

Université de Montréal

**La connaissance physique non empirique et le principe
de la moindre action**

par

Michaël Massussi

Département de philosophie
Faculté des arts et des sciences

Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de
Maître ès arts (M.A.)
en Philosophie

30 avril 2023

Université de Montréal

Faculté des arts et des sciences

Ce mémoire intitulé

La connaissance physique non empirique et le principe de la moindre action

présenté par

Michaël Massussi

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Christian Leduc

(président-rapporteur)

Molly Kao

(directeur de recherche)

Jonathan Simon

(membre du jury)

Résumé

Il n'est pas évident si et dans quelle mesure la connaissance non empirique peut donner de l'information sur des systèmes physiques réels. Hume croyait que toute connaissance à propos du monde qui nous entoure ne doit sa certitude à rien d'autre que l'expérience répétée de la conjonction des causes et des effets observables. Or, il y a quelques raisons de croire que le rôle de la raison en physique dépasse celui qui lui est attribué par Hume. Le principe de la moindre action est un bon candidat, pour quelques raisons : il a été découvert à partir d'un argument métaphysique, il rivalise avec les lois de Newton au titre de fondement de la mécanique classique, et il a fini par motiver le développement de nombreux formalismes qui lui sont propres jusqu'au sein des théories les plus récentes de la physique. Nous analyserons les idées ayant mené à sa découverte par Pierre-Louis de Maupertuis.

Mots-clés : Philosophie, philosophie des sciences, philosophie de la physique, épistémologie, métaphysique, philosophie moderne

Abstract

It is unclear whether and to what extent non-empirical knowledge can provide information about real physical systems. Hume believed that all knowledge about the world around us owes its certainty to nothing other than the repeated experience of the conjunction of observable causes and effects. However, there are some reasons to believe that the role of reason in physics goes beyond that attributed to it by Hume. The principle of least action is a good candidate for a number of reasons : it was discovered from a metaphysical argument, it rivals Newton's laws as the foundation of classical mechanics, and it eventually motivated the development of several formalisms in a wide variety of the most recent theories of physics. We will analyze the ideas that led to its discovery by Pierre-Louis de Maupertuis.

Keywords : Philosophy, philosophy of science, philosophy of physics, epistemology, metaphysics, modern philosophy

Table des matières

Résumé	iii
Abstract	v
Table des figures	ix
Remerciements	xi
Introduction	1
Chapitre 1. La réfutation de l'empirisme humien	3
Section 1.1. L'empirisme de Hume	3
Section 1.2. La connaissance physique non empirique	7
Section 1.3. Le rôle de la raison	11
Références bibliographiques	19
Chapitre 2. Le principe de la moindre action	21
Section 2.1. Équivalent aux lois de Newton ?	21
Section 2.2. La notion d'action	27
Section 2.3. La source du pouvoir explicatif du principe de la moindre action	37
Références bibliographiques	44

Chapitre 3. Des principes physiques non empiriques ?	45
Section 3.1. La preuve métaphysique du principe de la moindre action	45
Section 3.2. Le virage positiviste et la téléologie	49
Section 3.3. Les différentes formulations de la mécanique classique	54
Références bibliographiques	60
Conclusion	61
Bibliographie complète	63

Table des figures

2.1	L'unification des trois phénomènes de l'optique.....	25
2.2	La réfraction d'un rayon lumineux.....	26
2.3	Le principe de la moindre action.....	32
2.4	Le calcul de l'action de Maupertuis.....	34

Remerciements

Je remercie les professeurs Molly Kao, Christian Leduc et Jonathan Simon pour leur soutien académique, ainsi que le CIRST, la Fondation Desjardins ainsi que la Sun Life Financial pour leur soutien financier.

Introduction

La question concernant la possibilité de la connaissance scientifique non empirique se comprend aisément lorsqu'on la compare avec l'empirisme de Hume. Hume, en effet, croyait que la certitude caractéristique d'une connaissance scientifique ne pouvait être dû qu'à l'expérience répétée des effets qui suivent leurs causes. La connaissance à propos du monde qui nous entoure était d'abord causale, et il considérait qu'il est impossible de déduire un effet à partir de sa cause par la raison. N'en déplaise à Hume, la spéculation a joué un rôle important à plusieurs reprises en physique, même à ce jour. La question qui m'intéresse est de savoir si ce rôle se limite à assister l'expérience, qui elle seule sert à fonder la certitude de la connaissance à propos des systèmes physiques. Ou plutôt si le raisonnement, d'une forme ou d'une autre, peut permettre à *lui seul* de justifier une connaissance physique. Le travail débutera par une analyse de certaines des idées importantes de l'empirisme humien. J'identifierai quelques manières de répondre à son argument central quant à l'impossibilité de la connaissance physique non empirique. Il y a essentiellement deux possibilités : nous pouvons chercher à montrer que la connaissance des causes des phénomènes peut, en fait, s'acquérir par le raisonnement à lui seul. Autrement, nous pouvons chercher à savoir si la connaissance physique peut être non causale (contrairement à ce que Hume semble supposer dans *l'Enquête sur l'entendement humain*).

Le reste du travail vise d'abord à étudier la source de la certitude de certaines connaissances physiques en examinant le cas du principe de la moindre action. Il s'agit d'un principe qui joue un rôle fondamental dans plusieurs théories de physique contemporaine comme la mécanique classique, l'électrodynamique, la théorie des champs classique, la théorie quantique des champs, la relativité générale, et bien d'autres. Il est entre autres possible de déduire, par l'usage du principe de la moindre action, les lois de plusieurs de ces théories. Il est également possible de déduire les lois de Newton à partir du principe de la moindre action. Je voudrai

donc, pour commencer, expliquer quelles sont les différences entre le principe de la moindre action et les lois de Newton en ce qui a trait à leur rôle pour la mécanique classique ainsi qu'en ce qui a trait à leur justification. Je me baserai à cet égard sur les travaux de Pierre-Louis de Maupertuis, qui est à l'origine de l'une des premières formulations du principe de la moindre action.

Nous verrons qu'il lui a donné une justification métaphysique *a priori*. Si cette justification est acceptable, nous pourrions alors soutenir qu'il est possible d'acquérir la connaissance du principe de la moindre action (et par conséquent de la mécanique newtonienne) sans l'expérience. La justification du principe de la moindre action que Maupertuis a donnée n'a cependant pas duré, et un tournant positiviste s'est opéré lors duquel le principe a été relégué à n'être plus qu'une simple conséquence des lois de Newton, elles-mêmes étant considérées comme fondamentales. Nous voudrions alors savoir, dans le dernier chapitre, si l'absence de justification métaphysique *a priori* rend le principe de la moindre action inapte à supporter une réponse à l'empirisme humien, pour soutenir l'hypothèse de la possibilité de la connaissance physique non empirique. Je soutiendrai, en me basant notamment sur les idées de Suzanne Bachelard, qu'une explication non causale des phénomènes de la mécanique peut être attribuée au principe de la moindre action en l'absence d'une justification métaphysique *a priori* de celui-ci. Finalement, à la toute dernière section, j'étudierai brièvement un problème contemporain de la philosophie de la physique qui montre la pertinence de l'analyse de la question concernant la connaissance physique non empirique à travers l'étude de la mécanique classique et du principe de la moindre action. Le principe de la moindre action est à l'origine de deux formulations de la mécanique classique qui sont des formulations alternatives à celle fondée sur les lois de Newton. Ce sont les formulations lagrangiennes et hamiltoniennes de la mécanique classique. Les mêmes lois dynamiques peuvent être dérivées de ces trois formulations, et par conséquent elles sont le même contenu empirique. Par contre, elles ne sont pas équivalentes en tout point. Je présenterai certains critères non empiriques qui ont été avancés pour choisir une formulation de la mécanique classique parmi plusieurs formulations empiriquement équivalentes.

Chapitre 1

La réfutation de l'empirisme humien

Section 1.1. L'empirisme de Hume

Hume consacre les premiers paragraphes de la section IV de *l'Enquête sur l'entendement humain* à la définition du problème sur lequel le reste de son travail se penche. Il regroupe d'abord les objets possibles de l'enquête humaine en deux types : d'une part les relations d'idées, d'autre part les choses de faits. Ces types sont distingués de trois manières. Selon leur nature, selon la manière dont nous pouvons les vérifier, et selon la nature des preuves dont nous disposons pour évaluer leur vérité. Prenons d'abord le premier critère de distinction, soit la nature de l'objet de l'enquête humaine. Hume décrit d'emblée les affirmations qui relèvent de relations d'idées comme « toute affirmation qui est intuitivement ou démonstrativement certaine » (Hume, 2008, p. 95)¹. Il donne l'exemple des affirmations faisant l'objet de la géométrie, de l'algèbre et de l'arithmétique. De l'autre côté, les choses de faits sont des affirmations dont « le contraire [...] reste possible, puisqu'il n'implique jamais de contradiction et que l'esprit le conçoit aussi facilement et aussi distinctement que s'il était entièrement conforme à la réalité » (Hume, 2008, p. 95-6). Il donne l'exemple de l'affirmation selon laquelle le Soleil se lèvera demain matin. Il est possible d'appréhender l'affirmation selon laquelle le Soleil ne se lèvera pas demain matin, même si elle s'avère fausse. En revanche, il est impossible d'appréhender l'affirmation selon laquelle cinq fois trois n'égale pas la moitié de trente. Cette distinction reflète celle entre la nature des deux types d'affirmations.

1. Une bibliographie partielle se trouve à la fin de chaque chapitre.

Hume évoque deux autres distinctions entre les choses de faits et les relations d'idées. Les deux types d'affirmations se distinguent selon la manière dont nous pouvons les vérifier et selon la nature des preuves dont nous disposons pour évaluer leur vérité : comparativement aux relations d'idées, les « choses de fait [...] ne sont pas établies de même manière ; et si grande que soit pour nous l'évidence de leur vérité, cette évidence n'est pas de nature semblable à la précédente » (Hume, 2008, p. 95). Les relations d'idées sont établies par l'opération de la pensée et leur démonstration ne dépend pas de l'état des choses qui existent dans l'univers. Les preuves qui nous permettent d'établir leur vérité ont une certitude permanente. Et qu'en est-il des choses de faits ? Étant donné qu'il est possible d'appréhender la fausseté d'une chose de fait, nous ne pouvons pas dire que celles-ci sont établies par la seule opération de la pensée. La raison ne peut envisager la fausseté d'une affirmation qu'elle a établie. Nous ne pouvons pas non plus dire que la preuve qui nous permet d'établir sa vérité a une certitude permanente, puisque le contraire de la chose de fait est possible. Le projet de Hume vise donc à déterminer la manière dont nous pouvons vérifier une chose de fait ainsi que la nature des preuves dont nous disposons pour évaluer sa vérité : « Il n'est donc pas indigne d'un esprit curieux d'étudier de plus près la nature de cette évidence qui nous assure de la réalité des existences et des faits, quand ils échappent au témoignage actuel des sens ou ne sont point consignés par la mémoire. » (Hume, 2008, p. 97)

Il développe la réponse en deux parties. D'abord, il avance que « tous les raisonnements concernant les choses de fait semblent fondés sur la relation de *cause à effet* » (Hume, 2008, p. 97). Pour appuyer son propos, il demande ce que répondrait une personne à qui l'on demande pourquoi elle croit à un certain fait. Celle-ci nous répondrait avec un autre fait. Lorsque nous raisonnons sur la base de faits, nous supposons « qu'il existe une liaison entre le fait présent et ce qui en est inféré » (Hume, 2008, p. 99). Il doit donc exister une liaison pour donner une certaine certitude au raisonnement concernant les choses de fait. Pour rappel, l'objectif de Hume est de déterminer la manière par laquelle nous pouvons vérifier les affirmations concernant les choses de fait, ainsi que de déterminer la nature des preuves dont nous disposons pour y arriver. Nous venons de voir que la vérité de ces affirmations s'appuie sur la relation de cause à effet, mais pour répondre à la question encore reste-t-il à savoir « comment nous arrivons à la connaissance des causes et des effets » (Hume, 2008, p. 99).

Hume s'emploie dans le reste de la première partie de la quatrième section de *l'Enquête sur l'entendement humain* à montrer que cette connaissance ne peut pas être fondée sur le

raisonnement *a priori*, mais qu'elle provient plutôt de l'expérience. Sa réponse se base sur quelques exemples et sur le raisonnement suivant. Supposons que l'esprit soit placé devant une chose de fait initiale (la cause), et qu'on lui demande de déterminer les choses de fait qui suivront (l'effet), et ce sans faire l'usage de l'expérience. Par exemple, une personne qui n'a jamais fait l'expérience du monde pourrait soudainement se retrouver devant deux boules sur le point d'entrer en collision, et nous pourrions lui demander de déterminer à l'avance l'état des boules après la collision. L'esprit devrait alors imaginer un état de fait qui sera l'effet. Or, la situation qui constitue l'effet est en elle-même totalement distincte de celle qui constitue la cause : « Trouver l'effet dans la cause qui est supposée, l'esprit ne pourra jamais, même par l'examen le plus exact ou par la recherche la plus précise. Car l'effet est entièrement différent de la cause et par conséquent ne peut se découvrir en lui. » (Hume, 2008, p. 103) C'est parce qu'une affirmation à propos d'une chose de fait est telle que sa négation n'implique aucune contradiction pour l'esprit. S'il considère une chose de fait comme étant l'effet de la situation initiale devant laquelle il est placé, il peut tout aussi bien considérer le contraire, du moment qu'il est laissé à ses propres moyens. L'esprit ne peut donc pas découvrir l'effet dans la cause. Peut-être peut-il toutefois découvrir les causes et les effets des phénomènes rétroactivement, c'est-à-dire qu'ayant été témoin des phénomènes passés, il pourrait poser qu'un certain effet suivra d'une situation initiale. Et même s'il s'avère que cet effet suit effectivement la situation initiale, il ne pourrait pas déduire la conjonction de la cause et de l'effet par le simple usage de sa raison, puisqu'il peut aussi bien concevoir la conjonction d'une chose de fait avec n'importe quelle autre chose de fait sans contradiction. L'esprit ne peut donc pas arriver à la connaissance des causes et des effets par le simple exercice de la raison.

Hume laisse place toutefois à un rôle limité pour la raison dans l'acquisition des connaissances à propos des choses de fait. Bien qu'à elle seule elle ne permette ni de découvrir les causes et les effets ni de prouver la vérité d'affirmations concernant les choses de fait, elle nous permet de « réduire à plus de simplicité les principes qui produisent les phénomènes naturels et à ramener la foule des effets particuliers à un petit nombre de causes générales, au moyen de raisonnements tirés de l'analogie, de l'expérience et de l'observation » (Hume, 2008, p. 107). La raison nous assiste donc dans la tâche d'organisation des phénomènes observables. Elle regroupe les phénomènes en les réduisant à quelques causes générales : elle a un rôle unificateur. Mais quelle est la nature de ces causes générales qui permettent de regrouper certains phénomènes ? Pourquoi la raison peut-elle y avoir accès, alors qu'elle ne permet pas, par elle-même la connaissance empirique ? Ces causes générales se trouvent-elles dans le

monde réel, où ne sont-elles que des artefacts du travail de la raison ? Ce n'est pas certain. Hume laisse ouverte la possibilité que des causes fondamentales se trouvent dans la nature. Mais si c'est le cas, elles ne seraient pas accessibles à la raison humaine : « Mais quant aux causes de ces causes générales, en vain tenterions-nous de les découvrir ; aucune des explications particulières à leur sujet ne saura nous satisfaire. » (Hume, 2008, p. 107) Une dualité émerge. D'une part, toute connaissance de chose de fait est acquise par l'expérience et sa vérité ne dépend que de celle-ci. D'autre part, il y a des causes générales – qui sont des choses de fait ? – auxquelles peuvent être réduits les phénomènes particuliers par le travail de la raison. Les causes premières ne peuvent être connues par la raison, mais celle-ci peut tout de même trouver des causes plus générales que les phénomènes particuliers qu'elle rencontre. Ces causes se trouvent-elles dans le monde extérieur ? Sont-elles des choses de fait ? Sinon, en quoi est-ce qu'il s'agit de causes ?

Quel est donc le rôle de la raison dans l'élaboration de la science ? Plus précisément, dans la découverte et dans la justification des connaissances quant aux choses de fait ? Il permet de réduire les phénomènes à quelques principes généraux. Les lois de la mécanique, par exemple, constituent quelques-uns de ces principes généraux. Bien que nous n'ayons pas accès aux causes ultimes, nous avons néanmoins accès à certains principes plus généraux que les phénomènes. Mais comment ? Est-ce l'expérience qui nous permet de découvrir ces causes plus générales, ou est-ce plutôt l'organisation des phénomènes ? Pourrions-nous dire que l'expérience nous donne les phénomènes particuliers, mais que c'est la raison qui nous permet de découvrir ces principes généraux, et qui par le raisonnement mathématique leur fournit une justification ? Toute connaissance à propos des choses de fait provient et est justifiée par l'expérience à elle seule. Les principes généraux comme les lois de la mécanique sont-ils des choses de fait, ou des relations d'idées ? Si la raison nous permet d'organiser les phénomènes et de les ramener aux principes généraux, il reste que les principes généraux sont acquis par l'expérience. La gravité est découverte par l'observation répétée de ses effets, et puis ensuite, lorsque nous découvrons des phénomènes plus complexes comme le mouvement des planètes, la raison nous permettrait de les réduire à l'opération de la gravité :

L'élasticité, la gravité, la cohésion des parties, la communication du mouvement par impulsion, voilà probablement les causes et les principes derniers que nous découvrirons jamais dans la nature ; et nous pouvons nous estimer assez heureux si, grâce à l'exactitude de nos recherches et de nos raisonnements, nous réussissons à ramener les phénomènes particuliers à ces principes généraux ou à les en approcher. (Hume, 2008, p. 107)

Ainsi le raisonnement ne permet pas de découvrir les causes plus générales sous lesquelles les phénomènes particuliers sont regroupés. Celles-ci sont des choses de fait. Les lois du mouvement décrivent le comportement d'objets réels sous diverses conditions. Or, n'importe quelle chose de fait est cohérente avec n'importe quelle autre si l'on se fie au raisonnement strictement *a priori*. Dans cette situation, comment la raison pourrait-elle imposer, par elle-même, des conditions aux objets réels ? Les lois de la nature sont découvertes par l'expérience, et la raison ne peut que nous assister dans ce travail. Bien que l'imagination « se plaît à tout ce qui est lointain et extraordinaire » (Hume, 2008, p. 407), la recherche de la connaissance se doit plutôt de s'en tenir « aux réflexions de la vie commune, rendues méthodiques et corrigées » (Hume, 2008, p. 407).

Section 1.2. La connaissance physique non empirique

Ce travail vise à évaluer si une forme ou une autre de raisonnement peut permettre, par elle-même, d'acquérir une connaissance physique. Pour le moment, je propose de comprendre une connaissance physique comme une connaissance qui porte directement sur le monde qui nous entoure. Vers la fin du mémoire, nous serons amenés à explorer cette notion de connaissance physique dans un cadre littéraire contemporain. *L'Enquête sur l'entendement humain* permet d'aborder dans un contexte historique la question concernant la possibilité de la connaissance physique non empirique : pour Hume, il y a deux catégories de *connaissances*, soit les choses de faits et les relations d'idées, et deux *moyens* dont nous disposons pour établir la vérité de ces connaissances, soit l'expérience et le raisonnement. La connaissance d'une chose de fait dépend strictement de l'expérience, et la connaissance d'une relation d'idée dépend strictement du raisonnement. Si une connaissance à propos du monde qui nous entoure correspond nécessairement à la connaissance d'une chose de fait, alors le raisonnement ne pourrait pas à lui seul permettre d'acquérir une connaissance physique, selon Hume.

