, où l'exposant -2 apparaît sous la forme $\frac{1}{r^2} = r^{-2}$. L'auteur illustre l'idée générale par quelques exemples particuliers : la « belle » théorie de la Capillarité de Laplace (1749-1827), qui repose entre autres sur les lois de Newton de la gravitation ; la théorie de Charles Briot (1817-1882) sur l'attraction des atomes d'éther, qui considère l'éther comme un réseau cristallin régulier ; et la théorie de la répulsion des atomes de gaz de Maxwell (1831-1879).

Ces théories paradigmatiques ont en commun le fait de ramener un problème ontologiquement complexe à un formalisme naïf, ressemblant à celui de la gravitation universelle, tel qu'une certaine valeur simple, fonction de propriétés basiques des corps en jeu, est élevée à un certain exposant, ici respectivement -2 , -5 , et -6 . Pour nous aider à comprendre le principe, Poincaré cite la théorie de Fourier (1768-1830) pour la propagation de la chaleur comme un contre-exemple au paradigme de la physique des lois, il écrit à propos de cette théorie :

[...] il y a bien des atomes, agissant à distance, l'un sur l'autre ; ils s'envoient mutuellement de la chaleur mais ils ne s'attirent pas, ils ne bougent pas. A ce point de vue, la théorie de Fourier devait apparaître aux yeux de ses contemporains, à ceux de Fourier lui-même, comme imparfaite et provisoire. (p.125)

On comprend alors que dans le paradigme de la physique des lois (ou des forces centrales), il est question d'un mouvement simple et « majestueux » (p.125) tel que ceux de la mécanique céleste, où les propriétés d'un système ne dépendent que des masses en jeu et de la distance qui les sépare ; mais le paradigme en question est défini par la foi que les physiciens plaçaient dans cette simplicité, sans raison

objectivement pertinente. Le vocabulaire qui est employé ici est presque identique à celui que l'on emploierait pour décrire des œuvres d'art ; Poincaré dit à propos de cette physique des lois et de ses protagonistes :

*Cette conception n'était pas sans grandeur ; elle était séduisante [...].
[...] ils croient que quand on arrivera à ces éléments ultimes, on y
retrouvera la simplicité majestueuse de la Mécanique céleste. (p.125)*

Un peu plus bas, il indique encore :

*C'était pour eux une harmonie interne, statique pour ainsi dire et
immuable ; ou bien c'était comme un modèle que la nature s'efforçait
d'imiter. (p.125)*

La physique des lois se résume donc par les traits suivants, que je reformule ici :

- De manière physique, la physique des lois décrit les fondements de l'univers comme étant mécaniques et déterministes, de ce fait l'univers est décomposable en d'innombrables sous-systèmes qui peuvent chacun faire l'objet d'une étude indépendante.
- De manière mathématique, la physique des lois explique les phénomènes de l'univers par une réduction à une puissance inverse d'une équation de mouvement « simple », c'est à dire sans frottements, sans forces extérieures, sans probabilités, avec une action à distance, etc.
- De manière philosophique, la physique des lois décrit les fondements de l'univers comme étant simples (et de ce fait, beaux).
- De manière psychologique, on peut dire de la physique des lois qu'elle considère notre sensibilité comme un facteur qui nous induit en erreur, comme un obstacle entre la simplicité de l'univers et l'observateur.
- De manière générale, on peut dire de la physique des lois qu'elle soutient que toutes les réponses simples sont accessibles aux hommes, moyennant un travail acharné continu et exhaustif qui consiste à dépasser l'aspect sensible de l'univers pour en atteindre les mécanismes, comme l'indique Poincaré :

*[...] ils [les scientifiques qui n'ont pas renoncé à la physique des
forces centrales] savent qu'on atteindra les éléments ultimes des choses
qu'en débrouillant patiemment l'écheveau compliqué que nous donnent
nos sens ; qu'il faut avancer pas à pas en ne négligeant aucun inter-
médiaire [...]. (p.125)*

Nous avons maintenant dressé un portrait de cette physique des lois. Si, comme nous le verrons, elle s'est avérée au fil des siècles explicativement insuffisante, Poincaré nous dit qu'« elle nous a rendu un service inappréciable, puisqu'elle a contribué à préciser en nous la notion fondamentale de la loi physique » (p.125). Pour éclairer ce propos qui fait le lien avec la physique des principes, Poincaré explique :

Une loi, pour nous, ce n'est plus cela [i.e. une harmonie interne, statique pour ainsi dire et immuable] du tout ; c'est une relation constante entre le phénomène d'aujourd'hui et celui de demain ; en un mot, c'est une équation différentielle. (p.125)

