

### **3. 3. - LA FINALITE**

#### **I - LE MECANIQUE**

#### **3. 3. 2.**

*Le monde est-il rivé à ne réaliser que ce que ses conditions physiques l'autorisent à réaliser ou, par-delà, tend-il localement ou dans son ensemble à la réalisation de quelque fin supérieure ?*

*Le premier point de vue correspond au mécanisme et le second au finalisme - encore dit "providentialisme" s'il voit la main de Dieu intervenir directement dans le cours du monde pour en garantir la finalité.*

*NB : en français, "mécanisme" désigne tant un montage mécanique, une machine, que la théorie philosophique qui affirme que tout phénomène relève intégralement d'une explication mécanique. Mieux vaudrait donc parler, au second sens, de mécanicisme. Mais le terme est peu employé.*

*La vision commune du progrès des sciences et des idées étant de nos jours fort naïve, il convient de souligner d'emblée que, des deux doctrines, l'une n'a pas véritablement chassé l'autre. Que le mécanisme, qu'on pourrait trop rapidement croire être l'apanage de l'esprit moderne, n'a pas simplement vaincu et remplacé un finalisme qui serait, lui, propre aux âges religieux. En fait, dans l'histoire des idées, le finalisme n'est véritablement apparu et ne s'est constitué en doctrine qu'après le mécanisme et en réaction contre lui.*

*Il faut également comprendre qu'attendre un triomphe de l'une sur l'autre des deux positions serait assez illusoire, car mécanisme et finalisme ne trouvent chacun de sens que l'un face à l'autre, au point de paraître assez inséparables.*

*En fait, les deux points de vue ne s'opposent tout simplement pas par essence. Il importe de le souligner avant d'envisager : I. 1. la mécanique & I. 2. le vivant entre mécanisme et finalité*

## **I. 1. La mécanique**

**3. 3. 3.**

*Chez les Grecs, le terme mekane s'appliquait à divers dispositifs et machines comme les chariots ou les poulies et, longtemps, on entendra par mécanique l'étude de cinq dispositifs élémentaires : levier, poulie, treuil, vis et plan incliné. C'est-à-dire, plus généralement, l'étude du problème consistant (en termes modernes) à mouvoir une grande résistance au moyen d'une petite force. Soit encore, comme disait Aristote, "ce qui permet au plus petit de dominer le plus grand".*

*Ce n'est qu'avec Galilée et Descartes que la mécanique deviendra la science théorique du mouvement.*

*Elle est classiquement divisée en trois parties :*

- a) la cinématique, c'est-à-dire l'étude du mouvement indépendamment des forces qui en sont responsables ;*
- b) la dynamique, l'étude du mouvement en tant que provoqué par des forces ;*
- c) la statique, l'équilibre des forces internes entre les parties d'un corps sans mouvement, ce qui est parfois considéré comme un simple cas limite de la dynamique, quoique aussi bien cette dernière puisse réciproquement, nous le verrons, être ramenée à la statique.*

*Il ne peut s'agir d'exposer ici l'histoire de la mécanique. De fameux ouvrages existent à cet égard et tel n'est pas notre propos.*

*Outre les classiques études d'E. Mach (La mécanique, 1883<sup>1</sup>) et de P. Duhem (L'évolution de la mécanique, 1903<sup>2</sup>), on peut également se référer à l'Histoire de la mécanique (1950<sup>3</sup>) de R. Dugas, qui correspond le plus, à vrai dire, à ce qu'on peut attendre d'une histoire de la mécanique. Duhem, en effet, n'est pas toujours facile à suivre et quant à Mach, son ouvrage - fort important dans l'histoire des idées et fort brouillon aussi - est davantage une réflexion philosophique sur la science, appliquée à l'histoire de la mécanique.*

---

<sup>1</sup> trad. fr. Paris, Gabay, 1987.

<sup>2</sup> Paris, Vrin, 1992.

<sup>3</sup> Neuchâtel, Ed. du Griffon, 1950.

*Notre objet sera bien plutôt de saisir à travers la philosophie mécanique – et surtout à travers le développement historique de la dynamique - le modèle d'intelligence de la nature que la mécanique est à même d'apporter, notamment pour ce qui concerne le vivant. Quoique cette présente section ne traitera pas de ce dernier aspect, se contentant de présenter les grands thèmes et les principales conquêtes du mécanisme.*

\*

*L'histoire de la mécanique représente certainement l'une des aventures intellectuelles parmi les plus fascinantes. Mais au lecteur peu averti en ce domaine, il faut néanmoins demander d'emblée une certaine dose de courage et pas mal de patience.*

*Il faut surtout lui recommander de ne pas hésiter à lire rapidement mais à tout lire, quitte à avoir l'impression, parfaitement normale, de voir beaucoup de choses lui échapper. De toute façon, il ne faut pas attendre une intelligence globale de la mécanique. Née d'une démarche résolument abstraite, en effet, la mécanique s'est finalement reconnue science d'expérience au sens le plus fort du terme - au sens où, à ses fondements, on trouve surtout des faits et un monde rendu radicalement contingent par une réalité physique première en son sein : la masse des corps.*

*Dans ces conditions, on comprendra que pour avancer, pour devenir pleinement technique, la mécanique n'a pu que renoncer à se poser nombre de questions fondamentales. Son apparent mépris pour la métaphysique, en ce sens, n'a jamais été que l'avertissement d'une impuissance.*

*En fait, à travers les différents thèmes, sous lesquels nous retracerons les grands développements de pensée mécanique, nous ne cesserons de voir soulever des questions métaphysiques : A) Naissance de la mécanique moderne. B) Les conceptions antiques du mouvement. C) L'inertie & D) La notion de force. Ici, nous examinerons particulièrement l'idée de mouvement perpétuel, le principe de moindre action et même le dogme religieux de la transsubstantiation.*

*A) Naissance de la mécanique moderne*

**3.3.4.**

*Au XVII<sup>e</sup> siècle, la "philosophie mécanique" désigna d'abord l'atomisme.*

On se mit à parler de "philosophie mécanique" à partir du milieu du XVII<sup>e</sup> siècle en Angleterre, avec Robert Boyle notamment (*On the Excellency and Grounds of the Corpuscular or Mechanical Philosophy*, 1674<sup>4</sup>). Le mécanisme désigna d'abord ainsi la philosophie atomiste du temps, dont les principaux promoteurs - Boyle, Gassendi ou Gilles de Roberval - s'opposaient ouvertement au mathématisme de Galilée et de Descartes, soit aux deux auteurs qui représentent, pour nous, les principaux initiateurs de la mécanique moderne. Tout un courant de la mécanique, de fait, demeurera atomiste, avec Christian Huygens et Daniel Bernoulli notamment - ce dernier fournissant la première explication corpusculaire de la force expansive des gaz. Il faudra attendre Newton pour que soient unifiés le mécanisme mathématique cartésien et l'atomisme expérimental de la "philosophie mécaniste".

*Mécaniste ne signifie pas forcément matérialiste.*

D'emblée, parce que lié à l'atomiste, le mécanisme aura une forte connotation réductionniste et matérialiste. Cela ne signifie nullement, cependant, que toute philosophie mécanique soit matérialiste et encore moins que toute philosophie de la nature ait été mécanique à l'âge classique<sup>5</sup>. En fait, on a pu faire remarquer que la défense du mécanisme la plus résolue qu'ait produite le XIX<sup>e</sup> siècle fut écrite par le Révérend Père Angelo Secchi, directeur de l'observatoire du Vatican (*L'unité des forces physiques*, 1869)<sup>6</sup>. C'est que *le mécanisme*, il convient de le souligner d'emblée, *peut servir toutes sortes de valeurs*.

\*

*L'âge moderne n'a pas inventé l'explication mécaniste de la nature. Il a seulement considéré qu'elle pouvait suffire.*

---

<sup>4</sup> Nous n'avons pu toutefois consulter l'ouvrage, ni même vérifier cette référence.

<sup>5</sup> Voir E. Cassirer *La philosophie des Lumières*, 1932, trad. fr. Paris, Fayard, 1966, p. 85.

<sup>6</sup> Cité in J. Merleau-Ponty « Le mécanisme et les avatars du mouvement perpétuel » *Revue de synthèse*, n°110, avril-juin 1983, pp. 171-185.

Au Moyen Age, il était volontiers admis qu'on explique les phénomènes selon des principes mécaniques. On ne reconnaissait pas cependant à ce type d'explication la possibilité de fournir les causes réellement agissantes dans la nature. Cette mise en forme des phénomènes relevait, pour l'esprit du temps, d'un simple artifice auquel ne pouvait être réduite la vraie physique. *La philosophie mécanique, en regard, est née de ce que l'on en vint à considérer que l'explication mécanique apportait une intelligence suffisante des phénomènes.*

Robert Lenoble a admirablement exposé ce tournant majeur dans l'histoire de la pensée, en s'attachant au cas du Père Mersenne (*Mersenne ou la Naissance du mécanisme*, 1943<sup>7</sup>).