Mais est-ce qu'une connaissance à propos du monde qui nous entoure correspond nécessairement à la connaissance d'une chose de fait ? Hume définit la relation d'idées comme quelque chose dont la vérité relève directement du raisonnement, et il définit la chose de fait comme quelque chose dont la vérité est indifférente à ce qui peut être conçu par la raison. Par exemple, considérons le théorème de géométrie selon lequel la somme des angles intérieurs d'un triangle est à égale à 180 degrés. L'esprit déduit ce théorème par le raisonnement mathématique, et il lui est impossible de concevoir qu'il ne soit pas vrai. Le théorème correspond donc à une relation d'idées. De l'autre côté, les choses de fait sont ces connaissances qui ne

sont pas des connaissances nécessaires, c'est-à-dire selon la notion de Hume que ce sont des connaissances qui ne sont pas des relations d'idées. Par exemple, considérons l'observation que j'ai faite ce matin et selon laquelle le Soleil s'est levé. Même si j'en ai fait l'observation, mon esprit peut très bien *concevoir* que le Soleil ne se soit pas levé. C'est donc une chose de fait. Si l'on s'en tient à ces notions rudimentaires d'une relation d'idées et d'une chose de fait, on ne peut pas dire d'entrée de jeu qu'une connaissance physique correspond nécessairement à une chose de fait, puisqu'une chose de fait n'est rien d'autre qu'une connaissance qui n'est pas rendue nécessaire par le raisonnement. S'il est clair pour Hume que le raisonnement ne permet pas d'établir la connaissance d'une chose de fait, nous savons néanmoins que le raisonnement permet d'établir une relation d'idées et il n'est pas évident pour l'instant que la connaissance d'une relation d'idées ne puisse pas nous donner de l'information physique. Hume envisage-t-il qu'une connaissance d'une relation d'idée corresponde à une connaissance physique? Est-ce que la connaissance d'une relation d'idées peut à elle seule engendrer une connaissance qui porte directement sur le monde qui nous entoure? D'avancer que le raisonnement ne puisse rien nous apprendre sur ce qui est contingent (sur les choses de fait) ne répond pas définitivement à la question, puisque l'on devrait d'abord expliquer pourquoi le monde devrait être entièrement contingent.

M'inspirant de l'*Enquête*, j'envisage deux manières d'approfondir le rôle de la raison en physique. D'abord, nous pourrions accepter qu'une connaissance physique corresponde nécessairement à la connaissance d'une chose de fait, et remettre en question la division humienne des moyens par lesquelles il est possible de vérifier la vérité des connaissances. Ainsi (1) nous pourrions demander si le raisonnement – qu'il soit mathématique, métaphysique, ou d'une autre forme – en tant que *moyen* dont nous disposons pour justifier et acquérir une connaissance peut à lui seul engendrer la connaissance d'une chose de fait. Par exemple, le raisonnement peut-il par lui-même permettre la découverte d'une loi de la nature? L'objectif du travail n'est pas de mettre en évidence les lacunes des arguments de Hume, ni de répondre à ceux-ci dans une optique rationaliste, mais plutôt de voir ce que certains problèmes de la philosophie de la physique peuvent nous apprendre sur le rôle de la raison dans l'acquisition de connaissances physiques. Autrement, nous pourrions remettre en question l'idée selon laquelle la connaissance physique, que nous caractérisons pour l'instant comme la connaissance à propos du monde qui nous entoure, correspond nécessairement à la connaissance de choses de fait. Ainsi (2) nous pourrions demander si une connaissance physique ne peut pas, du moins parfois, être une connaissance nécessaire. Il y a donc deux manières d'aborder la question qui vise à savoir s'il est possible d'acquérir une connaissance physique sans

l'expérience. Nous pouvons nous concentrer sur les *moyens* dont nous disposons pour établir une connaissance physique, en recherchant des techniques scientifiques non empiriques qui permettent par elles seules l'acquisition de connaissances physiques. Sinon, nous pouvons nous concentrer sur la nature de certaines *connaissances* physiques afin de déterminer si elles peuvent être nécessaires. Ces deux options correspondent aux deux hypothèses de travail ci-dessous.

(H.1) Si une connaissance physique correspond à une chose de fait, alors le raisonnement à lui seul permet d'acquérir la connaissance d'une chose de fait.

(H.2) L'objet d'une connaissance physique peut être autre chose qu'une chose de fait.

La première des voies ci-dessus n'est pas très prometteuse. Une chose de fait, pour Hume, n'est que l'objet d'une connaissance dont l'esprit peut envisager la fausseté. Or, si le raisonnement à lui seul permet d'acquérir une connaissance, c'est que l'esprit ne peut pas envisager la fausseté de l'objet de cette connaissance. Puisqu'en effet, qu'est-ce que le raisonnement si ce n'est l'esprit qui s'exécute à résoudre un problème? Et s'il réussit à démontrer une certaine chose, par lui-même, comment pourrait-il par la suite accepter sa fausseté sans se contredire? Dans la mesure où nous acceptons qu'une connaissance physique corresponde à une chose de fait, le raisonnement à lui seul ne peut donc pas considérer la fausseté d'une connaissance physique. La deuxième voie (H.2) est plus prometteuse dans notre quête d'indices de la possibilité de la connaissance physique non empirique. Voyons d'abord pour quelle raison la pensée humienne ne s'accorde pas avec cette proposition. La connaissance physique pour Hume, c'est d'abord la connaissance des causes des phénomènes. Or, les causes des phénomènes ne peuvent pas être connues par l'esprit à lui seul, pour les raisons que nous avons vues à la première section : l'effet produit par une cause ne se retrouve pas uniquement dans la cause. La cause et l'effet sont des choses qui sont indépendantes. Et finalement, si l'esprit ne peut pas déduire l'effet à partir de sa cause, rien ne l'empêche d'appréhender la fausseté d'une proposition à propos des causes des phénomènes. En d'autres mots, rien n'empêche l'esprit d'appréhender la fausseté d'une connaissance physique. Donc, l'objet de la connaissance physique est une chose de fait. Je constate qu'il y a au moins deux manières de réagir à cet argument : nous pourrions d'abord chercher à montrer que le raisonnement peut, en fait, par lui-même permettre la découverte des causes des phénomènes (pour le moins dans certains cas). Autrement, nous pourrions faire l'argument que la connaissance physique (que nous entendons pour le moment comme la connaissance à propos du monde qui nous

entoure) peut reposer sur autre chose que la connaissance des causes des phénomènes. Ces deux hypothèses seront importantes pour le reste de l'étude. Consignons-les donc ci-dessous.

(H.2.1) Le raisonnement peut, par lui-même, permettre la découverte des causes des phénomènes.

(H.2.2) Une connaissance physique peut reposer sur autre chose que la connaissance des causes des phénomènes.

Tout au long du mémoire, nous verrons en quoi différents problèmes de physique permettent de penser qu'une forme de raisonnement ou une autre puisse, par elle-même, engendrer une connaissance physique. Mais dès maintenant, nous rencontrons deux formes de raisonnement dans l'*Enquête* : le raisonnement métaphysique et le raisonnement mathématique. Comme il est bien connu, la métaphysique pour Hume ne peut en rien apporter la connaissance d'une chose de fait. Et les mathématiques quant à elles se limitent à organiser des phénomènes et à ramener ceux-ci à des lois de la nature qui sont, elles, découvertes par l'expérience. Si les mathématiques jouent un rôle dans l'acquisition des connaissances scientifiques, ce n'est que pour *assister* la découverte des lois :

Toutes les parties des mathématiques mixtes reposent sur la supposition que dans ses opérations la nature a établi certaines lois ; et l'on emploie le raisonnement abstrait soit pour assister l'expérience dans la découverte de ces lois, soit pour déterminer leur influence dans les cas particuliers où cette influence dépend d'un degré précis de distance ou de quantité. [...] Mais la découverte de la loi elle-même n'est due qu'à l'expérience et tous les raisonnements abstraits du monde ne pourront jamais nous faire avancer d'un pas dans sa connaissance. (Hume, 2008, p. 109)

Hume ne croit manifestement pas que le raisonnement mathématique à lui seul ne permette d'acquérir la connaissance d'une loi de la nature, pour les raisons que nous avons vues à la dernière section : rien dans une cause ne permet d'en déduire l'effet. Le raisonnement mathématique peut cependant assister l'expérience dans la découverte de ces lois, mais c'est l'expérience à elle seule qui donne la certitude caractéristique d'une connaissance scientifique. Ce qui établit un lien épistémique entre le phénomène singulier et la loi de la nature pour Hume n'est qu'une question d'habitude liée à l'expérience répétée des phénomènes. Le raisonnement mathématique et le raisonnement métaphysique ne peuvent donc pas, par eux-mêmes, nous apporter une connaissance physique parce que la connaissance physique pour Hume dépend de la connaissance des causes des phénomènes, et celles-ci ne peuvent être découvertes que par l'expérience.

Section 1.3. Le rôle de la raison

Plusieurs penseurs modernes ont formulé des principes physiques généraux de manière spéculative, par exemple en suivant des arguments métaphysiques plutôt qu'en se basant sur la seule expérience. Mais pour répondre à la question posée précédemment, il ne suffit pas de constater que la spéculation joue n'importe quel rôle dans la découverte de connaissances physiques. Pour répondre à la question, il faut déterminer si dans certains cas la spéculation par elle-même permet l'acquisition d'une connaissance physique, avec la certitude qui caractérise la connaissance scientifique. C'est pourquoi la problématique doit être vue en opposition avec les arguments empiristes de Hume que nous avons déjà présenté. Je donnerai d'abord un aperçu en présentant deux positions qui semblent s'opposer à l'empirisme de Hume : la méthode de recherche de Galilée, et la conception des lois de Newton comme étant constitutives *a priori*. Galilée, selon Yourgrau et Mandelstam, *débute* sa recherche des lois de la nature par des présuppositions indépendantes de l'expérience : « [...] *Galileo, like Kepler, commenced his investigations with aprioristic presuppositions, though both insisted that the results of abstract thinking should, as a criterion for their validity, correspond to the findings of empirical research* » (Yourgrau et Mandelstam, 1960, p. 8). Galilée reconnaissait toutefois le besoin de vérifier que les lois issues de tels présupposés métaphysiques correspondent à l'expérience. Il accorde donc un rôle limité pour le raisonnement métaphysique, qui par contre ne peut pas à lui seul justifier la connaissance d'une loi de la nature. Nous pourrions croire que le rôle que Galilée accorde au raisonnement métaphysique dans la découverte des lois de la nature n'est qu'un rôle accessoire, comme ce que Hume envisage pour le raisonnement mathématique. L'imagination, pourrait-on dire, ne fait que proposer des idées qui parfois, par coïncidence, s'avèrent vraies. C'est parce que la certitude d'une connaissance ne dépend pas nécessairement de la manière dont elle est découverte. Une idée qui est suggérée par hasard peut donc n'être connaissance qu'en tant qu'elle est confirmée par l'expérience. Mais pour Galilée, ce n'est pas non plus le cas, puisque le monde est simple, ordonné et possède une régularité géométrique qu'il nous est possible de constater par le raisonnement métaphysique. Nous aurions donc un accès épistémique à la structure du monde, qui fonderait au moins *en partie* la certitude des connaissances scientifiques.

L'idée de Galilée pave le chemin pour comprendre certaines alternatives possibles à l'empirisme de Hume, et nous aide à cerner un aspect important de l'épistémologie de la mécanique classique. Le raisonnement, que l'on parle du raisonnement métaphysique, mathématique, ou autre, joue définitivement un certain rôle dans l'activité scientifique. Mais nous souhaitons

savoir si ce rôle est un rôle épistémique qui permet de fonder la certitude de la connaissance physique, ou s'il ne s'agit plutôt que d'un rôle d'assistant. Pour Hume, il ne s'agit que d'un rôle d'assistant, mais pour Galilée, il y a plus. Le raisonnement métaphysique ne peut certes pas déduire les lois de la nature indépendamment de l'expérience, mais il permet d'établir un lien épistémique entre le phénomène particulier et la loi de la nature :

Thus, after he had approximately verified by observation that a falling body suffered equal increments of velocity in equal times, he thought it unnecessary to have recourse to further and more accurate experiments. Galileo conceived of this law as the most natural and fitting; it required confirmation merely by consulting nature. (Yourgrau et Mandelstam, 1960, p. 8)

La loi de la nature à laquelle on arrive par la spéculation métaphysique ne tire sa certitude, pour Hume, que de sa coïncidence *entière* avec l'expérience. Pour Galilée, il s'agit au contraire de reconnaître un rôle épistémique pour le raisonnement métaphysique dans la justification de la connaissance d'une loi de la nature, sans toutefois laisser libre cours au raisonnement métaphysique. Comme Yourgrau et Mandelstam l'expliquent, si la nature possède une certaine structure qui est accessible au raisonnement métaphysique, alors nul de besoin de vérifier qu'une loi qui est déduite par le raisonnement métaphysique corresponde *entièrement* à l'expérience. Il ne suffit que de *consulter* la nature pour vérifier si la structure qui est identifiée par le raisonnement métaphysique est la bonne dans son ensemble. Le raisonnement métaphysique joue donc un rôle double. Il permet d'abord de découvrir des lois physiques, sans toutefois pouvoir les justifier à lui seul. Il permet également d'établir un lien épistémique entre un phénomène singulier et une loi de la nature tout entière (grâce au postulat selon lequel la nature profite d'une régularité géométrique). L'expérience reste toutefois une composante nécessaire de l'acquisition de la connaissance d'une loi de la nature. Nous pourrions aussi dire qu'elle est une composante suffisante de l'acquisition d'une connaissance physique : bien que Galilée envisage un moyen de découvrir une loi par le raisonnement métaphysique assisté de l'expérience, il est possible que ce ne soit pas l'unique moyen d'en acquérir la connaissance. L'usage du raisonnement métaphysique évite peut-être simplement une vérification expérimentale plus exhaustive. Il reste que si le raisonnement métaphysique justifie bien le lien épistémique entre un phénomène singulier et une loi de la nature, son rôle dépasse celui que Hume lui accorde dans la justification des connaissances physiques (c'est-à-dire aucun).

La position de Galilée illustre une manière d'accorder un rôle pour la spéculation dans la justification d'une connaissance physique, celui d'établir un lien épistémique entre le phénomène singulier et la loi de la nature. Mais pour y arriver, il faut supposer que la nature ait une certaine structure, et que l'esprit ait une manière d'y accéder. Rien de cela n'est évident. Il faudra nettement plus pour convaincre la lectrice de considérer une alternative à l'empirisme de Hume. À cette fin, je me tournerai dans le reste du chapitre vers une étude épistémologique du principe de la moindre action. Pour le moment, il est utile de donner un aperçu d'une deuxième manière, plus contemporaine, de s'opposer à l'empirisme de Hume. Il s'agit de la conception de certaines lois comme constitutives *a priori*. À cet égard, Samaroo (2022) concède que l'expérience ait un rôle à jouer dans l'acquisition d'une connaissance scientifique, mais il envisage que celle-ci ne soit pas suffisante :

Hume's view of the laws of motion singles out an obvious feature, namely that experience has a role to play in their formulation. But there are a number of criticisms one might raise against his view. One might say that we do not know the laws "purely from experience." For example, there are no truly force-free bodies : inertial motion is an ideal state and we have no "impressions." Hence, one could hardly say that the first law derives from mere induction. One might also take issue with Hume's remark that geometry merely "help us" apply the laws. The formulation of the laws presupposes a number of mathematical concepts, notably concepts belonging to Euclidean geometry and the calculus. In this way, one might argue that Hume's division of the objects of reason into relations of ideas and matters of fact is inapt for the analysis of the laws of motion. (Samaroo, 2022, p. 11)

Il y a deux idées laissant croire que l'acquisition d'une connaissance physique n'est pas entièrement due à l'expérience. D'abord, les lois que nous découvrons ne sont pas connues à partir de l'expérience pure. C'est parce que les lois scientifiques expriment des idées qui ne sont pas directement réalisées dans la nature. La première loi de Newton, qui dit qu'un corps en mouvement conserve sa vitesse en l'absence de force extérieure, ne s'observe pas directement dans le monde, puisqu'aucun corps réel n'est libre de toute force extérieure. Quelque chose d'autre est nécessaire pour passer du phénomène singulier à la loi (dont la formulation est idéalisée). Pour Galilée, c'est le raisonnement métaphysique qui permet d'établir une loi dont la formulation idéale exprime la structure selon laquelle les phénomènes sont organisés. Deuxièmement, la division humienne des objets de la connaissance en choses de fait et en relations d'idées serait inapte à l'analyse de la mécanique newtonienne puisque les lois du mouvement, des connaissances physiques, dépendent de concepts mathématiques, des relations d'idées. Mais alors, est-ce que les lois du mouvement sont des choses de fait (puisque ce sont des connaissances physiques), ou plutôt des relations d'idée (puisque leur

formulation dépend de concepts mathématiques) ? Selon ce que Samaroo suggère, la question serait mal posée, et il y aurait des connaissances qui ne tombent dans ni l'une, ni l'autre des catégories. Est-il toujours possible, dans ce cas, de concevoir la connaissance physique comme une connaissance dont la justification est purement empirique ?

Je crois, pour ma part, que le problème qu'il soulève n'est pas le bon. Une chose de fait est une connaissance dont l'esprit peut concevoir la fausseté, et une relation d'idée est une connaissance dont l'esprit ne peut pas concevoir la fausseté. Quelle autre option peut-il y avoir ? Même si leur formulation requiert des concepts mathématiques, les lois du mouvement peuvent toujours être des choses de fait. Il est en effet toujours possible de croire que l'esprit puisse concevoir leur fausseté : une loi de la nature peut s'avérer fausse même si un certain formalisme mathématique est nécessaire à sa formulation. C'est parce que la nécessité d'avoir certains concepts mathématiques pour exprimer une idée ne semble rien à voir avec la vérité ou la fausseté de cette idée. S'il peut être nécessaire d'avoir les concepts de force et de masse pour formuler la deuxième loi de Newton, en quoi ce fait à lui seul peut-il garantir la vérité de la deuxième loi ? Ce que l'argument de Samaroo soulève, c'est que le raisonnement mathématique (plus précisément la géométrie et le calcul) ne sert pas seulement à nous assister dans l'acquisition d'une connaissance scientifique, ou dans l'application des lois, comme Hume le soutient. La formulation des lois *présuppose* plutôt des concepts mathématiques, et le sens du mot *présuppose* est important : les concepts mathématiques précèdent certaines lois parce qu'ils sont nécessaires à leur formulation. Il est sous-entendu que la connaissance d'une loi de la nature dans ce cas nécessite la connaissance des concepts mathématiques nécessaires à sa formulation, et il est difficile de croire que ceux-ci puissent être obtenus par l'expérience, puisque par eux-mêmes, ce sont des concepts abstraits. Il est donc possible d'envisager que d'autres choses que l'expérience soient requises pour faire l'acquisition d'une connaissance physique. Selon ce point de vue, l'expérience est peut-être nécessaire, mais elle n'est pas suffisante pour acquérir une connaissance physique. Ce point suggère de relâcher l'hypothèse (H.2.1). Au lieu de montrer que le raisonnement puisse à lui seul permettre la découverte des causes des phénomènes, nous pouvons envisager d'étudier la possibilité de la connaissance physique non empirique autrement. Il pourrait être suffisant – afin de soutenir une position contredisant l'empirisme humien – de montrer que quelque chose d'autre que l'expérience est nécessaire pour fonder la certitude d'une connaissance physique.