La Physique des principes

Le glas sonna alors pour la physique des forces centrales, c'était ce que Poincaré nomme *la première crise*. Est née alors la physique dite « des principes ». En quoi consiste-t-elle ? L'auteur en dresse le portrait :

On renonça à pénétrer dans le détail de la structure de l'univers, à isoler les pièces de ce vaste mécanisme, à analyser une à une les forces qui les mettent en branle et on se contenta de prendre pour guides certains principes généraux qui ont précisément pour objet de nous dispenser de cette étude minutieuse. (p.126)

Pour éclairer davantage son propos, Poincaré présente un exemple assez simple à comprendre pour ne pas nécessiter d'autres explications :

Supposons que nous ayons en face de nous une machine quelconque ; le rouage initial et le rouage final sont seuls apparents, mais les transmissions, les rouages intermédiaires par lesquels le mouvement se communique de l'un à l'autre sont cachés à l'intérieur et échappent à notre vue ; nous ignorons si la communication se fait par des engrenages ou par des courroies [...]. Dirons-nous qu'il nous est impossible de rien comprendre à cette machine tant qu'on ne nous permettra pas de la démonter ? Vous savez bien que non et que le principe de la conservation de l'énergie suffit pour nous fixer [...]. [...] Eh bien, en présence de l'univers, le principe de la conservation de l'énergie peut nous rendre le même service. (p.126)

La physique des principes peut donc être identifiée comme une physique qui ne cherche plus à découvrir les lois de la nature comme si elles étaient une « substance » qu'il était nécessaire de « distiller » au travers d'observations et de calculs parfois ad hoc. Elle cherche en outre le *pouvoir explicatif* : les principes possèdent un pouvoir explicatif tant qu'ils ne rencontrent aucune exception empirique. Leur pouvoir leur confère le statut de fondement sur lequel pourront s'établir d'autres principes. C'est donc une physique des « relations » qui se développe, et non plus une physique des « essences » ; autrement dit, en *reliant* les principes les uns avec les autres, j'accrois significativement mon pouvoir explicatif (et acquiert même un *pouvoir créatif*, tel Einstein manipulant les équations de Lorentz jusqu'à en extraire $E = mc^2$), alors que les lois relatives aux forces centrales étaient données « en l'état, et c'était tout ».

Quels sont donc ces principes dont il est question ? Poincaré en dresse une liste (pp.126-127) que je reformule ici rapidement :

- Le principe de la conservation de l'énergie, ou principe de Mayer, qui dit que l'énergie totale d'un système isolé est invariante au cours du temps. Il prend la forme mathématique suivante : $\frac{dE}{dt} = 0$, ce qui signifie que la variation d'énergie instantanée est nulle.
- Le principe de Carnot, appelé aujourd'hui plutôt *deuxième principe de la thermodynamique*, qui peut se résumer à l'idée que, dans un système, l'entropie croît constamment.
- Le principe de Newton, ou principe d'action et de réaction, qui dit que tout corps *A* exerçant une force sur un corps *B* subit une force d'intensité égale, de même direction mais de sens opposé, exercée par le corps *B*.
- Le principe de la relativité, qui est ici celui de Galilée, et non celui d'Einstein qui n'existait pas encore. Reprenons les mots de Poincaré pour le décrire :

[...] les lois des phénomènes physiques doivent être les mêmes, soit pour un observateur fixe, soit pour un observateur entraîné dans un mouvement de translation uniforme [...]. (p.127)

- Le principe de la conservation de la masse, ou principe de Lavoisier, qui est décrit par son auteur en ces termes :

[...] car rien ne se crée, ni dans les opérations de l'art, ni dans celles de la nature, et l'on peut poser en principe que, dans toute opération, il y a une égale quantité de matière avant et après l'opération ; que la qualité et la quantité des principes est la même, et qu'il n'y a que des changements, des modifications¹.

- Le principe de moindre action qui dit, pour simplifier, qu'un corps naturel « prend » la direction qui lui permet de dépenser le moins d'énergie dans l'immédiat.

Pour donner encore un exemple de ce qu'est la physique des principes, Poincaré présente la théorie électromagnétique de Maxwell. Cette théorie, cohérente encore de nos jours, a été élaborée dans un contexte où ni la nature exacte de l'éther, ni la disposition exacte des molécules étaient connues, mais où les principes généraux de la mécanique, eux, l'étaient. Les équations du champ électromagnétiques pouvaient alors être érigées.

1. Lavoisier, *Traité élémentaire de chimie* (1789/1864), p.101

Utilité de l'ancienne Physique

Poincaré nous explique, pour clore le chapitre, qu'il serait faux de croire que, parce que la physique des forces centrales a été remplacée par la physique des principes, elle n'est plus utile.

