

**UN APERÇU DE LA DISCUSSION SUR LES
PRINCIPES DE LA MÉCANIQUE RATIONNELLE
EN FRANCE À LA FIN DU SIÈCLE DERNIER**

Konstantinos CHATZIS (*)

RÉSUMÉ. — À partir des années 1870, en Allemagne d'abord, dans plusieurs autres pays européens ensuite, la mécanique rationnelle, en tant qu'exemple de science achevée et incontestable dans ses résultats, fait l'objet d'une discussion critique. Des philosophes et des scientifiques s'interrogent sur ses concepts primitifs et ses principes fondateurs, examinent les formulations léguées par la tradition et en proposent de nouvelles, analysent enfin les rapports qu'elle entretient avec les données de l'expérience. Centré sur la France des années 1890–1905, le présent article est une contribution locale à l'étude de ce débat de caractère international. Il met en scène notamment une série d'auteurs qui, actifs dans la discussion de l'époque, sont aujourd'hui frappés d'oubli par la science et l'histoire. À travers leurs interventions, nous suivons l'évolution de la mécanique en quête de nouvelles conceptions du savoir scientifique.

ABSTRACT. — AN OUTLINE OF THE DEBATE ON THE PRINCIPLES OF RATIONAL MECHANICS IN FRANCE AT THE CLOSE OF THE 19TH CENTURY. From the 1870s on, in Germany initially, and then in various other European countries, rational mechanics, as an instance of a complete, closed science, yielding results of unquestionable validity, became a subject for critical debate. Philosophers and scientists questioned the discipline's basic concepts and grounding principles, scrutinised traditional formulations and proffered novel ones, and investigated its relation to the givens of experience. Focusing on France, in the years 1890–1905, the present paper is to be taken as a local study, and a contribution to the examination of that international debate. It brings into view, most notably, a number of authors, participants in the then-ongoing debate, who nowadays are generally forgotten or passed over by scientists and historians alike. Through their contributions, the evolution of mechanics may be followed, in its quest for a new concept of scientific knowledge.

(*) Texte reçu le 20 mai 1994, révisé le 4 septembre 1995.

Konstantinos CHATZIS, Laboratoire Techniques, Territoires et Sociétés (LATTS), École nationale des ponts et chaussées, Central IV, 1 av. Montaigne, 93167 Noisy-le-Grand CEDEX (France).

INTRODUCTION

À partir des années 1870, la mécanique rationnelle, en tant qu'exemple de science achevée et incontestable dans ses résultats, se place au centre d'un débat critique ayant comme objet la nature du savoir scientifique. Entamée en Allemagne, qui reste à cet égard son foyer le plus productif, la discussion ne tarde pas à gagner progressivement les autres pays européens¹. Jusqu'aux premières années de ce siècle, des savants et des philosophes, intéressés aux questions ayant trait à la théorie de la connaissance, se penchent sur la mécanique rationnelle, questionnent ses concepts primitifs et ses principes fondateurs, examinent ses présupposés, rectifient les formulations léguées par la tradition et en proposent de nouvelles, interrogent enfin les rapports qu'elle entretient avec le réel et les données de l'expérience.

Portant sur la composante française de la discussion qui se déroule pour l'essentiel entre 1890 et 1905, le présent travail se veut une contribution locale à l'étude de ce débat de caractère international. Dans ce but, l'article analyse plusieurs contributions dues, le plus souvent, à des auteurs aujourd'hui frappés d'oubli par la science et l'histoire, mais qui n'en ont pas moins joué un rôle important dans la discussion de l'époque. Leur intervention, peu étudiée jusqu'ici, nous fait assister à la transformation progressive de la mécanique rationnelle en quête de nouvelles conceptions plus réflexives du savoir scientifique, conceptions parmi lesquelles le holisme de Duhem et le conventionnalisme de Poincaré sont les manifestations (françaises) les plus connues².

Notre parcours se divise en trois étapes. Nous présentons d'abord rapidement la conception classique des principes de la mécanique rationnelle en France durant la deuxième moitié du siècle dernier : trouvant des assises institutionnelles à partir des années 1850, elle est toujours présente au tournant du siècle, muée entre-temps en tradition par rapport à laquelle

¹ Pour une cartographie (quasi) exhaustive des discussions, voir l'article [ESM 1915] qui contient de loin le bilan le plus complet du débat de l'époque. On trouve quelques indications supplémentaires dans [Cosserrat 1908]. D'autres références portant sur divers aspects du débat seront données au fur et à mesure.

² La pensée de ces deux auteurs ayant déjà fait l'objet de plusieurs analyses, nous avons préféré, dans le cadre de cet article, mettre l'accent sur les contributions moins connues, mais également originales en ce qui concerne la critique des principes de la mécanique rationnelle.

partisans et détracteurs doivent se situer. Nous poursuivons par l'exposé d'un certain nombre de critiques adressées à cette conception traditionnelle à partir des années 1885. Dans un troisième temps nous étudions l'implication de quelques grands mathématiciens dans ce mouvement de questionnement critique des principes de la mécanique rationnelle. Responsables de l'enseignement de la mécanique dans des établissements prestigieux de l'époque (Sorbonne, École polytechnique, École centrale des arts et manufactures), ces mathématiciens, directement impliqués dans les débats, multiplient analyses et prises de position.

BÉLANGER ET L'ENSEIGNEMENT CLASSIQUE DE LA MÉCANIQUE RATIONNELLE

En 1850, une commission, nommée par décret sur proposition du ministre de la Guerre, entreprend une révision radicale des programmes d'admission et d'enseignement à l'École polytechnique³. Abritant en son sein des noms illustres de l'époque, tels Poncelet, Morin et Duhamel, elle s'attaque en particulier à l'organisation de l'enseignement de la mécanique dispensé dans cet établissement. C'est J.-B. Bélanger⁴, élu en 1851 professeur de mécanique et des machines à l'École polytechnique, conformément aux souhaits de la Commission, qui va essayer de matérialiser ce projet. Sans entrer dans les détails, disons que le nouveau cours de l'École polytechnique intègre deux innovations majeures de la période précédente et, le poids de l'institution aidant, il va jouer un rôle

³ Sur cette commission et la conception de la mécanique en France pendant la première moitié du XIX^e siècle, voir [Chatzis 1994].

⁴ Jean-Baptiste Bélanger (1790–1874), polytechnicien et ingénieur des ponts et chaussées, professeur de mécanique à l'École centrale des arts et manufactures (1838–1864), à l'École des ponts et chaussées (1841–1855) et à l'École polytechnique (1851–1861), constitue une figure importante dans l'enseignement de la mécanique en France au XIX^e siècle. On retrouve la façon de concevoir les principes de la mécanique mise en avant par Bélanger dans plusieurs traités et cours de mécanique de la fin du siècle dernier (voir, entre autres, le traité d'Appell [1893], le cours de Léauté à l'École polytechnique [1898], ainsi que les témoignages de Milhaud [1894, p. 99] et de Vaschy [1895, p. 5]). Sa réputation d'enseignant traverse par ailleurs les frontières françaises. Reuleaux [1875] le cite de manière élogieuse dans l'introduction de son livre sur la théorie générale des machines. Mach [1883], pourtant avare de références, accueille le traité de Bélanger de 1847 dans la liste bibliographique de son ouvrage sur la mécanique. Sur Bélanger, voir [Chatzis 1994].

de référent en matière de conception de la mécanique pendant au moins un demi-siècle en France.

La première innovation, suggérée par Ampère [1834] et mise en œuvre par Poncelet en 1838 dans ses cours de mécanique physique à la Faculté des sciences de Paris⁵, consiste à commencer la mécanique par la cinématique, à savoir l'étude du mouvement des corps sans aucune référence aux conditions de sa production. La deuxième innovation, due à Bélanger lui-même, prend la forme d'un renversement d'une longue tradition. En effet, la statique, depuis longtemps dominante au sein de la mécanique, est reléguée par Bélanger au second plan, n'étant au fond qu'un cas limite de la dynamique (accélérations nulles)⁶.

Loin d'être une simple question d'ordre dans la présentation des différentes parties de la mécanique, le renversement opéré par Bélanger affecte la conception que l'on s'en fait. « Renoncer » à la statique, c'est, en effet, renoncer également à ses types de raisonnement et à ses modes de justification. Rappelons que jusqu'alors la statique ne fournit pas seulement à la mécanique le principe des vitesses virtuelles⁷, lequel, couplé avec le principe de d'Alembert, permet de transformer tout problème de mouvement en question d'équilibre, elle lui imprime également son style de raisonnement géométrique. Il en résulte que la mécanique se présente encore souvent durant la première moitié du XIX^e siècle sous la forme d'une science « axiomatique », déployant ses vérités par voie déductive à partir d'une vérité première, « transparente » à la raison, et faisant massivement appel à des modes de justification *a priori* tels que le principe de symétrie⁸.

Quelle est la place réservée aux principes dans cette nouvelle conception de la mécanique qui débute par la cinématique et qui englobe la statique dans la dynamique ? Quels sont les modes de justification à l'œuvre ? C'est lors de la transition de la cinématique à la dynamique que les principes

⁵ Sur ce cours de Poncelet, voir les témoignages de Flamant [1888/1911, p. v] et d'Appell [1902, p. 43].

⁶ La première présentation de sa nouvelle conception de la mécanique, expérimentée dans une série de cours délivrés à l'École centrale durant les années 1840, se trouve dans [Bélanger 1847].

⁷ Pour une histoire du principe des vitesses virtuelles voir, entre autres, les analyses de P. Bailhache [1975].

⁸ Pour des exemples concrets, voir [Chatzis 1994]. Sur le principe de symétrie, voir [Dhombres et Radelet-de Grave 1991].

font leur apparition. En effet, la cinématique, étude du mouvement *per se*, n'est au fond qu'une géométrie élargie qui a accueilli le temps à côté de son objet traditionnel, l'espace, son ordre étant construit de déduction en déduction. Le réel (physique) n'entre en scène qu'avec la dynamique, quand on passe des figures aux corps. L'étude du mouvement de ceux-ci exige des principes et un arsenal conceptuel plus riche que celui de la cinématique. Elle exige également des types de raisonnement et des modes de justification nouveaux par rapport à ceux mobilisés dans le cadre de la cinématique.

Imbu de la croyance positiviste en la seule autorité de l'observation en matière de vérité scientifique, Bélanger écarte toute référence à des vérités transparentes à la raison, évidentes par elles-mêmes, donc *a priori*⁹. Non fondés en eux-mêmes, les principes de la dynamique sont désormais justifiés par l'accord supposé entre les conséquences que l'on peut en tirer et les observations recueillies. «*L'accord complet de l'expérience avec les conséquences du principe en est la confirmation*» deviendra l'énoncé canonique du nouveau mode de justification [Bélanger 1864b, p. 7]¹⁰.

Trois principes fondent la mécanique d'après Bélanger. Avant de les énoncer, il s'interroge sur une question d'identité : qu'est-ce que la dynamique, quels sont ses traits diacritiques par rapport à la cinématique ? «*La dynamique (du grec Δυναμις, force, puissance) est la partie de la mécanique qui s'occupe des relations du mouvement des corps avec ses causes, appelées forces*» [*Ibid.*, p. 1]. La force, notion aussi certaine que tout ce qui nous vient de l'expérience¹¹, marque la transition de

⁹ Pour mesurer l'importance du changement, il suffit de penser à toutes les démonstrations *a priori* du principe d'inertie basées sur l'argument de la symétrie, à commencer par celles d'Euler et de d'Alembert : «*Car un corps ne peut se déterminer de lui-même au mouvement, puisqu'il n'y a pas de raison pour qu'il se meuve d'un côté plutôt que d'un autre. Corollaire : De là il s'ensuit, que si un corps reçoit du mouvement pour quelque cause que ce puisse être, il ne pourra de lui-même accélérer ni retarder ce mouvement*» [d'Alembert 1743/1758, p. 4]. On trouve le même type de démonstration dans le cas de la proportionnalité des forces aux accélérations [Chatzis 1994]. Comte critique ces démonstrations *a priori* dans ses leçons consacrées à la mécanique [1830, leçons 15–18]. (Sur les démonstrations *a priori* du principe de l'inertie, voir [ESM 1915, p. 19] et [Meyerson 1908, chap. 3].)