Retraçons alors notre argument au complet : j'ai suggéré plus haut deux manières de réfuter l'argument de Hume concernant la nature purement empirique de la connaissance physique

(ce sont les hypothèses H.1 et H.2). L'hypothèse H.1 suggérait d'accepter qu'une connaissance physique corresponde à une chose de fait, tout en demandant si le raisonnement à lui seul permet d'acquérir la connaissance d'une chose de fait. Nous l'avons rejeté, puisque si le raisonnement pouvait établir à lui seul la connaissance d'une chose de fait, alors l'objet de cette connaissance ne serait plus une chose de fait. C'est pourquoi nous nous sommes tournés vers la deuxième hypothèse, dans notre quête d'indices de la connaissance physique non empirique. L'hypothèse H.2 suggérait que l'objet d'une connaissance physique puisse être autre chose qu'une chose de fait, et j'ai trouvé deux manières d'en explorer la vérité. Nous pourrions soit montrer que le raisonnement peut, par lui-même, permettre la découverte des causes de phénomènes, soit montrer qu'une connaissance physique peut reposer sur autre chose que la connaissance des causes des phénomènes. Ce sont les hypothèses H.2.1 et H.2.2. Mais comme nous l'avons vu chez Galilée et Samaroo, il y a quelques manières d'envisager que l'expérience, contrairement à ce que Hume soutient, ne soit pas suffisante pour fonder la certitude d'une connaissance physique. C'est pourquoi nous pouvons diviser l'hypothèse H.2.1 en des composantes nécessaires et suffisantes :

- (H.3.1) L'expérience n'est pas suffisante pour permettre la découverte des causes des phénomènes.
- (H.3.2) L'expérience n'est pas nécessaire pour permettre la découverte des causes des phénomènes.
- (H.3.3) Une connaissance physique peut reposer sur autre chose que la connaissance des causes des phénomènes.

L'essentiel des deux arguments que Samaroo présente se résume donc à relever que l'expérience n'est pas suffisante à l'acquisition d'une connaissance physique. Sans doute qu'une réponse possible pourrait poser une nouvelle distinction entre une loi de la nature et une loi scientifique. La loi de la nature est ce qui, dans le monde, contraint les phénomènes à se produire d'une certaine manière. La loi scientifique, de l'autre côté, est une règle formulée par la communauté scientifique qui est censée décrire un ensemble de phénomènes. S'il est vrai que la loi scientifique ne correspond pas directement à quelque chose qui se trouve dans le monde, on ne peut pas en dire autant de la loi de la nature (dans la mesure où nous sommes prêts à adopter la position non humienne). Et s'il se trouve bien quelque chose dans le monde extérieur qui contraint les phénomènes à se produire d'une certaine manière, peut-être pourrions-nous en faire l'expérience directement, d'une manière ou d'une autre.

Alors l'expérience pourrait suffire à l'acquisition de la connaissance physique, même si les concepts qui nous servent à la caractériser ne se retrouvent pas directement dans le monde. Une autre manière de répondre à Samaroo : nous pourrions croire que les concepts mathématiques préalables à la formulation des lois n'ajoutent aucune information physique qui n'était pas déjà contenue dans les données de l'expérience. Malgré tout, Samaroo soulève un point important. La question qui oriente notre travail ne devrait pas se limiter à savoir si le raisonnement permet d'acquérir la connaissance physique indépendamment de l'expérience. Une position qui s'oppose à l'empirisme de Hume peut se contenter de montrer que dans certains cas, l'expérience ne peut pas justifier à elle seule une connaissance physique. Nous voudrions donc voir s'il est possible d'acquérir une connaissance physique sans l'expérience, ou pour le moins si dans certains cas le rôle de la raison dans l'acquisition d'une connaissance physique dépasse celui que Hume lui accorde. En d'autres mots, nous demandons si l'expérience est suffisante – comme Hume le prétend – pour justifier la découverte d'une connaissance physique.

Les prochaines sections visent à étudier la source de la certitude de certaines connaissances physiques en s'attardant au cas du principe de la moindre action. Il est possible de donner une dérivation des lois de Newton à partir du principe de la moindre action, et par conséquent il s'agit d'un principe qui se trouve au fondement de la théorie de la mécanique newtonienne. Nous verrons entre autres dans la section 3.1 qu'une justification métaphysique *a priori* a été donnée à ce principe qui est au fondement de la mécanique newtonienne. Si cette justification est acceptable, nous pourrions alors soutenir qu'il est possible d'acquérir la connaissance du principe de la moindre action (et par conséquent de la mécanique newtonienne) sans l'expérience. Nous verrons également dans la section 3.2 comment penser l'abandon de la justification métaphysique du principe de la moindre action. Nous voudrions savoir s'il est toujours possible de soutenir l'une des hypothèses H.3. Je soutiendrai, en me basant notamment sur les idées de Suzanne Bachelard, qu'une explication non causale des phénomènes de la mécanique peut être attribuée au principe de la moindre action en l'absence d'une justification métaphysique *a priori* de celui-ci. Cet argument supportera donc la proposition H.3.3. Finalement, je présenterai dans la section 3.3 un exemple contemporain d'usage de critères non empiriques pour choisir une formulation de la mécanique classique parmi plusieurs formulations empiriquement équivalentes (puisqu'elles permettent toutes de dériver les mêmes équations dynamiques, et ainsi de faire les mêmes prédictions observables).

Le principe de la moindre action est d'abord intervenu dans le contexte des lois de l'optique, puis de manière plus importante dans le contexte de la mécanique newtonienne. Le rôle qu'occupe la raison dans l'acquisition d'une connaissance physique peut être étudié de différentes manières à travers l'épistémologie de la mécanique newtonienne. Nous pourrions nous questionner à savoir si les lois de Newton, à partir desquelles toute la théorie de la mécanique est construite, ne dépendent que de l'expérience. Peuvent-elles être découvertes sans faire l'usage de l'expérience ? Et puis si c'est possible, quelle est la source de la certitude qui les accompagne ? Sans doute que si les lois de la mécanique peuvent être découvertes sans faire l'usage de l'expérience, alors le raisonnement, d'une forme ou d'une autre, jouera un rôle plus important que celui qui lui a été accordé par Hume. Il pourrait s'agir de raisonnement mathématique, métaphysique, ou encore d'une autre sorte de raisonnement. Si, par contre, les lois de Newton ne peuvent être découvertes qu'en faisant usage de l'expérience, nous pouvons tout de même imaginer un rôle plus grand pour la raison que celui qui lui est accordé par Hume. C'est parce que tout en admettant que l'expérience soit nécessaire, il est toujours possible de soutenir qu'elle ne soit pas suffisante pour la découverte des lois de Newton. Ceci correspond entre autres aux idées de Galilée et de Samaroo que j'ai expliqué précédemment. L'étude du principe de la moindre action nous permet d'étudier la question de la connaissance physique non empirique différemment.

En effet, il est possible d'approcher la question différemment, en s'intéressant à une formulation alternative de la mécanique classique qui est fondée sur le principe de la moindre action (également connu sous le nom du principe de Hamilton). La mécanique classique peut être formulée indépendamment des lois de Newton, à partir du principe de la moindre action :

That Hamilton's principle is a sufficient condition for deriving the equations of motion enables us to construct the mechanics of monogenic systems from Hamilton's principle as the basic postulate rather than Newton's laws of motion. Such a formulation has advantages ; [...] the formulation in terms of a variational principle is the route that must be followed when we try to describe apparently nonmechanical systems in the mathematical clothes of classical mechanics, as in the theory of fields. (Goldstein, 1980, p. 36-7)

Goldstein explique dans *Classical Mechanics* que le principe de la moindre action permet de dériver les équations du mouvement des systèmes mécaniques indépendamment des lois de Newton. Ainsi, il est possible d'envisager que nos connaissances à propos de la mécanique reposent sur notre connaissance du principe de la moindre action, plutôt que sur les lois de Newton. Il y a sans doute des contraintes à cette conclusion. Par exemple, pour pouvoir conclure qu'il permet l'acquisition d'une connaissance physique par lui-même, il faudrait

probablement pouvoir justifier le principe de la moindre action indépendamment des lois de Newton. J'en dirai plus à ce sujet plus tard : l'idée d'une justification indépendante sera centrale aux trois prochaines sections. La première de ces sections se penchera sur la justification métaphysique du principe de la moindre action par Pierre-Louis de Maupertuis. C'est en effet lui qui en a fait la découverte le premier. Celle-ci s'opéra d'abord dans le contexte de l'unification des lois de l'optique dans *Accord des différentes lois de la nature qui avaient jusqu'ici parurent incompatibles* (Maupertuis, 1756a), mais fut plus tard appliquée à la mécanique dans *Recherches des lois du mouvement* (Maupertuis, 1756c). Il justifia le principe de la moindre action par un argument métaphysique dans *Essai de cosmologie* (Maupertuis, 1752). Si nous croyions cette justification métaphysique, alors nous aurions une connaissance physique qui peut être acquise sans l'expérience.

La justification métaphysique de Maupertuis fut cependant abandonnée suite aux développements dus à Euler, Hamilton et Lagrange. En l'absence d'une preuve métaphysique acceptable du principe de la moindre action, il faut nous demander si nous pouvons toujours dire qu'il s'agit d'une connaissance physique qui peut être acquise sans l'expérience. Une autre sorte d'argument *a priori* pourrait peut-être justifier la connaissance du principe. Je n'étudierai cependant pas cette possibilité. Le reste du chapitre se consacrera plutôt sur deux autres aspects de l'épistémologie du principe de la moindre action : son rôle explicatif téléologique et son universalité. Si l'explication et l'universalité sont des choses qui nous permettent d'acquérir une connaissance physique, alors nous pourrions faire l'argument qu'il s'agit de deux façons d'acquérir une connaissance physique d'une manière qui ne repose pas entièrement sur l'expérience.

Références bibliographiques

- Goldstein, Herbert. 1980. *Classical mechanics*. 2d ed. Addison-Wesley series in physics. Reading, Mass : Addison-Wesley Pub. Co.
- Hume, David. 2008. *Enquête sur l'entendement humain* [en eng fre]. Traduit par Michel Malherbe. Bibliothèque des textes philosophiques. Paris : J. Vrin.
- Maupertuis, Pierre-Louis. 1752. « Essai de cosmologie ». In *Les oeuvres de Mr. de Maupertuis*, 3-54. Dresde.
- . 1756a. « Accord des différentes lois de la nature qui avaient jusqu'ici paruient incompatibles ». In *Les oeuvres de Mr. de Maupertuis, nouvelle édition corrigée et augmentée*, 4 : 1-28. Lyon.
- . 1756c. « Recherche des lois du mouvement ». In *Les oeuvres de Mr. de Maupertuis, nouvelle édition corrigée et augmentée*, 4 : 29-42. Lyon.
- Samaroo, Ryan. 2022. « Newtonian Mechanics » [en eng]. In *The Routledge companion to philosophy of physics*, sous la direction d'Eleanor Knox et Alastair Wilson, 8-20. Routledge philosophy companions. New York London : Routledge.
- Yourgrau, Wolfgang, et Stanley Mandelstam. 1960. *Variational principles in dynamics and quantum theory*. 2^e éd. New York : Pitman.

Chapitre 2

Le principe de la moindre action

Section 2.1. Équivalent aux lois de Newton ?

Notre objectif premier est d'évaluer la justification métaphysique *a priori* du principe de la moindre action qui a été donné par Maupertuis, mais pour y arriver, il faut d'abord comprendre une difficulté qui est propre à la justification d'un certain type de principes physiques. En 1740, il écrit pour la première fois dans *Loi du repos* à propos de la distinction entre deux types de principes physiques. La distinction s'apparente à celle entre les lois de Newton et le principe de la moindre action, bien qu'à ce moment il ne s'y réfère pas directement. Les principes du premier et du deuxième type peuvent être distingués de deux façons : par la manière dont ils sont découverts et par leur usage. Les principes du premier type sont simples et leur vérité est évidente. Il s'agit des premiers principes des sciences, des principes d'où dépendent toutes les vérités faisant l'objet de celles-ci. Leur simplicité élémentaire les rend cependant difficiles d'usage : « notre esprit étant aussi peu étendu qu'il l'est, il y a souvent trop loin pour lui de premiers principes au point où il veut arriver, et il se lasse ou s'écarte de sa route » (Maupertuis, 1756b, p. 46). Pour comprendre un phénomène faisant l'objet d'une science, il faudrait retracer ses causes efficientes jusqu'aux premiers principes. Or, Maupertuis indique que notre esprit ne peut envisager une suffisamment grande suite de causes efficientes dans leur ensemble. S'il est aisé de saisir la vérité des premiers principes, il est difficile d'y réduire les phénomènes que nous observons. Les principes physiques du deuxième type sont dans la situation inverse : faciles d'usage, il n'est cependant pas aisé de les découvrir. Ces principes sont « les lois que la Nature suit dans certaines combinaisons

de circonstances » (Maupertuis, 1756b, p. 45). Ce sont des principes qui décrivent le comportement des phénomènes sans toutefois les réduire à une suite de causes efficientes. Leur usage est plus simple, puisqu'ils nous épargnent cette réduction, laborieuse pour un esprit incapable de voir l'objectif à partir des premières causes. Bien que plus utiles, ils n'ont pas l'évidence des premiers principes. Il faut les démontrer, et il y a deux façons d'y parvenir : *a posteriori*, soit en cherchant à prouver les principes dans un certain nombre de systèmes particuliers, ou encore *a priori*, soit par une preuve « semblant appartenir à quelque science supérieure [à la physique] » (Maupertuis, 1756b, p. 46).

Marco Panza (1995) clarifia la nature des deux types de principes de Maupertuis. Les principes du premier type, dit-il, correspondent aux principes comme ceux de Newton, à partir desquels il est possible de dériver tous les théorèmes de la mécanique, par l'analyse des forces présentes, de la position et de la masse des corps. Les principes du deuxième type correspondent, dit-il, aux autres *sortes* de principes qui sont utilisés par les mécaniciens, comme par exemple le principe de la conservation des forces vives (un principe de conservation d'énergie) et la loi du repos (un principe d'équilibre).

Une fois rangés dans une première catégorie les principes qui permettaient la résolution d'un problème de mécanique au moyen d'une analyse directe des masses des corps, de leur position et des forces agissant sur eux – c'est-à-dire, en particulier, les trois principes dits de Newton, accompagnés par les considérations géométriques élémentaires qui intervenaient dans la mise en équation de ces données et par les définitions correspondantes –, il restait encore, pour compléter la liste des principes effectivement utilisés par les mécaniciens, d'autres principes comme ceux de la descente maximale du centre de gravité ou de la conservation des forces vives, auxquels Maupertuis proposait d'ajouter sa loi du repos. (Panza, 1995, p. 438)

Panza concède toutefois que la distinction de Maupertuis entre les principes du premier et du deuxième type n'est pas irréprochable et générale. Il faut comprendre cette distinction dans le contexte de la mécanique de l'époque, alors qu'on accordait à Newton la dérivation *a priori* de ses trois principes à partir desquelles étaient décrits les phénomènes de la mécanique. La description de problèmes complexes (comme les problèmes à plusieurs corps) peut être extrêmement laborieuse, voire impraticable pour les mécaniciens analytiques. Les principes du second type trouvent leur utilité d'abord dans la simplification des problèmes autrement trop compliqués à résoudre. Mais, alors que les principes du premier type sont découverts par des preuves *a priori* dont la vérité est élémentaire (et par la découverte d'un principe, j'entends toujours l'acquisition de la connaissance du principe, avec la certitude caractéristique de la connaissance scientifique), il n'est pas toujours évident d'où provient

la certitude des principes du deuxième type. C'est le mystère qui anime Panza au début de son article : « Je vais commencer par exposer l'opinion de Maupertuis à propos de la source d'où proviendrait notre certitude concernant les principes du second type. Elle est double, inductive d'un côté, métaphysique de l'autre. » (Panza, 1995, p. 439) Maupertuis lui-même conduit en effet une recherche quant à la source de la certitude, d'abord de sa loi du repos, puis plus tard du principe de la moindre action – deux principes du deuxième type.

Mais puisque la certitude des principes du deuxième type repose sur la spéculation métaphysique et l'induction, là où la certitude des principes du premier type repose sur des vérités mathématiques élémentaires, nous sommes en droit de contester la légitimité des arguments justifiant les principes du deuxième type. C'est ce que Panza s'engage à faire. Il veut étudier

[...] la différence essentielle qui [sépare la justification spéculative et inductive des principes du deuxième type] de la justification mathématique à partir d'une évidence originaire, comme celle que Maupertuis semble assigner aux principes newtoniens et refuser, au contraire, aux principes du second type. Grâce à quelle légitimité et en vue de quel avantage ces derniers principes viennent-ils donc s'incorporer à une science qui prétend au statut de mathématique et en deviennent-ils des éléments? (Panza, 1995, p. 440)

Cette difficulté apparente dans la justification des principes du deuxième type soulève un problème, puisque ces mêmes principes se trouvent à occuper un rôle crucial dans l'élaboration de la mécanique. Une tension subsiste donc entre la démonstration (ou, suivant mon usage de ce terme jusqu'à présent, la découverte) des principes physiques, d'une part, et leur utilité, d'autre part. Nous ne pouvons pas nous satisfaire des principes du premier type, puisqu'ils permettent difficilement de décrire les phénomènes plus complexes de la mécanique. Mais dès lors, nous nous donnons la tâche de découvrir les principes du deuxième type, et d'en donner une démonstration sur laquelle reposera la certitude des connaissances physiques qui en seront déduites.

Opposés intrinsèquement, d'après Maupertuis, par la nature de leur base justificative, les principes du premier et du second type s'opposent ainsi extrinsèquement par le rôle qu'ils assument dans l'édifice de la mécanique, les premiers constituant la base vérifiable d'une science idéale qui s'organiserait sur eux comme une chaîne ininterrompue, les seconds n'étant que les premiers maillons de certaines parties de cette chaîne qu'on a pu reconstruire. (Panza, 1995, p. 440)

Or, comme les diverses tentatives d'unification des lois de l'optique le montrent, la justification des principes du deuxième type peut se trouver bien dangereuse. C'est ce que nous

pouvons constater dans l'explication de Maupertuis (1756a) de ce qu'il considère comme l'erreur commise par Fermat dans la détermination de la dépense de la nature.