#### *Le Père Mersenne.*

On ne connaît plus guère Marin Mersenne de nos jours que pour avoir été l'ami et le correspondant de Descartes. Il fut pourtant également un savant d'importance. Son nom reste ainsi attaché à une famille de nombres premiers très rares : des entiers de la forme  $2^p-1$ , où  $p$  est lui-même un nombre premier (on n'en connaît à ce stade que 48). Il diffusa les idées de Galilée dans toute l'Europe (*Les mécaniques de Galilée*, 1634<sup>8</sup>) et fut l'un des principaux fondateurs de l'acoustique scientifique (*L'Harmonie universelle*, 1633-1637<sup>9</sup>).

Il fut en effet l'un des premiers à considérer le son comme un mouvement réel et non comme une simple impression de l'oreille consécutive au mouvement de l'air. Il en mesura la vitesse (1636) et formula plusieurs lois qui, longtemps, portèrent son nom : le nombre de battements d'une corde vibrante est en raison inverse de sa longueur ; pour deux cordes de même longueur et tension, ce battement est comme la racine carrée de leur poids ; pour deux cordes identiques par la longueur et le poids, il est proportionnel à la racine carrée des poids tendeurs ; il faut qu'une corde batte au moins vingt fois dans l'air pour se faire entendre, etc.

Mécaniste, Mersenne s'opposait aux théories animistes et volontiers magiques qui étaient réapparues à la Renaissance. C'est ainsi qu'il s'attache à détruire la légende selon laquelle l'écho pourrait répondre par d'autres paroles que celles qui ont été prononcées. Avait-on pour habitude, de même, pour se protéger de l'orage, de sonner les cloches des églises lorsque grondait le tonnerre ? Mersenne explique que c'est l'ébranlement conséquent de l'air qui, peut-être, chasse la foudre et non le fait que les cloches sont bénies.

---

<sup>7</sup> Paris, Vrin, 1943.

<sup>8</sup> Paris, PUF, 1966.

<sup>9</sup> 3 volumes, Abbeville, Imprimerie F. Paillart, 1637.

*Si une explication mécaniste de la nature peut suffire, ce n'est pas forcément parce que le monde est régi par une nécessité aveugle. Ce peut être que Dieu n'agit pas dans le détail des phénomènes.*

Ce qui paraît décisif chez Mersenne, c'est que s'il reconnaît volontiers qu'il est toujours possible de superposer une intention divine à l'explication mécanique, il ne sollicite pourtant guère ce recours à la volonté de Dieu concernant les phénomènes de la nature, qu'il réduit au simple jeu de forces mécaniques. Et s'il rompt ainsi avec la tradition scolastique pour laquelle la théologie prolongeait et couronnait naturellement la physique, il s'en prend aussi bien au naturalisme panthéiste d'un Giordano Bruno, identifiant Dieu et l'Univers (voir 2. 5. 13.). Il bat en brèche cette pensée cosmique et magique de la Renaissance pour laquelle la volonté divine était comme une âme du monde pénétrant chaque phénomène, même le plus insignifiant. Ce naturalisme qui, en plus d'invoquer l'action constante d'un démiurge, expliquait tout par analogie : le fer ainsi était réputé se diriger vers l'aimant comme la femelle vers le mâle, etc. Car, selon l'image du microcosme redoublant le macrocosme, tout passait pour être à l'image de tout (voir 2. 5.).

On trouve une très bonne illustration de ce principe en médecine avec Paracelse<sup>10</sup>.

*Le mécanisme de Mersenne, comme celui de Descartes, consiste avant tout à souligner qu'il est impossible de remonter jusqu'à Dieu à partir du Monde, comme si celui-ci témoignait directement dans le détail de la divine Perfection. En fait, soulignent Mersenne et Descartes, si la mécanique est à même d'apporter une intelligence suffisante des phénomènes, c'est que le monde repose sur une cascade de décrets contingents. Il ne se laisse pas déduire logiquement de la nature de Dieu mais témoigne uniquement de sa puissance (sur ce thème chez Descartes, voir 1. 11. 14.). Il est impossible, en d'autres termes, d'affirmer que le monde devait nécessairement être tel qu'il est et il n'est pas de "vraie" physique qui puisse en ce sens prétendre en rendre compte, en déduisant chaque phénomène d'une sorte de plan divin.*

*Dans un monde contingent, le recours à l'expérience s'impose.*

La connaissance du réel ne saurait être une œuvre de pure spéculation mais doit nécessairement être guidée par l'expérience puisqu'on ne peut déduire a priori l'ordre du

---

<sup>10</sup> Voir par exemple *Œuvres médicales*, trad. fr. Paris, PUF, 1968, pp. 112-113.

monde de quelque connaissance que nous aurions de la nature divine. Ainsi, si Mersenne ou Descartes ont chassé Dieu du monde, ce fut avant tout pour restaurer sa toute-puissante liberté, contre le panthéisme de la Renaissance qui le voyait, "tel un Jupiter", intervenir dans chaque phénomène et lisait ses intentions dans n'importe quel signe du monde. Comme si Dieu était en quelque sorte enclos dans sa Création, immédiatement discernable dans les règles qui régissent celle-ci.

Mêmes les vérités mathématiques et logiques dépendent entièrement de Dieu et ne s'imposent pas à lui, affirme en ce sens Descartes dans une *Lettre à Mersenne* du 15 avril 1630 (voir encore 1. 11. 14.).

*Les principes de la mécanique ont été formulés d'abord contre le panthéisme magique de la Renaissance. Mais ceci a été oublié et l'on voit plutôt la science moderne s'être affirmée prioritairement contre la scolastique et l'Eglise.*

Assez inexplicablement, l'histoire des idées ne sait en général rendre compte de l'apparition de la science moderne au XVII<sup>e</sup> siècle que comme une réaction contre les idées scolastiques, c'est-à-dire chrétiennes et aristotéliennes ; des idées moyenâgeuses, admet-on, quoique l'esprit du Moyen-âge fut peut-être moins magique que celui de la Renaissance<sup>11</sup>. C'est là pourtant s'interdire de comprendre que, si nombre des thèses scolastiques seront effectivement critiquées, elles n'en fournissaient pas moins dans leur ensemble un cadre de pensée rationnel qui favorisa la naissance de la science moderne (voir 2. 5. 12.). Cela explique que beaucoup de principes scolastiques se retrouvent chez les principaux héritiers de cette dernière et notamment Descartes.

Certes, le dix-neuvième siècle humaniste et laïc n'était guère disposé à reconnaître une telle filiation. Pour lui, l'Eglise était encore la grande ennemie à abattre et l'on concevait que la science moderne ne pouvait qu'être née de s'opposer à ses dogmes. Et quant aux auteurs de la Renaissance qui, comme Bruno, avaient eu à connaître les prisons et les bûchers de l'Inquisition, ils ne pouvaient qu'être comptés dès lors parmi les premiers esprits modernes.

De nos jours, on ne lutte plus guère contre l'autorité de l'Eglise mais l'on se flatte toujours de stigmatiser l'intolérance et le fanatisme. De sorte que cette vision n'a en général guère été amendée, quoique dans les faits la cosmologie "enchantée" de la Renaissance ait sans doute été bien davantage mise à mal par la science moderne naissante

---

<sup>11</sup> Voir G. Federici Vescovini *Le Moyen-Age magique. La magie entre religion et science aux XIII<sup>e</sup> et XIV<sup>e</sup> siècles*, Paris, Vrin, 2011.

que les dogmes scolastiques<sup>12</sup>. Sachant que la volonté de combattre le paganisme de la Renaissance fut d'abord un souci chrétien, notamment à travers l'Oratoire, fondé par Bérulle et qui comptera le cartésien Malebranche.

Alors qu'un Giordano Bruno voyait Dieu inséparable de sa création et qu'un Paracelse ou un Marsile Ficin retrouvaient sa marque dans chaque "signe" du monde, Thomas d'Aquin affirmait, lui, que Dieu ne poursuit pas de fins mondaines et que la représentation d'une fin à obtenir n'est pas ce qui détermine sa volonté à rechercher, comme moyen, tel ou tel objet du monde. En Dieu, l'entendement n'est pas distinct de la volonté, affirme Thomas. Dieu veut tout par un acte unique et simple et il ne se propose pas de fins qui seraient pour lui comme autant de biens auxquels il aspirerait et dont il aurait besoin. Il n'attend rien de ses œuvres et n'agit que par pure bonté, par surabondance d'être. Mais cela ne signifie pas qu'il n'y a pas de fins dans son œuvre (*Somme théologique*, 1266-1274, I, Question 19, art. V<sup>13</sup>).