¹⁰ On trouve une formulation explicite de ce type de raisonnement chez C. Huygens [1690]. En France et dans le domaine de la mécanique, c'est L. Carnot [1783] qui tient ce type de raisonnement. (Sur ces questions, voir [Laudan 1981].)

¹¹ D'après Bélanger, la notion de force procède, comme celles de durée et de

la cinématique à la dynamique. Comment le concept voit-il le jour ? «*La sensation que nous éprouvons, lorsque par notre contact avec un corps nous modifions son état de repos ou de mouvement, produit en nous l'idée de la force plus ou moins grande que nous exerçons ; et comme d'autres circonstances que l'action de nos muscles, telles que les attractions ou les répulsions à distance, donnent lieu à des effets semblables, nous sommes conduits à abstraire de ces circonstances très diverses la notion commune et simple que l'expérience à tout moment répétée nous a donnée de la force mécanique [c'est l'auteur qui souligne] » [Ibid., p. 3]. D'après Bélanger, la force existe indubitablement, les sensations tactiles (fait d'expérience) le prouvent, l'abstraction (raison) en forme le concept grâce à une opération qui consiste à extraire de la diversité des phénomènes leur dénominateur commun.*

Une fois la passerelle jetée entre la cinématique et la dynamique, viennent ensuite les principes. En premier lieu, on trouve celui de l'inertie, aussitôt suivi par le principe de l'action et de la réaction. Occupant une place centrale dans les deux principes, la force reste jusqu'ici un concept qualitatif. Quel rapport quantitatif existe-t-il entre la force, cause du mouvement, et le mouvement produit ? C'est le troisième principe, énoncé en deux temps, qui apporte la réponse. Dans un premier temps, Bélanger, après s'être référé à l'expérience du mouvement d'un corps emporté dans un bateau, énonce le « fait expérimental » suivant, passé à la postérité sous le nom de principe de l'indépendance de l'effet des forces et du mouvement antérieurement acquis :

«Lorsque tous les points d'un système matériel ont un mouvement commun, uniforme et rectiligne [...], si un autre point matériel ayant [...] la vitesse commune du système, est sollicité à partir de cet instant par une

déplacement, de l'expérience [1866, p. VIII]. L'évidence de la notion de force, assise sur le sentiment de l'effort ou de la tension musculaire, est une idée très répandue en France durant la deuxième moitié du siècle dernier. On la trouve nettement exprimée chez plusieurs auteurs tels Cournot, Duhamel, C. de Freycinet (pour des citations précises, voir [ESM 1915, p. 63–64]). Au début du siècle, Poincaré écrivait également que «*l'idée de force est une notion primitive, irréductible, indéfinissable ; nous savons tous ce que c'est, nous en avons l'intuition directe. Cette intuition directe provient de la notion d'effort, qui nous est familière depuis l'enfance*» [1902/1968, p. 124]. Cette croyance en la réalité de la force façonne la pensée des mécaniciens français du siècle dernier et ne va pas sans conditionner (en partie) la réception mitigée des formulations alternatives de la mécanique venant d'Allemagne, formulations qui envisagent la force comme un simple signe mathématique (voir *infra*).

ou plusieurs forces, il prend, relativement aux premiers points formant un système invariable de comparaison, le même mouvement que ces forces lui imprimeraient, dans le cas où le mouvement commun n'existerait pas» [*Ibid.*, p. 9].

Ce « fait expérimental » permet à Bélanger d'établir la proposition selon laquelle une force constante, appliquée à un point matériel possédant une vitesse initiale, lui imprime un mouvement rectiligne et uniformément varié, l'accélération étant indépendante de la vitesse et de même sens que la force¹². Cette dernière conclusion, jointe au principe général de la composition des effets des forces, permet à Bélanger d'établir la proportionnalité de l'accélération à la force pour un même corps. En termes mathématiques, le troisième et dernier principe stipule que pour chaque point matériel le rapport de la force F à l'accélération J est constant. C'est à ce point du développement qu'intervient la notion de masse, « notion comparative » et définie de la façon suivante : « *les masses de divers points matériels sont des grandeurs proportionnelles aux forces nécessaires pour imprimer à ces corps un même mouvement dans le même temps, une même accélération* » [*Ibid.*, p. 17]. Il suffit de prendre pour unité de masse celle d'un corps qui, sous l'action d'une unité de force, recevrait l'unité d'accélération, pour aboutir à l'expression de base $m = F/J$.

LES REMISES EN QUESTION

Aussitôt née, cette conception de la mécanique sera contestée par deux voix, chacune animée dans sa critique par des motifs idoine. La première attaque, dirigée contre la notion de force, vient de Barré de Saint-Venant. S'inscrivant dans une tradition qui voit en la force un reliquat de la notion de cause de la métaphysique, Saint-Venant prône une mécanique cinématique sans forces¹³. La force, réalité première et évidente pour les auteurs qui mettent l'accent sur l'expérience tactile, devient superflue et

¹² Poincaré écrira plus tard au sujet de cette « loi » : « *Il y a eu longtemps des traces de cette démonstration dans les programmes du baccalauréat ès sciences. Il est évident que cette tentative est vaine. L'obstacle qui nous empêchait de démontrer la loi d'accélération, c'est que nous n'avions pas de définition de la force* » [1902/1968, p. 129].

¹³ Sur cette tradition à laquelle appartient Saint-Venant et qui compte aussi d'Alembert et Carnot, voir [Jouguet 1909/1924, p. 72–81] et [Dugas 1950, p. 234–243, 309–317, 421–422].

insaisissable pour ceux qui, comme lui, érigent la vue comme premier sens, seule capable d'accueillir les véritables données immédiates, à savoir des corps se déplaçant dans l'espace, entrant en relation et échangeant des vitesses [Barré de Saint-Venant 1851, p. 58–59]¹⁴. Synthétisant les leçons de l'expérience, Saint-Venant énonce sa loi générale :

«Les corps se meuvent comme des systèmes de points ayant à chaque instant, dans l'espace, des accélérations dont les composantes géométriques, dirigées suivant leur ligne de jonction deux à deux, et variables avec les grandeurs de ces lignes, mais non avec les vitesses des points, sont constamment égales et opposées pour les deux points dont chaque ligne mesure la distance» [Ibid., p. 61].

Si la force perd le statut de concept premier, c'est la masse, définie par l'entremise du phénomène du choc¹⁵, qui prend sa place. La force ou *«l'action attractive ou répulsive d'un corps sur un autre»* devient ainsi un pur produit du calcul, *«la ligne ayant pour grandeur le produit de la masse de celui-ci par l'accélération moyenne de ses points vers ceux du premier et pour direction celle de cette accélération»* [Ibid., p. 64]¹⁶.

Alors que Saint-Venant critique la conception classique de la mécanique pour la place centrale qu'elle accorde à la notion de force (problématique d'après lui), Ferdinand Reech, ingénieur de la marine, lui reproche une compréhension déficiente de cette même notion. D'accord avec Bélanger sur le caractère évident du concept de force, Reech se sépare de lui sur la question de sa définition. Celle-ci doit être statique, la force étant, pour Reech, un concept indépendant du mouvement¹⁷. Pour mener à bien

¹⁴ D'Alembert déclarait aussi : *«Tout ce que nous voyons bien distinctivement dans le mouvement d'un corps, c'est qu'il parcourt un certain espace, et qu'il emploie un certain temps à le parcourir»* [1743/1758, p. xvj].

¹⁵ *«La masse d'un corps est le rapport de deux nombres exprimant combien de fois ce corps et un autre corps choisi arbitrairement et constamment le même, contiennent de parties qui, étant séparées et heurtées deux à deux l'une contre l'autre se communiquent, par le choc, des vitesses opposées égales»* [Barré de Saint-Venant 1851, p. 64].

¹⁶ Sur Saint-Venant, voir [Jouguet 1909/1924, p. 77–81] et [Dugas 1950, p. 421–422].

¹⁷ Précisons que Reech rédige sa mécanique comme réponse au programme proposé par la Commission mixte et mis en œuvre par Bélanger : *«L'ouvrage qu'on va lire a été commencé en décembre 1850, quand le bruit s'est répandu et confirmé bientôt après que, dorénavant, on n'admettrait plus la science de la statique à l'École polytechnique, ou du moins que la statique n'y serait plus admise que comme une conséquence de la dynamique»* [Reech 1852, p. 1].

son projet d'une définition statique de la force, Reech peuple d'abord le monde des corps solides d'une entité nommée *qualité liaison*. Celle-ci «*fait que l'état de repos ou de mouvement d'une seule partie d'un corps entraîne des états correspondants de repos ou de mouvement dans les autres parties du corps*», et sert par là à «*la transmission ou à la production même de la force entre toutes les parcelles de matière d'un corps à volume fini*» [Reech 1852, p. 39]. Reech utilise ensuite cette qualité pour définir le concept de force :

«*L'expérience nous apprend [...] que la rupture ou la séparation du système de liaison d'un corps n'a lieu qu'après un certain changement de figure, préalablement accompli, et par là nous comprenons que la qualité liaison des corps pourra nous servir à trouver expérimentalement les intensités des forces dès le début et avant l'établissement d'aucune science mécanique*» [Ibid., p. 40].

C'est l'allongement d'un fil flexible qui donne à Reech la mesure d'une force. Muni de cette mesure, Reech bâtit ensuite sa dynamique, autrement dit la constitution des rapports entre la force définie à l'aide du fil et le mouvement qu'elle imprime à un point matériel¹⁸.

Contestée, la mécanique classique n'en résiste pas moins. La tentative de Reech tombe en effet dans l'oubli total avant de refaire surface à la fin des années 1890 (voir *infra*). Quant aux idées de Barré de Saint-Venant, elles ne franchissent pas le cercle étroit de quelques fidèles¹⁹, parmi lesquels figure Boussinesq. Celui-ci revoit la mécanique de Saint-Venant et la prolonge dans une direction «*énergétique*», en essayant d'obtenir les équations différentielles du mouvement au moyen du «*principe de la conservation des forces vives ou de l'énergie*»²⁰. Malgré la stature de ses

¹⁸ Sur la mécanique de Reech, voir [Jouguet 1909/1924, p. 102–126] et [Dugas 1950, p. 423–426].

¹⁹ Alfred Flamant, polytechnicien et ingénieur des Ponts et chaussées, professeur à l'École des ponts et chaussées et à l'École centrale des arts et manufactures, collaborateur de Saint-Venant, écrira plus tard un manuel de mécanique conforme aux canons de ce dernier [Flamant 1888]. Il établira avec Boussinesq une notice sur la vie et les travaux de Saint-Venant, dans laquelle les auteurs saluent leur maître pour avoir produit une mécanique «*où les forces se présentent enfin scientifiquement dégagées de la notion métaphysique de cause et de la notion physiologique d'effort musculaire qui en obscurcissaient le sens cinématique accessible au calcul*» [Boussinesq et Flamant 1886, p. 577–578].

²⁰ Boussinesq pose d'abord le «*principe de la conservation des forces vives ou de*

promoteurs, cette mécanique sans forces ne parviendra pas à émouvoir la communauté des mécaniciens en France.

Dominant sans partage la scène française pendant un demi-siècle, la mécanique classique est placée à partir des années 1890 au centre d'une discussion intense. Des critiques décèlent des lacunes, des points non clarifiés, des présupposés litigieux. La comparaison des éditions successives d'un classique de la mécanique rationnelle, le traité de Paul Appell, publié en 1893 et qui connaît une deuxième édition « entièrement refondue » en 1902, constitue une bonne introduction aux débats de l'époque.