Tenant d'unifier l'explication des trois phénomènes de l'optique – la propagation, la réflexion et la réfraction – Fermat introduit un principe du deuxième type, le principe selon lequel un rayon lumineux suit le parcours le plus prompt entre deux points. Le temps et la distance du parcours que suit la lumière lorsqu'elle se propage directement en deux points et lorsqu'elle est réfléchi sur une surface sont tous les deux les moindres parmi toutes les trajectoires possibles. Ainsi Fermat y verrait l'application d'une loi métaphysique : « voilà donc le mouvement direct et le mouvement réfléchi de la lumière, qui paraissent dépendre d'une loi métaphysique qui porte, que la nature dans la production de ses effets agit toujours par les moyens les plus simples » (Maupertuis, 1756a, p. 12). Cette loi le guiderait dans la recherche d'une explication de la réfraction, puisqu'en effet la réfraction est un phénomène ayant une particularité qui le distingue de la propagation directe et de la réflexion (voir la figure 2.1). Dans le cas de la réfraction – et contrairement aux deux autres cas – le rayon lumineux ne suit plus le trajet ayant la distance la plus courte. Porté par la loi métaphysique qu'il applique aux cas de la réflexion et de la propagation, Fermat pensa que le temps de propagation dans le cas de la réfraction serait le plus petit qu'il soit possible. Ainsi pourrait-on dire que dans les trois phénomènes de l'optique, la lumière suit la trajectoire dont la durée est la plus courte (voir la figure 2.2).

Pour Maupertuis il s'agirait d'une erreur, qui exprime bien la difficulté propre à la découverte des principes du deuxième type (dont la vérité ne possède pas l'évidence de celle des principes du premier type). En effet, Fermat se serait précipité, et il aurait pris la mauvaise quantité pour la vraie dépense de la nature. Sachant que la trajectoire de la lumière suit le parcours le plus prompt possible dans le cas de la réflexion et de la propagation directe, et considérant son principe métaphysique selon lequel la nature agit par les moyens les plus simples, il n'aurait eu aucune difficulté à accepter la condition nécessaire pour expliquer la réfraction par le même principe : que la vitesse de la lumière dans le milieu le moins dense soit plus rapide que dans le milieu le plus dense. Le trajet suivi par la lumière dans le cas de la réfraction n'est en effet celui dont la durée est la plus courte que dans la mesure où sa vitesse est plus rapide dans le milieu le moins dense. Or, l'erreur se trouverait là, puisque selon Maupertuis la vitesse de la lumière serait en fait plus la rapide dans le milieu le plus dense. Si c'est effectivement le cas, alors la trajectoire d'un rayon lumineux réfracté ne serait pas

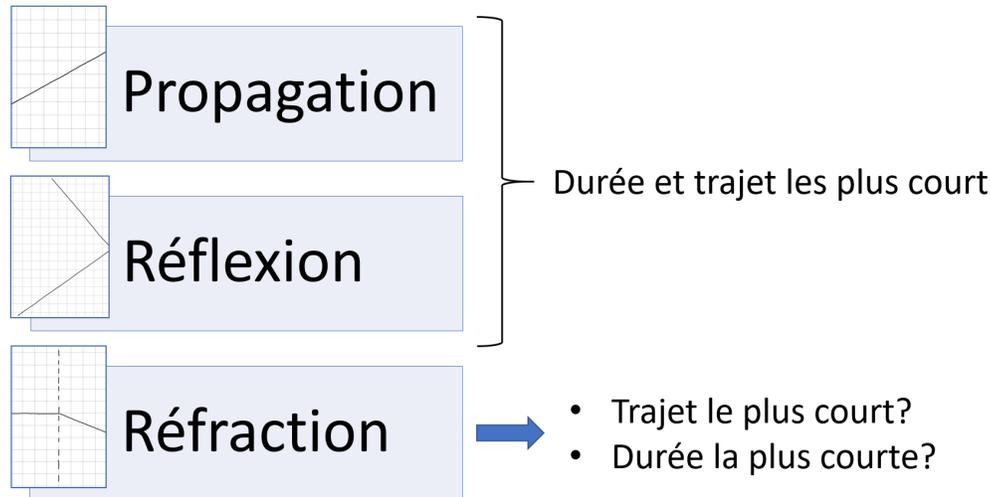


Figure 2.1 – L’unification des trois phénomènes de l’optique. Dans le cas de la propagation et de la réflexion d’un rayon lumineux, le trajet suivi par la lumière est celui dont la durée du parcours et la distance parcourue sont les plus courtes parmi tous les trajets possibles entre le point de départ et le point d’arrivée. Or, dans le cas de la réfraction de la lumière, le trajet suivi par le rayon lumineux n’est pas celui dont la distance est la plus courte (le trajet le plus court correspond à une ligne droite entre le point de départ et le point d’arrivée). L’explication commune à la propagation et à la réflexion de la lumière – l’idée selon laquelle la lumière suit le trajet dont la distance et la durée sont les plus courtes – ne s’applique pas au cas de la réfraction. Comment, alors, donner une explication commune aux trois phénomènes de l’optique ?

celle dont la durée est la plus courte parmi toutes les trajectoires possibles. Le principe de Fermat ne vaudrait plus.

Comme je l’ai expliqué, les principes du premier et du deuxième type se distinguent selon leur démonstration et leur utilité. Toutefois, dès la publication d’*Accord des lois de la nature qui avaient jusqu’ici paru incompatibles*, en 1746, Maupertuis ne qualifie plus les principes physiques selon cette distinction, du moins pas explicitement. Il choisit de distinguer différentes façons par lesquelles nous pouvons découvrir les causes des phénomènes de la physique, soit par les causes finales et par les causes efficientes :

Une mécanique aveugle et nécessaire suit les desseins de l’Intelligence la plus éclairée et la plus libre ; et si notre esprit était assez vaste, il verrait également les causes des effets physiques, soit en calculant les propriétés des corps, soit en recherchant ce qu’il y avait de plus convenable à leur faire exécuter. (Maupertuis, 1756a, p. 21)

Nous pourrions dire que la distinction entre les principes du premier et du deuxième type correspond à la distinction entre les deux manières de découvrir les causes des phénomènes.

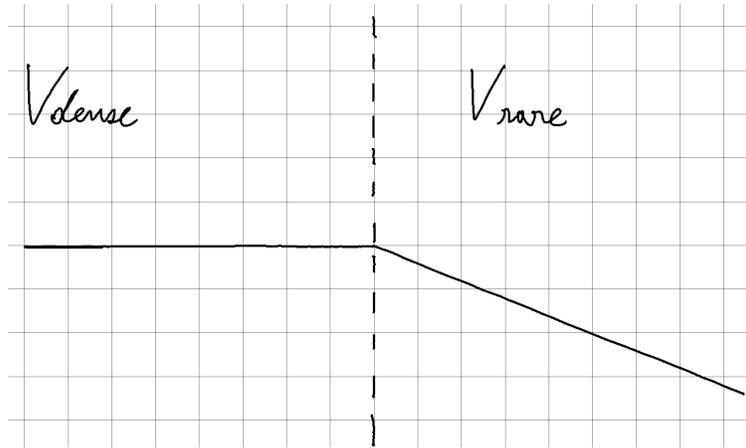


Figure 2.2 – La réfraction d’un rayon lumineux. V_{dense} est la vitesse du rayon lumineux dans le milieu le plus dense, et V_{rare} est sa vitesse dans le milieu le moins dense. Si comme Fermat nous croyons que $V_{dense} > V_{rare}$, alors nous pouvons conclure que le rayon réfracté se propage en suivant la trajectoire dont la durée du parcours est la plus courte. Que la lumière se propage toujours en suivant la trajectoire dont la durée du parcours est la plus courte peut alors servir d’explication commune aux trois phénomènes de l’optique. C’est le principe de Fermat.

Les principes du premier type sont des vérités évidentes qui concernent les propriétés des corps, et la première manière de découvrir les causes des phénomènes physiques, c’est justement de les chercher à partir des propriétés des corps. Les principes du deuxième type quant à eux décrivent des lois suivies par la nature dans certaines situations, et nous pourrions comprendre la citation ci-haut comme une précision sur la nature de ces lois : elles décrivent ce qu’il est le plus convenable de se produire.

J’avais au début de cette section que la découverte et l’usage des deux types de principes sont en opposition. Les principes du premier type sont évidents, mais il est difficile d’y réduire les phénomènes. Les principes du deuxième type permettent de décrire aisément les phénomènes, mais ils ne sont pas dotés de la même évidence. Pour les découvrir, il faudrait avoir recours aux causes finales, si nous acceptons – comme je l’ai suggéré à la fin du dernier paragraphe – que ces principes doivent décrire le comportement le plus convenable des corps. On pourrait alors expliquer la non-évidence des principes du deuxième type par la difficulté que nous avons de découvrir les bonnes causes finales. C’est dans la critique de Maupertuis du principe de Fermat que l’on trouve le premier exemple de cette difficulté. Comme nous l’avons vu, Fermat se serait précipité, et il aurait commis une erreur dans la détermination de la finalité propre aux rayons lumineux. Cette erreur démontre que l’usage des causes finales en physique en dangereux :

L'erreur où sont tombés des hommes tels que Fermat et Leibniz en les suivant, ne prouve que trop combien leur usage est dangereux. [...] Si notre esprit était assez vaste, il verrait également les causes des effets physiques, soit en calculant les propriétés des corps, soit en recherchant ce qu'il y a de plus convenable à leur faire exécuter. Le premier de ces moyens est le plus à notre portée, mais il ne nous mène pas fort loin. Le second quelque fois nous égare, parce que nous ne connaissons point assez quel est le but de la Nature, et que nous pouvons nous méprendre sur La Quantité que nous devons regarder comme Sa Dépense dans la production de ses effets. (Maupertuis, 1756a, pp. 21-22)

Nous pouvons comprendre ce passage en gardant en tête la correspondance que j'ai suggérée entre les principes du premier type et la détermination des causes des phénomènes par le premier moyen (selon les propriétés des corps), ainsi que la correspondance suggérée entre les principes du deuxième type et la détermination des causes des phénomènes par le deuxième moyen (selon leur finalité). Le premier moyen – la considération des causes efficientes – est le plus à notre portée, étant donné l'évidence des principes physiques du premier type. Mais il ne nous mène pas fort loin dans son application, étant donné que les principes du premier type ne permettent pas de décrire les phénomènes aisément. Le deuxième moyen – la considération des causes finales – est moins à notre portée, étant donné la non-évidence des principes du deuxième type : contrairement aux principes du premier type, il faut les découvrir, et en donner une certaine démonstration, ce qui s'avère une tâche risquée, comme le montre l'erreur de Fermat. Mais une fois les bons principes découverts, le deuxième moyen nous mène loin dans son application, étant donné que les principes du deuxième type permettent de décrire les phénomènes plus aisément.

Section 2.2. La notion d'action

Pour Maupertuis, il se trouve donc deux types de principes physiques qui se distinguent selon leur rôle et leur justification. Le principe de la moindre action tombe dans la deuxième catégorie, alors que les lois de Newton tombent dans la première. Alors que les lois de Newton profitent de la justification mathématique *a priori* donnée par Newton (Panza, 1995, p. 441), le principe de la moindre action lui dépend d'une justification différente, qui est moins certaine : une justification métaphysique *a priori*. Nous pourrions sans doute étudier la question de départ – à savoir la possibilité de la connaissance physique non empirique – en s'attardant à la preuve mathématique *a priori* des lois de Newton. Or, j'ai plutôt choisi l'étude de la preuve du principe de la moindre action, non pas parce que cette preuve supporte mieux la possibilité de la connaissance physique non empirique, mais plutôt pour ce qui lui succède

une fois qu'elle fût rejetée : même sans justification métaphysique adéquate, le principe de la moindre action garde un rôle explicatif fondamental et, parce qu'il s'appliquera à plusieurs théories physiques complètement différentes, universel. C'est ce que nous verrons dans les deux prochaines sections.

Pour l'instant nous voulons évaluer la preuve métaphysique du principe de la moindre action afin de déterminer si elle permet de supporter l'une des trois hypothèses formulées au chapitre précédent :

- (H.3.1) L'expérience n'est pas suffisante pour permettre la découverte des causes des phénomènes.
- (H.3.2) L'expérience n'est pas nécessaire pour permettre la découverte des causes des phénomènes.
- (H.3.3) Une connaissance physique peut reposer sur autre chose que la connaissance des causes des phénomènes.

Nous voulons étudier la source de la certitude de certaines connaissances physiques en s'attardant à la source de la certitude de la connaissance mécanique qui provient du principe de la moindre action, d'abord chez Maupertuis. Comme nous l'avons vu à la section précédente, pour Panza, la certitude sur laquelle repose la connaissance des principes du deuxième type pour Maupertuis est double : elle peut reposer sur l'induction, lorsqu'on observe, sans savoir pourquoi, qu'un tel principe permet constamment de trouver les bonnes quantités qui permettent de résoudre des problèmes de physique. Bien que Panza qualifie cette justification des principes du deuxième type d'inductive, je me garderai pour l'instant de partager cette caractérisation puisque dans notre travail, l'induction fait référence à l'idée humienne selon laquelle la certitude de la connaissance physique repose strictement sur l'expérience répétée de la conjonction de certaines causes à leurs effets. Pour Panza, la loi de la conservation de l'énergie (un principe du deuxième type) peut être justifiée par l'induction lorsque l'on observe constamment, dans divers phénomènes physiques, qu'elle est respectée. À première vue, l'induction auquel Panza fait référence n'a rien à voir avec les causes des phénomènes. Nous en dirons davantage dans les deux prochaines sections. Outre cette justification par « induction » des principes du deuxième type, Panza identifie la justification métaphysique de ces principes. Il s'agit d'arguments métaphysiques que la physique elle-même ne permet pas nécessairement d'acquérir, selon Maupertuis, pour qui ces démonstrations métaphysiques

« semblent appartenir à quelque science supérieure. » (Maupertuis, 1756b, p. 46) En ce qui concerne la source de la certitude du principe de la moindre action (un principe du deuxième type), nous aurions deux possibilités : ce que Panza qualifie de la justification par induction, et ce qu'il qualifie de justification métaphysique. Nous étudierons plus en détail ce qu'il entend comme la justification par induction dans les deux prochaines sections, et ici nous nous concentrons sur la justification métaphysique.

Si cette justification est acceptable, et si elle est réellement *a priori*, comme Panza l'entend, alors nous pourrions soutenir qu'il est possible d'acquérir la connaissance du principe de la moindre action – une connaissance physique – sans l'expérience. Si, par contre, nous réalisons que cette justification n'est pas réellement *a priori* – contrairement à ce que Panza croyait – alors nous ne pourrions plus avancer que la justification métaphysique du principe prouve qu'il est possible d'acquérir une connaissance physique *sans l'expérience*. Plutôt, les travaux de Maupertuis laissent croire que l'expérience joue un certain rôle dans la justification métaphysique du principe de la moindre action. Il faudra alors voir si l'aspect métaphysique de la justification du principe de la moindre action permet de répondre à l'empirisme humien en supportant l'une des trois propositions H.3.

Dans son article sur les lois de l'optique, Maupertuis tenta de réconcilier l'idée métaphysique de Fermat selon laquelle la nature dans sa démarche économise ses voies avec le fait selon lequel la vitesse de la lumière est plus élevée dans un milieu plus dense. Il réalisa que rien n'indique que le temps – qui selon Fermat devait faire l'objet de l'économie de la nature – devrait avoir un statut particulier : « la lumière [...] abandonnant déjà le chemin le plus court [...] pouvait bien aussi ne pas suivre celui de temps le plus prompt ; en effet, quelle préférence devrait-il y avoir ici du temps sur l'espace ? » (Maupertuis, 1756b, p. 16) Nous avons déjà vu en effet que bien que la lumière suive la trajectoire dont la distance est la plus courte entre deux points dans le cas de la propagation directe et de la réflexion, elle ne suit plus une telle trajectoire dans le cas de la réfraction. Pensant qu'il n'y a pas de raison de croire que la nature veuille économiser le temps plutôt que l'espace, Maupertuis jugea que l'abandon de l'économie de l'espace dans le cas de la réfraction constituait un indice suffisant pour refuser de croire que le temps doive faire l'objet de l'économie de la nature.

Il introduit alors une quantité qui représente la véritable dépense de la nature, c'est-à-dire son *action*. L'action est déterminée par un critère métaphysique, et elle correspond littéralement à la dépense que la nature doit faire pour qu'un changement se produise :

Lorsqu'un corps est porté d'un point à un autre, il faut pour cela une certaine Action : cette action dépend de la vitesse qu'a le corps et de l'espace qu'il parcourt, mais elle n'est ni la vitesse ni l'espace. La quantité d'action est d'autant plus grande que la vitesse du corps est plus grande, et que le chemin qu'il parcourt est plus long. (Maupertuis, 1756b, p. 17)

Prendre la dépense de la nature pour le produit de la vitesse et de la distance parcourue permet d'unifier l'explication des trois phénomènes de l'optique, tout en respectant le fait (selon Maupertuis) que la vitesse de la lumière est plus élevée dans le milieu le plus dense. Dans le cas de la propagation directe et de la réflexion, la trajectoire de moindre action correspond à la trajectoire de moindre temps et de moindre distance. Dans le cas de la réfraction, la trajectoire réelle du rayon lumineux n'est ni celle du moindre temps ni celle de la moindre distance, mais elle correspondrait toujours à celle de la moindre action. Maupertuis généralisa son principe de moindre action de l'optique à la mécanique à partir de l'Essai de cosmologie (Maupertuis, 1752). De la même manière qu'il permet d'unifier les différents phénomènes de l'optique, le principe de moindre action permet d'unifier différentes lois de la mécanique applicables à différents phénomènes. Dans *Recherche des lois du mouvement* (Maupertuis, 1756c), Maupertuis applique son principe d'économie à trois phénomènes : au choc des corps durs, au choc des corps élastiques, ainsi qu'à l'équilibre d'un levier. Dans les deux premiers cas, il calcul l'action, définie comme le produit de la masse, par la vitesse, par la distance parcourue, puis il applique le critère de moindre action pour dériver la vitesse des corps avant et après les collisions. À partir des formules des vitesses, il arrivera à démontrer que dans le cas du choc des corps durs, la quantité de mouvement est conservée, et que dans le cas des chocs de corps élastiques, la force vive est conservée. Le principe de moindre action offre, comme dans le cas de l'optique, une unique explication pour plusieurs phénomènes auparavant décrits par des lois que l'on croyait incompatibles.

L'action de Maupertuis, comme il la décrit dans ses travaux, est différente de l'action dont on entend parler dans les théories contemporaines de physique. La mécanique classique, dans sa formulation contemporaine, peut se formuler de différentes manières, soit à partir des lois de Newton, soit à partir du principe de la moindre action, entre autres. Chacune des formulations repose sur des lois dynamiques qui déterminent le comportement des systèmes mécaniques qui sont soumis à des forces. La formulation newtonienne repose sur la deuxième loi de Newton :

$$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt},$$

où \mathbf{F} est la somme des forces agissant sur une particule et \mathbf{p} est la quantité de mouvement de la particule. Les lois dynamiques des formulations lagrangiennes et hamiltoniennes sont quant à elles les équations d'Euler-Lagrange et les équations hamiltoniennes, respectivement. Les équations d'Euler-Lagrange peuvent être dérivées, notamment, à l'aide du principe de la moindre action, dont la formulation en mécanique classique contemporaine prend la forme du principe d'Hamilton :

Définition 2.2.1 (Principe de Hamilton). *La trajectoire d'une particule de l'instant t_1 à l'instant t_2 est celle pour laquelle l'action*

$$\int_{t_1}^{t_2} (K - U) dt$$

est stationnaire, où K est l'énergie cinétique et U l'énergie potentielle.