*Le premier principe de la mécanique moderne : tout se fait par figure et mouvement.*

Ainsi, quoique par nature réductionniste, la philosophie mécaniste n'est nullement née d'une attitude uniment matérialiste. Avant qu'il ne s'appuie sur une science véritablement ordonnée et unifiée dans ses principes avec Louis de Lagrange, on ne peut certainement pas dire que le mécanisme ait correspondu à une seule et même doctrine.

Le primat accordé aux relations spatiales, de fait, est pratiquement le seul trait commun aux différents efforts qui aboutiront à la constitution d'une science mécanique. Celle-ci, comme l'écrit un auteur, est en effet essentiellement "une pensée des rouages qui vise à repérer les supports matériels d'ordres spatiaux et les enchaînements de transformation qu'ils y rendent possibles"<sup>14</sup>. *Par mécanisme, il faut donc avant tout entendre l'affirmation selon laquelle un ensemble de transformations dans l'espace, liées les unes aux autres, suffit à rendre compte de tout phénomène.* Tout, en d'autres termes, se fait par figures et mouvements et tout doit être expliqué par le dynamisme de forces purement physiques. C'est là une affirmation qui ne fut clairement énoncée que par Descartes, après qu'on eut considéré pendant des siècles que l'ordre matériel des

---

<sup>12</sup> Voir N. Weill-Parot *Points aveugles de la nature. La rationalité scientifique médiévale face à l'occulte, l'attraction magnétique et l'horreur du vide (XIII<sup>e</sup>-milieu du XV<sup>e</sup> siècle)*, Paris, Les Belles Lettres, 2013.

<sup>13</sup> trad. fr. en 4 volumes Paris, Cerf, 1981-1984.

<sup>14</sup> Voir R. Boirel « Science mécaniste et science mécanique » *Revue philosophique* n°2, 1985, pp. 227-230.

phénomènes ne permettait pas seul d'en rendre raison. C'est sur ce point que porta l'essentiel de l'opposition moderne aux principes aristotéliens.

\* \*

*B) Les conceptions antiques du mouvement*

**3.3.5.**

*Par mouvement, Aristote entend de manière générale le changement susceptible d'affecter l'être des choses.*

Pour Aristote, le mouvement consistait moins en la translation d'un corps - laquelle n'en représentait pour lui qu'un cas particulier - qu'en l'altération et le devenir de ce corps dans son essence même (dans ce que la scolastique nommera sa "quiddité"). Tout mouvement s'enracine ainsi, pour Aristote, dans une privation et renvoie d'abord au non-être de l'être mû, c'est-à-dire à ce qu'il n'est pas mais pourrait être. Le mouvement, en d'autres termes, est pleinement un *changement* et traduit le fait d'une existence *en puissance* des choses du monde.

N'étant que le passage d'une non-détermination à une détermination, ou d'une détermination à une autre, le mouvement n'a de sens qu'en regard des diverses qualités qui sont à même d'affecter un être. Il n'existe donc pas de mouvement en soi mais des mouvements aussi divers qu'il y a de grandes catégories de bouleversements possibles dans la nature des choses et des êtres. Ainsi, lorsqu'Aristote déclare qu'en leur état naturel, les choses sont en repos, il faut entendre qu'elles sont, simplement. Dès lors qu'elles deviennent autres qu'elles ne sont, il y a mouvement. Mais il convient de souligner que par "chose", Aristote n'entend pas comme nous un objet, simple support matériel du mouvement<sup>15</sup>. Chaque chose, pour Aristote, possède une nature.

*Le repos est l'état naturel des êtres. Simple effet du devenir qui les affecte, le mouvement n'est pas un état en soi.*

Par définition, le mouvement n'est pas un état caractérisant les choses, comparable au repos en ceci. C'est qu'en lui-même il n'affecte en rien les choses, qu'il mène seulement

---

<sup>15</sup> Voir F. Balibar Article "Mouvement" in D. Lecourt (dir) *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences*, 1999, Paris, PUF, 2003.

à une caractérisation différente. Les choses deviennent et ce devenir, l'actualisation de leur puissance (*Dynamis*<sup>16</sup>) est premier et lui échappe. Il n'en est que l'effet. Il en marque le rythme.

En somme, si le mouvement ne saurait être un état, c'est que tout change. Or si tout se modifie incessamment, tout mouvement est par essence périssable et n'est rien de stable. Il n'est pour Aristote qu'un seul mouvement naturel, un seul mouvement en acte : la révolution parfaite et éternelle des corps célestes (*Physique*, 335-332 av. JC, VIII, 265a<sup>17</sup>). C'est ce mouvement premier dans l'ordre du cosmos qui engendre, de proche en proche, les mouvements qui animent le monde sublunaire (et notamment les altérations liées aux changements célestes, comme les saisons). Ce mouvement premier, en d'autres termes, est le temps (voir 2. 2. 12.).

Parce qu'ils sont continus, les mouvements célestes communiquent à l'ensemble du cosmos un rythme régulier dont le temps marque la cadence (pratiquement jusqu'au XX<sup>e</sup> siècle, la mesure du temps sera ultimement référée aux mouvements célestes, voir 2. 2. 15.). C'est pourquoi chaque mouvement peut s'exprimer par un nombre, souligne Aristote ; chaque durée de vie. Il y a un ordre régulier en chaque chose. En même temps, les mouvements du monde sublunaire sont multiples et contraires.

Dès lors, comment des révolutions parfaites peuvent-elles engendrer des mouvements irréguliers ? Aristote répond d'une formule mystérieuse que ce qui est cause de la génération et de la corruption dans le monde n'est pas la révolution parfaite des astres mais leur "révolution selon le cercle oblique" (*De la génération et de la corruption*, 334-330 av. JC, 336ab<sup>18</sup>).

Tout mouvement renvoie à l'organisation entière du cosmos. A un premier moteur immobile mettant en branle la sphère la plus extérieure du Ciel et ainsi de proche en proche. Et du mouvement qui affecte le cosmos dans son ensemble, Aristote tire la conclusion que ce cosmos est fini. Dans un monde infini, en effet, il n'y aurait pas de mouvement puisque tout mouvement requiert, pour être qualifié de tel, une orientation, donc des repères fixes qui supposent eux-mêmes un univers fini.

C'est, encore une fois, qu'un mouvement n'est rien en soi pour Aristote mais dépend du type de changement qu'il exprime. Il est ainsi caractérisé par sa *direction*, c'est-à-dire par ses points de départ et d'arrivée. *Mouvement vers le bas et mouvement vers le haut, attachés aux deux natures irréductibles et opposées du lourd et du léger, sont donc*

---

<sup>16</sup> Voir D. Lefebvre *Dynamis. Sens et genèse de la notion aristotélicienne de puissance*, Paris, Vrin, 2018.

<sup>17</sup> trad. fr. en 2 volumes Paris, Les Belles Lettres, 1983.

<sup>18</sup> trad. fr. Paris, Les Belles Lettres, 1966.

*deux types de mouvement tout à fait distincts dans le monde d'Aristote, où l'espace est immédiatement direction. Où il n'y a pas d'espace en fait mais des lieux (voir 2. 2. 13.).*

Au total, le mouvement est pour Aristote ce qui aboutit à la génération d'une substance nouvelle ou autre sous différents rapports - ce que les scolastiques nommeront un *secundum quid*. Aristote distingue ainsi, en fait de mouvements, le changement selon la substance (génération et corruption) et le changement se bornant à affecter les substances selon trois types majeurs d'altération (*Physique*, V, 225b) :

- l'altération de la qualité d'une substance (la production d'un *secundum quale* dans le langage scolastique) ;
- l'altération de la taille d'un corps par dilatation ou contraction (*secundum quantum*) ;
- l'altération selon le lieu, produite par une translation (*secundum ubi*).

C'est dans le cas du mouvement de translation que la construction aristotélicienne allait à terme se révéler la plus fragile, ouvrant la voie à la constitution de la mécanique moderne.