C'est la physique mathématique de nos pères qui nous a familiarisés peu à peu avec ces divers principes, qui nous a habitués à les reconnaître sous les différents vêtements dont ils se déguisent. [...]

Les cadres ne se sont donc pas brisés parce qu'ils étaient élastiques ; mais ils se sont élargis ; nos pères, qui les avaient établis, n'avaient pas travaillé en vain ; et nous reconnaissons dans la science d'aujourd'hui les traits généraux de l'esquisse qu'ils avaient tracée. (p.128)

J'abrègerai en disant que Poincaré pose un contexte, justement, avec ce chapitre : le passage de la physique des lois à celle des principes, la « première crise ». Et il fait cela dans le but de pouvoir développer convenablement l'hypothèse du chapitre suivant, qui peut se résumer par la question qui l'ouvre :

Allons-nous entrer maintenant dans une troisième phase ? Sommes-nous à la veille d'une seconde crise ? (p.129)

2 La crise actuelle de la physique mathématique

Dans ce chapitre, Poincaré va soutenir la thèse que la physique mathématique est en crise, en prenant un à un les principes présentés dans le chapitre précédent, et en mettant en lumière les difficultés nouvelles qu'ils rencontrent à l'aube du grand bouleversement einsteinien.

Le principe de Carnot

Le principe de Carnot est présenté en premier certainement parce que, comme le dit l'auteur :

C'est le seul qui ne se présente pas comme une conséquence immédiate de l'hypothèse des forces centrales : bien mieux, il semble sinon contredire directement cette hypothèse, du moins ne pas se concilier avec elle sans un certain effort. (p.129)

En tant que principe d'irréversibilité, il s'oppose en effet tant physiquement que philosophiquement aux lois telles qu'elles étaient envisagées dans la mécanique céleste ; lois selon lesquelles le renversement des conditions initiales devrait engendrer une inversion du mouvement. Poincaré indique de plus :

Si le monde tend vers l'uniformité, ce n'est pas parce que ses parties ultimes, d'abord dissemblables, tendent à devenir de moins en moins différentes, c'est parce que, se déplaçant au hasard, elles finissent par se mélanger. (p.130)

Une objection est alors présentée, selon laquelle le principe de Carnot ne serait qu'un « principe imparfait, une sorte de concession à l'infirmité de nos sens » (p.130) :

[...] c'est parce que nos yeux sont trop grossiers que nous ne distinguons pas les éléments du mélange ; c'est parce que nos mains sont trop grossières que nous ne savons pas les forcer à se séparer ; le démon imaginaire de Maxwell, qui peut trier les molécules une à une, saurait bien contraindre le monde à revenir en arrière. (pp.130-131)

Cette objection pourrait ainsi faire du principe de Carnot un principe « ad hoc », le sauvant d'une éventuelle remise en question. Or, le mouvement brownien découvert par les biologistes, ignoré d'abord par les physiciens puis représenté sous un nouveau jour par Luis Georges Gouy (1854-1926) pose, face au principe de Carnot, une véritable interrogation problématique :

[...] [Gouy] vit, ou crut voir, que cette explication [i.e. que ce ne sont que de simples inégalités de températures qui causent le mouvement brownien] est insoutenable, que les mouvements deviennent d'autant plus vifs que les particules sont plus petites, mais qu'ils ne sont pas influencés par le mode d'éclairage. Si alors ces mouvements ne cessent pas, ou plutôt renaissent sans cesse, sans rien emprunter à une source extérieure d'énergie, que devons-nous croire ? (p.131)

La conservation de l'énergie pourrait être remise en question ici. Mais admettons que l'on décide de ne pas souscrire à la fausseté de ce principe pour le moment, comme le propose Poincaré juste ensuite :

Nous ne devons pas, sans doute, renoncer pour cela à la conservation de l'énergie, mais nous voyons sous nos yeux tantôt le mouvement se transformer en chaleur par le frottement, tantôt la chaleur se changer inversement en mouvement, et cela sans que rien ne se perde, puisque le mouvement dure toujours. C'est le contraire du principe de Carnot. (p.131)

En quoi est-ce exactement le contraire du principe de Carnot ? Eh bien simplement parce que selon ce principe, l'entropie croissante devrait faire tendre le système observé vers un système inerte, les énergies se dispersant de parts et d'autres : le mouvement devrait finir par s'arrêter.