La quantité qui correspond à l'action, dans la formulation contemporaine de la mécanique classique, est déterminée à partir de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle que nous associons avec un problème mécanique particulier. En d'autres mots, si la *forme* de l'équation qui détermine l'action reste la même (elle correspond à l'intégrale de la différence entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle d'un système mécanique), la formule mathématique particulière changera d'un système à un autre selon notre détermination de l'énergie cinétique et potentielle de chacun d'eux. La formulation de l'action de Maupertuis est différente, moins rigoureuse, et la forme mathématique que prend la quantité d'action dans chaque problème de mécanique est basée sur l'idée vague de *changement nécessaire* pour qu'un phénomène se produise.

C'est dans (Maupertuis, 1756c) qu'il donna pour la première fois une quantité d'action dans le contexte de la mécanique. En fait, il donne trois formules différentes pour l'action : la première pour un système mécanique où deux corps solides entrent en choc, la deuxième pour un système mécanique où deux corps élastiques entrent en choc, et finalement la troisième pour un levier en équilibre. Il dérive la quantité d'action dans chacun de ces systèmes afin d'obtenir, par une simple application du principe de la moindre action, les lois du mouvement et de l'équilibre pour chacun : « Cherchons maintenant les Loix, selon lesquelles le Mouvement se distribue entre deux Corps qui se choquent, soit que ces Corps soient Durs, soient qu'ils soient Élastiques. Nous déduirons ces Loix d'un seul Principe, & de ce même Principe nous déduirons les Loix de leur Repos. » (Maupertuis, 1756c, p. 36) Puis il énonce son principe de

la moindre action pour la première fois en mécanique : « Principe Général. Lors qu'il arrive quelque changement dans la Nature, la Quantité d'Action, nécessaire pour ce changement, est la plus petite qu'il soit possible. » (Maupertuis, 1756c, p. 36) Le principe de la moindre action de Maupertuis, contrairement à sa formulation contemporaine, n'est pas formulé en termes variationnels (voir la figure 2.3).

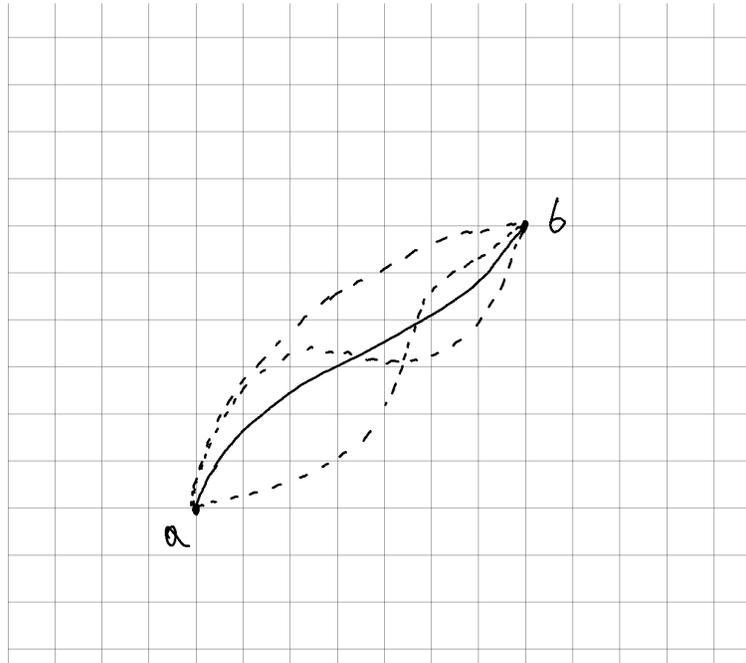


Figure 2.3 – Le principe de la moindre action, dans sa formulation contemporaine, est souvent interprété de manière variationnelle (par exemple Morin, 2008 ; Neuenschwander, 2017) : on dit alors que parmi toutes les trajectoires possibles entre le point de départ (a) et le point d'arrivée (b), la trajectoire suivie par une particule (la ligne pleine) est celle qui, parmi toutes les trajectoires possibles (les lignes pointillées) entre le point de départ et le point d'arrivée, minimise (ou extrémise) l'action. Une telle formulation des problèmes fait intrinsèquement usage du calcul intégral, comme Bachelard (1958) le soulève.

La formulation contemporaine du principe de la moindre action est donc pensée différemment de celle de Maupertuis d'abord parce qu'elle formule le problème de manière variationnelle, faisant par la même occasion usage du calcul intégral. Par contre, la différence entre les deux formulations du principe de la moindre action ne s'arrête pas là. En plus d'une différence dans la formulation des problèmes résolus par le principe de la moindre action, il y a une différence dans le calcul de la quantité prise pour l'action. Dans la formulation contemporaine du principe en mécanique classique, l'action est la différence entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle d'un système mécanique. L'énergie prendra une forme différente dans chaque problème physique différent, dépendamment de la nature des forces présentes, mais la forme générale de la quantité d'action est l'intégrale de la différence $K - U$. Chez Maupertuis,

cependant, la quantité d'action n'est pas associée à l'énergie des systèmes mécaniques. Il semble plutôt qu'il utilise la notion plus vague de « quantité d'Action nécessaire pour [un] changement » (Maupertuis, 1756c, p. 36) dans la nature. Il est vrai qu'il donne aussitôt une forme mathématique plus précise pour l'action, et qui est indépendante des particularités de chaque système mécanique qu'il donne en exemple par la suite (le choc de corps durs, le choc de corps élastiques, et le levier en équilibre) :

La Quantité d'Action est le produit de la Masse des Corps, par leur vitesse & par l'espace qu'ils parcourent. Lorsqu'un Corps est transporté d'un lieu dans un autre, l'Action est d'autant plus grande, que la Masse est plus grosse ; que la vitesse est plus rapide, que l'espace, par lequel il est transporté, est plus long. (Maupertuis, 1756c, p. 36)

Le problème, c'est qu'il ne donne absolument aucune justification ni aucune explication pour prendre l'action de la nature comme le produit de la masse par la vitesse par l'espace parcouru ! Pour lui, l'action de la nature a d'abord une signification intuitive. Il ne faut pas prendre l'action de Maupertuis comme une quantité mathématique à l'image de l'action dans la formulation contemporaine. Sa première utilisation du concept de l'action, dans le contexte de l'unification des lois de l'optique (Maupertuis, 1756b), n'y faisait référence qu'en tant que quantité qui fait l'objet de l'économie de la nature. Pour la déterminer, il faudrait donc réfléchir à la nature de chaque système physique afin de déterminer la quantité qui devrait faire l'objet de l'économie de la nature. Peut-être pourrions-nous faire l'argument qu'une telle quantité doit nécessairement prendre la forme de l'intégrale de la différence entre l'énergie cinétique et potentielle dans un système mécanique. Ce n'est toutefois pas mon objectif.

Nous pouvons mieux comprendre la manière par laquelle Maupertuis détermine la bonne quantité d'action dans un système mécanique donné en examinant sa recherche des lois du mouvement dans le cas du choc de deux corps durs (Maupertuis, 1756c). La figure 2.4 représente le schéma du système mécanique que Maupertuis examine.

Comme il le déclare dans l'énoncé de son principe de la moindre action dans le contexte de la mécanique, la quantité d'action est déterminée par le *changement nécessaire* dans l'univers pour qu'un phénomène se produise. C'est précisément en réfléchissant à la nature du problème du choc de deux corps solides qu'il arrive à déterminer une quantité pour l'action nécessaire au changement se produisant (voir la figure 2.4). Il calcule donc le changement dans la vitesse et dans la distance parcourue par les deux corps qui s'entrechoquent. Le

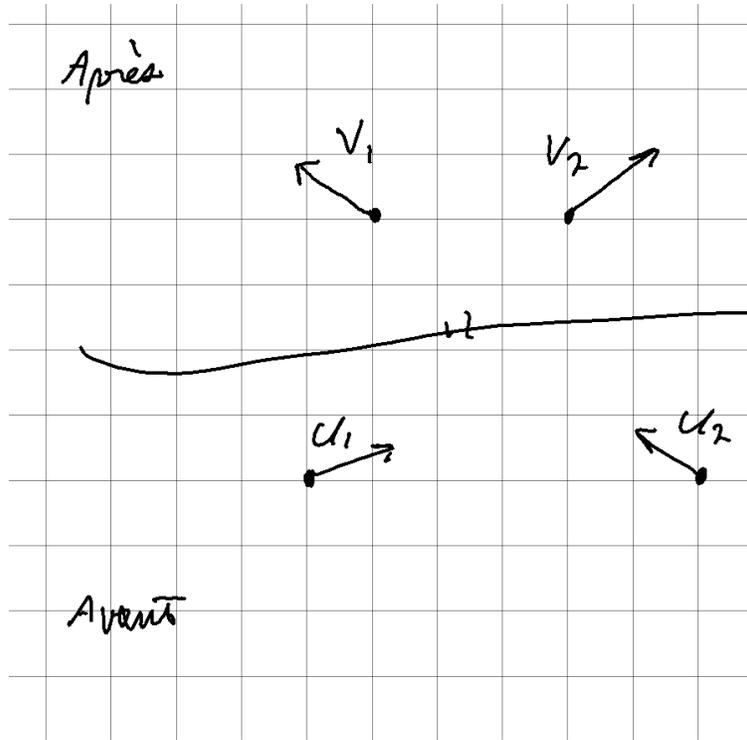


Figure 2.4 – Maupertuis détermine la quantité qui représente l'action dans quelques problèmes de mécanique différents. Il détermine cette quantité à partir d'une représentation du changement nécessaire dans l'état des composantes d'un système physique pour qu'un certain phénomène se produise. Le schéma représente le choc de deux corps. C'est à partir de la différence entre l'état du système mécanique avant et après l'impact que Maupertuis construira la forme de l'action propre à ce système mécanique.

changement de vitesse (Maupertuis, 1756c, pp. 36-38) est donné, pour chaque corps, par

$$u_1 \rightarrow v_1 \tag{2.2.1}$$

$$u_2 \rightarrow v_2 \tag{2.2.2}$$

alors que le changement dans la distance (Maupertuis, 1756c, pp. 36-38) est donné par

$$u_1 \Delta t \rightarrow v_1 \Delta t \tag{2.2.3}$$

$$u_2 \Delta t \rightarrow v_2 \Delta t. \tag{2.2.4}$$

L'action, comme il l'énonce sans justification, est construite à partir du produit de la masse, de la vitesse et de la distance parcourue par les corps,

$$(\text{masse}) \times (\text{vitesse}) \times (\text{distance}). \tag{2.2.5}$$

Le changement nécessaire pour que les corps durs se comportent comme observé devrait être la différence entre cette quantité avant le choc et celle après le choc :

$$m_1 \underbrace{(u_1 - v_1)}_{\text{vitesse}} \underbrace{(u_1 - v_1)}_{\text{distance}} + m_2 (u_2 - v_2)(u_2 - v_2). \quad (2.2.6)$$

Pour une unité de temps, la vitesse et la distance partagent la même dimension. Nous voyons donc au final que l'action de Maupertuis dans le cas du choc des corps durs est la somme des produits de la masse, de la différence de vitesse avant et après la collision et de la distance parcourue, pour chacun des corps. Une fois la quantité d'action déterminée, Maupertuis s'emploie aussitôt à y appliquer le principe de la moindre action. Il pose donc la condition que l'action doit être un minimum, et en déduit par un calcul direct la vitesse finale des corps en fonction des paramètres de départ du système. Il vérifie finalement que la quantité de mouvement est conservée : il s'agit d'une déduction de la loi de conservation de la quantité de mouvement. La même procédure lui permettra de dériver la loi de la conservation des forces vives, à partir d'une application du principe de la moindre action à un système mécanique où s'entrechoquent deux corps élastiques, puis finalement la position d'un levier en équilibre. Comme le principe de la moindre action offrait une unique explication aux trois lois de l'optique, il semble qu'en mécanique il permette d'offrir une unique explication à ces trois lois de la mécanique (la conservation de la quantité de mouvement, la conservation de la force vive puis l'équilibre d'un levier). S'il peut sembler difficile de comprendre la « dériviation » de la quantité d'action à laquelle Maupertuis applique le principe de la moindre action dans le cas du choc des corps durs, c'est qu'il n'en justifie pas chaque étape de son. Il m'apparaît qu'il y a trois explications importantes qu'il reste à donner pour justifier adéquatement les conclusions que Maupertuis tire du principe de la moindre action (principalement, l'unification de ces trois lois de la mécanique).

- (E.1) Comment déterminer de manière systématique le changement nécessaire pour qu'un phénomène se produise ?
- (E.2) Pourquoi l'action devrait-elle prendre la forme du produit de la masse par la vitesse par la distance parcourue ?
- (E.3) Comment justifier le principe de la moindre action lui-même ?

Le premier problème, (E.1), est peut-être moins inquiétant. La notion d'action telle qu'introduite par Maupertuis est indissociable de l'idée d'un changement nécessaire pour la production d'un phénomène : l'action est par définition une quantité qui représente l'effort de

la nature pour la production de certains phénomènes, et il est ensuite avancé, sur la base d'un argument d'abord métaphysique, que la dépense d'action par la nature est toujours minimale. C'est de cette manière peu concrète qu'il imagine le principe de la moindre action – et par le fait même la notion d'action – dès sa première formulation dans le contexte des lois de l'optique. Or, le problème, c'est que ce changement nécessaire pour la production de certains phénomènes prend une forme générale que Maupertuis n'explique pas : pour une certaine raison, il s'agit, en mécanique, d'une certaine combinaison de la masse, de la vitesse et de la distance parcourue par les corps qui composent le système mécanique. Pourquoi ces quantités devraient-elles être les quantités qui représentent la véritable action de la nature ? Il est possible que cette question soit semblable à une autre que nous avons vu dans le contexte de la formulation contemporaine du principe de la moindre action en mécanique. J'ai expliqué plus haut que l'action prend la forme, dans le contexte de la mécanique contemporaine, de l'intégrale de la différence entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle totale d'un système mécanique (cette différence correspond au *lagrangien* du système mécanique dont il est question). Mais le lagrangien n'est pas le même dans tout système physique. Sa forme mathématique particulière dépend des forces qui sont présentes et de la configuration du système, notamment. La certitude des résultats obtenus par l'usage du principe de la moindre action repose ainsi en partie sur les principes par lesquels nous déterminons le lagrangien d'un système physique.

Maupertuis donne-t-il de telles raisons pour justifier la quantité qu'il prend pour l'action ? Panza (1995) croit que non. Il croit que la quantité que Maupertuis prend pour l'action dans chaque système mécanique est spécieuse, qu'elle n'est pas justifiée autrement que par le simple fait qu'il s'agit dans chaque système différent de la quantité qui permet de dériver par une application directe du principe de la moindre action les lois qu'il tente d'unifier. Panza trouve problématique l'imprécision de la notion d'action de Maupertuis, non seulement parce qu'il n'est pas évident pourquoi Maupertuis pose qu'elle doit être le produit de la masse par la vitesse par la distance parcourue, mais également parce qu'il prend une quantité différente pour l'action selon le problème et (selon Panza) sans l'expliquer. Au final, ce ne serait rien de moins que l'imprécision de la notion d'action qui donnerait au principe de Maupertuis tout son pouvoir unificateur, et rien d'autre :

Si ces objections sont tout à fait inévitables, Maupertuis ne pouvait pas répondre sans perdre la principale richesse qu'il attachait à son principe, sa grande portée cosmologique, sa puissance métaphysique, son pouvoir explicatif du monde. Il ne peut ainsi rien faire d'autre qu'adapter son énoncé aux différents exemples qu'il considère au moyen de différentes interprétations

choisies *ad hoc*, de manière à obtenir des résultats déjà connus. (Panza, 1995, p. 478)

Panza partage donc les inquiétudes exprimées par les problèmes E.1 et E.2 ci-haut. Mais ce n'est pas tout. Il ne trouve aucune preuve adéquate chez Maupertuis du principe de la moindre action : « En dépit de la généralité de l'énoncé, Maupertuis ne fournit aucune justification, se limitant à relier le principe à la sagesse de Dieu et à en donner trois applications » (Panza, 1995, p. 478). Je tenterai de donner suffisamment de raisons de croire que la position de Panza est exagérée, et qu'en fait les trois problèmes E.1, E.2 et E.3 concernant la justification de la notion d'action ainsi que du principe de la moindre action ne sont pas sans réponse.

Si Panza avait raison, toutefois, nous aurions bien du mal à voir en quoi le principe de la moindre action peut soutenir l'une des trois hypothèses H.3.1, H.3.2 et H.3.3 à propos de la possibilité d'acquérir une connaissance physique d'une manière qui ne dépend pas entièrement de l'expérience. Nous voulions trouver des cas de connaissances physiques qui répondent à au moins l'une de ces trois propositions. Concernant H.3.1 et H.3.2, il faudrait voir si la connaissance des causes des phénomènes peut être donnée à partir d'une application du principe de la moindre action. Mais si l'usage du principe de la moindre action est complètement *ad hoc*, comment peut-il permettre de connaître quelque cause que ce soit ? Pour supporter l'acquisition d'une connaissance physique, la quantité que nous prenons pour l'action ainsi que le principe lui-même doivent pouvoir être justifiés indépendamment des phénomènes à propos desquels nous souhaitons acquérir une connaissance.

Section 2.3. La source du pouvoir explicatif du principe de la moindre action

J'ai déjà suggéré que Maupertuis détermine la quantité d'action dans chaque système physique en considérant la nature du problème dont il est question pour déterminer le changement qui doit se produire dans l'univers pour qu'un certain phénomène soit observé. Nous avons également déjà vu que Maupertuis, sans donner de raison, croit que la quantité d'action dans divers systèmes mécaniques devrait généralement dépendre de trois paramètres physiques fondamentalement liés à la quantité qui, selon lui, doit faire l'objet de l'économie de la nature : la masse, la vitesse et la distance parcourue. Je crois que certains doutes de Panza peuvent être dissipés si l'on s'attarde pendant quelques instants à la détermination

de l'action de systèmes mécaniques dans la formulation contemporaine de la mécanique classique. La résolution d'un problème de mécanique à l'aide du principe de la moindre action repose sur la formulation *lagrangienne* de la théorie. Il n'est pas nécessaire de donner une description complète de la formulation lagrangienne de la mécanique classique. Il suffit de reconnaître que le point de départ de toute solution est une fonction qui représente la configuration d'un système mécanique et sur laquelle le principe de la moindre action opère : cette fonction, c'est le lagrangien. Or, le lagrangien d'un système mécanique n'est pas déterminé en fonction de la trajectoire que l'on souhaite déduire de l'application du principe de la moindre action. Il y a des méthodes indépendantes des résultats de l'application du principe de la moindre action pour déterminer le lagrangien d'un système. Ces méthodes, je soutiens, ne sont pas si différentes de celle que Maupertuis utilise pour déterminer la quantité d'action dans chacun des trois problèmes de mécanique qu'il résout.