\*

*Question cruciale : qu'est-ce qui fait perdurer le mouvement de translation ?*

Le mouvement, nous l'avons dit, est toujours un effet pour Aristote. En d'autres termes, sans une contrainte extérieure, sans l'action d'une force étrangère, les corps demeureraient toujours au repos. Cependant, si le mouvement de translation ne traduit que l'affection d'un mobile, qu'est-ce qui, *physiquement*, peut bien le faire durer ? Le mouvement ne naissant pas des corps eux-mêmes et ne représentant pas pour eux un état selon lequel on pourrait dire qu'ils sont naturellement en mouvement, force est de faire intervenir, pour rendre compte de la prolongation du mouvement postérieurement au contact avec le moteur, le milieu de sa propagation : l'air et l'eau. L'air, ainsi, conserve pour Aristote l'impulsion d'un projectile lancé, car le moteur ne met pas seulement le mobile en mouvement mais anime l'air ambiant.

Solution délicate car, en même temps, Aristote est bien obligé de reconnaître que l'air oppose une résistance au mouvement. Sinon, le mouvement acquerrait une vitesse infinie, le transport du corps serait instantané, comme dans le vide, ce qui est contraire à

toute expérience. Au total, à la fois porté et contraint par le milieu qu'il traverse, un mobile a tendance, selon Aristote, à se mouvoir avec une plus grande vitesse au milieu de sa course qu'à son commencement ou à sa fin.

On admettait que le renversement de vitesse avait lieu en un moment, le *quies media* scolastique, où le corps demeurait immobile. Cela correspondait à l'impression que donne le mouvement d'une flèche tirée en l'air : il semble y avoir un moment où elle ne monte plus et ne descend pas encore.

### *Le milieu comme force propagatrice.*

Ce principe de la force propagatrice du milieu aura la vie dure : Léonard de Vinci rendra encore compte de l'action accélératrice de l'air ébranlé par la conjugaison de la traction de l'air chassé vers l'avant du mobile et l'impulsion du fluide qui vient, en tourbillonnant, occuper la place derrière lui. Alessandro Piccolomini sera l'un des premiers à affirmer que le milieu ne saurait en aucun cas entretenir le mouvement (*Mechanicas Questiones*, 1547<sup>19</sup>).

Maintenant, quant à la puissance du moteur initial capable de déplacer un corps, elle est exprimée par le produit de la masse ou du poids du corps (les Anciens ne distinguaient pas entre les deux) par la vitesse du mouvement imprimé, lit-on dans les *Questions mécaniques*, qui ne sont pas d'Aristote mais de l'un de ses disciples immédiats. Donc, si une force meut un corps selon une certaine vitesse, il faut une force double pour doubler cette vitesse et la vitesse sera d'autant moins grande que la masse est importante. C'est là une conception fautive mais qui répond à la perception intuitive du mouvement. Le cheval qui tire une voiture semble en effet développer un effort qui croît régulièrement avec la vitesse.

Cependant, dans le cas de deux corps qui chutent, Aristote admet que le plus lourd des deux tombera le plus rapidement et ce à mesure qu'il s'approchera davantage du sol. Cela, qui est tout aussi faux, correspond au fait que le mouvement vers le bas correspond pour lui à l'essence même du lourd, de la masse, qui devient première ici, comme une force capable de déterminer la vitesse.

Comment les Grecs en vinrent-ils à observer qu'un corps qui tombe accroît sa vitesse d'un moment à l'autre ? s'est demandé Pierre Duhem (*De l'accélération produite par une force constante. Notes pour servir à l'histoire de la mécanique*, 1904<sup>20</sup>). Sans doute, répond-il, en remarquant qu'un filet d'eau est continu près

---

<sup>19</sup> Roma, apud A. Bladum Asulanum, 1547.

<sup>20</sup> II<sup>e</sup> Congrès international de philosophie, Genève, 4-8 septembre 1904.

de son origine, puis que l'accélération sépare les gouttes, qui tombent alors de façon isolée. Qu'une pierre qui tombe frappe plus violemment un obstacle vers la fin que vers le milieu de sa chute.

*Les principes de la mécanique moderne sont pratiquement ceux de la mécanique aristotélicienne inversés.*

Nous pouvons à présent résumer les principaux fondements de la dynamique d'Aristote :

- a) mouvement et repos correspondent à deux réalités parfaitement différentes, puisque le second définit la nature des êtres et le premier leur devenir ;
- b) le mouvement intervient nécessairement dans un espace fini ;
- c) il y a autant de mouvements différents et irréductibles qu'il y a de directions dans l'espace et surtout de façons pour les corps de changer selon leur nature ;
- d) la vitesse d'un corps est inversement proportionnelle à sa masse, sauf dans le cas du mouvement vers le bas (cela suit le principe précédent) ;
- e) en lui-même, un mouvement n'a rien qui puisse tendre à le prolonger. Il lui faut l'action constante d'un moteur.

Maintenant, inversons ces propositions :

- f) affirmons que le repos n'est qu'un cas particulier du mouvement ;
- g) que ce dernier doit être appréhendé dans le cadre d'un espace illimité ;
- h) où il devient patent que tous les différents types de mouvements peuvent être ramenés à un même modèle ;
- i) où tout mouvement tend de lui-même à se prolonger indéfiniment ;
- j) sa vitesse étant directement proportionnée à sa masse.

Nous avons là tous les principes de base de la mécanique moderne.

*La science moderne n'a pourtant pas simplement corrigé Aristote.*

Pour autant, il serait fâcheux de considérer - et c'est malheureusement ce que conduit à croire pratiquement tout ce qu'on peut lire à ce propos - que la mécanique moderne a trouvé son essor dans la correction des erreurs commises par Aristote. A l'âge moderne, la mécanique a bien plus proprement choisi une orientation qu'Aristote n'ignorait nullement et qu'il rejetait expressément.

Aristote, en effet, avait bien conscience qu'on peut être tenté d'expliquer les transformations dans la nature des choses uniquement par le jeu de différents mouvements.

Une telle interprétation "matérielle", reconnaissait-il, est d'ailleurs légitime dans la mesure où les choses se transforment bien matériellement (*De la génération et de la corruption*, 335b). Mais tout ce qui est purement matériel, notait-il aussi bien, se contente de subir des actions et d'être mis en mouvement, de sorte que pour rendre compte véritablement du changement lui-même, force est de recourir à un autre type d'explication faisant sa part à la *finalité*, c'est-à-dire au sens même de la transformation engendrée par le mouvement. Une finalité qui ne peut qu'être ignorée par une explication purement matérielle. Tel est le présupposé fondamental de la science d'Aristote, qui l'oblige à poser notamment que tout mouvement doit être considéré dans son orientation particulière ; principe sur lequel repose sa dynamique.

*La science moderne sera obligée de remplacer la finalité aristotélicienne par la toute-puissance du hasard.*

La mécanique moderne prendra son essor à considérer que ce type d'explication qu'Aristote nommait "matériel" suffit pour comprendre les phénomènes. Dès lors, il lui deviendra possible de considérer abstraitement le mouvement en lui-même, indépendamment de toutes circonstances et de tous repères et ses conclusions iront tout à fait à l'encontre de celles d'Aristote.

Cela, toutefois, ne saurait être trop rapidement assimilé à une "victoire" sur la science antique, reléguant celle-ci à un âge d'ignorance ou de naïveté. Car, ayant renoncé à une finalité jugée "métaphysique" ou illusoire, l'explication mécanique, dès lors qu'elle s'applique à quelque phénomènes organisés comme les êtres vivants, ne peut, comme le redoutait Aristote, que faire intervenir le hasard pour rendre compte de leur constitution. Nous y reviendrons.

\*

*Pendant des siècles, les principes aristotéliciens ne furent guère contestés. Il est vrai que l'observation courante les confirmait.*

Nous l'avons dit, le tournant favorisant l'apparition d'une véritable philosophie mécanique n'interviendra guère avant le XVII<sup>e</sup> siècle. De fait, jusqu'à cette date, les "erreurs" d'Aristote ne seront pas facilement détectées, tant le cadre de pensée, sans doute, sera peu modifié. *Tant, surtout, la simple observation était à même de les confirmer.*

Pour Aristote le mouvement n'est pas un état et ne possède rien en propre qui puisse assurer sa prolongation. Un moteur doit donc nécessairement accompagner ce qui est mû de manière constante. De lui-même, le mouvement ne peut que tendre à s'éteindre au fur et à mesure qu'il s'éloigne de son impulsion. Ainsi, tandis que pour nous une force constante engendre un mouvement uniformément accéléré, une force constante produit selon Aristote un mouvement uniforme. Or la simple observation confirme ce dernier point de vue : dans le monde, un mouvement n'intervient guère sans obstacle, de sorte qu'il tend comme naturellement à s'éteindre si un moteur ne l'entretient pas. Le point de vue d'Aristote tient simplement au fait que ce dernier ne fait pas abstraction des différentes sources d'amortissement lorsqu'il considère le mouvement. En regard, la mécanique n'adoptera d'autres présupposés que dès lors qu'elle osera raisonner tout abstraitement, en négligeant la perception immédiate.