De ce point de vue, le mouvement brownien met alors en péril le principe de Carnot. Pour alimenter notre thématique d'un Poincaré visionnaire, notons que

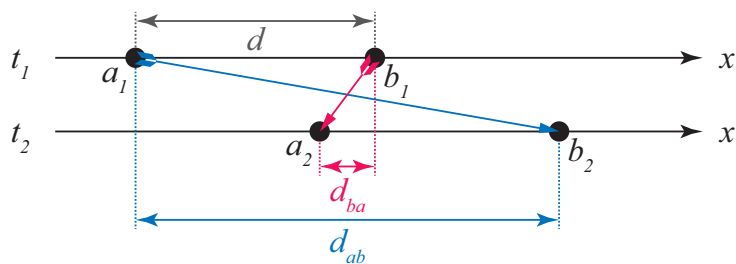


FIGURE 1 – Le problème du temps local

quelques mois après la publication de ces propos, Einstein prouva que pour expliquer le mouvement brownien, il est nécessaire de passer par une formulation probabiliste. Il s'appuiera d'ailleurs sur cette démonstration pour valider une bonne fois pour toute l'hypothèse atomique. On comprend alors combien il était pertinent de soulever ce problème et combien, en effet, c'en était un.

Le principe de relativité

Avant de traiter la question de la relativité, replaçons rapidement le contexte : la contingence de l'éther n'a pas encore été démontrée, de même que la croyance en l'existence d'un possible « mouvement absolu » des astres par rapport à cet éther (ou par rapport aux « bords » de l'univers ?) est encore très prononcée. Il faudra en effet attendre la théorie de la relativité générale pour qu'une représentation parfaitement cohérente d'un espace-temps-matière unifié puisse remplacer les appréciations banales des anciens, c'est à dire notamment la croyance en l'existence d'un « éther » absolu.

Dans cette partie, Poincaré nous montre que le principe de la relativité, tel qu'il existait alors, court un important danger de discrédit. Pour présenter cette idée, il rappelle premièrement qu'aucune expérience n'a permis de mesurer l'hypothétique vitesse absolue de la Terre. Ensuite, il présente une idée, celle du « temps local », développée par des mathématiciens tels que Lorentz.

Il est question de la synchronisation de deux horloges, eu égard à la vitesse de la lumière. Deux « stations », a et b , sont séparées par une certaine distance invariante que nous appellerons d . Si l'on admet que le système est au repos, en imaginant une grande distance d , la synchronisation des horloges est possible du moment que le récepteur connaît la distance d . En ce cas, il suffira à b (le récepteur) de se mettre d'accord sur une heure de synchronisation (disons 15h) avec a (l'émetteur), de calculer le décalage temporel que d engendre (disons une seconde si l'on considère que b est sur la Lune et a sur la Terre...), puis d'ajouter cet intervalle temporel à 15h lorsque b prend connaissance du signal lumineux

envoyé par a . Ainsi, lorsque son horloge indique 15h, a envoie un signal lumineux à b qui, lorsqu'il le reçoit, règle son horloge à 15h plus une seconde, et le tour est joué, les pendules sont synchronisées.

Cependant, comme nous l'avons dit, on doit considérer un mouvement aujourd'hui oublié, le « mouvement absolu » des astres (Terre et Lune dans l'exemple) par rapport à l'éther. Voilà qui, dans ce cas, corse le problème. Il s'agit essentiellement de la même situation, mais a et b se meuvent maintenant ensemble dans la même direction, comme l'illustre la figure 1. Poincaré pose le problème comme suit :

[...] la durée de la transmission ne sera pas la même dans les deux sens, puisque la station A par exemple marche au devant de la perturbation optique émanée de B, tandis que la station B fuit devant la perturbation émanée de A. Les montres réglées de la sorte ne marqueront donc pas le temps vrai, elles marqueront ce qu'on peut appeler le temps local, de sorte que l'une d'elles retardera sur l'autre. (p.133)

On voit en effet sur la figure 1 que si a et b se meuvent ensemble, d reste invariante certes, mais les distances que doivent parcourir les rayons lumineux de synchronisation ne sont plus identiques selon que a envoie le signal à b (distance d_{ab}) ou que b envoie le signal à a (distance d_{ba}). Comment fixer alors le décalage temporel ?

Peu importe, puisque nous n'avons aucun moyen de nous en apercevoir. Tous les phénomènes qui se produiront en A par exemple seront en retard, mais tous le seront également, et l'observateur ne s'en apercevra pas puisque sa montre retarde ; ainsi, comme le veut le principe de relativité, il n'aura aucun moyen de savoir s'il est en repos ou en mouvement absolu. (p.133)

Le problème est là : en retard par rapport à quoi ? Par rapport au « temps vrai » cité ci-dessus. Il manque pour résoudre ce problème la notion de temps relatif qu'Einstein introduira quelques temps plus tard, au détriment de ce « temps vrai ». Mais on comprend cependant la chose suivante : le principe de relativité semble, dans ce cas, conservé, moyennant d'admettre que le « référentiel absolu » est simplement inaccessible. Comme le dit Poincaré, « tout semble arrangé, mais tous les doutes sont-ils dissipés ? » (p.134)