Les deux éditions du traité d'Appell

Résumé de ses leçons de licence de mathématiques à la Faculté des sciences de Paris, l'ouvrage de P. Appell revendique des traits diacritiques par rapport aux traités de l'époque : « *Ce qui fait le caractère distinctif de cet ouvrage [...], c'est l'introduction de la Mécanique analytique dans les commencements mêmes du cours* », ce qui permettra au lecteur de connaître « *les équations de Lagrange, celles de Hamilton, les théorèmes de Jacobi, le principe de moindre action, les théorèmes de Tait et Thomson* » [1893, p. I-II]. En effet, parmi les ingénieurs auteurs de traités de mécanique, à commencer par Bélanger lui-même, nombreux sont ceux qui expriment leur réticence vis-à-vis de la mécanique analytique, jugée peu utile pour les besoins des applications. A. Flamant exprime une opinion répandue quand il écrit dans l'avant-propos de son traité : « *on n'y trouvera donc aucune application ayant en vue les problèmes de la mécanique céleste, ni même les équations générales de Lagrange, Jacobi et Hamilton qui n'ont pas d'application, ou dont on peut se passer, dans la résolution des problèmes usuels* » [1888, p. I].

l'énergie» sous la forme : énergie potentielle (fonction des distances mutuelles des points du système) + énergie cinétique (nommée énergie actuelle) = C^{te} . En différentiant par rapport au temps et en *supposant* que les accélérations sont indépendantes des vitesses, Boussinesq obtient les équations du mouvement. Outre Boussinesq [1872; 1889, p. 12-26], voir également à ce sujet la note n° 16 ajoutée par Saint-Venant dans la traduction (cosignée avec Flamant) du livre de Clebsch sur la théorie de l'élasticité des corps solides [Clebsch 1862/1883, p. 63-74]. Du fait du développement du mouvement « énergétique » en Allemagne à la fin du siècle dernier, les réflexions de Boussinesq sont devenues l'objet de discussion (voir [ESM 1915, p. 184-186], [Jungnickel et McCormmach 1986, p. 217-227]). Les positions de Saint-Venant et celles de Boussinesq méritent une étude à part, d'autant plus que des auteurs allemands, promoteurs des mécaniques alternatives à la fin du siècle dernier, développent au sujet des principes de la mécanique des réflexions analogues, le plus souvent sans citer les auteurs français.

Novateur quant aux thèmes abordés, le traité d'Appell de 1893 n'en suit pas moins fidèlement la tradition quant à la présentation des principes de la mécanique. Toute autre est l'attitude que l'auteur adopte en 1902 dans la deuxième édition de son ouvrage. Tandis qu'en 1893 la section relative aux principes s'ouvrait sur la définition du point matériel, celle-ci est précédée dans la deuxième édition par deux petits paragraphes intitulés respectivement *axes fixes* et *temps*, que nous reproduisons textuellement :

«*Axes fixes* — Nous rapporterons les positions de tous les corps à un système d'axes que nous appellerons, par définition, axes absolument fixes : ce système d'axes est un trièdre trirectangle invariablement lié aux étoiles appelées étoiles fixes».

«*Temps* — Le temps en usage est le temps moyen défini en Cosmographie» [1902, p. 81].

Pourquoi Appell a-t-il senti le besoin de faire ces ajouts ? La réponse se trouve dans le même livre, mais quelques quarante pages avant, à l'endroit où l'auteur traite la cinématique du point. La mise en regard des deux éditions nous livre ici la clé. Fidèle à la tradition, Appell commence sa cinématique par la définition du corps au repos et en mouvement, ce qui l'amène à poser la question de la relativité du mouvement. Dans l'édition de 1893, après avoir expliqué que l'«*on n'observe que des mouvements relatifs*», Appell note que

«*cependant, nous pouvons imaginer [c'est nous qui soulignons] trois axes coordonnés absolument fixes : le mouvement d'un corps, par rapport à ces axes, s'appellera mouvement absolu du corps*²¹. Le mouvement absolu est donc une pure abstraction ; mais les mouvements relatifs pouvant toujours être ramenés aux mouvements absolus, et ceux-ci étant soumis à des lois plus simples, il convient de commencer par l'étude du mouvement

²¹ Ce raisonnement qui fait appel au pouvoir de l'imagination n'est pas propre à Appell. La possibilité de concevoir, d'imaginer un concept semble constituer un argument répandu à l'époque en faveur de sa légitimité. Ainsi Freycinet répondait aux détracteurs du mouvement absolu, qui soutenaient que l'on ne peut observer que des déplacements des corps les uns par rapport aux autres, que leur thèse reposait «*sur un malentendu [...] qui tient à la confusion établie entre la possibilité de concevoir et la possibilité de réaliser [...]. Nous concevons bien, sans les rencontrer dans la Nature, la ligne infinie, la durée infinie et à l'autre bout de l'échelle l'infiniment petit et l'atome*» [1902, p. 11–12]. Le débat n'est pas gratuit. Le principe de l'inertie en est affecté : on peut concevoir un corps isolé ayant un mouvement uniforme et rectiligne mais on ne peut pas l'observer puisque l'observation demande au moins deux corps : le corps évoqué par le principe et celui de l'observateur [Wickersheimer 1905, p. 72–73].

absolu»²² [1893, p. 44].

En revanche, dans l'édition de 1902, après avoir réaffirmé que l'on n'observe que des mouvements relatifs, Appell écrit : «*Néanmoins, il est commode [c'est nous qui soulignons], dans chaque question de Cinématique, de faire choix d'un système d'axes qui, par définition, sera regardé comme absolument fixe. Le mouvement, par rapport à ces axes, s'appellera alors mouvement absolu*». Et il continue :

«*Mais si, en Cinématique, le choix du système d'axes regardé comme fixe est arbitraire, il n'en est pas de même en Mécanique : nous verrons plus loin que, pour simplifier autant que possible l'étude des phénomènes naturels, au point de vue mécanique, les axes qu'il convient de regarder comme fixes sont des axes invariablement liés aux étoiles appelées fixes*» [1902, p. 44].

On le voit, la deuxième édition du traité d'Appell se distingue de la formulation classique de la mécanique sur un point important. La différence se localise dans le passage de la cinématique à la dynamique. Alors que dans la formulation traditionnelle la transition est effectuée grâce à l'introduction de la notion de force qui nous fait passer de l'étude du mouvement *per se* à celle des relations du mouvement avec ses causes, les questions du temps et de l'espace étant traitées de façon indistincte dans la cinématique et la dynamique, la deuxième édition de l'ouvrage d'Appell insiste sur le fait que la dynamique n'est pas caractérisée uniquement par une complexité conceptuelle croissante mais également par une dépendance beaucoup plus marquée du double choix des axes et de l'unité de temps. À l'encontre des théorèmes de la cinématique qui sont indépendants du choix des axes et de l'unité du temps, les lois de la mécanique, telles qu'elles sont énoncées habituellement, ne sont pas indifférentes à ce choix. À qui doit-on cette prise de conscience ?

La brochure d'Auguste Calinon

En 1885, A. Calinon²³, publiée à Nancy une brochure intitulée *Étude*

²² Bélanger tient un raisonnement analogue : «*Si un tel système de comparaison est supposé fixe et rien n'empêche de concevoir cet état de repos [...], le déplacement qui résulte [...] s'appelle [...] déplacement absolu*» [1864a, p. 2].

²³ Auguste Calinon (1850–1900), ancien élève de l'École polytechnique, est l'auteur d'une série de travaux portant sur la cinématique, la géométrie et sur les diverses grandeurs en mathématiques. La plupart de ses études ont vu d'abord le jour dans le

critique sur la mécanique [1885]. Au début du chapitre qui suit celui consacré à la cinématique, on trouve la remarque suivante :

« nous voyons que la loi de direction des accélérations ne peut être vraie que pour un seul système de repères ; ce système est celui des étoiles fixes. Cette remarque très importante paraît avoir échappé aux auteurs ; il ne nous semble pas qu'aucun d'eux, en énonçant la loi de l'action et de la réaction ait vu nettement que cette loi était liée à un choix des repères » [1885, p. 57].

La dépendance des lois de la mécanique par rapport au système de coordonnées choisi ne constitue pas une découverte, au sens propre du terme, de Calinon. Déjà en 1869, C. Neumann inaugurant, en Allemagne, le débat sur les principes de la mécanique par ses réflexions sur le principe de l'inertie, notait que celui-ci est complètement inintelligible si on ne spécifie pas le système de coordonnées auquel on se réfère. Un mouvement qui, vu de la terre, semble se faire en ligne droite, paraîtrait curviligne vu du soleil, remarquait alors Neumann [1870]²⁴. Il n'en reste pas moins qu'en France, c'est Calinon qui semble avoir traité le premier et de façon systématique la question des rapports entre principes et système de coordonnées, et cela à l'intérieur de la tradition qui veut qu'on commence la mécanique par la cinématique²⁵.

Bulletin des séances de la Société des sciences de Nancy avant d'être reprises chez des éditeurs parisiens. Oublié aujourd'hui, Calinon est souvent cité de manière élogieuse par plusieurs acteurs de l'époque tels que Poincaré, Milhaud, Couturat.

²⁴ Pour rendre le principe intelligible, Neumann postule l'existence, dans quelque endroit inconnu de l'univers, d'un corps absolument rigide, à jamais invariable dans sa figure et ses dimensions, auquel il donne le nom de « corps alpha » et qui sert de point de repère à tous les mouvements. Sur les réflexions de Neumann et la discussion qui a suivi, voir [ESM 1915, p. 51–52, 57–61], [Duhem 1909, p. 193–197, 206–207], [Mach 1883/1904, p. 229–234], [Cassirer 1910/1977, p. 200–218] et plus récemment [Barbour 1989, p. 646–662].

²⁵ Outre la déclaration de l'auteur, voir aussi le témoignage de Georges Lechalas [1896, p. 67–68]. Polytechnicien et ingénieur des ponts et chaussées, G. Lechalas est, à l'instar de Calinon, un auteur important pour les débats épistémologiques de son époque. Auteur aussi prolifique qu'éclectique (on lui doit des études sur les fondements de la géométrie, l'esthétique, la théorie de la connaissance, un manuel de droit administratif, un rapport sur les chemins de fer...), Lechalas est un interlocuteur de plusieurs de ses contemporains (citons, entre autres, Poincaré, Renouvier, Couturat, Boutroux). Sur Lechalas, voir son dossier d'ingénieur conservé aux Archives Nationales, sous la cote F14/11571.

Sans nier l'importance de la brochure de Calinon, notons néanmoins que Saint-Venant dans un article paru en 1878, lie explicitement formulation des lois de la

L'originalité de la brochure ne se réduit pas à cette remarque liant la formulation (et *a fortiori* la validité) de la loi de l'action et de la réaction au système de coordonnées choisi. L'auteur n'hésite pas à avancer deux autres thèses qui, pour l'époque, paraissent étonnantes. La première porte sur les rapports d'interdépendance qui existent entre une loi et les concepts qui y figurent. Calinon se sert de la loi de l'action et de la réaction pour établir une mesure du temps (choix de l'angle de la rotation terrestre) et obtenir la définition de la masse [1885, p. 58]²⁶. La deuxième thèse contenue dans cet ouvrage est encore plus radicale. En renversant complètement les rapports traditionnels entre observation et théorie, celle-ci étant subordonnée à celle-là, l'auteur avance que «*l'univers n'est qu'une application particulière et très limitée de cette mécanique qui ne dépend en rien des faits observés et nous aide au contraire à les prévoir et à les expliquer*» [*Ibid.*, p. 98]. Énoncés dans l'isolement, les thèses de Calinon vont trouver dans la décennie qui suit plusieurs échos favorables, surtout parmi les philosophes intéressés à la théorie de la connaissance.