C'est ainsi que de la fin du XVI<sup>e</sup> siècle au milieu du XVII<sup>e</sup> siècle, les spéculations mécaniques, note-t-on, passent totalement sous silence les frottements. Leur mise entre parenthèses fut la condition d'accès à la formulation des axiomes de la mécanique<sup>21</sup> et faute d'avoir adopté une telle attitude, le point de vue d'Aristote ne sera qu'assez marginalement amendé avant cette époque. *S'il est une discipline qui témoigne de ce qu'en elles-mêmes l'observation et l'expérience sont incapables de changer la science, c'est la mécanique !*

Laplace déclare que l'expérience confirme la loi d'inertie, car nous observons couramment que les mouvements se perpétuent d'autant plus longtemps que les obstacles qu'ils rencontrent sont moindres, ce qui nous porte à croire que, sans eux, ils dureraient toujours (*Traité de mécanique céleste*, 1798, I, livre I, chap. 2<sup>22</sup>). Mais c'est là une vue qui passe à côté de l'essentiel, car il y a bien quelque chose qui va à l'encontre de toute intuition dans le principe moderne d'inertie, c'est l'idée que la masse d'un corps puisse *positivement* conditionner sa vitesse. Si notre voiture est lourdement chargée, pensons-nous, sans y réfléchir, que sa vitesse sera plus difficile à maîtriser que d'ordinaire ou est-ce le contraire ?

### *La notion d'impetus.*

Dans l'Antiquité, note René Dugas (*op. cit.*), seul Jean Philopon d'Alexandrie (mort en 660 ap. JC) combatta l'opinion selon laquelle l'air est le moteur du mouvement ; affirmant que celui-ci est tout au contraire facilité dans le vide. Il imaginait qu'une puissance de mouvement (*dynamis kinetike*) était communiquée par le moteur au mobile

---

<sup>21</sup> Voir J-P. Sérès *Machine et communication*, Paris, Vrin, 1987, p. 163.

<sup>22</sup> Paris, Bachelier, 1829-1839.

ou au milieu qui, dans l'un ou l'autre cas, prolongeait le mouvement<sup>23</sup>. Simple idée isolée qui, via les Arabes, fera cependant son chemin au Moyen Age. On la retrouvera notamment chez Guillaume d'Occam, qui rejettera l'exigence aristotélicienne d'un moteur accompagnant le mouvement à chaque instant.

Jean Buridan prolongera ce refus, affirmant que le moteur se borne à imprimer au mobile un certain *impetus* ou élan, proportionnel à la vitesse communiquée ainsi qu'à la quantité de matière du mobile et qui s'atténue avec la résistance de l'air et la pesanteur (un *impetus* auquel Nicolas de Cues assimilera volontiers l'âme). Alors qu'on attribuait l'accélération dans la chute des graves à l'effet de la proximité de leur lieu naturel, à la raréfaction de l'air due à la chaleur dégagée par le corps en chute ou encore à l'affaiblissement progressif de la résistance de l'air au fur et à mesure de la descente du corps, Buridan parlera d'une augmentation cumulée d'*impetus*, d'une gravité accidentelle créée par la lourdeur des corps graves<sup>24</sup>.

Léonard de Vinci, de même, parlera d'*impetus* (ou *impeto*) pour désigner la propriété que le moteur cède au mobile et qu'entretient le mouvement de ce dernier et Giovanni Battista Benedetti affirmera que cet *impetus*, ou, dans son langage, cette *virtus impressa*, se conserve en ligne droite. Pour en conclure d'ailleurs faussement que le mouvement d'une roue doit s'amortir de lui-même parce que chacun de ses points tend spontanément à prendre une trajectoire rectiligne (*Diversarum speculationum mathematicorum et physicarum liber*, 1585<sup>25</sup>).

*Pour la première fois, le mobile était doué d'un mouvement propre.* Mais pas au point de pouvoir prolonger seul son mouvement<sup>26</sup>. Et cela suscitait encore toutes sortes de raisonnements faux.

On distinguait ainsi trois phases dans la trajectoire d'un boulet de canon (pour ces observations, les artilleurs de Charles VII tiraient des boulets à travers des toiles tendues entre des perches). D'abord, concevait-on, l'*impetus* prend le pas sur le poids du boulet, dont la trajectoire est alors une ligne droite. Puis leur influence combinée courbe la trajectoire toujours plus vers le bas jusqu'à ce que, l'*impetus* s'étant dissipé, le boulet retombe à la verticale. Autre raisonnement erroné : une pierre tourne au bout d'une ficelle qui se rompt. On admettait que le mouvement circulaire de la pierre doit persister jusqu'à ce que son *impetus* se dissipe.

---

<sup>23</sup> Voir R. Sorabji (ed) *Philoponus and the rejection of aristotelian science*, London, Duckworth, 1987.

<sup>24</sup> Voir E. Grant *La physique au Moyen-Age*, 1977, trad. fr. Paris, PUF, 1995, pp. 70-71.

<sup>25</sup> Taurini, apud haeredem N. Bevilacqua, 1585.

<sup>26</sup> Voir C. Vilain Article "Impetus" in D. Lecourt *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences*, 2003.

*La conception antique de l'inertie.*

L'un des principaux acquis de la philosophie mécanique avant Galilée fut ainsi de s'être débarrassée du milieu moteur d'Aristote pour expliquer la prolongation du mouvement par un effet, l'*impetus*, voué par nature à décroître du fait de ce qu'on nommait l'*inertie*, c'est-à-dire la tendance naturelle au repos de tout corps, assimilable à l'aversion que les hommes paresseux ont pour le travail. L'inertie avait donc très exactement le sens contraire de celui que nous lui donnons. Mais elle était également ce qui s'oppose à toute force capable de changer les corps d'état, une résistance naturelle au changement, ce qui la rattache à son acception moderne. En somme, le mouvement, quoique désormais rapporté au mobile, n'était toujours qu'un effet. En regard, l'apport majeur de Galilée sera ainsi de poser les bases d'une pensée nouvelle de l'inertie, c'est-à-dire d'un principe autonome du mouvement.

Les textes majeurs de Galilée sont le *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* (1632<sup>27</sup>), célèbre pour sa défense de l'héliocentrisme et les *Discours concernant deux sciences nouvelles* (1638<sup>28</sup>), où sont notamment exposées les conceptions relatives à la mécanique.

\* \*

*C) L'inertie*

**3. 3. 6.**

*Galilée distingue le mouvement de sa vitesse.*

N'étant qu'un effet, le mouvement, pour Aristote, ne possédait pas d'attributs propres (*Physique*, V, 225b et sq.). On ne le distinguait pas ainsi de sa vitesse, au sens où celle-ci aurait pu lui être rapportée au titre d'une qualité variable. Et il était encore plus absurde de parler d'un mouvement de mouvement, de la vitesse d'une vitesse, c'est-à-dire d'une *accélération*. Si l'on parlait de la vitesse d'un mouvement, c'était uniquement pour caractériser le rapport entre la force motrice et la masse du corps mû. Dès lors, comme le soulignent particulièrement les analyses de Maurice Clavelin, l'un des principaux apports de Galilée sera de fonder le rapport du mouvement à sa vitesse (*La philosophie naturelle de Galilée*, 1968, voir notamment p. 253 et sq. & p. 287 et sq.<sup>29</sup>).

---

<sup>27</sup> trad. fr. Paris, Seuil, 1992.

<sup>28</sup> trad. fr. Paris, A. Colin, 1970.

<sup>29</sup> Paris, A. Michel, 1996.

En ceci, toutefois, Galilée n'était pas tout à fait sans précurseurs. A partir de 1320, à Oxford puis à Paris, la vitesse avait de plus en plus tendu à caractériser en propre le mouvement (*motus*). On la désignait comme "*latitudo motus*" et l'on parlait également de "*latitudo acquisitionis latitudinis motus*", c'est-à-dire d'une capacité de variation, pour décrire l'écart entre l'intensité initiale du mouvement rapportée à son intensité finale ; soit pour caractériser tout processus d'*intensio* et de *remissio* (augmentation et diminution de la vitesse).

Les maîtres d'Oxford furent Thomas Bradwardine (1290-1349), William Heytesbury (connu à partir de 1330), Richard Swineshead (il publie entre 1328 et 1350) et John Dumbleton (qui nous est pratiquement inconnu). Ils enseignèrent tous au Merton College et on les désigne parfois comme les Mertonien. Leur enseignement sera recueilli et poursuivi à Paris par Jean Buridan, Nicole Oresme (1323-1382) et Albert de Saxe (1316-1390).