Qu'arriverait-il si on pouvait communiquer par des signaux qui ne seraient plus lumineux et dont la vitesse de propagation différerait de celle de la lumière ? Si, après avoir réglé les montres par le procédé optique, on voulait vérifier le réglage à l'aide de ces nouveaux signaux, on constaterait des divergences qui mettraient en évidence la translation commune des deux stations. Et de pareils signaux sont-ils

inconcevables, si l'on admet avec Laplace que la gravitation universelle se transmet un million de fois plus vite que la lumière ? (p.134)

On voit alors qu'il manque des pièces cruciales pour pouvoir résoudre ce casse-tête. L'ensemble de ces pièces sera amené en deux temps par Einstein :

1. la limite supérieure de toutes les vitesses fixée à la vitesse de la lumière ;
2. l'invalidation du principe de référentiel absolu ou favorisé ;
3. la relativité et l'unification du temps et de l'espace ;
4. la gravitation comme une propriété géométrique de l'espace et du temps qui n'agit *pas* à distance.

Si ces quatre principes résolvent le problème avec élégance et simplicité, reconnaissons tout de même la pertinence et la justesse des ambiguïtés soulevées par Poincaré dans cette partie.

Le principe de Newton

Afin d'isoler les problèmes relatifs au principe d'action et de réaction, ou principe de Newton, reformulons le problème que pose Poincaré.

Un excitateur de Hertz, envoyant toute son énergie dans une seule direction grâce à des miroirs, devrait reculer, « comme s'il était un canon et si l'énergie qu'il a projetée était un boulet » (p.135). Il en va de même pour un phare pourvu d'un réflecteur ; cas que l'auteur explique de la sorte : « la lumière n'est autre chose qu'une perturbation du champ électromagnétique. Ce phare devra reculer comme si la lumière qu'il envoie était un projectile. » (p.135).

Mais ceci ne tient pas la route face au principe de Newton : le projectile dont on parle ici n'a pas de masse. Afin de tenter de « sauver » du discrédit le principe d'action et de réaction, Poincaré propose une série d'explications étonnantes, sur la base de la reformulation suivante des exemples choisis :

Si toute l'énergie issue de notre excitateur va tomber sur un récepteur, celui-ci se comportera comme s'il avait reçu un choc mécanique, qui représentera en un sens la compensation du recul de l'excitateur ; la réaction sera égale à l'action, mais elle ne sera pas simultanée, le récepteur avancera, mais pas au moment où l'excitateur reculera. Si l'énergie se propage indéfiniment sans rencontrer de récepteur, la compensation ne se fera jamais. (p.136)

Le premier contre argument, ou la première solution potentielle, consiste à penser que l'espace qui sépare l'excitateur du récepteur n'est pas vide, et que cette matière qui le constitue « subit le choc comme le récepteur au moment où l'énergie l'atteint et recule à son tour quand la perturbation la quitte » (p.136). Mais cet

argument ne tient pas la route, car « si l'énergie en se propageant restait toujours attachée à quelque substratum matériel, la matière en mouvement entrainerait la lumière avec elle [...]. (p.136)

Le second contre argument est exposé en ces termes : « on peut supposer aussi que les mouvements de la matière proprement dite sont exactement compensés par ceux de l'éther [...]. » (p.136) Mais, comme indiqué juste après, « les suppositions qu'il faudrait faire sur les mouvements de l'éther ne sont pas très satisfaisantes », en effet :

Si les charges électriques doublent, il serait naturel d'imaginer que les vitesses des divers atomes d'éther doublent aussi, et, pour la compensation, il faut que la vitesse moyenne de l'éther quadruple. (p.136)

On voit à nouveau que certains principes aujourd'hui fondamentaux manquent ici pour résoudre le problème.

1. L'existence de l'éther demeure comme une béquille dont on pourrait se passer mais qu'il faut quand même prendre en considération. Einstein l'éradiquera bientôt.
2. La nature corpusculaire et ondulatoire de la lumière sera développée proprement par la physique quantique qui saura marier la théorie ondulatoire de Maxwell (encore incomplète pour décrire l'ensemble des propriétés de la lumière) et le travail d'Einstein sur les quantas de lumière. Cette nature « schizophrénique » en quelque sorte des particules-ondes électromagnétiques répondra à beaucoup de questions dans l'esprit des problèmes soulevés ici par Poincaré.

Encore une fois, on remarque combien Poincaré touche des problèmes profonds et pertinents, sans ma foi réussir à les résoudre faute d'outils et de conceptions qui ne tarderont pas à être élaborés par ses successeurs.

Le principe de Lavoisier

Le principe de Lavoisier, rappelons-le, est le principe de conservation de la masse. Plutôt que de développer ici l'ensemble de l'argumentaire point par point, je me bornerai à montrer combien Poincaré était près de répondre au problème qu'il soulève.