Joseph Delbœuf

Dans sa petite brochure, Calinon soulignait les interdépendances qui lient le système de coordonnées, la validité de la loi de l'action et de la réaction et la définition de la notion de masse. Vingt ans plus tôt, J. Delbœuf²⁷, dans un livre de caractère philosophique, avait présenté des remarques du même genre [Delbœuf 1865]. Alors que, selon les mécaniciens

mécanique et système d'axes (il parle des étoiles fixes). Mais le fait que même un disciple de Saint-Venant tel que Flamant ne mentionne cet article qu'en 1911, lors de la deuxième édition de son traité de mécanique [1888/1911, p. 335–337], et après avoir cité Calinon [*Ibid.*, p. xi], nous incite à penser que la remarque de Saint-Venant n'a pas trouvé de lecteur.

²⁶ Dans un texte de 1898, Poincaré développera au sujet du rapport entre la mesure du temps et la validité des hypothèses en physique des considérations analogues. Calinon y est cité à deux reprises [Poincaré 1898, p. 45, 47].

²⁷ Philosophe belge, professeur à l'Université de Gand puis de Liège, Joseph Delbœuf (1831–1896) est l'auteur de plusieurs travaux allant de la géométrie et de la philosophie des sciences à la psychologie et la psychophysique (on lui doit des travaux sur les illusions optico-géométriques dont l'une porte son nom). Son article posthume sur la mécanique, paru dans la *Revue de métaphysique et de morale*, contient des éléments d'autobiographie intellectuelle [1897]. On peut lire deux brèves notices biographiques sur Delbœuf dans *The American Journal of Psychology*, 8 (1896–1897) et dans le *Bulletin de l'Académie royale des sciences, des lettres et des beaux-arts de Belgique*, 33 (1897).

de l'époque, le temps et l'étendue sont des concepts primitifs, si simples qu'ils se passent de définition, Delbœuf, dans une même veine que Calinon, met en évidence l'implication des lois de la mécanique dans la définition des notions les plus élémentaires comme le temps. Implication qui ne va pas, selon Delbœuf, sans engendrer des circularités dans les procédures de vérification des lois de la mécanique :

«Pour vérifier un mouvement uniforme il me faut d'abord une division uniforme du temps. Mais quel que soit le moyen par lequel je crois obtenir cette division uniforme, sa construction se fonde nécessairement sur les lois de la mécanique, et admettre ses indications comme sûres, c'est admettre implicitement comme vraies ces mêmes lois qu'il s'agit pourtant de vérifier. Si par exemple je divise le temps par le mouvement oscillatoire du pendule, d'où sais-je que ces oscillations du pendule sont isochrones ?, par les lois de la mécanique. Donc partir de l'isochronisme des oscillations du pendule pour vérifier les lois de la mécanique, c'est faire une pétition de principe» [1865, p. 256].

En avance sur leur temps, lorsqu'elles sont énoncées pour la première fois, les idées de Delbœuf sont redécouvertes en France au milieu des années 1890²⁸.

Gaston Milhaud

Toujours à la même époque, un normalien, G. Milhaud²⁹, mathématicien de formation, écrivait, dans sa thèse de philosophie soutenue en 1893, que le principe de l'inertie, loin de pouvoir être démontré par l'expérience, la devance en réalité [1894, p. 103]. Alors que, pour la conception classique, la force, donnée immédiate fournie par les sensations, pouvait être identifiée indépendamment des principes de la mécanique, Milhaud observe qu'en règle générale cette identification requiert l'établissement préalable du principe de l'inertie :

²⁸ Lechallas les cite dans son étude sur l'espace et le temps [1896, p. 84-85]. Couturat s'y réfère également dans un article paru dans la *Revue de métaphysique et de morale* [1896, p. 654-655].

²⁹ Gaston Milhaud (1858-1918) entre à l'École normale en 1878. Agrégé de mathématiques en 1881, il enseigne aux lycées du Havre, de Lille et de Montpellier. Après sa thèse (1893), il professe la philosophie à l'Université de Montpellier. En 1909, une chaire d'histoire de la philosophie dans ses relations avec les sciences est créée pour lui à la Sorbonne (pour plus d'information, voir la notice biographique établie par P. Costabel [1974]).

«[II] permet [...], dans une observation quelconque, d'énumérer les forces déterminées en présence desquelles on se trouve, puisqu'on veut dépasser, à propos des mouvements, la notion primitive de pression ou d'impulsion naturelle, directement vérifiable; puisque, en d'autres termes, il est question de forces correspondant à des mouvements qui s'effectuent sans trace apparente d'aucun effet statique. Ainsi l'observation, pas plus qu'une raison a priori, ne nous obligera à considérer comme naturellement donnée [c'est l'auteur qui souligne] la force que pose le principe d'inertie. Et celui-ci nous apparaît comme fixant, par définition, les circonstances précises où il sera question de force, à savoir tous les cas où un mouvement ne sera pas à la fois rectiligne et uniforme» [1896, p. 291].

Henri Bouasse

Avec H. Bouasse³⁰, la discussion sur les principes de la mécanique, menée jusqu'alors sur un terrain scientifique et philosophique, sera enrichie d'une dimension historique. L'auteur donne pendant l'hiver 1893–1894, à la Faculté des sciences de Toulouse, une série de leçons sur l'histoire du développement des notions fondamentales de la mécanique telles que la force, le travail, l'impulsion [Bouasse 1895]³¹. Physicien proche de Duhem avec qui il partage nombre d'options épistémologiques, Bouasse ne se contente pas de faire œuvre de simple historien. Son récit est en effet imprégné de convictions philosophiques fortes. Se ralliant, selon ses propres termes, à «*un positivisme très profond*», Bouasse conçoit son historique comme une mise en scène de la façon dont l'action conjointe des résultats de l'expérience et des principes «*métaphysiques*» *a priori* (par exemple celui qui postule la conservation de certaines quantités dans la nature) finit par produire une série d'équations différentielles. Celles-ci, dépouillées de toute représentation imagée des phénomènes (telle que la représentation de la chaleur comme un mouvement vibratoire, par exemple) constituent, selon l'auteur, l'explication dernière de la nature.

³⁰ Entré à l'École normale en 1885, docteur ès sciences mathématiques et physiques, Henri Bouasse (1866–1953) fait sa carrière universitaire à Toulouse. Outre des articles scientifiques et une série de manuels de mathématiques générales et de physique, traitant de tous les domaines, dont la mécanique rationnelle, sa production intellectuelle comporte des articles philosophiques parus pour l'essentiel dans la *Revue de métaphysique et de morale*.

³¹ Le livre a fait l'objet d'un long compte rendu élogieux par Rauh [1895] dans la *Revue de métaphysique et de morale*.

En assimilant la partie réellement explicative d'une théorie à sa forme mathématique, Bouasse peut adhérer à un pluralisme épistémologique. Plusieurs théories s'appuyant sur des « images » différentes, à condition qu'elles débouchent sur le même système final d'équations différentielles (ou sur des équations si peu différentes que la précision limitée des expériences permet de les confondre), sont recevables pour la même classe de phénomènes. Du coup, la formulation traditionnelle de la mécanique devient une « forme » à côté d'autres³².

Dans le sillage des auteurs précités, d'autres protagonistes, arguments philosophiques et références historiques à l'appui, mettent en évidence les connexions et les interdépendances (qualifiées souvent de cercles vicieux) qui lient concepts, mesures, lois, systèmes de référence, connexions que la formulation traditionnelle de la mécanique passait sous silence³³. Il en résulte un mouvement de doute de plus en plus intense quant à la possibilité de démontrer, en invoquant le témoignage de l'expérience, les principes-piliers de la mécanique. Ce mouvement rend la thèse de Calinon, selon laquelle les lois de la mécanique sont plutôt des règles d'action que des représentations du réel, de plus en plus plausible. Des mots tels que simplicité, commodité, pouvoir créateur de l'esprit, sont fréquemment utilisés.

Jules Andrade

Le débat ne reste pas spéculatif. En 1898, ces thèmes, jusqu'ici avancés surtout au sein des cercles philosophiques, trouvent en la personne de J. Andrade, à l'époque maître de conférences de mathématiques à Montpellier, un relais puissant³⁴. Celui-ci ne se contente pas en effet d'avancer

³² Bouasse [1910] optera pour une présentation des principes de la mécanique faisant appel aux forces d'inertie.

³³ Voir notamment les travaux de J. Wilbois [1899] et surtout ceux de E. Le Roy [1899; 1900a,b; 1901]. L'étude de la production intellectuelle de la constellation de penseurs issus de l'École normale pour l'essentiel (Milhaud, Wilbois, Le Roy, Lechalas, Couturat, etc.), dont les réflexions philosophiques s'appuient sur une solide formation scientifique initiale et qui gravitent autour de la *Revue de métaphysique et de morale*, reste à faire. Pour un premier aperçu, voir « La philosophie en France depuis 1867 » de Boutroux [1908/1994, p. 918–920, 934–942, notamment].

³⁴ Après des études à l'École polytechnique (1876–1878) et à l'École d'application de Fontainebleau, Jules Andrade (1857–1933) est docteur ès sciences mathématiques en 1890. Il enseigne comme maître de conférences à Rennes, puis à Montpellier et à Besançon où il devient professeur. Spécialiste des questions de chronométrie

des thèses de caractère épistémologique. Après avoir procédé à un examen approfondi de la formulation classique de la mécanique, à laquelle il reproche de ne pas réaliser avec la netteté nécessaire «*la distinction entre les définitions, les conventions et les faits expérimentaux*» [1898b, p. 399], Andrade lui oppose la mécanique de Reech, vieille d'un demi-siècle, mécanique oubliée qu'il prolonge et améliore. En introduisant la notion de «*cours naturel des choses*», que les forces viennent troubler, Andrade, en suivant Reech, transforme le principe d'inertie en convention [Andrade 1898a]. En effet, ce «*cours naturel des choses*», à savoir le mouvement d'un corps non soumis à une force, pourrait bien être autre que celui postulé par le principe de l'inertie (par exemple, une courbe parabolique). Opter, parmi les différentes sortes de mouvement possibles, pour un mouvement rectiligne et uniforme, n'obéit, d'après Reech et Andrade, qu'à des motifs de simplicité.

Comme chez Reech et à l'opposé de la mécanique classique, la force n'est plus définie comme une notion de dynamique. Elle devient un concept statique, mesuré à l'aide de l'allongement d'un fil élastique, alors que la masse est définie par les phénomènes de percussion. Andrade résout ainsi une tension, non explicitement reconnue, installée au sein de la formulation classique : prônant une conception dynamique de la force en tant que cause du mouvement, celle-ci n'en recourait pas moins dans la pratique à des mesures statiques *via* le dynamomètre ou la balance. Son propre travail à l'appui, Andrade donne une illustration contemporaine des thèses que défendait Bouasse par un appel à l'histoire et selon lesquelles «*dans toutes les parties de la physique on trouve plusieurs théories qui sont également recevables*» [Bouasse 1895, p. 23]. Il emboîte le pas à Calinon en soutenant, lui aussi, que «*les notions fondamentales de la mécanique rationnelle dérivent beaucoup plus de conceptions a priori que de l'expérience proprement dite ; elles sont une manière d'interroger l'expérience mais nullement une réponse* [c'est l'auteur qui souligne] *de l'expérience*» [Andrade 1898b, p. 399].

Des mécaniques venant d'Allemagne

À la réflexion française sur la mécanique, il faut ajouter celle provenant

et d'horlogerie, Andrade est l'auteur de contributions dans les principales revues de mathématiques, mais aussi dans la *Revue philosophique* et dans la *Revue de métaphysique et de morale*.

d'outre-Rhin. Associées aux noms de Mach, Kirchhoff, Helmholtz, Hertz, Boltzmann, des formulations venant d'Allemagne et accompagnées de réflexions de nature épistémologique, concurrencent également la conception classique de la mécanique.