Nancy Cartwright dans *Models as Mediators* présente une question semblable à la question concernant la justification de la quantité d'action prise par Maupertuis, mais dans le contexte de la mécanique quantique. S'il ne s'agit pas de la mécanique classique, il n'en reste pas moins que les éléments centraux de son argument s'appliquent aussi bien à celle-ci. Il se trouve en effet qu'en mécanique quantique, une fonction semblable au lagrangien de la mécanique classique sert essentiellement à représenter la configuration physique des systèmes quantiques et sur laquelle est appliquée une loi dynamique pour déterminer les solutions des problèmes que nous examinons. Il s'agit du *hamiltonien* d'un système quantique (voir par exemple (Townsend, 2012, pp. 111-136)). Pour résoudre un problème, il faut d'abord spécifier le hamiltonien du système de départ, puis y appliquer les lois dynamiques de la mécanique quantique. Cartwright explique que le hamiltonien d'un système quantique particulier peut bien être choisi sans justification indépendante, *simplement* pour obtenir – une fois que la loi dynamique lui est appliquée – un résultat que nous connaissons déjà. Par exemple, il est possible que nous connaissions le comportement de certains phénomènes par l'observation, sans que nous connaissions auparavant le hamiltonien du système en question. Il serait alors possible de construire un hamiltonien *simplement* pour qu'une application directe des lois dynamiques de la mécanique quantique donne un résultat qui correspond au phénomène que nous avons observé.

Il est toutefois possible de procéder différemment. Il est possible de déterminer le hamiltonien sur la base de principes théoriques. Et c'est cette détermination basée sur des principes qui

permet d'établir certaines connaissances physiques avec la certitude caractéristique de la connaissance scientifique :

Some theoretical treatments of empirical phenomena use ad hoc Hamiltonians. But these are not the nice cases that give us really good reasons to believe in the truth of the theory. For this we need Hamiltonians assigned in a principled way; and for quantum mechanics as it is practiced that means ones that are licensed by principles of the theory – by bridge principles. (Cartwright, 1999, p. 265)

Les principes-ponts (*bridge principles*) sont donc ces principes qui – entre autres choses – permettent de déterminer, d'une manière qui n'est pas *ad hoc*, le hamiltonien de certains systèmes quantiques. Que sont-ils ? Cette question nous intéresse puisque sa réponse pourrait permettre d'attribuer à Maupertuis un raisonnement semblable qui éviterait la critique de Panza. Pour bien comprendre la notion et le rôle d'un principe-pont, il faut prendre quelque temps pour décrire les modèles interprétatifs et les modèles représentatifs, ainsi que leur relation avec la réalité qui nous entoure et qui constitue l'objet de la connaissance physique telle que nous l'entendons jusqu'ici.

La théorie des modèles veut expliquer la relation entre les concepts abstraits des théories et le monde qui nous entoure. Les modèles *représentatifs* sont des modèles qui sont construits à partir des théories pour représenter un arrangement réel de choses qui appartiennent au monde qui nous entoure (Cartwright, 1999, 242). Ils nous permettront d'utiliser nos théories pour faire des prédictions qui sont utiles puisqu'une correspondance avec le monde observable a été établie. Ces prédictions pourraient nous permettre, par exemple, de corroborer une théorie. Or, les modèles représentatifs contiennent des termes abstraits qui ne correspondent directement à rien qui n'existe dans le monde réel qui nous entoure. C'est pourquoi, afin de pouvoir être utilisés pour décrire des systèmes physiques réels, les modèles représentatifs (qui sont construits à partir des termes abstraits des théories) dépendent d'un autre type de modèle. Les modèles *interprétatifs* sont des modèles concrets qui décrivent les termes abstraits de la théorie :

In these cases the assignment of forces and fields is determined by specific interpretative models involving specific mass or charge distributions and their circumstances. The abstract terms 'force' and 'field' require specific kinds of concrete models to apply wherever they do. [...] 'Force', then, is abstract relative to mechanics; and being abstract, it can only exist in particular mechanical models. This is why interpretative models and bridge principles are so important in physics. Abstract terms are fitted out by the concrete descriptions provided by interpretative models. And it is the bridge principles that assign

concrete interpretative models to the abstract concepts of physics theories.
(Cartwright, 1999, p. 257)

Nous voyons émerger un lien important entre le principe-pont et la capacité pour une théorie de fournir de l'information physique (en d'autres mots, d'être *utile* afin de prédire le comportement des phénomènes). Les principes-ponts sont des principes qui font partie des théories, et ils permettent la formulation de modèles interprétatifs – eux-mêmes nécessaires pour établir un lien entre les concepts abstraits de la théorie et le monde réel qui nous entoure et qui est l'objet de la connaissance physique telle que je l'ai décrit dès le début du travail. Le principe-pont, nous dit Cartwright, permet entre autres de justifier la quantité qui est prise pour le hamiltonien d'un système quantique. Comment ? Nous le verrons bientôt. Mais sans le principe-pont, la désignation du hamiltonien d'un système est *ad hoc*, et étant *ad hoc* ne peut pas fonder l'acquisition de connaissance physique par elle-même. Le hamiltonien qui est déterminé de manière *ad hoc* ne permet pas de découvrir quoi que ce soit de nouveau, alors que le hamiltonien qui est déterminé à partir de principes théoriques permet pour le moins d'étudier les prédictions de la théorie. Encore mieux, dans certains cas il peut permettre d'*expliquer* des phénomènes en désignant les mécanismes qui permettent de fournir ces explications.

Je reviens, finalement, à la question la plus importante en ce qui a trait aux principes-ponts. Que sont-ils, exactement, et comment permettent-ils de justifier la formulation particulière du hamiltonien d'un système quantique donné ? Les concepts abstraits avec lesquels est formulée une théorie ne permettent pas directement d'en tirer des connaissances à propos du monde réel qui nous entoure. Il nous faut un moyen de comprendre ces concepts abstraits d'une manière à ce qu'ils correspondent avec les systèmes réels à propos desquels nous souhaitons acquérir certaines connaissances. C'est le rôle des principes-ponts :

[Given a mechanical system composed of two bodies under a gravitational potential.] The theorems of classical mechanics will provide us with a description of how this body moves. We may not be able to tell which theorem we want, though, for the properties described in the theory do not match the vocabulary with which our system is presented. That's what bridge principles are for. 'If the force on a moving body of mass m is GmM/r^2 , then the body will move in an elliptical orbit $1/r = 1 + e \cos\phi$ (where e is the eccentricity).' To establish the relevance of this theorem to our initial problem we need a bridge principle that tells us that the gravitational force between a large body of mass M and a small mass m is of size GmM/r^2 . (Cartwright, 1999, p. 246)

Le principe-pont nous donne la correspondance nécessaire entre le concept abstrait de force et les quantités qui correspondent concrètement à des paramètres directement accessibles des

systèmes physiques réels (comme la masse et la distance). De la même manière, dans le cas d'un système quantique pour lequel nous voulons déterminer, d'une manière bien justifiée, le hamiltonien, un principe-pont nous donnera la correspondance entre les termes que nous devrions inclure dans le hamiltonien et les caractéristiques du système réel auquel il doit correspondre. Et cette assignation n'est pas arbitraire ni *ad hoc*, puisqu'elle est fondée sur notre compréhension des concepts qui font partie de la théorie de la mécanique quantique et qui sont interprétés d'une manière cohérente d'un modèle à l'autre grâce aux principes-ponts.

Voyons maintenant comment les principes-ponts peuvent nous permettre de comprendre la critique de Panza, qui prétend que ce n'est que la vacuité de la notion d'action de Maupertuis qui lui donne son pouvoir explicatif. Il ne fait aucun doute que Maupertuis est économe dans les explications qu'il donne pour justifier la quantité qu'il prend comme l'action dans chacun des trois problèmes de mécanique que nous avons vus à la dernière section. En particulier, il n'est pas évident comment il peut répondre aux questions (E.1) et (E.2), sans quoi nous aurions davantage de raisons de croire que la quantité d'action que Maupertuis choisit dans chacun des problèmes est en effet *ad hoc*. Or, dans ce cas, comment pourrions-nous dire que le principe de la moindre action permet d'acquérir de la connaissance physique ? Pour en connaître davantage quant aux mécanismes qui causent ou expliquent les phénomènes, il faut que la quantité que Maupertuis prend pour l'action soit justifiée indépendamment des résultats des calculs qu'il souhaite obtenir. Le fait-il ? Ce n'est pas évident. Les trois quantités fondamentales qui, selon lui, composent l'action (la masse, la vitesse et la distance) sont des quantités concrètes, que nous pouvons faire correspondre sans problème avec les systèmes physiques réels. Mais cette correspondance doit être basée sur des principes, elle ne peut pas être arbitraire. La question, c'est de savoir pour quelles raisons c'est à partir de ces quantités que pour Maupertuis l'action de tout système mécanique devrait être formulée. Mais ce problème n'est pas si différent du problème de la formulation du hamiltonien d'un système quantique à propos duquel Cartwright écrit. Il n'est pas non plus différent du problème, dans la formulation contemporaine de la mécanique classique, de la formulation du lagrangien d'un système mécanique. Ce que le travail de Cartwright nous rappelle, c'est que pour que la théorie puisse nous informer sur les mécanismes qui expliquent certains phénomènes, et pour pouvoir faire des prédictions à partir de la théorie, la quantité d'action sur laquelle est appliqué le principe de la moindre action doit être construite à partir de principes théoriques (les principes-ponts) qui s'appliquent de manière cohérente d'un modèle à l'autre. Or, il n'est pas évident que ce ne soit pas le cas de Maupertuis. L'assignation de l'action comme d'une certaine combinaison de la masse, de la vitesse et de la distance s'applique à tous les

phénomènes de la mécanique, et même à son application du principe de la moindre action à l'optique. Et elle s'applique selon un principe cohérent : que la forme de la combinaison soit déterminée par ce que nous considérons être le changement nécessaire dans l'univers pour la production d'un phénomène. C'est peut-être ici que la procédure de Maupertuis peut sembler *ad hoc*.

La question déterminante qu'il nous faut répondre pour savoir si le principe de la moindre action peut participer à la production de connaissances physiques, c'est (E.1). Il nous faut une manière fondée sur des principes théoriques pour déterminer le changement nécessaire dans l'univers pour qu'un phénomène se produise. Évidemment, comme Panza le soulève avec véhémence, Maupertuis nous donne peu de détails sur les raisons à partir desquelles il détermine ce changement. Mais je ne crois pas que la méthode de Maupertuis soit *nécessairement ad hoc*. Il détermine l'action à partir, d'une part, des quantités concrètes que sont la masse, la vitesse et la distance, et d'autre part de ce qu'il considère être le changement nécessaire pour qu'un phénomène se produise. Mais pourquoi ce changement ne pourrait-il pas être déterminé sur la base de principes théoriques ? Ce que Maupertuis fait lorsqu'il tente d'évaluer le changement nécessaire pour qu'un phénomène se produise pourrait être comparable à la construction de modèles interprétatifs et représentatifs. Le modèle représentatif sert à faire une prédiction, à représenter un système physique réel en utilisant un modèle interprétatif pour fixer la correspondance entre les termes théoriques abstraits et les caractéristiques du système physique réel. C'est peut-être le rôle qu'occupe le schéma à la figure 2.4. Comme je l'ai expliqué à la section précédente, Panza croyait que la détermination de l'action de Maupertuis était *ad hoc* puisque pour lui, le choix de l'action de Maupertuis a été fait *simplement* pour arriver à dériver les lois de la conservation de la quantité de mouvement et des forces vives (des résultats déjà connus). En particulier, Panza ne prétend pas que le choix de l'action de Maupertuis soit fait *simplement* pour dériver les trajectoires qui sont représentées à la figure 2.4. Or, ces trajectoires sont le résultat de l'application directe du principe de la moindre action sur la quantité qu'il prend pour l'action du système, et c'est ce que Maupertuis devrait viser s'il déterminait l'action de manière complètement *ad hoc*. Lorsque Maupertuis cherche à déterminer le changement nécessaire dans l'univers pour qu'un phénomène se produise, il est envisageable qu'il s'adonne à un travail qui est plus proche de la construction d'un modèle représentatif qu'à la construction d'une quantité d'action *ad hoc*.

Sans vouloir faire l'argument que la procédure de Maupertuis corresponde effectivement à la construction de modèles, je crois avoir montré dans cette section qu'il n'est pas si évident que le pouvoir explicatif que Maupertuis accorde au principe de la moindre action ne soit dû à rien d'autre que l'imprécision d'une notion d'action totalement spéieuse. Au contraire, s'il est envisageable de concevoir le travail de Maupertuis comme semblable à la construction de modèles représentatifs et interprétatifs, alors il y a une raison de penser que le principe de la moindre action permette l'acquisition de connaissances physiques, soit par l'exposition de mécanismes explicatifs, soit par la possibilité que ces modèles offrent de vérifier certaines idées théoriques. Il reste à voir, toutefois, s'il peut s'y prendre sans avoir recours à l'expérience, ou du moins sans que les connaissances qu'il permet d'acquérir ne doivent leur certitude à rien d'autre que l'expérience.

Références bibliographiques

- Bachelard, Suzanne. 1958. « Maupertuis et le principe de la moindre action ». Publisher: Armand Colin, *Thalès* 9 : 3-36.
- Cartwright, Nancy. 1999. « Models and the limits of theory: quantum Hamiltonians and the BCS model of superconductivity » [en eng]. In *Models as mediators: perspectives on natural and social science*, 1. publ, 241-281. OCLC: 917770020. Cambridge : Cambridge Univ. Press.
- Maupertuis, Pierre-Louis. 1752. « Essai de cosmologie ». In *Les oeuvres de Mr. de Maupertuis*, 3-54. Dresde.
- . 1756a. « Accord des différentes lois de la nature qui avaient jusqu'ici parurent incompatibles ». In *Les oeuvres de Mr. de Maupertuis, nouvelle édition corrigée et augmentée*, 4 : 1-28. Lyon.
- . 1756b. « Loi du repos ». In *Les oeuvres de Mr. de Maupertuis, nouvelle édition corrigée et augmentée*, 4 : 43-68. Lyon.
- . 1756c. « Recherche des lois du mouvement ». In *Les oeuvres de Mr. de Maupertuis, nouvelle édition corrigée et augmentée*, 4 : 29-42. Lyon.
- Morin, David. 2008. *Introduction to classical mechanics: with problems and solutions*. OCLC: ocn154682282. Cambridge, UK ; New York : Cambridge University Press.
- Neuenschwander, Dwight E. 2017. *Emmy Noether's wonderful theorem*. Revised and updated edition. OCLC: ocn961410174. Baltimore, Md : Johns Hopkins University Press.
- Panza, Marco. 1995. « De la nature épargnante aux forces généreuses : le principe de moindre action entre mathématiques et métaphysique. Maupertuis et Euler, 1740-1751 » [en fr]. *Revue d'histoire des sciences* 48 (4) : 435-520. <https://doi.org/10.3406/rhs.1995.1240>.
- Townsend, John. 2012. *A Modern Approach to Quantum Mechanics*. Second Edition. Mill Valley : University Science Books.

Chapitre 3

Des principes physiques non empiriques ?

Section 3.1. La preuve métaphysique du principe de la moindre action

Pour répondre à la troisième inquiétude que j'ai soulevée au chapitre précédent, il faut voir de quelle manière Maupertuis justifie le principe de la moindre action. Notons dès maintenant la justification métaphysique que Maupertuis donne à son principe fût rejetée aussitôt que l'on a constaté que l'action est, dans certains systèmes mécaniques, loin d'être minimale : elle est plutôt parfois dépensée au maximum. Mais Maupertuis n'en savait rien. Qu'est-ce qui lui faisait penser que la nature doit minimiser sa dépense d'action dans la production des phénomènes ? Comme je l'ai indiqué au chapitre précédent, la notion d'action de Maupertuis n'est pas définie à l'avance en termes mathématiques. C'est une notion qui au départ est imprécise, et qu'il introduit en même temps que le principe de la moindre action. L'un et l'autre sont indissociables : le principe de la moindre action pose qu'il existe une certaine quantité, qu'il faut comprendre comme étant la dépense que la nature souhaite minimiser dans la production des phénomènes. Cette dépense *est* l'action. Pour quelles raisons Maupertuis croit-il que son principe est suffisamment certain pour être au fondement de la mécanique ? L'argument qu'il donne à cet égard, dans *Essai de cosmologie*, fut critiqué par Panza. Voici l'argument. Parlant de la justification du principe de la moindre action, Maupertuis pense à un procédé en trois étapes :

J'ai cru plus sûr et plus utile de déduire ces lois des attributs d'un Être tout puissant et tout sage. Si celles que je trouve par cette voie, sont les mêmes

qui sont en effet observées dans l'Univers n'est-ce pas la preuve la plus forte que cet Être existe, et qu'il est l'auteur de ces lois ? (Maupertuis, 1750, p. 40)

D'abord, il faut, d'une manière ou d'un autre, déduire le principe de la moindre action à partir d'une propriété fondamentale de l'Être tout puissant et tout sage. C'est l'étape qui donne à cette preuve son caractère résolument métaphysique. Ensuite, il faut dériver de ce principe les lois qui décrivent les phénomènes observables. Si, finalement, celles-ci correspondent aux phénomènes qui sont effectivement observés, alors, croit-il, nous aurions une suffisamment bonne justification du principe de la moindre action. Si P est l'Être suprême ayant certaines propriétés, Q est le principe de la moindre action, alors l'argument a la forme suivante :

$$P \rightarrow Q$$
$$Q$$
$$\text{Donc } P$$

Il ne s'agit de toute évidence pas d'un argument déductif. Comment, dans ce cas, croire qu'une telle preuve puisse justifier un principe qui veut être au fondement de toute la science mécanique ? Giorgio Tonelli donne une interprétation charitable de la preuve de Maupertuis. Selon lui, l'existence de l'Être suprême ayant certaines propriétés n'est au départ qu'une hypothèse, de laquelle on déduit le principe de la moindre action. C'est la *coïncidence surprenante* entre la conséquence de cette hypothèse et les lois qui décrivent le comportement des phénomènes qui donnerait à l'hypothèse de départ un certain degré de certitude. Ce n'est sans doute pas l'argument scientifique le plus convaincant. Pourquoi devrions-nous considérer que la science mécanique se fonde sur un principe possédant une justification si douteuse, alors que nous pouvons en fait le déduire à partir des lois de Newton ? Cette difficulté rappelle la distinction maupertuisienne entre les deux types de principes, que nous avons vue au début du deuxième chapitre.

Nous y avons vu que notre esprit est doublement limité : (1) il est limité dans sa capacité à décrire les phénomènes à partir des causes efficientes (ou des principes du premier type), et (2) il est limité dans sa capacité à donner une démonstration des principes du deuxième type. La première limite le pousse à rechercher des principes physiques du deuxième type, mais la deuxième rend cette tâche risquée. Notre esprit est en effet incapable de voir avec

évidence dans la nature la sagesse de Dieu en elle-même, bien qu'il puisse voir certaines de ses marques, et bien qu'il puisse voir avec évidence la vérité des premiers principes. Ceci explique pourquoi il n'est pas suffisant de simplement supposer l'existence de Dieu. Ce n'est pas suffisant puisque notre esprit ne nous permet pas de connaître avec évidence les principes qui représentent sa sagesse. Nous pouvons cependant voir les marques de cette sagesse dans l'univers, et c'est sur cette idée que la méthode de recherche de Maupertuis se base. Dans l'avant-propos de l'Essai de cosmologie, il considère deux manières de rechercher l'être suprême : soit dans les lois de la nature ; « dans ces règles universelles, selon lesquelles le mouvement se conserve, se distribue, ou se détruit (Maupertuis, 1752, p.12) », soit par une preuve en l'apparence inductive :

J'ai cru plus sûr et plus utile de déduire [les] lois des attributs d'un Être tout puissant et tout sage. Si celles que je trouve par cette voie, sont les mêmes qui sont en effet observées dans l'Univers, n'est-ce pas la preuve la plus forte que cet Être existe, et qu'il est l'auteur de ces lois ? (Maupertuis, 1752, p. 13)

Maupertuis préfère montrer l'existence de l'être suprême par la preuve essentiellement a posteriori que j'ai présenté. L'argument n'est pas déductif, mais ça ne devrait pas surprendre étant donné l'incapacité qu'a notre esprit de voir l'évidence des principes du deuxième type, qui représentent la sagesse de l'être suprême.