Dans le cas du mouvement croissant en vitesse, Nicole Oresme parlera de "*velocitatio*" pour désigner le rapport de la variation de vitesse sur toute la durée du mouvement. Mais Oresme n'ira pas jusqu'à parler d'une variation *instantanée* de la vitesse. Il ne concevra pas que l'effet d'un mouvement dépend moins de sa vitesse que de l'intensité que revêt, d'instant en instant, cette vitesse. Toutefois, la vitesse n'en était pas moins conçue pour la première fois comme une grandeur intensive. Comme un facteur en regard duquel tous les mouvements sont comparables.

La tardive découverte de tels concepts - pour nous si élémentaires - peut surprendre. Mais il est de fait que les spéculations mécaniques des Anciens ignoraient peu ou prou la dynamique, pour ne s'intéresser pratiquement qu'à la statique<sup>30</sup>.

### *La mathématisation du mouvement.*

Galilée ira au bout de cette logique ; ouvrant la possibilité de traiter le mouvement comme un objet mathématisé dont les propriétés peuvent être déduites<sup>31</sup>. Il donnera même un exemple d'une telle mathématisation concernant le mouvement naturellement accéléré : la chute des graves (la pesanteur). Ce sera là la première géométrisation pleinement réussie d'un problème de physique depuis Archimède, souligne M. Clavelin.

Galilée ne s'est pourtant dégagé que très lentement des concepts aristotéliens et scolastiques. C'est ainsi, a-t-on relevé, que dans un traité de 1593, il s'inspire encore largement des *Mécaniques* d'Aristote, pour

---

<sup>30</sup> Voir E. Mach *op. cit.*, chap. II, I.

<sup>31</sup> Voir R. Signore *Histoire de l'inertie*, Paris, Vuibert, 2012.

définir le *momento*, c'est-à-dire l'invariant poids-vitesse<sup>32</sup>. Sa conception de la vitesse, par ailleurs, est encore fort proche, sur bien des points, de celle des médiévaux. Enfin, dans la volonté de mettre mathématiquement en forme la science mécanique, l'influence de Benedetti était sensible, ainsi que celle, à travers lui, de Niccolò Tartaglia, dont la *Nova Scientia* (1537<sup>33</sup>) traitait déjà de la balistique de manière géométrique, quoique ses idées n'aient guère été nouvelles. On a dit que cette conviction que les mathématiques fournissent la clé de la compréhension de la nature marquait un retour au platonisme.

*Le repos n'est qu'un état du mouvement.*

Voulant mettre en avant le caractère continu de la croissance de la vitesse dans le cas de la chute des graves, Galilée affirme qu'un mobile, partant du repos, passe par tous les degrés de lenteur compris entre le repos et un degré quelconque de vitesse. Cela enfrenait un dogme aristotélicien selon lequel la force n'est pas une grandeur intensive, c'est-à-dire continue. Au-dessous d'un certain niveau, elle n'agit plus. De ce qu'un corps produit tel effet, il ne s'ensuit pas que ses parties fassent de même, affirmait Aristote. Verser à terre un boisseau de mil fait du bruit. Mais non pas un grain de mil (*Physique*, VII, 250a).

Et quant aux médiévaux, s'ils s'étaient efforcés, nous venons de le voir, de traiter la vitesse comme une grandeur intensive caractérisée par la continuité de sa croissance, ils n'avaient pas vu la conclusion galiléenne que *mouvement et repos ne sont pas de nature distincte. Le repos n'est que le premier degré d'un mouvement d'une extrême lenteur* (*Dialogue*, XIII).

*Trois fondements de la mécanique nouvelle.*

Ainsi Galilée fut-il à même de formuler trois fondements de la Dynamique moderne :

1) *Le mouvement est un état en soi*. Il n'est pas nécessaire de le définir par son sens, c'est-à-dire par ses deux "termes" (les *termini motus* de la scolastique : les points de départ et d'arrivée). *Sa vitesse, ou plus exactement son processus de croissance, suffit seul à le caractériser*. L'apport décisif à cet égard fut de lier vitesse et durée.

Formulant la loi de la chute des graves, Galilée établit que la vitesse est proportionnelle à la durée de la chute, c'est-à-dire suit un mouvement uniformément

---

<sup>32</sup> Voir F. de Gandt « Les Mécaniques attribuées à Aristote et le renouveau de la science des machines au XVI<sup>e</sup> siècle » *Les études philosophiques* n°3, 1986, pp. 391-405.

<sup>33</sup> Vinegia, 1537.

accélééré dans lequel l'espace parcouru est égal au carré du temps (*Discours*, fin de la première journée).

Soit un mobile animé d'une vitesse  $v$ , acquise pendant le temps  $t$ .  $v = gt$ , avec  $g$  la vitesse acquise dans une unité du temps  $t$  (l'accélération). L'espace parcouru est  $s = gt/2$  et  $t = 1/2gt^2$ .

Galilée établit cette loi à partir de deux autres :

- soit deux mobiles mus d'un mouvement uniforme à des vitesses inégales, l'espace qu'ils parcourent en des temps inégaux sera entre eux dans un rapport composé du rapport des vitesses et du rapport des temps :  $E1/E2 = V1/V2 \times T1/T2$  ;

- le temps nécessaire à un mobile animé d'un mouvement uniformément accéléré pour franchir une certaine distance est égal à celui qui lui serait encore nécessaire s'il se déplaçait d'un mouvement uniforme dont le degré de vitesse serait la moitié du plus grand et du dernier degré de vitesse atteint au cours du mouvement uniformément accéléré.

Les Grecs, nous l'avons vu, savaient que la vitesse d'un corps qui tombe va croissant sans cesse au cours de sa chute. Mais on rapportait communément cette vitesse - et Galilée fera de même tout d'abord<sup>34</sup> - non pas à la durée de la chute mais à la longueur du parcours (la vitesse double en parcourant un espace double, etc.). En regard, liant vitesse et durée, Galilée sera à même, lui, de définir l'accélération comme un "moment de vitesse" ; la vitesse représentant à un instant  $t$  la sommation de tous les moments. Et, indiquant que le temps pris entre chaque moment de vitesse peut être aussi petit que l'on veut, Galilée définissait déjà l'accélération par un coefficient différentiel  $dv/dt$ .

Pour la mécanique moderne, la vitesse instantanée sera en effet le coefficient différentiel de l'espace parcouru  $s$  par rapport au temps  $ds/dt$ . C'est-à-dire plus exactement la limite du quotient d'un espace fini  $\Delta e$  par un temps fini  $\Delta t$  quand  $\Delta t$  tend vers 0. De sorte que pour un mouvement rectiligne, la vitesse instantanée est simplement la dérivée du rapport de l'espace au temps. La dérivée seconde est l'accélération :  $a = d/dt (ds/dt) = d^2s/dt^2$ .

2) Ce qui caractérise en propre le mouvement n'est pas le rapport d'une force à une vitesse mais celui d'une force à un changement de vitesse. Et c'est la définition moderne de la force que Galilée formulait ainsi avant Newton : tout déterminant du mouvement susceptible de provoquer en lui une accélération, ou plus exactement -

---

<sup>34</sup> Voir E. Mach *op. cit.*, p. 122 et sq.

parce que par "accélération" on est enclin à entendre un accroissement de vitesse - un changement de vitesse<sup>35</sup>.

3) La réflexion de Galilée affirme enfin qu'une intelligibilité géométrique du mouvement - c'est-à-dire, au sens même où Aristote l'entendait, de la Nature (voir ci-dessus) - est non seulement possible mais nécessaire pour comprendre celle-ci.

Au total, il ne manqua à Galilée que d'avoir formulé clairement le principe de l'inertie ; ce que fera René Descartes.

\*

### **3.3.7.**

*Descartes formule la loi d'inertie.*

Sans doute est-il vain de vouloir désigner le premier découvreur de la loi d'inertie. Sachant, on a pu le souligner, qu'il n'est guère de découverte importante en mécanique qui ne se prête à la même remarque. Les grands noms de cette discipline, en effet, sont moins des découvreurs au sens strict que des auteurs étant parvenus à formuler avec rigueur et dans toutes leurs conséquences des principes approchés par beaucoup d'autres. Quoi qu'il en soit, la conception du mouvement rectiligne uniforme ne devient parfaitement claire qu'avec Descartes. Dès une lettre *A Mersenne* du 18 décembre 1629, il énonce pour la première fois la loi d'inertie d'une façon nette : un corps ayant commencé à tomber, écrit-il, maintiendrait son mouvement vers le bas même s'il cessait d'être pesant et, en ce cas, sa vitesse n'augmenterait pas.