Au risque de schématiser à outrance, voici quelques éléments caractéristiques de ces mécaniques. En appliquant le rasoir d'Ockham aux concepts de base, Kirchhoff retient trois notions premières pour construire sa mécanique, celles de temps, d'espace et de matière. Le reste de la construction est affaire de calcul. Avec l'introduction des équations de liaison, la masse devient un simple coefficient afférant au point matériel et figurant dans les équations générales du mouvement alors que la force se transforme également en signe mathématique, à savoir le produit de la masse par l'accélération (voir [Jouguet 1909/1924, p. 88–101], [Dugas 1950, p. 426–428]).

Mach, explorant le territoire conceptuel du paradigme « galiléo-newtonien », y décèle des circularités et des redondances. En particulier, la mesure de la masse proposée par Newton, le produit de la densité et du volume, laisse à désirer, le terme de densité étant indéfini ; et la loi de l'inertie est contenue dans la proportionnalité des forces aux accélérations. Pour faire face à ces problèmes internes, Mach mettra au premier plan la notion de masse définie simultanément avec la loi régissant le mouvement des corps (voir [Mach 1883/1904, p. 210–241], [Duhem 1903b] et pour une appréciation récente [Barbour 1989, p. 676–689]).

Avec H. von Helmholtz, la découverte du principe de conservation de l'énergie débouche sur une version « énergétique » de la mécanique qui énonce la seule loi qui régit le mouvement des corps à l'aide du principe de Hamilton : si un système de corps est dans la situation A à l'époque t_0 et dans la situation B à l'époque t_1 , il va toujours de la première situation à la seconde par un chemin tel que la valeur moyenne de la différence entre les deux sortes d'énergie (cinétique et potentielle), dans l'intervalle de temps qui sépare les deux époques t_0 et t_1 , soit aussi petite que possible (voir [Poincaré 1897], [Jungnickel et McCormmach 1986, p. 129–141]).

La même démarche déductive que celle de Helmholtz conduit Hertz à bâtir l'édifice de la mécanique à l'aide d'une seule loi qui condense en un énoncé unique le principe d'inertie et le principe de la moindre contrainte de Gauss (voir [Poincaré 1897], [Duhem 1903a/1992, p. 157–168], [Dugas

1950, p. 430–33], [Jouguet 1909/1924, p. 269–280])³⁵.

Boltzmann enfin, pour construire sa mécanique, également de façon déductive, pose l'existence d'un certain nombre de points matériels, l'accélération de chacun étant la somme de $(n - 1)$ accélérations partielles, deux à deux de sens contraires et dans un rapport constant, dirigées suivant les droites joignant le point considéré aux $(n - 1)$ autres. Boltzmann considère ensuite chaque accélération partielle comme une fonction $f(r)$ de la distance r de deux points correspondants. Pour bâtir l'édifice de la mécanique, il suffit de choisir des fonctions $f(r)$ de façon que des mouvements réels concordent avec les résultats des équations du mouvement qui caractérisent le système de points précédemment posé (voir [Boltzmann 1899], [Dugas 1959, p. 30–67]). Le lecteur aura déjà remarqué que dans toutes ces formulations, la force apparaît comme un simple signe mathématique.

La réception de ces mécaniques par les mécaniciens français nécessiterait une étude à part. Disons ici, qu'à l'exception de celle de Mach³⁶, l'accueil donné aux mécaniques allemandes semble être plutôt réservé. La plupart des commentateurs, peu nombreux au demeurant et souvent attachés à une conception réaliste de la force — celle-ci n'étant «*point une abstraction, un être de raison, mais quelque chose de réel*» [Freycinet 1902, p. 14] — expriment leur réticence à l'égard de formulations qui n'accordent à la force que le statut d'une expression analytique³⁷. À notre connaissance,

³⁵ La traduction anglaise de son livre sur la mécanique contient un essai introductif de R.S. Cohen, accompagné d'une riche bibliographie [Cohen 1956].

³⁶ La formulation de la mécanique par Mach sera favorablement accueillie notamment par Blondlot [1896; 1900], Appell [1902] et Wickersheimer [1905].

³⁷ Voir les réactions de Freycinet [1902], Vicaire [1897] et Combediac [1902]. La critique adressée par Vicaire à l'entreprise de Kirchhoff est significative à cet égard. En établissant une hiérarchie entre les sensations tactiles et visuelles, Vicaire ira jusqu'à soutenir que la notion de force est antérieure à celle même d'espace : «*Comme le toucher opère justement par la sensation de la résistance des corps, résistance qui est une force, on voit, que la notion de force est pour nous, jusqu'à un certain point, antérieure à celle de l'espace*». Et Vicaire continue : «*La vue qui entend cette notion [celle d'espace] n'est pas nécessaire pour la constituer, car l'aveugle de naissance a certainement une idée très nette de l'espace*» [1897, p. 48–49]. Les remarques de Vicaire s'inscrivent dans une discussion plus large menée par des philosophes de l'époque sur les différentes classes de sensations et le sentiment de la réalité objective (voir les réflexions de A. Lalande et la discussion qu'elles ont suscitée au sein de la Société française de philosophie [Lalande 1902; 1903]).

seuls les frères Cosserat saluent les contributions « déductives » des allemands et s'en inspirent [Cosserat 1908].

Profusion des formulations de la mécanique, critique de la tradition, accent mis sur le pouvoir créateur de l'esprit, comment ceux qui s'occupent de l'enseignement de la mécanique rationnelle dans les établissements les plus prestigieux vont-ils réagir ?

L'ENTRÉE EN SCÈNE DE MATHÉMATIENS CONNUS

Appell

Nous avons déjà rencontré Paul Appell dont le traité a servi de point de départ pour notre historique des débats autour des principes de la mécanique. À l'écoute des discussions critiques, il déclare, dans la deuxième édition de son traité : « *il nous est impossible, dans cet Ouvrage, de faire la critique des principes de la Mécanique. C'est là une question des plus délicates qui demande de nouvelles recherches* » [Appell 1902, p. 80]. Il se contente en effet de mentionner les auteurs qui ont le plus participé, selon lui, au renouvellement de la conception de la mécanique : Mach, Hertz, Andrade, Boussinesq et Bouasse. Tout en restant fidèle au mode de justification traditionnel — observations, induction, formulation des principes, accord entre les conséquences des principes et les observations recueillies —, il abandonne la formulation classique de la mécanique afin de se rallier, sans avancer de raisons particulières, aux conceptions machiennes, qui semblent avoir été introduites en France par Blondlot, professeur de physique à l'Université de Nancy [Blondlot 1896; 1900]³⁸.

Si Appell opte, sans expliciter son choix, pour la formulation machienne de la mécanique, Picard, Painlevé, et Hadamard seront plus actifs dans leurs interventions. Ils vont s'engager directement dans la discussion, en multipliant, au tournant du siècle, analyses et prises de position.

Picard

Enseignant cette discipline à l'École centrale depuis 1894, Émile Picard

³⁸ Plusieurs indices militent en faveur de cette hypothèse. Appell [1902, p. 81] se réfère explicitement à Blondlot. C'est Blondlot qui expose les conceptions machiennes lors de son intervention sur les principes de la mécanique rationnelle au Congrès international de philosophie, tenu en 1900 à Paris [Blondlot 1900]. Enfin, Mach lui-même cite Blondlot dans la préface de son ouvrage sur la mécanique, comme seul Français parmi ceux qui se réfèrent à ses réflexions [1883/1904, p. 5].

s'intéresse surtout aux questions ayant trait à la formulation des principes de la mécanique. Au fait des mécaniques venant d'Allemagne, sensible aux réflexions d'Andrade et de Bouasse³⁹, Picard n'en reste pas moins fidèle à la formulation classique de la mécanique. Fidélité non dogmatique puisque consciente des limites et des difficultés affectant la tradition et mises au clair pendant les années 1890. De là une tentative vigoureuse qui essaie à la fois de justifier l'attachement à la tradition et d'intégrer, grâce à une série de modifications, les critiques qui lui sont adressées. Tout en exprimant son admiration pour la contribution de Hertz, Picard récuse la démarche déductive. En effet, cette manière de procéder, certes *«d'une parfaite clarté»*, ne manque pas de présenter des inconvénients, au moins comme méthode d'enseignement, car *«elle ne montre pas comment on a été conduit à échafauder la construction et en cela ne satisfait pas l'esprit»* [Picard 1902, p. 2–3]. En résumé :

«les modes d'exposition deductifs [...] sont d'abord très séduisants. Ils condensent en quelques postulats que l'on formule au début les résultats auxquels a conduit la succession d'efforts et de tâtonnements des créateurs de la science du mouvement. Ces postulats ont un caractère extrêmement général, et l'on renvoie à l'expérience pour vérifier leurs conséquences plus ou moins lointaines. Il faut toutefois reconnaître qu'à côté d'eux, d'autres modes d'exposition se rapprochant davantage de l'ordre historique seront, sans doute, longtemps encore préférés» [Ibid., p. 10].

Les motifs d'attachement à la tradition une fois exposés, Picard entreprend de rénover l'ancien édifice. Ordre historique oblige, il commence son exposition des principes par le principe de l'inertie. Puis, il modifie la tradition en soutenant, à l'instar de Milhaud, que le principe en question n'est en réalité qu'une définition de la force : *«il résulte de là que si le mouvement d'un point matériel n'est pas rectiligne et uniforme, certaines actions extérieures s'exercent sur lui, et ceci est en quelque sorte une définition. On donne le nom de forces à ces actions »* [Ibid., p. 34].

La force étant introduite, Picard énonce ensuite le principe de l'indépendance de l'effet des forces et du mouvement antérieurement acquis. Fidèle cette fois-ci à la tradition, l'auteur démontre que le mouvement d'un

³⁹ Picard présente et commente rapidement les mécaniques déductives de Boltzmann et Hertz dans [1902, p. 2–10], les références à Mach, Bouasse et Andrade se trouvant dans [Picard 1900, p. 3]. Enfin, il a écrit l'introduction de la traduction française du livre de Mach [1883/1904, p. v–ix].

point matériel dans un champ de forces constantes est un mouvement dont l'accélération est constante. Mais là où la mécanique classique regardait la constance, pour un point matériel, du rapport de la force à l'accélération comme un théorème, Picard y voit une définition de la mesure de la force : «*nous prendrons comme mesure des forces agissant sur le point déterminé A dans chacun de ces champs des quantités proportionnelles aux accélérations*» [*Ibid.*, p. 34].

Or, transformer en définition ce qui était censé découler de l'expérience n'est pas une opération qui peut se prolonger indéfiniment, à moins qu'on n'assume explicitement la réduction de la mécanique à un savoir mathématique. Après avoir présenté le principe de l'inertie et la proportionnalité des forces aux accélérations comme des actes de définition, Picard fait appel à l'expérience afin de soutenir que les nombres représentant les forces envisagées au point de vue dynamique (proportionnalité aux accélérations) et au point de vue statique (*via* le dynamomètre) sont proportionnels⁴⁰, en explicitant et justifiant à la fois ce qui relevait de l'implicite dans la tradition. Entre-temps, Picard reconnaît que la mesure statique de la force *via* le dynamomètre présuppose la validité du principe de l'action et de la réaction, transformé ainsi en convention. Picard pose ensuite comme fait expérimental «*absolument fondamental*», que dans un même champ l'accélération du mouvement est la même quel que soit le point matériel. Le champ de pesanteur est présenté comme une illustration de ce fait.

L'édifice de la mécanique s'achève sur une définition de la masse qui est également statique : ainsi deux points ont des masses égales s'ils donnent au ressort la même flexion alors qu'une masse sera double si elle donne une déformation correspondant à une action statique double.