Premièrement, il rappelle la différence qui existe alors entre la masse mécanique et ce qu'il nomme « masse électrodynamique ». La première peut être ramenée à « une quantité certaine d'atomes » et la seconde est la masse d'inertie de Newton, par rapport à l'éther. Cet éther semble proprement ennuyer Poincaré dans ce passage.

La masse totale ou apparente que l'on mesure se compose donc de deux parties : la masse réelle ou mécanique de la molécule, et la masse électrodynamique représentant l'inertie de l'éther. (p.137)

Mais ennuyé par l'éther, il l'est aussi par ce qui sera plus tard ramené au noyau atomique :

Les électrons négatifs n'ont pas de masse, c'est entendu ; mais les électrons positifs, d'après le peu qu'on en sait, semblent beaucoup plus gros. Peut-être ont-ils, outre leur masse électrodynamique, une vraie masse mécanique. (p.138)

En prenant en compte le problème des rayons cathodiques, Poincaré émet tout à coup une proposition complètement visionnaire :

De tous ces résultats, s'ils se confirmaient, sortirait une mécanique entièrement nouvelle qui serait surtout caractérisée par ce fait qu'aucune vitesse ne pourrait dépasser celle de la lumière (car les corps opposeraient une inertie croissante aux causes qui tendraient à accélérer leur mouvement ; et cette inertie deviendrait infinie quand on approcherait de la vitesse de la lumière) pas plus qu'aucune température ne peut tomber au-dessous du zéro absolu. (pp.138-139)

Un peu plus loin, il ajoute :

S'il n'y a plus de masse, que devient la loi de Newton ? (p.139)

Lorsqu'on lit ces lignes, on comprend la légitimité des débats sur la paternité de la relativité restreinte ! En quelques paragraphes, Poincaré imagine une physique qui n'est autre que la physique de la relativité telle qu'Einstein la formulera quelques mois plus tard, il admet une remise en question fondamentale de la loi de Newton, remise en question qui n'est autre que celle que forcera la relativité générale

Le principe de Mayer

Pour illustrer les problèmes relatifs au principe de la conservation de l'énergie, Poincaré cite l'expérience des époux Curie qui ont mis du radium radioactif dans un calorimètre. L'énergie semblait alors inépuisable. William Ramsay (1852-1916) a cherché à montrer que le radium renferme une provision d'énergie énorme, mais non inépuisable :

Le radium s'épuiserait en 1250 ans ; c'est bien court, mais vous voyez que nous sommes du moins certains d'être fixés sur ce point d'ici quelques centaines d'années. En attendant nos doutes subsistent. (p.140)

Le problème est simple : selon le principe de Mayer, cette énergie *doit* bel et bien venir de quelque part, ou du moins venir à manquer quelque part...

Encore une fois, il faudra attendre la fameuse relation $E = mc^2$ d'Einstein pour admettre le fait que la masse se transforme en énergie, mais en quantités ma foi trop faibles pour avoir déjà été remarquées lorsque Poincaré écrivait ces lignes. D'ailleurs, aujourd'hui, le principe de conservation de la masse est encore applicable dans les domaines macroscopiques tels que la chimie ou la biologie.

3 L'avenir de la physique mathématique

Poincaré ouvre ce chapitre en posant la question suivante : « En présence de cette débâcle générale des principes, quelle attitude va prendre la Physique mathématique ? »

Le rôle de l'analyste

L'auteur explique ici que la part de responsabilité face à la grandeur, mais aussi face à la potentielle décadence, des principes dont on a parlé, incombe tant aux physiciens qu'aux mathématiciens. Il insiste particulièrement sur le rôle qu'ont joué les « analystes » (ou théoriciens, donc les mathématiciens) dans le déroulement des évènements :

Ce sont les expérimentateurs qui ont vu le radium dégager de l'énergie, mais ce sont les théoriciens qui ont mis en évidence toutes les difficultés soulevées par la propagation de la lumière à travers un milieu en mouvement ; sans eux il est probable qu'on ne s'en serait pas avisé. (p.142)

A nouveau, on remarque à quel point, dans ses propositions de solutions mathématiques, Poincaré est si près de résoudre les problèmes, surtout lorsqu'il avance à titre d'exemple :

Prenons donc la théorie de Lorentz, retournons-la dans tous les sens ; modifions-là peu à peu et tout s'arrangera peut-être. (p.142)

N'est-ce pas exactement ce qu'a fait Einstein pour élaborer la théorie de la relativité restreinte ainsi que la formule $E = mc^2$?