En regard, à la même époque, Galilée utilisait correctement le principe de la conservation du mouvement rectiligne uniforme (*Discours*, 1638, 4<sup>o</sup> journée) mais ne le formalisait pas, sans doute parce que cela heurtait sa propre conception de la gravité, toujours référée à la nature pesante des graves. Dans la pesanteur, Galilée voyait en effet, en un sens encore tout aristotélicien, une force propre aux corps pesants, distincte du mouvement indéfini et uniforme qu'il réservait au seul cas d'un mobile lancé sur un plan

---

<sup>35</sup> Voir A. Einstein & L. Infeld *L'évolution des idées en physique*, 1936, trad. fr. Paris, Champs Flammarion, 1983.

horizontal. Descartes n'y vit, lui, que le simple effet d'une accélération imprimée aux corps<sup>36</sup>.

Les principes de la mécanique cartésienne seront posés dans *Le Monde ou Traité de la lumière*, rédigé en 1633 mais que le procès de Galilée décidera Descartes à ne pas publier (il ne le sera qu'en 1664), reportant leur exposition aux *Principes de la philosophie* (1644, II<sup>o</sup> partie) que nous suivrons ci-après et dans lesquels le monde savant découvrit en général sa mécanique. Sachant que les idées cartésiennes seront également diffusées à travers le très répandu *Traité de physique* (1671<sup>37</sup>) de Jacques Rohault.

*Tout se ramène à l'étendue.*

Un corps, affirme Descartes, ne se définit que par une seule qualité : il a de l'extension. Il relève de l'étendue (*Principes*, II, §4) ; laquelle ne doit pas être confondue avec la Matière. A l'étendue ne s'attache en effet aucune idée de masse. En fait, hormis occuper un certain espace, ce qui est une donnée première, toute autre qualité que l'on prête aux corps (dureté, poids, etc.) dépend pour Descartes de leur état de mouvement ou plutôt du mouvement de leurs parties (§23). Les corps, ainsi, ont deux déterminations principales : leur extension et leur état de mouvement ; loin qu'ils soient par nature au repos.

De Galilée, Descartes retient en effet que le repos n'est qu'une rapidité infiniment petite ou une lenteur infinie, qu'il n'est donc nullement un état naturel ou particulier mais qu'il requiert lui-aussi une force explicative (§37), laquelle, mesurable, rend compte de la cohésion des corps (§55). *Tout dans le monde peut ainsi être ramené au mouvement local. Avec Descartes, la mécanique devient une approche réductionniste totale, susceptible de rendre compte, c'est-à-dire de permettre la mathématisation, de chaque phénomène.*

*Une seule nature de mouvement.*

Quant au mouvement, il n'existe que sous une seule forme : la translation (§24) et non sous plusieurs comme pour Aristote et les scolastiques, qui parlaient de mouvements sans déplacement (*motus ad formam, motus ad calorem* : mouvements de formation, calorique, etc.). Le mouvement se réduit à une trajectoire. Il est toujours dans le mobile et jamais dans ce qui le meut (§25). Par rapport à Aristote, le renversement est complet.

---

<sup>36</sup> Voir A. Koyré *Etudes galiléennes*, 1939, Paris, Hermann, 1986, III, p. 151 ; ainsi que B. Kouznetsov *La notion cartésienne de l'inertie et la science moderne* in (collectif) *Mélanges Alexandre Koyré*, 2 volumes, Paris, Hermann, 1964, I.

<sup>37</sup> Paris, Veuve de C. Saureux, 1671.

Tous les mouvements peuvent être ramenés au mouvement rectiligne uniforme ; le seul que Dieu a créé au départ (§36). Dieu crée les mouvements droits. La matière les courbe en ce qu'elle les empêche.

Il y a donc bien chez Descartes l'idée d'une matière se manifestant comme résistance, distincte de l'étendue géométrique, note Jean Wahl (*Du rôle de l'idée de l'instant dans la philosophie de Descartes*, 1920, pp. 27-28<sup>38</sup>). Une idée qui ne sera pourtant guère autrement développée.

Dieu n'a introduit ni ordre ni proportion dans la nature. La seule distinction qu'il a établie entre les choses tient à une diversité de mouvements. A partir de là, tous les mouvements particuliers sont engendrés par les simples lois de la nature et les dispositions de la matière, selon des règles que formulait déjà *Le Monde* :

1) Dans la nature se conserve toujours la même quantité totale de mouvement. La mesure mouvement/repos est toujours globalement respectée car les corps ne font qu'échanger leur mouvement lorsqu'ils se rencontrent (§ 36).

2) Quand deux corps se heurtent et que l'un pousse l'autre, le premier perd autant de mouvement qu'il en communique, ou le conserve intégralement s'il rebondit (§40).

Les lois du choc que Descartes énonce (§40 et sq.) sont fausses pour la plupart<sup>39</sup>. Huygens s'en rendra très vite compte, nous le verrons. Descartes ne tient aucun compte de l'élasticité, du ralentissement ni de la déformation des corps, lesquels ont pour lui la rigidité abstraite de solides géométriques. Et il va jusqu'à affirmer qu'un corps immobile ne peut être ébranlé par un plus petit que lui quelle que soit la vitesse de ce dernier.

3) Lorsqu'un corps se meut dans la nature, c'est le plus souvent en ligne courbe - c'est pourquoi les scolastiques pensaient que le mouvement naturel était le mouvement courbe - mais chacune de ses parties, en fait, tend à continuer son mouvement en ligne droite (§39). *L'action, c'est-à-dire l'inclination à se mouvoir, est différente du mouvement réel*. Elle est un état naturel et n'a donc besoin d'aucune force particulière. La force centrifuge

---

<sup>38</sup> Paris, Alcan, 1920.

<sup>39</sup> P. Costabel a cependant souligné que d'importants non-sens apparaissent dans la traduction française des *Principes* (surtout au §44) que Descartes n'a pu réviser (« Essai critique sur quelques concepts de la mécanique cartésienne » *Archives internationales d'Histoire des Sciences* n°80, juillet-septembre 1967, pp. 235-252).

tangentielle, ainsi, ne résulte pas d'une force autre qu'elle-même, souligne Descartes.

*Le mouvement n'a plus besoin d'un premier moteur.*

Si le mouvement est un état naturel, il est faux de croire qu'il requiert un moteur pour commencer et être entretenu ou, ce qui revient au même, qu'il faut plus de force pour le mouvement que pour le repos (§26). Il faut poser pour "première loi de la nature", en revanche, la loi d'inertie selon laquelle "chaque corps continue d'être en même état autant qu'il se peut et jamais ne le change que par la rencontre des autres" (§37). L'inertie correspond ainsi à et peut être calculée par la *résistance* qu'un corps est à même d'opposer à un changement d'état ; loin d'être cette tendance au repos, cette "paresse" naturelle de la matière ou « antitypie » qu'elle était encore chez un Kepler. *Chaque corps est caractérisé par une quantité de mouvement* (*Monde*, chap. VII ; *Principes*, §36), soit le quotient de sa "quantité de matière" (c'est-à-dire de son volume, de son extension, plus que de sa masse) par sa vitesse. Un corps, ainsi, peut se mouvoir deux fois plus vite qu'un autre deux fois plus grand que lui. Ils partageront alors la même quantité de mouvement  $mv$  et, par rapport au monde aristotélicien, la direction est donc abstraite des données premières du mouvement<sup>40</sup>.

Au total, comme le soulignera Leibniz, il manquait seulement aux principes cartésiens les deux notions de masse et de force.

\* \*

*D) La notion de force*

**3. 3. 8.**

*Leibniz.*

C'est par une approche volontairement abstraite, correspondant à l'idéal d'une science déduite a priori, que Leibniz amorce sa réflexion mécanique. En 1671, il publie un

---

<sup>40</sup> Voir D. Dubarle *Sur la notion cartésienne de quantité de mouvement* in (collectif) *Mélanges Alexandre Koyré*, II.

ouvrage (*Hypothesis physica nova*<sup>41</sup>) qui regroupe une *Theoria motus abstracti seu rationes motuum universales, a sensu et phaenomenis independantes* ("Théorie du mouvement abstrait ou raisons universelles des mouvements, indépendantes du sensible et des phénomènes"), ainsi qu'une *Theoria motus concreti seu Hypothesis de rationibus phaenomenorum nostri Orbis* ("Théorie du mouvement concret ou Hypothèse sur les raisons des phénomènes de notre Monde").