⁴⁰ Jean Perrin, physicien expérimentateur, voit dans cette proportionnalité tout ce que la science peut avancer au sujet de la force. Lors d'une discussion avec le colonel Hartmann, auteur d'une mécanique d'inspiration aristotélicienne, il déclare : «*Je proposerais qu' [...] on exclût complètement les expressions de force, de cause, de tendance, pour se borner à la description des phénomènes visibles [...]. La mécanique classique ne consiste pas à dire que la force est la cause de l'accélération; mais par exemple à établir une équation entre la déformation visible que, au repos, en un point déterminé, un corps produit dans un dynamomètre auquel on l'accroche — et, d'autre part, l'accélération que possède ce même corps lorsque, lancé de façon quelconque, il passe au même point*» [Hartmann 1905, p. 143]. Loin d'être conçue sur le mode de la substance, la force est appréhendée sur le mode de la fonction exprimant des relations quantitatives entre groupes de phénomènes.

La proportionnalité expérimentalement posée entre la force statique et la force dynamique permet dès lors de soutenir que les forces agissant sur deux masses inégales sont proportionnelles à ces masses [*Ibid.*, p. 44]. Si à cette dernière proposition on ajoute la définition de la mesure de la force comme proportionnelle aux accélérations, on obtient l'équation fondamentale $F = m \times J$.

Nous avons insisté sur la formulation de la mécanique produite par Picard dans la mesure où celle-ci se présente comme une tentative systématique et pleinement assumée par l'auteur pour actualiser une tradition placée sur la défensive. Son intervention, centrée sur le problème de la formulation des principes, fait la part de ce qui relève de l'expérience et de ce qui appartient au domaine de la définition et de la convention dans l'édifice de la mécanique classique. Pluraliste quant à son épistémologie, prêt à admettre la possibilité de représenter le réel de plusieurs façons, Picard n'en continue pas moins à accorder sa préférence à « l'ordre historique », et à organiser la présentation de la mécanique autour de la notion de force.

Painlevé, Hadamard et Poincaré

Paul Painlevé et Jacques Hadamard, plus nominalistes au sujet de la force, privilégient la masse comme concept premier de la mécanique. Présents dans la discussion sur la formulation des principes, ils n'hésitent pas à fréquenter également les lieux institutionnels animés par les philosophes (congrès, revues, conférences) afin d'interroger la mécanique à travers le prisme de la théorie de la connaissance. Invité en 1904 par la Société française de philosophie, Painlevé livre ses vues sur la mécanique devant un public qui, outre les « habitués », comprend Hadamard⁴¹. Proche de Mach et de Calinon, qu'il ne cite pas, dans la mesure où il met au premier plan la notion de masse (la force étant par définition une grandeur dirigée suivant l'accélération du point et égale au produit de la masse du point par cette accélération), Painlevé reste *in fine* attaché à la forme de la mécanique classique. Il en reproduit en effet tous les principes, à cette différence près que la force est remplacée par l'action d'un élément matériel sur un autre. Ainsi, le principe de l'inertie (rebaptisé axiome)

⁴¹ Sont présents à cette séance : MM. Belot, Brunschvicg, Couturat, Dauriac, Delbos, Dunan, Evellin, Hadamard, Hartmann, Jacob, Lachelier, Lalande, Léon, Le Roy, Lévy-Brühl, Pécaut, Rauh, Simiand, Sorel, Weber.

est énoncé de la façon suivante : «*un élément matériel infiniment éloigné de tous les autres décrit une droite avec une vitesse constante*» [Painlevé 1905, p. 40]. Painlevé énonce ensuite le principe de l'action et de la réaction qui lui sert aussi pour définir la masse. L'indépendance des effets de force de la mécanique traditionnelle devient enfin axiome de l'indépendance des effets des éléments matériels.

Hadamard épouse des vues similaires. Après avoir soutenu que la définition usuelle de la masse repose sur un véritable cercle vicieux puisque «*elle introduit la notion de forces égales appliquées à des corps différents, notion qui n'est nullement claire par elle-même et dont on ne se donne aucune définition*» [Hadamard 1897, p. 1807]⁴², il introduit la notion de masse par l'intermédiaire de la loi de l'action et de la réaction.

C'est en réagissant aux positions avancées au sujet des principes de la mécanique par Poincaré lors du Congrès international de philosophie tenu à Paris en 1900, que Painlevé et Hadamard sont amenés à rendre publiques leurs options épistémologiques. Au fait des discussions récentes sur les principes, le premier à présenter devant le public français les mécaniques de Helmholtz et de Hertz⁴³, Poincaré saisit en effet l'occasion du Congrès pour scruter les formulations proposées jusqu'alors des principes de la mécanique. Il interroge les concepts de base, il questionne les principes ; il soutient, multiples exemples à l'appui, que définitions, principes et lois sont à tel point intriqués que tout devient circulaire et soustrait au verdict de l'expérience. La loi de l'accélération ? Elle est simplement la définition de la force. La définition de la force donnée par Andrade ? Elle présuppose la validité de la loi de l'action et de la réaction. La loi de l'inertie ? Il n'y a pas de systèmes isolés. Le principe de la conservation de l'énergie ? Compte tenu de l'existence de plusieurs sortes d'énergie, celui-ci ne peut être ni vérifié ni infirmé puisqu'il se réduit au fond à ceci : il y a quelque chose qui demeure constant⁴⁴. Suggérés par l'expérience, les principes de

⁴² Pour une critique similaire, voir aussi Vaschy [1895].

⁴³ Voir Poincaré [1897]. En 1900, Picard regrette que le système de Hertz ne soit pas «*assez connu en France malgré le bel article que lui a consacré Poincaré*» [Picard 1900, p. 3].

⁴⁴ Notons ici que Poincaré, aussi radical qu'il soit dans sa lecture critique des principes de la mécanique, n'en semble pas moins être resté attaché à une conception «*substantialiste*» des concepts — *i.e.* le concept désigne une entité qui existe dans le monde. En témoigne l'idée qu'il se fait de l'énergie en tant que «*quelque chose qui*

la mécanique se sont transformés en conventions que l'expérience ne peut pas renverser [Poincaré 1900]⁴⁵.

Face à ces conclusions trop pessimistes à leur goût, Painlevé et Hadamard, également présents au Congrès, expriment leur malaise. Contre les déclarations de Poincaré sur l'impossibilité de vérifier (ou de réfuter) les principes de la mécanique, Hadamard fait appel à Duhem : «*D'ailleurs, conformément à une remarque de Duhem, ce n'est pas une hypothèse déterminée, mais l'ensemble des hypothèses de la mécanique que l'on peut essayer de vérifier expérimentalement*» [Congrès 1900, p. 559]. Painlevé répond aussi «*à chaud*» à l'exposé de Poincaré. Le bien-fondé des principes de la mécanique sera défendu au nom de la simplicité et de la convergence. Simplicité : «*il suffit de remplacer un seul des principes par un principe différent pour être submergé par des complications innombrables dans l'étude des faits les plus simples*». Convergence : la science physique est conçue par Painlevé «*comme une méthode d'approximations successives, orientée au début par l'empirisme et guidée par quelques principes généraux d'origine expérimentale. La convergence de cette méthode n'est pas garantie a priori, mais bien justifiée par le succès, par l'accord de plus en plus naturel et parfait des théories avec la réalité*» [Congrès 1900, p. 558].

demeure constant», idée qui transparait également dans la phrase : «*pour matérialiser l'énergie, il faut la localiser*» [Poincaré *L'Analyse*, p. 77].

À l'instar de Perrin, qui épouse des vues similaires au sujet du concept de force (voir note 40), c'est un autre physicien, Bouasse, défenseur d'une conception expérimentale de la mécanique rationnelle, qui propose explicitement une conception «*relationnelle*» de l'énergie. Visant, sans le citer, Poincaré, Bouasse ironise en déclarant que «*c'est une aimable plaisanterie de soutenir que le principe de la conservation de l'énergie se ramène à dire que dans les transformations physiques quelque chose se conserve [...]. L'énergie cinétique et l'énergie potentielle sont expérimentalement interchangeables avec une perte négligeable sans contradiction, voilà tout ce qui nous sert comme mécaniciens*» [1910, p. 291].

⁴⁵ Cette présentation, plus que schématique, des positions de Poincaré ne rend évidemment pas justice à la qualité de ses thèses épistémologiques. Qui plus est, celles-ci semblent évoluer dans le temps d'un conventionnalisme «*radical*» à un conventionnalisme plus tempéré. Poincaré finit par soutenir lors de sa polémique avec Le Roy qu'au-delà des conventions il y a des «*lois invariantes*», à savoir des relations entre des faits bruts (*sense data*, sensations et souvenirs). Sur ses positions et leur évolution, le lecteur peut se reporter aux textes de Poincaré lui-même [1900; 1905/1970, p. 151–187], ainsi qu'aux études de Berthelot [1911, 2^e partie], Vuillemin [1968; 1970] et Giedymin [1982, p. 1–41, 113–118].

Painlevé ne se contente pas de cet échange oral avec Poincaré. Quatre ans plus tard, l'auteur expose de façon autrement plus détaillée, devant un public composé essentiellement de philosophes, l'arrière-plan philosophique de sa conception de la mécanique fondée sur le principe de causalité [Painlevé 1905]. Par un retour à des modes de justification et de raisonnement que l'on peut qualifier de « rationalistes », Painlevé tente d'asseoir une partie de l'édifice de la mécanique sur la productivité *a priori* de l'esprit humain. Le principe de causalité, selon lequel le temps et l'espace ne sont pas des causes efficientes⁴⁶, couplé avec l'argument de la symétrie⁴⁷ et avec l'axiome de la «*non-influence sur un corps des autres corps infiniment éloignés*», conduit Painlevé à énoncer que le mouvement d'un élément isolé (c'est-à-dire infiniment éloigné de tous les autres) est rectiligne [1905, p. 31–35]. L'expérience ajoute au mouvement « l'attribut » de l'uniformité et on obtient ainsi le principe de l'inertie tel qu'on le connaît. L'expérience toujours, impose, selon Painlevé, les deux autres principes de l'action et de la réaction et de l'indépendance des effets des éléments matériels.

Il en résulte un partage des principes de la mécanique en deux classes. La première classe comporte des principes «*auxquels on ne peut toucher, sans renverser du même coup le principe de causalité tel qu'on l'énonce à la base de toute science*» [Ibid., p. 47]. Il en est ainsi du principe en vertu duquel le mouvement d'un élément isolé est rectiligne. Les principes de la deuxième classe peuvent en revanche être modifiés par l'expérience «*quand le champ de ses investigations s'étendra, sans que notre conception de la causalité soit bouleversée*». Les évolutions récentes de la physique, cristallisées dans la théorie de l'électron, ne font que confirmer, selon

⁴⁶ «*Si à deux instants les mêmes conditions sont réalisées, transportées seulement dans l'espace et le temps, les mêmes phénomènes se reproduiront, transportés seulement dans l'espace et le temps*» [Painlevé 1905, p. 31]. Nous ne pouvons pas reproduire ici la façon dont Painlevé applique à l'étude du mouvement le principe de causalité. Notons que ses conclusions ne sont pas une conséquence logique de ce principe. Le principe de causalité et l'argument de la symétrie sont en réalité appliqués à des prémisses que l'on suppose tirées de l'expérience (ici le fait que les conditions initiales déterminant l'état ultérieur du système sont la position et la vitesse de chaque élément, et celui de la non-influence sur un corps des autres corps infiniment éloignés).

⁴⁷ «*Au principe de causalité se rattache un corollaire qu'on peut appeler le corollaire de la symétrie et qui s'énonce ainsi : "La symétrie des causes subsiste dans les effets"*» [Painlevé 1909, p. 372].

Painlevé, le bien-fondé de ce clivage puisque c'est un principe de la deuxième classe, celui de l'action et de la réaction qui vient d'en souffrir.