L'aberration et l'astronomie

Le phénomène dit d'aberration de la lumière se traduit par le fait que la direction apparente d'une source lumineuse dépend de la vitesse de celui qui l'observe, de la même façon que la pluie semble tomber depuis une direction située vers l'avant d'un véhicule et non à la verticale de celui-ci quand celui-ci se déplace. Pourquoi Poincaré aborde-t-il ce phénomène ici ? Voyons ce qu'il en dit :

La position réelle [des étoiles] nous ne pouvons la connaître, mais nous pouvons observer les variations de la position apparente. Les observations de l'aberration nous montrent donc non le mouvement de la Terre, mais les variations de ce mouvement, elles ne peuvent par conséquent nous renseigner sur le mouvement absolu de la Terre.
(p.143)

On comprend ici que la question est de savoir si, faute de pouvoir trouver quelque réconfort dans la physique, le curieux trouvera, ou non, des réponses dans l'astronomie quant au mouvement absolu de la Terre par rapport à l'éther. Poincaré propose la théorie suivante, sans y croire pour autant, comme nous le verrons :

[...] mais il n'en serait plus de même si on pouvait apprécier les millièmes de seconde. [...] la constante de l'aberration ne serait pas tout à fait la même pour toutes les étoiles, [et les] différences nous feraient connaître le mouvement absolu de la Terre dans l'espace.

Ce serait là, sous une autre forme, la ruine du principe de relativité. Nous sommes loin [...] d'apprécier le millième de seconde, mais après tout, [...] la vitesse absolue totale de la Terre est peut-être beaucoup plus grande que sa vitesse relative par rapport au Soleil ; si elle était par exemple de 300 kilomètres par seconde au lieu de 30, cela suffirait pour que le phénomène devînt observable. (p.143)

Si Poincaré propose cette bancale théorie, c'est certainement dans le but de couvrir au maximum le champ des possibles, car, comme déjà dit, il n'y croit pas lui-même :

En attendant, je crois que les théoriciens, se rappelant l'expérience de Michelson, peuvent escompter un résultat négatif, et qu'ils feraient œuvre utile en construisant une théorie de l'aberration qui en rendrait compte d'avance. (p.144)

Les électrons et les spectres

Dans ce bref paragraphe, Poincaré souligne le mystère qui existe encore autour des raies d'émission, et la nécessité de percer à jour leur lien avec les électrons. Il y évoque l'effet Zeeman qui est un effet, alors encore inexplicable, de séparation des raies spectrales en un nombre imprévisible de composantes.

Nous pénétrerons pour ainsi dire dans l'intimité de la matière. Et au point de vue particulier qui nous occupe aujourd'hui, quand nous saurons pourquoi les vibrations des corps incandescents diffèrent ainsi des vibrations élastiques ordinaires, pourquoi les électrons ne se comportent pas comme la matière qui nous est familière, nous compren-

drons mieux la dynamique des électrons et il nous sera peut-être plus facile de la concilier avec les principes. (p.145)

Il faudra, encore une fois, attendre la formulation complète de la lumière, c'est à dire notamment la théorisation de ses quantas, pour que cette énigme trouve sa solution au travers de la double nature ondulatoire-corporelle de la lumière.

Les conventions devant l'expérience

N'avez-vous pas écrit [...] que les principes, quoique d'origine expérimentale, sont maintenant hors des atteintes de l'expérience parce qu'ils sont devenus des conventions ? Et maintenant vous venez nous dire que les conquêtes les plus récentes de l'expérience mettent ces principes en danger. (p.145)

Autrement dit, s'il a été dit que les principes sont des bases fortes² pour bâtir la physique de la seconde phase (la physique des principes), comment concilier leur apparent échec face aux dernières découvertes en date ?

Poincaré met ici en garde contre une réadaptation ad hoc du système de la physique des principes, qui permettrait peut-être d'éviter l'aspect bancal de l'édifice, mais qui présenterait alors un certain nombre de dangers. Il présente, pour illustrer l'idée, une théorie ad hoc qui pourrait expliquer l'expérience des Curie sur le radium :

On a supposé que le radium n'était qu'un intermédiaire, qu'il ne faisait qu'emmagasiner des radiations de nature inconnue qui sillonnaient l'espace dans tous les sens, en traversant tous les corps, sauf le radium, sans être altérées par ce passage et sans exercer sur eux aucune action. Le radium seul leur prendrait un peu de leur énergie et il nous la rendrait ensuite sous diverses formes.

Quelle explication avantageuse et combien elle est commode ! D'abord elle est invérifiable et par là même irréfutable. [...] elle répond d'avance non seulement à l'objection de Curie, mais à toutes les objections que les expérimentateurs futurs pourraient accumuler. [...]