Comme je l'ai plusieurs fois souligné, la notion d'action et le principe de la moindre action sont indissociables. L'action est à l'origine définie par Maupertuis à l'intérieur de la stipulation du principe de la moindre action. Le principe de la moindre action n'est ce qu'il est que dans la mesure où nous prenons la quantité d'action comme étant cette quantité qui fait l'objet de l'économie de la nature. La justification du principe de la moindre action doit donc inclure une notion d'action qui correspond à l'hypothèse d'économie. Comme je l'ai déjà montré, Panza (1995) suggère que le choix de Maupertuis de la forme particulière de l'action dans les trois phénomènes mécaniques à l'étude dans *Recherche des lois du mouvement* est spécieux, et il s'agit de la raison principale pour laquelle il refuse la preuve métaphysique de Maupertuis. La définition générale de l'action que donne Maupertuis ne semble en effet pas suffisamment précise pour être directement applicable dans différents phénomènes. Selon sa définition, l'action correspond au changement nécessaire pour qu'un phénomène se produise, et est le produit de la masse des corps par leur vitesse et par la distance qu'ils parcourent. Mais comme Panza (1995, p. 478) l'explique, il faut encore savoir quelle vitesse et quelle distance considérer dans le calcul de l'action, et comment prendre la somme des quantités

d'action dans un système comprenant plusieurs particules. Selon Panza, Maupertuis choisirait la forme précise de l'action dans les exemples des chocs de corps élastiques et durs spécifiquement pour obtenir par une courte dérivation les principes de conservation de la quantité de mouvement et des forces vives. La généralité du principe de moindre action – permettant d'unifier l'explication des trois phénomènes de la mécanique – ne serait due qu'à sa pauvreté mathématique, celui-ci ne définissant pas l'action suffisamment précisément.

Mais est-ce que le pouvoir descriptif du principe de moindre action de Maupertuis n'est effectivement rien d'autre que le résultat d'une formulation trop imprécise ? Pour répondre à cette question, nous pouvons nous tourner vers la justification métaphysique du principe de moindre action, que Maupertuis donne dans l'Essai de cosmologie. Nous pouvons noter dès à présent que le principe de moindre action n'est pas aussi vague que le principe métaphysique que Maupertuis attribuait à Fermat, et selon lequel la nature agit par les voies les plus simples. La critique de Panza sur la spéciosité de la détermination de l'action de Maupertuis ne semble pas étrangère à ce dernier :

Cependant, ceux qui ne sont pas assez instruits dans ces matières, ont crû que je ne faisais ici que rebattre l'ancien Axiome qui porte, que la Nature agit toujours par les voies les plus simples. Mais cet Axiome, qui n'en est un qu'autant que l'Existence de Dieu est déjà prouvée, est si vague que personne n'a encore su dire en quoi il consiste. (Maupertuis, 1752, Préface NP p. 24)

Dans cet extrait tiré de la préface de l'Essai de cosmologie, Maupertuis évoque deux caractéristiques que devrait avoir son principe de moindre action. D'abord, celui-ci ne devrait pas présupposer l'existence de Dieu, et ensuite, il devrait être suffisamment précis pour que l'on sache comment l'appliquer aux problèmes de mécanique. La première caractéristique peut expliquer ce qui apparaît pour Panza comme la pauvreté mathématique et la spéciosité du principe de moindre action : Maupertuis reconnaît que son principe doit être une conséquence des attributs de l'être suprême, mais comme je le montrerai dans les prochains paragraphes, il préfère le fonder par une recherche mathématique a posteriori plutôt que par une simple supposition. Nous pouvons dire qu'il s'agit pour Maupertuis d'une façon d'éviter de répéter l'erreur de Fermat, et de succomber au danger de la détermination des causes finales.

Cherchant une réponse face à la critique de Panza, j'ai montré dans les derniers paragraphes que c'est parce que Maupertuis cherche à éviter de présupposer l'existence de Dieu, et en raison de la double limite de notre esprit, que le principe de moindre action ne peut tirer

son pouvoir descriptif que d'une certaine pauvreté mathématique. Mais je terminerai en remarquant que cette pauvreté n'est pas entière, puisqu'il faut tout de même savoir comment appliquer le principe (c'est la deuxième caractéristique). Dans *Recherche des lois du mouvement*, Maupertuis tire la forme particulière de l'action dans divers systèmes mécaniques non seulement en se servant des lois de conservation comme guide, mais d'abord en utilisant le critère métaphysique selon lequel l'action doit correspondre au changement nécessaire dans l'univers pour qu'un phénomène se produise. La compréhension d'un phénomène permet de déterminer ce changement, qui par exemple dans le cas des chocs de corps n'est que la différence entre les vitesses et les distances parcourues en une unité de temps avant et après la collision. Ce changement nous donne donc la forme particulière de la vitesse et de la distance que nous devons introduire dans la formule de l'action, qui est le produit d'une masse par une vitesse par une distance parcourue.

Section 3.2. Le virage positiviste et la téléologie

Nous pouvons voir dans l'essai de Suzanne Bachelard (1958) deux aspects de l'évolution du principe de moindre action depuis sa formulation par Maupertuis jusqu'à celle de Lagrange dans sa mécanique variationnelle. D'abord, un tournant positiviste se serait effectué, alors que Lagrange formula et démontra le principe sans en faire la conséquence des attributs de l'être suprême, c'est-à-dire sans avoir recours à une notion d'économie de la nature. Le deuxième aspect concerne l'évolution du finalisme mécanique devant ce tournant dans la démonstration du principe de moindre action. Selon Bachelard, la téléologie du principe passerait d'une téléologie métaphysique chez Maupertuis à une téléologie positiviste chez Lagrange. La téléologie métaphysique est caractérisée par la soumission des phénomènes au dessein d'un être suprême dont l'un des attributs est la minimisation de sa dépense. La téléologie positiviste est quant à elle caractérisée par le caractère global des problèmes posés et adressés par le principe de la moindre action. Cette forme de téléologie place donc les causes finales dans l'usage du principe pour la résolution des problèmes, plutôt que dans les attributs de l'être suprême. Nous verrons qu'il y a deux différences importantes entre la démonstration du principe qu'Euler donne et celle de Maupertuis, et que ces différences peuvent nous permettre de qualifier le tournant dans la démonstration du principe d'un tournant positiviste. Nous terminerons en voyant pourquoi, selon Bachelard, ce tournant élimine les causes finales de la démonstration du principe de moindre action, mais qu'il reste bien une place – dans l'usage du principe – pour celles-ci, faisant la téléologie du principe d'Euler une téléologie positiviste au sens où Bachelard l'entend.

Les limites de notre esprit nous obligeraient à donner une démonstration d'abord métaphysique du principe de moindre action : nous supposons que l'existence de l'être suprême ayant certains attributs implique la vérité du principe de la moindre action, et puis nous cherchons finalement à vérifier si ce principe correspond aux lois de la nature que nous pouvons observer. Dans cette section, je montrerai qu'Euler offre une démarche alternative permettant de démontrer le principe de moindre action. [différence entre les justifications positivistes chez Panza et Bachelard] Cette démarche est d'abord fondée sur une recherche mathématique, plutôt que sur une recherche métaphysique, et pour cette raison nous pourrions qualifier sa démarche d'une justification positiviste du principe de moindre action. Je proposerai finalement qu'à ce tournant dans la justification du principe de moindre action corresponde une nouvelle place pour les causes finales dans la mécanique. Les phénomènes ne sont plus soumis à la sagesse d'un être suprême qui minimise sa dépense de l'action, mais le principe démontre toujours qu'ils sont soumis à la nécessité d'un arrangement particulier.

À l'image des deux manières de trouver les causes des phénomènes énumérées par Maupertuis, soit par la considération des causes efficientes et des causes finales, Euler fait état de deux méthodes permettant de résoudre les problèmes de la mécanique. Il s'agit des méthodes directes et indirectes :

Par là on voit qu'il doit y avoir une double méthode de résoudre les problèmes de Mécanique : l'une est la méthode directe, qui est fondée sur les lois de l'équilibre, ou du mouvement ; mais l'autre est celle dont je viens de parler, où sachant la formule, qui doit être un maximum, ou un minimum, la solution se fait par le moyen de la méthode de maximis & minimis. La première fournit la solution en déterminant l'effet par les causes efficientes ; or l'autre a en vue les causes finales, et en déduit l'effet : l'une et l'autre doit conduire à la même solution, et c'est cette harmonie, qui nous convainc de la vérité de la solution, quoique chaque méthode doive être fondée sur des principes indubitables. (Euler, 1748, p. 152)

La méthode directe correspond plus ou moins à la détermination des phénomènes par les principes du premier type de Maupertuis. Puisqu'il s'agit de trouver les solutions de problèmes de mécanique par leurs causes efficientes, les lois de l'équilibre et du mouvement dont Euler parle correspondent aux principes du premier type de Maupertuis. La méthode indirecte quant à elle correspond plus ou moins à la détermination des phénomènes par les principes du deuxième type de Maupertuis. Plus précisément, elle correspond à la détermination des solutions des problèmes de mécanique par l'usage du principe de moindre action chez Maupertuis, bien qu'ici Euler ne fasse pas référence à l'action de la nature, mais plutôt à une certaine fonction indéfinie *a priori*, et qui est un minimum ou un maximum. L'application du

critère mathématique de stationnarité à cette fonction (qui remplace le critère métaphysique d'économie dans la dépense de la nature de Maupertuis) donne, par sa méthode des maximas et des minimas, les solutions des problèmes mécaniques.

Comme Panza (1995, p. 483) le remarque, la méthode indirecte d'Euler ne fait pas appel à la même notion d'action que celle de Maupertuis. Ce dernier définissait l'action comme le changement nécessaire dans la nature pour qu'un phénomène se produise correspondant au produit de la masse des corps par leur vitesse par la distance parcourue. Euler, quant à lui, ne donne pas un critère permettant de déterminer l'action dans des systèmes physiques. Il suppose plutôt l'existence d'une fonction, dans chaque système physique, qui sera un minimum ou un maximum : « On n'aura plus la moindre raison de douter, que dans tous les mouvements, par quelques forces qu'ils soient produits, il n'y ait toujours une certaine formule, dont la valeur soit la plus petite, et par laquelle sera représentée la quantité d'action. » (Euler, 1748, p. 150) La découverte de cette fonction n'est cependant pas simple : Euler dans le même article remarque « [qu']il est souvent très difficile de découvrir la formule, qui doit être un maximum, ou minimum, et par laquelle la quantité d'action est représentée » (Euler, 1748, p. 152), et que cette recherche risque davantage d'appartenir à la métaphysique qu'à la physique. L'admission de cette difficulté n'est pas sans rappeler l'admission de Maupertuis quant au danger de la considération des causes finales en physique et dans la détermination des principes du deuxième type. La différence est qu'Euler ne recherche pas une unique formule représentant la véritable dépense de la nature dans tous les systèmes, et cette liberté supplémentaire s'avère utile puisqu'elle facilite l'élaboration d'une méthode de recherche plus rigoureuse.

Cette méthode de recherche permettra de trouver la formule représentant l'action dans divers systèmes physiques, mais également elle permettra de justifier le principe de moindre action. Elle se déroule en trois étapes. D'abord, la méthode directe, soit l'usage des causes efficientes pour résoudre les problèmes de physique, permettrait de trouver les solutions des problèmes de mécanique. Ensuite, connaissant les formules de ces solutions, il devrait être plus facile de découvrir une fonction – dont on suppose déjà l'existence (mais pas la forme particulière) dans tous les systèmes physiques – qui doit être minimale ou maximale. Puis finalement, la forme mathématique de cette fonction nous servirait de guide pour trouver une preuve métaphysique de sa minimalité ou maximalité :

Or sachant les solutions, que la méthode directe nous fournit, il ne sera pas difficile de deviner des formules, qui étant supposées des maxima, ou minima,

conduisent aux mêmes solutions. Par ce moyen nous connaissons a posteriori ces formules qui expriment la quantité d'action, et alors il ne sera plus si difficile d'en démontrer la vérité par les principes connus de la métaphysique. (Euler, 1748, p. 152)

Cette méthode est singulièrement différente de la méthode par laquelle Maupertuis entend justifier le principe de moindre action. Celui-ci en effet supposait que l'existence de l'être suprême implique certaines lois de la nature déterminées par le principe de moindre action, puis il montrait que ces lois correspondent aux lois observées, accordant ainsi à son hypothèse un certain degré de certitude. Son argument est d'abord métaphysique, et la recherche mathématique (c'est-à-dire l'application du principe à des problèmes de mécanique afin d'en vérifier la correspondance avec les phénomènes observés) n'intervient qu'une fois connu le principe de moindre action découlant des attributs d'un être suprême. Chez Euler, les rôles de la recherche métaphysique et de la recherche mathématique sont inversés. Reconnaisant la difficulté inhérente à une recherche métaphysique de la bonne quantité d'action – soucis que Maupertuis partage lorsqu'il affirme la dangerosité de la considération des causes finales en physique – Euler, contrairement à Maupertuis, développe une méthode de recherche répondant spécifiquement et rigoureusement à cette difficulté.

Euler et Maupertuis ont donc deux approches différentes face à la difficulté qui entoure la détermination du principe de moindre action. Le premier cherche à y pallier en basant sa recherche sur la certitude de la méthode directe, et le deuxième cherche à y pallier en ayant recours à un argument qui montre la correspondance entre l'hypothèse de l'être suprême ayant certains attributs et les lois observés dans la nature. Nous pourrions dire qu'il s'effectue un virage positiviste dans la justification du principe de moindre action. Bachelard (1958) qualifie le principe de Maupertuis de téléologie métaphysique, étant donné qu'il repose avant tout sur une recherche fondée dans la métaphysique. Puisqu'Euler fonde d'abord sa démarche sur une recherche mathématique, et puisque sa démarche se base sur l'hypothèse moins forte de l'existence d'une fonction dont la forme n'est pas connue a priori plutôt que celle de l'existence d'un être suprême ayant certains attributs, nous pourrions dire que s'entame dans son travail de 1748 un virage positiviste dans la justification du principe de moindre action.

Hamilton (1833, p. 8) et Bachelard (1958, p. 9) rejettent l'argument métaphysique de Maupertuis sur la base de l'observation selon laquelle la nature, dans certains phénomènes, au lieu de faire l'économie de l'action, la dépense autant qu'elle le peut. Cette observation pose

problème pour la démarche de Maupertuis, lui qui croyait que le seul moyen qu'a notre esprit de découvrir les causes finales, étant donné sa double limite, est de s'attarder à certains phénomènes simples, dont la « simplicité expose entièrement à notre vue » (Maupertuis, 1752, p. 11) leur universalité. Il se trouve que dans certains de ces phénomènes simples, la nature dépense l'action autant qu'elle le peut. Comment alors pourrions-nous arriver à justifier un principe métaphysique selon lequel la nature économise cette quantité? Si cette difficulté est insurmontable et rend la démarche de Maupertuis inadéquate, et que par ailleurs nous adoptons la démarche d'Euler permettant de démontrer le principe de moindre action, quelle place resterait-il pour la considération des causes finales dans les problèmes de la mécanique? Un tournant positiviste dans la justification du principe de moindre action déloge-t-il les causes finales de la mécanique?

Bachelard (1958, p. 9) propose qu'il reste une forme de téléologie qui est caractérisée par le caractère global des problèmes résolus par le principe de moindre action. Les causes finales occupent effectivement un rôle double dans le principe de Maupertuis. D'abord, elles occupent une place dans la justification de Maupertuis du principe, en tant que celui-ci dépend de l'hypothèse téléologique des attributs de l'être suprême. Mais si nous évacuons cette justification de la mécanique, en adoptant plutôt celle d'Euler, il reste tout de même une place pour le finalisme dans l'usage du principe, dans le caractère global des problèmes de mécaniques résolues par la méthode indirecte d'Euler : le principe de moindre action pose que la trajectoire suivie par des corps entre deux extrémités dans un système physique corresponde à celle qui minimise ou maximise une certaine fonction des forces qui agissent sur ces corps. Le principe décrit donc l'agencement nécessaire des différentes forces dans un système donné, et c'est cet agencement qui constitue la finalité des corps. Il n'est cependant pas nécessaire de considérer cet agencement comme la conséquence d'attributs de l'être suprême. En effet, Euler montre qu'il est possible de démontrer que le principe de moindre action n'est qu'une conséquence du principe d'équilibre des forces :

Ayant établi ce principe pour le repos, ou l'équilibre, qu'y a-t-il de plus naturel que de soutenir, que ce même principe ait aussi lieu dans le mouvement de corps, sollicités par de semblables forces? Car si l'intention de la Nature est d'épargner le plus qu'il est possible sur la somme des efforts, il faut qu'elle s'étende aussi au mouvement, pourvu qu'on prenne les efforts, non seulement comme ils subsistent dans un instant, mais dans tous les instants ensemble, que dure le mouvement. (Euler, 1751b, p. 175)

Comme Panza (1995, pp. 507-8) le soutient, ce principe lui-même peut être démontré a priori, à partir d'un axiome selon lequel « toute force agit autant qu'elle le peut. » (Euler, 1751a, p.

248) Ainsi, nous aurions finalement un moyen d'expliquer le principe de moindre action sans avoir recours à une hypothèse téléologique concernant certains attributs de l'être suprême. Le caractère global des problèmes posés par la méthode indirecte conserve cependant une forme de finalisme, mais dans l'usage du principe plutôt que dans sa démonstration, celui-ci qui décrit l'agencement nécessaire de différentes forces agissant dans un système.

Section 3.3. Les différentes formulations de la mécanique classique

La mécanique classique peut être formulée de plusieurs façons différentes, mais toutes en accord avec les lois de la théorie. Parmi ces formulations, deux font l'usage du principe de la moindre action : ce sont les formulations lagrangiennes et hamiltoniennes de la mécanique classique. Mathématiquement, il ne fait aucun doute que ces deux formulations soient différentes. La formulation lagrangienne a la structure d'une variété riemannienne, alors que la formulation hamiltonienne a la structure d'une variété symplectique (North, 2009, p. 31-32). Mais il n'est pas évident qu'elles soient équivalentes d'un point de vue physique, c'est-à-dire si elles représentent précisément la même information à propos du monde réel. Il est certes possible de dériver les équations dynamiques de chacune des formulations de la mécanique classique l'une à partir de l'autre :

[...] Physics books typically state, and go on to prove, an equivalence among the three formulations, by showing that their dynamical equations are all inter-derivable. A typical route is to begin with Newton's laws, derive the Lagrangian and Hamiltonian equations from them, and then show that the derivation can go the other way. (North, 2022, p. 27)

Mais est-ce que la connaissance physique concernant la mécanique classique se limite aux équations dynamiques d'une théorie? North ne pose pas la question de cette manière, mais elle identifie certaines différences qui ne sont pas de simples différences de notation entre les formulations de la mécanique classique :

In all, it seems very much an open question whether the three formulations of classical mechanics are genuinely equivalent, mere notational variants of a single theory, as usually thought. There is a case to be made that the differences are significant enough to render them more like distinct theories, with different accounts of what the physical world is like. (North, 2022, p. 30)

Nous pouvons penser à quelques manières de se demander dans quelle mesure les différences entre les formulations de la mécanique classique permettent de croire qu'elles rendent possible la connaissance de connaissances physiques différentes. Si les trois formulations reposent par

ailleurs sur les mêmes fondements empiriques, alors que différentes formulations permettent l'acquisition de connaissances physiques différentes supporterait l'idée que la connaissance physique puisse ne pas être fondée entièrement sur l'expérience.