En posant une construction de l'édifice de la mécanique par étages clairement séparés, la contribution de l'expérience venant remplir un cadre fixé *a priori* par l'esprit humain, Painlevé s'inscrit en faux contre l'image de la science qui émerge pendant cette période. Image d'après laquelle, rappelons-le, «*toute théorie mettant en présence un certain nombre de concepts, d'hypothèses, de faits expérimentaux et de raisonnements forme un amalgame dont les parties peuvent se laisser difficilement disjoindre*» [Picard 1909, p. 18]. La discussion qui suit l'exposé de Painlevé montre la fragilité de ses positions ainsi que les implications en matière de vérification qui accompagnent cette nouvelle conception de la science.

La controverse Painlevé–Le Roy

E. Le Roy, le principal contradicteur de Painlevé dans cette discussion⁴⁸, contestera vivement la légitimité même du partage proposé des principes de la mécanique en deux groupes. Le Roy met en avant l'imbrication inextricable des différentes parties de la mécanique, ce qui ne va pas sans affecter profondément les possibilités de vérification :

«*Est-il évident a priori que les causes géométriquement lointaines n'ont aucune influence mécanique ? Qu'est-ce que «lointain» ? À partir de quelle distance le principe [de l'inertie] commence-t-il à être suffisamment vérifié ? [...] C'est plutôt quand les phénomènes obéissent aux lois de la Mécanique supposées dûment établies que nous pouvons conclure à la non-influence de certaines causes, à savoir de celles dont nous n'avons pas eu besoin de tenir compte*» [Le Roy 1905, p. 60].

Impossible donc de fonder le principe de l'inertie sur la vérité *a priori* selon laquelle, dans l'étude du mouvement d'un élément matériel, on peut négliger les éléments très éloignés. Peut-on, pour autant, justifier

⁴⁸ Édouard Le Roy (1870–1954), admis en 1890 à l'École polytechnique, préfère préparer le concours d'entrée à l'École normale supérieure qu'il réussit en 1892. En 1898, il soutient sa thèse de mathématiques sur l'intégration des équations de la chaleur. Poincaré, rapporteur, écrit : «*L'ensemble de cette thèse me paraît constituer un travail fort remarquable, où l'auteur a montré de grandes qualités de justesse d'esprit, de sagacité et d'invention mathématique*» [Gispert 1991, p. 374]. Sur les positions épistémologiques de Le Roy et leurs rapports avec celles de Duhem et de Poincaré, voir Poincaré [1905/1970, p. 151–187], Duhem [1906/1981, p. 316–329], Giedymin [1982, p. 109–148].

le principe en évoquant des observations? Le Roy dissèque ensuite la démonstration empirique du principe de l'inertie avancée par Painlevé qu'il résume de la façon suivante :

«*M. Painlevé ne retient qu'un argument pour établir notre principe. On peut constater, dit-il, que l'accélération de chaque planète est dirigée vers le soleil et inversement proportionnelle au carré de la distance qui sépare les deux astres. Imaginons alors que cette distance croisse au delà de toute limite : nous voyons l'accélération tendre vers zéro, c'est-à-dire le mouvement devenir rectiligne et uniforme, à mesure que le mobile est mieux isolé et par la suite plus complètement livré à lui-même*» [Ibid., p. 61].

Le Roy essaie d'explicitier les présupposés qui soutiennent cette « vérification » qui se veut basée sur des observations. D'après notre auteur, Painlevé présuppose en effet *primo* : «*établie préalablement la loi de Newton, dans laquelle une analyse attentive montrerait sans peine que toute la science est plus ou moins impliquée*»; *secundo* : «*une extrapolation poussée jusqu'à l'infini. On raisonne par continuité comme s'il était évident de soi que la loi de Newton subsiste à n'importe quelle distance*» [Ibid., p. 62].

Painlevé dans sa réponse aux commentaires de Le Roy reconnaît que sa démonstration n'échappe pas «*au reproche d'extrapolation téméraire que lui adresse M. Le Roy*». Se déclarant cependant non convaincu, il poursuit :

«*Mais on peut vérifier indirectement [c'est l'auteur qui souligne] le principe d'une façon beaucoup plus satisfaisante [...] : on peut écrire les axiomes de la Mécanique dans un ordre et sous une forme tels que l'axiome de l'inertie soit le dernier et que chacun des axiomes précédents soit vérifiable directement par des expériences terrestres. Il est dès lors facile de déduire du corps des axiomes [c'est l'auteur qui souligne] des conséquences que l'expérience vérifie et qui confirme l'axiome de l'inertie, le seul qui reste en discussion*» [Painlevé 1905, p. 66–67].

Painlevé s'arrête là. On ne saura pas quelles sont ces expériences qui vérifient directement les autres axiomes de la mécanique.

CONCLUSION

Science bien assise dans ses résultats empiriques, la mécanique rationnelle, revisitée avec une fréquence qui s'intensifie au tournant du siècle, devient la terre d'expérimentation de nouvelles conceptions, plus réflexives, du savoir scientifique. Interrogations sur des concepts élémentaires tels que le temps et la force, longtemps considérés comme antérieurs au développement de la mécanique proprement dite, prise de conscience des liens d'interdépendance et des définitions mutuelles qui unissent les différentes parties de la théorie (concepts de base, systèmes de référence, principes), suggèrent l'image d'une connaissance scientifique plutôt inédite. Loin d'être une lecture passive du donné d'observation, copie univoque du réel, édifice procédant par étapes bien identifiées et passant séparément devant le tribunal de l'expérience, la mécanique se présente désormais comme une entreprise intellectuelle qui rencontre l'expérience « en bloc », et qui met en jeu des choix, des décisions permettant à l'esprit créateur du savant de rendre compte du réel de plusieurs façons. On reconnaît sans peine, dans ce qui vient d'être dit, des éléments du holisme de Duhem ou du conventionnalisme de Poincaré. En analysant des contributions largement oubliées aujourd'hui, nous avons essayé de placer les manifestations les plus connues de la réflexion épistémologique française de l'époque dans un milieu et une histoire.

Suggérons enfin quelques questions que des recherches ultérieures devraient traiter. En premier lieu, celle de la spécificité française : les différences de style entre des mécaniques déductives en provenance d'Allemagne et les mécaniques françaises, plus ou moins fidèles à la formulation classique (galiléo-newtonienne), attentives à l'ordre historique, ne peuvent pas être élucidées sans des études approfondies sur les conceptions que l'on se fait des mathématiques et de la physique dans les deux pays pendant cette période⁴⁹. De même, le positionnement des différents acteurs (philosophes, mathématiciens, physiciens) à l'intérieur du débat français reste à étudier. Nous avons eu l'occasion de remarquer, par exemple, que J. Perrin et H. Bouasse, adeptes d'une approche expérimentale de la mécanique, récusaient une conception substantialiste des concepts, alors que d'autres mécaniciens restaient attachés à une conception réaliste,

⁴⁹ Voir notamment les travaux de M. Atten [1992; 1994].

s'appuyant sur l'évidence préthéorique de la notion de force (sensation de l'effort musculaire). Il est nécessaire de développer des analyses à l'échelle d'un milieu (philosophique, scientifique), sur des populations composées d'acteurs « mineurs », pour reconstituer la matrice intellectuelle et institutionnelle dans laquelle a évolué la discussion⁵⁰.

BIBLIOGRAPHIE

- ALEMBERT (J. d')
 [1743] *Traité de dynamique*, Paris, 1743; 2^e éd., 1758.
- AMPÈRE (A.-M.)
 [1834] *Essai sur la philosophie des sciences*, Paris, 1834.
- ANDRADE (J.)
 [1898a] *Leçons de mécanique physique*, Paris, 1898.
 [1898b] Les idées directrices de la mécanique, *Revue philosophique de la France et de l'étranger*, 46 (1898), p. 399-419.
- APPELL (P.)
 [1893] *Traité de mécanique rationnelle*, t. 1, Paris, 1893.
 [1902] *Traité de mécanique rationnelle*, t. 1, 2^e éd., Paris : Gauthier-Villars, 1902.
- ATTEN (M.)
 [1992] *Théories électriques en France, 1870-1900. La contribution des mathématiciens, des physiciens et des ingénieurs à la construction de la théorie de Maxwell*, Paris : thèse de doctorat de l'EHESS, 1992.
 [1994] La physique en souffrance, 1850-1914, dans [Belhoste et al. 1994, p. 217-243].
- BAILHACHE (P.)
 [1975] Introduction, dans Louis Poinsoot : *La Théorie générale de l'équilibre et du mouvement des systèmes*, Paris : Vrin, 1975.
- BARBOUR (J. B.)
 [1989] *Absolute or relative motion*, vol. 1 : «The discovery of dynamics», Cambridge : Cambridge University Press, 1989.
- BARRÉ DE SAINT-VENANT (A.)
 [1851] *Principes de mécanique fondés sur la cinématique*, Paris, 1851.
 [1878] De la constitution des atomes, *Annales de la Société scientifique de Bruxelles*, 2 (1878), p. 417-456.
- BÉLANGER (J.-B.)
 [1847] *Cours de mécanique, ou Résumé de leçons sur la dynamique, la statique et leurs applications à l'art de l'ingénieur*, Paris, 1847.
 [1864a] *Traité de cinématique*, Paris, 1864.
 [1864b] *Traité de la dynamique d'un point matériel*, Paris, 1864.
 [1866] *Traité de la dynamique des systèmes matériels*, Paris, 1866.
- BELHOSTE (B.), DAHAN DALMEDICO (A.) et PICON (A.) (éd.)
 [1994] *La Formation polytechnicienne, 1794-1994*, Paris : Dunod, 1994.
- BERTHELOT (R.)
 [1911] *Un romantisme utilitaire. Étude sur le mouvement pragmatiste : le pragmatisme chez Nietzsche et chez Poincaré*, Paris : F. Alcan, 1911.

⁵⁰ Pour une mise en œuvre de cette démarche dans l'étude de l'analyse au XIX^e siècle en France, voir [Gispert 1991 ; 1994].

BLONDLOT (R.)

- [1896] *Notions de mécanique à l'usage des élèves de physique*, Nancy, 1896 (autographié).
- [1900] Exposé des principes de la mécanique, *Bibliothèque du Congrès international de philosophie*, 1900, t. III : « Logique et histoire des sciences », Paris : A. Colin, 1901, p. 445–455.

BOLTZMANN (L.)

- [1899] Über die Grundprinzipien und Grundgleichungen der Mechanik, (conférence à Clark University en 1899), dans *Populäre Schriften*, Leipzig : Barth, 1905, p. 253–270. Trad. angl., On the fundamental principles and basic equations of mechanics, dans [Kockelmans 1968, p. 246–260].

BOUASSE (H.)

- [1895] *Introduction à l'étude des théories de la mécanique*, Paris, 1895.
- [1910] *Cours de mécanique rationnelle et expérimentale*, Paris : Delagrave, 1910.

BOUASSE (H.), DELBET (P.), DURKHEIM (E.) *et al.*

- [1909] *De la méthode dans les sciences*, Paris : F. Alcan, 1909.

BOUSSINESQ (J.)

- [1872] *Recherches sur les principes de la mécanique, sur la constitution moléculaire des corps et sur une nouvelle théorie des gaz parfaits*, (mémoire présenté à l'Académie des sciences et lettres de Montpellier, le 8 juillet 1872), Montpellier, 1873.
- [1889] *Leçons synthétiques de mécanique générale*, Paris, 1889.

BOUSSINESQ (J.) et FLAMANT (A.)

- [1886] Notice sur la vie et les travaux de M. de Saint-Venant, *Annales des ponts et chaussées*, (VI) 12 (1886), p. 557–595.

BOUTROUX (E.)

- [1908] La philosophie en France depuis 1867, *Revue de métaphysique et de morale*, 16 (1908), p. 683–716; réimp. dans S. Douailler, R.-P. Droit et P. Vermeren (éd.) : *Philosophie, France, XIX^e siècle. Écrits et opuscules*, Paris : Librairie générale française, 1994.