[...] avec cela on nous montre bien que notre principe est hors des atteintes de l'expérience. (pp.145-146)

Le danger principal ici consisterait à établir un principe explicatif, mais « infécond ». Qu'entend-on par « infécond » ? Eh bien il faut y voir un principe dont on ne peut simplement rien faire. Il « fait joli » dans l'édifice qu'est la physique car il explique quelque chose, mais son utilité et son pouvoir de prédiction sont nuls. Poincaré court-circuite donc la méthode ainsi :

2. J'ai reformulé en parlant de principes à « pouvoir explicatif », cf. § « La Physique des principes » en première partie.

[...] si un principe cesse d'être fécond, l'expérience, sans le contredire directement, l'aura cependant condamné. (p.146)

Si l'adaptation des principes en principes ad hoc est à proscrire, la situation n'est pourtant pas sans solution, c'est ce que le dernier paragraphe de notre chapitre explique.

La Physique mathématique future

Ce n'est donc pas cela qu'il faudrait faire ; nous devrions rebâtir à neuf. [...]

Comme je vous l'ai dit, nous avons déjà passé par une crise semblable. Je vous ai montré que, dans la seconde physique mathématique, celle des principes, on retrouve les traces de la première, celle des forces centrales ; il en sera encore de même si nous devons en connaître une troisième. (p.146)

Dans ce dernier paragraphe, Poincaré fait preuve, à nouveau, d'une étonnante lucidité et d'un très vif esprit d'appréhension des problèmes dans leur ensemble. Non seulement il prédit une « troisième crise », mais en plus il identifie exactement la nature de ce chambardement paradigmatique qui pointe, et qui ne sera autre chose que l'avènement de la physique quantique :

Dans quel sens allons-nous nous étendre, nous ne pouvons le prévoir ; peut-être est-ce la théorie cinétique des gaz qui va prendre du développement et servir de modèle aux autres. Alors les faits qui d'abord nous apparaissaient comme simples ne seraient plus que les résultantes d'un très grand nombre de faits élémentaires que les lois seules du hasard feraient concourir à un même but. La loi physique alors prendrait un aspect entièrement nouveau ; ce ne serait plus seulement une équation différentielle, elle prendrait le caractère d'une loi statistique. (p.146)

Qu'est-ce que la physique quantique sinon l'avènement des statistiques à un niveau ontologique en physique ? Einstein montrera quelques mois après la rédaction de ce texte que le mouvement brownien n'est quantifiable qu'en passant par un formalisme probabiliste, et qu'est-ce qu'un formalisme probabiliste sinon une loi statistique ? Et, quant à la prophétie de la relativité einsteinienne, Poincaré écrit :

Peut-être aussi devons-nous construire toute une mécanique nouvelle que nous ne faisons qu'entrevoir, où, l'inertie croissant avec la vitesse, la vitesse de la lumière deviendrait une limite infranchissable. (p.146)

Conclusion

Finalement, le mot « prophétie » n'était pas forcément de trop ! Nous avons vu combien les questions qui animent Henri Poincaré, en cette période philosophiquement et physiquement tumultueuse, sont légitimes, et nous avons vu que chaque problème qu'il soulève trouve, dans les années qui suivent, une réponse. Nous avons vu aussi que la prophétie de la « deuxième crise », qui n'est autre que la venue de la « troisième physique », la *quantique*, était temporellement parfaitement située et qu'il s'en est joué de peu pour que ce soit Poincaré qui hérite de la paternité de la relativité, de la statistique brownienne, et de la formulation de l'équivalence masse-énergie.

Mais d'un autre œil, plus « humain » que scientifique, il est aussi beau de voir comment Poincaré, au fil du texte, s'approprie la Physique pour en faire une grande quête passionnée qui dépasse l'homme qu'il était, pour prendre place dans le temps à des échelles impressionnantes. Il n'en oublie pas moins de ne pas commettre les erreurs de l'esthète, préférant - comme certains artistes l'ont fait - un « bel édifice » qu'un édifice explicatif et « fécond », qui est le propre de la Physique et qui la distanciera toujours d'une démarche subjective ou ad hoc.

Bibliographie

Livres

- Poincaré, Henri, *La valeur de la science*, Flammarion, 1905/1970
- Poincaré, Henri, *La science et l'hypothèse*, Flammarion, 1902/1968
- Chappert, André, *L'édification au XIX^e siècle d'une science du phénomène lumineux*, Vrin, 2004
- Barberousse, Anouk, *La physique face à la probabilité*, Vrin, 2000
- de Lavoisier, Antoine Laurent, *Traité élémentaire de chimie*, Cuchet, 1789/1864

Articles

- Fernflores, Francisco, « *The Equivalence of Mass and Energy* », The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Fall 2010 Edition), Edward N. Zalta (ed.)
- www.techno-science.net : « Aberration de la lumière »