Les différences identifiées par North sont des différences mathématiques et métaphysiques. Mais puisque jusqu'ici je n'ai décrit la connaissance physique que comme la connaissance à propos du monde qui nous entoure, il n'est pas exclu que les aspects mathématiques et métaphysiques d'une théorie ne puissent pas permettre d'acquérir une connaissance physique. Margaret Morrison par exemple soutient, dans *Reconstructing Reality*, qu'une méthode mathématique puisse par elle-même apporter de l'information physique, à propos de systèmes physiques réels, qu'il ne serait pas possible d'acquérir avec les outils de la physique qui sont disponibles au même moment (Morrison, 2015, p. 51). Jill North se demande quant à elle si les différentes formulations représentent différentes caractéristiques intrinsèques du monde, ou si elles ne sont pas plutôt des descriptions équivalentes des mêmes caractéristiques intrinsèques du monde (North, 2009, p. 2). Nous verrons les grandes lignes de son argument, et nous verrons que le choix d'une formulation plutôt qu'une autre pour adéquatement représenter la structure du monde peut bien reposer sur des critères non empiriques.

D'abord, North introduit la notion de *structure* comme étant ces caractéristiques intrinsèques aux objets géométriques qui sont invariants sous différentes descriptions (North, 2009, pp. 4-6). Selon elle, la formulation hamiltonienne de la mécanique classique correspondrait à la structure du monde, mais pas la formulation lagrangienne. Son argument suit les étapes suivantes :

- (A) Les structures des formulations lagrangiennes et hamiltoniennes de la mécanique classique sont celles de variétés riemanniennes et symplectiques, respectivement.
- (B) Les variétés symplectiques possèdent moins de structure que les variétés riemanniennes.
- (C) Une formulation possède le moins de structure parmi les formulations de la mécanique classique si et seulement si la structure de cette formulation correspond à la structure de la mécanique classique.
- (D) Si C, alors la structure de la mécanique classique correspond à la structure d'un monde dont la théorie fondamentale est la mécanique classique.
- (E) Conclusion : la structure de la formulation hamiltonienne de la mécanique classique correspond à la structure d'un monde dont la théorie fondamentale est la mécanique classique, et ce n'est pas le cas de la structure de la formulation lagrangienne.

La prémisses A résume un travail mathématique pour décrire les deux formulations comme des variétés riemanniennes (M, g, L) et symplectique (M, ω, X_H) (North, 2009, p. 31-32) . Les deux formulations sont données dans l'espace-état de la mécanique classique, un espace dont chaque point représente les différents états possibles d'un système physique en entier. La prémisses B indique que la formulation hamiltonienne est une formulation moins contraignante de la mécanique classique que la formulation lagrangienne. La prémisses C est une application du rasoir d'Ockham et indique que la formulation représentant la structure de la théorie est celle qui soit la moins contraignante possible. La prémisses D suggère un réalisme de l'espace-état, et North donne trois justifications à cet égard :

- (1.1) Comme les quantités invariantes à propos d'un objet géométrique indiquent sa structure, les quantités physiques invariantes indiquent la structure du monde selon une théorie (North, 2009, pp. 8-9, 31).
- (1.2) Les descriptions non invariantes contiennent des artéfacts d'une convention arbitraire (North, 2009, p. 8, 22).
- (1.3) La structure minimale nécessaire pour formuler de façon covariante une théorie doit pouvoir exister (North, 2009, p. 28).

North conclut donc que la formulation hamiltonienne, parce qu'elle est la structure nécessaire pour formuler la mécanique classique *de façon invariante*, doit correspondre à la structure du monde. Des critères non empiriques viennent justifier, par eux-mêmes, le choix d'une formulation qui représente adéquatement la structure du monde.

L'étape D de l'argument de North pose une forme de réalisme d'espace-état. Mais comme le reconnaît North, l'espace-état ne correspond à aucun aspect du monde qui soit familier, contrairement à l'espace-temps. Swanson et Halvorson (2012) concrétisent ce problème et soutiennent avec des exemples que les symétries dans l'espace-état ne correspondent pas nécessairement aux symétries des systèmes physiques réels dans l'espace-temps.

D'abord (2.1) il existe certaines symétries de l'espace-état de la mécanique classique qui ne sont que des symétries accidentelles de systèmes physiques réels. Par exemple, dans le problème de deux corps de Kepler, si la force centrale dévie de sa forme de $1/r^2$, le vecteur LRL ne sera plus analytiquement conservé et par conséquent le système n'aura plus la symétrie correspondante (North, 2009, p. 8). Cette symétrie était due à la forme particulière de la force gravitationnelle dans ce modèle, et non aux lois universelles de la mécanique classique. On peut donc penser que la formulation de la mécanique classique dans l'espace-état ne

représente pas bien les lois fondamentales de la mécanique classique, et que la structure du monde que représentent les lois fondamentales de la mécanique classique n'est pas bien représentée par la structure de la mécanique classique dans l'espace-état. Il s'agit donc d'une critique de la prémisse D.

Ensuite, (2.2) dans le problème de deux corps de Kepler, le vecteur LRL est une quantité conservée générée par la transformation canonique qui envoie les solutions des équations du mouvement représentant des orbites de même énergie, mais d'excentricité différente les unes sur les autres dans l'espace-état (Swanson et Halvorson, 2012, p. 7). Donc il existe des systèmes symétriques (c'est-à-dire reliés par une transformation canonique) dans l'espace-état, mais qui ne sont pas physiquement équivalents dans l'espace-temps (puisqu'ils ont des orbites d'excentricité différente). Ainsi, les symétries des modèles dans l'espace-état ne correspondraient pas nécessairement à des symétries de systèmes physiques dans l'espace-temps : la structure de la mécanique classique dans l'espace-état ne correspondrait pas nécessairement à la structure réelle de systèmes physiques, ce qui réfuterait la prémisse D.

Finalement, (2.3) les systèmes physiques réels ne sont pas bien représentés par les structures des formulations hamiltoniennes et lagrangiennes, c'est-à-dire (M, ω, M_H) et (M, g, L) respectivement. L'exemple du problème de deux corps de Kepler montre qu'il serait nécessaire d'inclure dans cette structure une carte entre l'espace-état et l'espace-temps (Swanson et Halvorson, 2012, p. 9) : de cette manière seulement pourrions-nous éviter de nous retrouver avec deux systèmes équivalents dans l'espace-état, mais non équivalents dans l'espace-temps. Mais une telle carte ne fait pas partie de la structure minimale nécessaire pour formuler la mécanique classique de façon invariante, ce qui réfuterait la prémisse D.

La critique basée sur les exemples de Swanson et Halvorson repose sur deux problèmes : d'abord que les symétries de modèles dans l'espace-état ne représentent pas nécessairement des symétries de la mécanique classique, et ensuite qu'il existe des symétries dans l'espace-état qui ne correspondent pas à des symétries de systèmes réels dans l'espace-temps. Pour rescaper la prémisse D et conserver l'argument de North voulant que l'une des deux formulations de la mécanique est plus adéquate que l'autre pour représenter la structure du monde, nous pouvons procéder en deux temps.

La solution (3.1) au premier problème serait la suivante : avançons que tous les modèles dans l'espace-état aient une structure en commun, et que c'est précisément cette structure commune à laquelle correspond la structure fondamentale de la mécanique classique. Cette suggestion répond de manière satisfaisante à la critique 2.1 : les symétries accidentelles ne sont pas communes à tous les modèles physiques. Puisqu'elles sont justement accidentelles, elles dépendent de la forme particulière de certains modèles physiques, et sont donc exclues de la structure commune à tous les modèles dans l'espace-état. La solution (3.2) au deuxième problème serait la suivante : il faut faire un compromis entre le réalisme de l'espace-temps et le réalisme de l'espace-état, pour postuler que la structure de la mécanique classique dans l'espace-état existe bien, mais qu'elle décrit une partie différente de la réalité que la structure spatio-temporelle de la mécanique classique. Si c'est le cas, alors l'exemple utilisé par Swanson et Halvorson à la critique 2.2 n'est plus un problème. Si les deux orbites symétriques dans l'espace-état ne correspondent pas à deux orbites physiquement équivalentes dans le monde, ce pourrait être parce que cette symétrie de l'espace-état correspond à une structure de la partie de la réalité différente de celle de l'espace-temps. Cette solution évite d'avoir à postuler une structure supplémentaire dans la formulation de la mécanique classique : contrairement à ce que la critique 2.3 avance, nous n'avons plus à poser de structure qui ne soit pas nécessaire à la formulation invariante de la mécanique classique. La critique 2.3 est donc évitée.

Avec une légère précision, la prémisse D peut incorporer la solution 3.2 pour se prémunir contre les critiques 2.2 et 2.3 : la structure de la mécanique classique, donnée par la structure de sa formulation la plus économe, correspond à une partie de la structure du monde réel. Incorporer la solution 3.1 demande de préciser la prémisse C : une formulation possède le moins de structure parmi les formulations de la mécanique classique et est commune à tous les modèles de systèmes physiques si et seulement si la structure de cette formulation correspond à la structure de la mécanique classique.

Les deux solutions posent toutefois de nouveaux problèmes. Concernant la solution 3.1, il est difficile de concevoir comment créer un répertoire des modèles possibles dans l'espace-état de la mécanique classique. Concernant la solution 3.2, il reste à expliquer le lien entre la structure de la réalité correspondant à l'espace-état et la structure de la réalité correspondant à l'espace-temps. Comment se fait-il que la plupart des symétries dans la structure d'une théorie dans l'espace-état correspondent à la structure de la réalité propre à l'espace-temps plutôt qu'à la structure de la réalité propre à l'espace-état ? Ces deux structures de la réalité sont-elles mutuellement exclusives, de sorte qu'une symétrie correspondant à la structure de

la réalité propre à l'espace-temps ne corresponde jamais en même temps à la structure de la réalité propre à l'espace-état ?

Il y a un autre problème important : comment expliquer que la réalité correspondant à l'état-espace n'ait rien de familier, alors que la réalité correspondant à l'espace-temps l'est ? Les deux peuvent-ils être réels au même titre, ou est-ce que l'une doit correspondre à une réalité plus fondamentale que l'autre ? Dans tous les cas, pour ce qui nous concerne la simple possibilité qu'une solution aux problèmes 2.1 à 2.3 existe et soit compatible avec l'argument de North me semble être une bonne raison de prendre sa conclusion au sérieux. Il faut cependant inclure quelques précisions à la conclusion qui ne changent pas véritablement sa signification : la structure de la formulation hamiltonienne de la mécanique classique qui soit commune à tous les modèles possibles dans l'espace-état correspond à une partie de la structure d'un monde dont la théorie fondamentale est la mécanique classique, et ce n'est pas le cas pour la structure de la formulation lagrangienne.

Références bibliographiques

- Bachelard, Suzanne. 1958. « Maupertuis et le principe de la moindre action ». Publisher: Armand Colin, *Thalès* 9 : 3-36.
- Euler, Leonhard. 1748. « Recherches sur les plus grands et les plus petits qui se trouvent dans les actions des forces ». *Mémoires de l'académie des sciences de Berlin*, 149-188.
- . 1751a. « Essay d'une démonstration métaphysique du principe général de l'équilibre ». *Mémoires de l'académie des sciences de Berlin*, 246-254.
- . 1751b. « Harmonie entre les principes généraux de repos et de mouvement de M. de Maupertuis ». *Mémoires de l'académie des sciences de Berlin*, 169-198.
- Hamilton, William. 1833. « On a General Method of Expressing the Paths of Light, and of the Planets, by the Coefficients of a Characteristic Function ». *Dublin University Review and Quarterly Magazine*, 795-826.
- Maupertuis, Pierre-Louis. 1750. *Essay de cosmologie, par M. de Maupertuis*. [S.I.] MDCCL.
- . 1752. « Essai de cosmologie ». In *Les oeuvres de Mr. de Maupertuis*, 3-54. Dresde.
- Morrison, Margaret. 2015. *Reconstructing Reality: Models, Mathematics, and Simulations*. Oxford Studies in Philosophy of Science. Oxford, New York : Oxford University Press, janvier.
- North, Jill. 2009. « The "Structure" of Physics: A Case Study ». Publisher: Journal of Philosophy, Inc. *The Journal of Philosophy* 106 (2) : 57-88.
- . 2022. « Formulations of Classical Mechanics » [en eng]. In *The Routledge companion to philosophy of physics*, sous la direction d'Eleanor Knox et Alastair Wilson, 21-32. Routledge philosophy companions. New York London : Routledge.
- Panza, Marco. 1995. « De la nature épargnante aux forces généreuses : le principe de moindre action entre mathématiques et métaphysique. Maupertuis et Euler, 1740-1751 » [en fr]. *Revue d'histoire des sciences* 48 (4) : 435-520. <https://doi.org/10.3406/rhs.1995.1240>.
- Swanson, Noel, et Hans Halvorson. 2012. *On North's "The Structure of Physics"* [en en]. Preprint, septembre.

Conclusion

Nous avons vu, tout d'abord, l'argument important de Hume qui explique pourquoi il n'admet pas que la connaissance physique puisse être acquise strictement à partir de méthodes non empiriques. J'ai donné trois manières de le contredire, et par le fait même de supporter la possibilité de la connaissance physique non empirique. Nous pouvions d'abord soutenir que l'expérience ne soit pas suffisante pour permettre la découverte des causes des phénomènes. Nous pouvions également soutenir qu'elle ne soit pas nécessaire pour y arriver. Nous pouvions finalement soutenir que la connaissance physique puisse reposer sur autre chose que la connaissance des causes des phénomènes. Puis nous avons passé le reste du temps à étudier le principe de la moindre action, principalement pour en tirer trois conclusions importantes. D'abord, que sa capacité à fournir de l'information physique repose largement sur la manière par laquelle la quantité d'action est déterminée dans un système physique donné. Ensuite, que même si l'on refuse la preuve métaphysique *a priori* du principe, il garde un caractère téléologique qui permet de penser qu'une explication non causale des phénomènes de la mécanique puisse lui être attribuée. Son caractère téléologique fait en sorte qu'il ne s'arrime pas bien avec les deux premières façons de répondre à l'argument empiriste humien (c'est-à-dire en demandant s'il est possible de croire que l'expérience ne soit pas nécessaire, ou encore pas suffisante pour permettre l'acquisition de la connaissance des causes des phénomènes). Le principe de la moindre action est par contre tout à fait compatible avec la troisième réponse à l'empirisme humien, puisque son caractère téléologique fait en sorte que les connaissances physiques qu'il permet de découvrir ne reposent pas nécessairement sur des explications causales.

Bibliographie complète

- Bachelard, Suzanne. 1958. « Maupertuis et le principe de la moindre action ». Publisher: Armand Colin, *Thalès* 9 : 3-36.
- Cartwright, Nancy. 1999. « Models and the limits of theory: quantum Hamiltonians and the BCS model of superconductivity » [en eng]. In *Models as mediators: perspectives on natural and social science*, 1. publ, 241-281. OCLC: 917770020. Cambridge : Cambridge Univ. Press.
- Euler, Leonhard. 1748. « Recherches sur les plus grands et les plus petits qui se trouvent dans les actions des forces ». *Mémoires de l'académie des sciences de Berlin*, 149-188.
- . 1751a. « Essay d'une démonstration métaphysique du principe général de l'équilibre ». *Mémoires de l'académie des sciences de Berlin*, 246-254.
- . 1751b. « Harmonie entre les principes généraux de repos et de mouvement de M. de Maupertuis ». *Mémoires de l'académie des sciences de Berlin*, 169-198.
- Goldstein, Herbert. 1980. *Classical mechanics*. 2d ed. Addison-Wesley series in physics. Reading, Mass : Addison-Wesley Pub. Co.
- Hamilton, William. 1833. « On a General Method of Expressing the Paths of Light, and of the Planets, by the Coefficients of a Characteristic Function ». *Dublin University Review and Quarterly Magazine*, 795-826.
- Hume, David. 2008. *Enquête sur l'entendement humain* [en eng fre]. Traduit par Michel Malherbe. Bibliothèque des textes philosophiques. Paris : J. Vrin.
- Maupertuis, Pierre-Louis. 1750. *Essay de cosmologie, par M. de Maupertuis*. [S.I.] MDCCL.
- . 1752. « Essai de cosmologie ». In *Les oeuvres de Mr. de Maupertuis*, 3-54. Dresde.

- Maupertuis, Pierre-Louis. 1756a. « Accord des différentes lois de la nature qui avaient jusqu'ici parurent incompatibles ». In *Les oeuvres de Mr. de Maupertuis, nouvelle édition corrigée et augmentée*, 4 : 1-28. Lyon.
- . 1756b. « Loi du repos ». In *Les oeuvres de Mr. de Maupertuis, nouvelle édition corrigée et augmentée*, 4 : 43-68. Lyon.
- . 1756c. « Recherche des lois du mouvement ». In *Les oeuvres de Mr. de Maupertuis, nouvelle édition corrigée et augmentée*, 4 : 29-42. Lyon.
- Morin, David. 2008. *Introduction to classical mechanics: with problems and solutions*. OCLC: ocn154682282. Cambridge, UK ; New York : Cambridge University Press.
- Morrison, Margaret. 2015. *Reconstructing Reality: Models, Mathematics, and Simulations*. Oxford Studies in Philosophy of Science. Oxford, New York : Oxford University Press, janvier.
- Neuenschwander, Dwight E. 2017. *Emmy Noether's wonderful theorem*. Revised and updated edition. OCLC: ocn961410174. Baltimore, Md : Johns Hopkins University Press.
- North, Jill. 2009. « The "Structure" of Physics: A Case Study ». Publisher: Journal of Philosophy, Inc. *The Journal of Philosophy* 106 (2) : 57-88.
- . 2022. « Formulations of Classical Mechanics » [en eng]. In *The Routledge companion to philosophy of physics*, sous la direction d'Eleanor Knox et Alastair Wilson, 21-32. Routledge philosophy companions. New York London : Routledge.
- Panza, Marco. 1995. « De la nature épargnante aux forces généreuses : le principe de moindre action entre mathématiques et métaphysique. Maupertuis et Euler, 1740-1751 » [en fr]. *Revue d'histoire des sciences* 48 (4) : 435-520. <https://doi.org/10.3406/rhs.1995.1240>.
- Samaroo, Ryan. 2022. « Newtonian Mechanics » [en eng]. In *The Routledge companion to philosophy of physics*, sous la direction d'Eleanor Knox et Alastair Wilson, 8-20. Routledge philosophy companions. New York London : Routledge.
- Swanson, Noel, et Hans Halvorson. 2012. *On North's "The Structure of Physics"* [en en]. Preprint, septembre.
- Townsend, John. 2012. *A Modern Approach to Quantum Mechanics*. Second Edition. Mill Valley : University Science Books.

Yourgrau, Wolfgang, et Stanley Mandelstam. 1960. *Variational principles in dynamics and quantum theory*. 2^e éd. New York : Pitman.