CALINON (A.)

- [1885] *Etude critique sur la mécanique*, Nancy, 1885.

CARNOT (L.)

- [1783] *Essai sur les machines en général*, Dijon, 1783.

CASSIRER (E.)

- [1910] *Substanzbegriff und Funktionsbegriff*, Berlin, 1910. Trad. fr., *Substance et fonction. Éléments pour une théorie du concept*, Paris : Minuit, 1977.

CHATZIS (K.)

- [1994] Mécanique rationnelle et mécanique des machines, dans [Belhoste *et al.* 1994, p. 95–108].

CHWOLSON (O. D.)

- [1908] *Traité de Physique*, t. 1, Paris : Hermann, 1908.

CLEBSCH (R.)

- [1862] *Theorie der Elastizität fester Körper*, Leipzig, 1862. Trad. fr. par Barré de Saint-Venant et Flamant, *Théorie de l'élasticité des corps solides*, Paris, 1883.

COHEN (R.S.)

- [1956] Hertz's philosophy of science : an introductory essay, dans [Hertz 1894/1956].

- COMBEDIAC (G.)
 [1902] Les idées de Hertz sur la mécanique, *L'Enseignement mathématique*, 4 (1902), p. 247–271.
- COMTE (A.)
 [1830] *Cours de philosophie positive*, t. 1 : «Les préliminaires généraux et la philosophie mathématique», Paris, 1830.
- CONGRÈS INTERNATIONAL DE PHILOSOPHIE, 1900
 [Congrès 1900] Comptes rendus du congrès, *Rev. métaph. morale*, 8 (1900), p. 503–699.
- COSSERAT (E. et F.)
 [1908] Note sur la dynamique du point et du corps invariable, dans [Chwolson 1908], p. 236–273].
- COSTABEL (P.)
 [1974] Milhaud Gaston, dans *Dictionary of Scientific Biography*, vol. IX, New York : Charles Scribner's Sons, 1974, p. 382–383.
- COUTURAT (L.)
 [1896] Études sur l'espace et le temps de MM. Lechalas, Poincaré, Delbœuf, Bergson, L. Weber, Evellin, *Rev. métaph. morale*, 4 (1896), p. 646–669.
- DELBŒUF (J.)
 [1865] *Essai de logique scientifique. Prolégomènes suivis d'une étude sur la question du mouvement considérée dans ses rapports avec le principe de contradiction*, Liège, 1865.
 [1897] Notes sur la mécanique, *Rev. métaph. morale*, 5 (1897), p. 257–284.
- DHOMBRES (J.) et RADELET-DE GRAVE (P.)
 [1991] Contingence et nécessité en mécanique. Étude de deux textes inédits de Jean d'Alembert, *Physis. Rivista internazionale di storia della scienza*, 28 (1991), p. 35–114.
- DUGAS (R.)
 [1950] *Histoire de la mécanique*, Neuchâtel : Le Griffon, 1950.
 [1959] *La Théorie physique au sens de Boltzmann et ses prolongements modernes*, Neuchâtel : Le Griffon, 1959.
- DUHEM (P.)
 [1903a] *L'Évolution de la mécanique*, Paris : Joannin, 1903; rééd., Paris : Vrin, 1992.
 [1903b] Analyse de l'ouvrage de Ernst Mach : «La mécanique. Étude historique et critique de son développement», *Bulletin des sciences mathématiques*, (II) 27 (1903), p. 261–283; réimp. dans [Duhem 1903a/1992, p. 443–462].
 [1906] *La Théorie physique, son objet et sa structure*, Paris : Chevalier et Rivière, 1906; rééd., Paris : Vrin, 1981.
 [1909] *Le Mouvement absolu et le mouvement relatif*, Montligeon : Imprimerie-librairie de Montligeon, 1909.
- FLAMANT (A.)
 [1888] *Mécanique générale*, Paris, 1888; 2^e éd., Paris et Liège : C. Béranger, 1911.
- ENCYCLOPÉDIE DES SCIENCES MATHÉMATIQUES
 [ESM 1915] Principes de la mécanique rationnelle, article de E. et F. Cosserat dans *Encyclopédie des sciences mathématiques pures et appliquées*, t. IV, vol. 1, Paris : Gauthier-Villars et Leipzig : Teubner, 1915 p. 1–187; d'après l'article de A. Voss (1901) dans *Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften*, IV. 1., Leipzig : Teubner, 1901–1908, p. 3–121.
- FREYCINET (C. de)
 [1902] *Sur les principes de la mécanique rationnelle*, Paris : Gauthier-Villars, 1902.

- GIEDYMIN (J.)
 [1982] *Science and convention*, Oxford : Pergamon Press, 1982.
- GISPERT (H.)
 [1991] *La France mathématique. La Société mathématique de France (1870–1914)*, (Cahiers d'histoire et de philosophie des sciences, n° 34), Paris : SFHST et SMF, 1991.
 [1994] Un exemple d'approche sociologique en histoire des mathématiques : l'analyse au XIX^e siècle, dans R. Boudon et M. Clavelin (éd.) : *Le Relativisme est-il résistible ?*, Paris : PUF, 1994, p. 211–220.
- HADAMARD (J.)
 [Œuvres] *Œuvres de Jacques Hadamard*, 4 vol., Paris : CNRS, 1968.
 [1897] Sur les principes fondamentaux de la mécanique, *Procès-verbaux des séances de la Société des sciences physiques et naturelles de Bordeaux*, 18 mars 1897; *Œuvres IV*, p. 1807–1809.
- HARTMANN (L.)
 [1905] Matière et mouvement : bases d'une mécanique objective opposée à la mécanique classique, *Bulletin de la Société française de philosophie*, 5 (1905), p. 103–149.
- HERTZ (H.)
 [1894] *Die Prinzipien der Mechanik, in neuem Zusammenhange dargestellt*, Leipzig, 1894. Trad. angl., *The principles of mechanics, presented in a new form*, London, 1899; rééd. New York : Dover, 1956.
- HUYGENS (C.)
 [1690] *Traité de la lumière*, Leyde, 1690; rééd. avec introd. de M. Blay, Paris : Dunod, 1992.
- JOUGUET (E.)
 [1909] *Lectures de mécanique : la mécanique enseignée par les auteurs originaux*, t. II : «L'organisation de la mécanique», Paris : Gauthier-Villars, 1909; rééd., 1924.
- JUNGNICKEL (C.) et MCCORMMACH (R.)
 [1986] *Intellectual mastery of nature*, vol. II : «The now mighty theoretical physics, 1870–1925 », Chicago and London : The University of Chicago Press, 1986.
- KOCKELMANS (J.J.) (éd.)
 [1968] *Philosophy of science*, New-York : The Free Press, 1968.
- LALANDE (A.)
 [1902] Sur l'apparence objective de l'espace visuel, *Rev. phil. Fr.*, 53 (1902), p. 489–500.
 [1903] Sur l'apparence objective des perceptions visuelles, *Bull. Soc. fr. phil.*, 3 (1903), p. 57–93.
- LAUDAN (L.)
 [1981] *Science and hypothesis*, Dordrecht : D. Reidel, 1981.
- LÉAUTÉ (H.)
 [1898] *Cours de mécanique de l'École polytechnique, 1897–1898*, Paris, 1898 (lithographié).
- LECHALAS (G.)
 [1896] *Étude sur l'espace et le temps*, Paris : F. Alcan, 1896.
- LE ROY (E.)
 [1899] Science et philosophie, *Rev. métaph. morale*, 7 (1899), p. 375–425, 503–562, 706–731.
 [1900a] Science et philosophie, *Ibid.*, 8 (1900) p. 37–72.

- [1900b] La science positive et les philosophies de la liberté, *Bibliothèque du Congrès international de philosophie, 1900*, t. I : « Philosophie générale et métaphysique », Paris : A. Colin, 1900, p. 313–341.
- [1901] Un positivisme nouveau, *Rev. métaph. morale*, 9 (1901) p. 138–153.
- [1905] Interventions, dans [Painlevé 1905, p. 50–64, 67–70].
- MACH (E.)
- [1883] *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch und kritisch dargestellt*, Leipzig, 1883. Trad. fr. d'après la 4^e éd. all., *La Mécanique, exposé historique et critique de son développement*, Paris : Hermann, 1904.
- MEYERSON (E.)
- [1908] *Identité et réalité*, Paris : F. Alcan, 1908 ; 5^e éd., Paris : Vrin, 1951.
- MILHAUD (G.)
- [1894] *Essai sur les conditions et les limites de la certitude logique*, Paris : F. Alcan, 1894.
- [1896] La science rationnelle, *Rev. métaph. morale*, 4 (1896), p. 280–302.
- NEUMANN (C.)
- [1870] *Über die Prinzipien der Galilei–Newtonschen Theorie*, Leipzig, 1870.
- PAINLEVÉ (P.)
- [1905] Les axiomes de la mécanique et le principe de causalité, *Bull. Soc. fr. phil.*, 5 (1905), p. 27–72.
- [1909] Mécanique, dans [Bouasse *et al.* 1909, p. 363–409].
- PICARD (E.)
- [1900] Une première leçon de dynamique, *Enseign. math.*, 2 (1900), p. 3–13.
- [1902] *Quelques réflexions sur la mécanique, suivies d'une première leçon de dynamique*, Paris : Gauthier-Villars, 1902.
- [1904] Introduction, dans [Mach 1883/1904, p. v–ix].
- [1909] De la science, dans [Bouasse *et al.* 1909, p. 1–30].
- POINCARÉ (H.)
- [1897] Les idées de Hertz sur la mécanique, *Revue générale des sciences pures et appliquées*, 8 (1897), p. 734–743 ; rééd. dans [L'Analyse, p. 62–86].
- [1898] La mesure du temps, *Rev. métaph. morale*, 6 (1898), p. 1–13 ; rééd. dans [Poincaré 1905/1970, p. 41–54].
- [1900] Sur les principes de la mécanique, *Bibliothèque du Congrès international de philosophie, 1900*, t. III : « Logique et histoire des sciences », Paris : A. Colin, 1901, p. 457–494.
- [1902] *La Science et l'hypothèse*, Paris : Flammarion, 1902 ; rééd. 1968.
- [1905] *La Valeur de la science*, Paris : Flammarion, 1905 ; rééd. 1970.
- [L'Analyse] *L'Analyse et la recherche*, Paris : Hermann, 1991 [recueil d'articles].
- RAUH (F.)
- [1895] “Introduction à l'étude des théories de la mécanique”, par H. Bouasse, *Rev. métaph. morale*, 3 (1895), p. 480–493.
- REECH (F.)
- [1852] *Cours de mécanique d'après la nature généralement flexible et élastique des corps*, Paris, 1852.
- REULEAUX (F.)
- [1875] *Theoretische Kinematik : Grundzüge einer Theorie des Maschinenwesens*, Braunschweig, 1875. Trad. fr., *Cinématique. Principes fondamentaux d'une théorie générale des machines*, Paris, 1877.

VASCHY (A.)

- [1895] Sur la définition des masses et des forces, *Nouvelles annales de mathématiques*, (III) 14 (1895), p. 5–10.

VICAIRE (E.)

- [1897] Observations sur le traité de mécanique de G. Kirchhoff, *Bulletin de la Société philomatique de Paris*, (VIII) 9 (1896–1897), p. 25–53.

VUILLEMIN (J.)

- [1968] Préface, dans [Poincaré 1902/1968, p. 7–19].

- [1970] Préface, dans [Poincaré 1905/1970, p. 7–15].

WICKERSHEIMER (E.)

- [1905] *Les Principes de la mécanique*, Paris : Dunod, 1905.

WILBOIS (J.)

- [1899] La méthode des sciences positives, *Rev. métaph. morale*, 7 (1899), p. 579–615.