La première des deux théories est une analyse purement abstraite du mouvement et de ses lois. La seconde tente de résoudre les difficultés que la première rencontre dans la réalité. Se met ainsi en place une philosophie mécanique leibnizienne, dont Martial Guéroult a minutieusement retracé les étapes et cerné les attendus (*Leibniz. Dynamique et métaphysique*, 1967<sup>42</sup>).

La réflexion de Leibniz se poursuivra à travers une multitude de lettres et d'écrits épars<sup>43</sup> que la critique a mis à jour mais que Leibniz ne publiera pas, comme sa *Dynamica* de 1690, exhumée seulement en 1860 ; ou qui tomberont dans l'oubli à peine communiqués, comme ces deux textes de 1692, dont un *Essay de Dynamique* que Pierre Costabel a retrouvé dans les archives de l'Académie des Sciences de Paris (*Leibniz et la dynamique*, 1960<sup>44</sup>). Il n'existe donc pas d'ouvrage de Leibniz présentant l'ensemble de sa philosophie mécanique.

### *L'analyse différentielle appliquée au mouvement.*

Au XVII<sup>e</sup> siècle, certains, comme Gassendi, pour expliquer les divers degrés du mouvement (l'accélération), imaginaient que des intervalles de repos entraient dans sa structure. Ils concevaient ainsi comme des grains de mouvement correspondant aux différentes vitesses<sup>45</sup>.

Un principe tout à fait opposé guide Leibniz : le mouvement est un phénomène continu, c'est-à-dire infiniment divisible. Sa réflexion sera ainsi inséparable de ses travaux concernant le calcul infinitésimal (voir Index).

Dès la *Theoria motus abstracti*, Leibniz utilise la méthode des indivisibles de Cavalieri (voir 2. 3. 8.). Plus tard, l'élaboration d'outils de différenciation et d'intégration lui fournira la possibilité d'introduire une algorithmisation différentielle dans la science du

---

<sup>41</sup> Moguntiae, typis C. Kuchlesi, 1671.

<sup>42</sup> Paris, Aubier Montaigne, 1967.

<sup>43</sup> Voir la note 2 du § 17 dans l'édition du *Discours de métaphysique* (Paris, Vrin, 1988), p. 232.

<sup>44</sup> Paris, Hermann, 1960.

<sup>45</sup> Voir F. Bernier *Abrégé de la philosophie de Gassendi*, 1678, Paris, Corpus Fayard, 1992, I, pp. 296-299.

mouvement<sup>46</sup>. Mais d'emblée, avant même que sa réflexion mathématique ne soit aussi poussée (la *Nova methodus* est de 1684), Leibniz est convaincu que le traitement du continu oblige à raisonner sur des êtres abstraits comme le point et l'instant, dont le propre est d'être des quantités inassignables. A cet égard, il adopte comme première notion de la science du mouvement celle de *conatus*. Une notion qu'il emprunte à Thomas Hobbes.

*Un infiniment petit, le conatus.*

Hobbes définissait le conatus ou "effort" (Hobbes parle également en anglais d'*endeavour*) comme le mouvement qui s'effectue en un espace et en un temps toujours plus petits que ceux qui peuvent être considérés. Un mouvement s'effectuant en un point donc, c'est-à-dire non pas un élément qui ne peut être divisé mais dont la quantité n'est pas considérée (*De corpore : elementorum philosophiae sectio prima*, 1655, chap. XV, 107<sup>47</sup>).

Ainsi, pour Hobbes, le conatus était non pas un élément indivisible mais indivisé. Leibniz le considère lui aussi comme l'infiniment petit du mouvement, correspondant à l'espace indivisible parcouru en un instant et exprimant le degré de vitesse. Tout mouvement se réduit dès lors à des sommations algébriques de conatus et ainsi une approche purement abstraite du mouvement, comme celle que propose la *Theoria motus abstracti*, devrait-elle en toute logique pouvoir traiter intégralement des lois du choc par la simple composition de conatus et vérifier la conservation globale du mouvement dans le monde au sens cartésien.

*Le mouvement se heurte à une résistance : la masse des corps doit être prise en considération.*

Une telle approche rencontre cependant un évident problème que Descartes a trop négligé dans les faits : le choc des corps produit des soustractions de vitesse. Or, si le mouvement était en soi quelque chose d'absolu, selon les principes cartésiens, une telle déperdition ne devrait pas intervenir. Lorsqu'un corps en mouvement en rencontre par exemple un autre en repos, les deux corps devraient se mouvoir ensuite à la vitesse du premier puisque, selon Descartes, ils ne font qu'échanger leur vitesse et que la vitesse de

---

<sup>46</sup> Sur l'impact de la mathématisation différentielle de la mécanique, à travers notamment Pierre Varignon, voir M. Blay *La naissance de la mécanique analytique*, Paris, PUF, 1992, ainsi que, du même, *Les raisons de l'infini*, Paris, Gallimard, 1993, p. 159 et sq.

<sup>47</sup> trad. fr. Paris, Vrin, 1999.

l'un d'eux est nulle. Or il n'en est pas ainsi. Le mouvement rencontre une *résistance* qui lui fait perdre de la vitesse. Descartes ne rend pas pleinement compte de l'inertie des corps, qui se traduit comme résistance chez ces derniers. Dans l'ensemble de l'univers, ainsi, contrairement à ce qu'il soutient, le mouvement semble devoir se détruire lui-même et le monde retourner au néant ; tout son dynamisme étant en quelque sorte absorbé par sa masse. Dès lors, comment invoquer une loi de conservation universelle qui éviterait que le mouvement ne se perde ?

Par ailleurs, quelle réalité physique est à même de fonder le fait que deux conatus de direction contraire, en se heurtant, entraînent une diminution de la vitesse *de chacun des deux* ? D'où vient cette résistance des corps dont témoigne l'expérience la plus élémentaire ?

Chez Descartes, nous l'avons vu, la masse n'était pas prise en compte. Les corps se réduisaient à l'étendue. Force est pourtant de reconnaître, souligne Leibniz, qu'il y a autre chose dans la nature que la pure étendue géométrique.

A force de simplifier la Physique, de la vider de tout contenu qui ne serait pas purement géométrique, écrit Pierre Duhem, Descartes l'a réduite à un vain fantôme, incapable de représenter le monde des corps réels (*L'évolution de la mécanique*, 1903, p. 16) et la réflexion de Leibniz, aussi bien, deviendra de manière privilégiée une critique des principes cartésiens à compter d'une *Brevis demonstratio* publiée dans les *Acta Editorum* en 1686.

\*

L'étendue ne saurait constituer la substance des corps, écrit Leibniz dans son *Discours de métaphysique* (1685, §12<sup>48</sup>). Seule est réelle la force (§18). Les notions de grandeur, de figure et de mouvement doivent elles aussi être rangées parmi les qualités secondes que Descartes distinguait en regard d'elles (poids, couleur, etc.). Elles sont quelque chose "d'imaginaire et de relatif".

Par ailleurs, les lois du choc cartésiennes sont surtout fausses, souligne Leibniz, en ce qu'elles violent le principe de continuité. A un changement infinitésimal dans les données, elles font correspondre deux aspects totalement différents dans les phénomènes.

---

<sup>48</sup> Paris, Vrin, 1988.

Une balle frappée par un maillet est ainsi réputée passer en un instant du repos au mouvement. Comme si la transmission du mouvement pouvait être instantanée. Elle a en fait toujours lieu de manière progressive et continue, corrige Leibniz. Elle implique un temps fini au cours duquel se manifeste l'effet d'une résistance de la matière au mouvement. La masse rend compte ainsi de la variation continue du mouvement parce qu'elle est quelque chose que celui-ci doit continûment faire l'effort de surmonter. Elle est un fait en chaque corps, que seule l'expérience permet de découvrir, de sorte qu'en regard la mesure du mouvement ne saurait être déduite a priori. Elle oblige à considérer le mouvement comme assimilable à un *travail*.

***La notion de travail.***

Au sens moderne, le travail correspond à l'une des trois équations de base de la dynamique.

Soit  $t$  = le temps,  $s$  = la distance parcourue,  $v$  = la vitesse et  $a$  = l'accélération, on a :

$$v = at$$

$$s = 1/2at^2$$

$$as = v^2/2$$

En introduisant la masse  $m$  de l'objet en mouvement, il vient :

$$mv = mat$$

$$ms = ma/2.t^2$$

$$mat = mv^2/2$$

En introduisant une force motrice  $p$ , il vient enfin :

$$mv = pt \text{ (impulsion)}$$

$$ms = pt^2/2$$

$$ps = mv^2/2 = \Delta p.ds = \text{travail (unité = le Joule)}.$$

Lorsque Descartes parlait de "force", il s'agissait en fait de ce que nous nommons "travail". La force correspondait en effet essentiellement pour lui au principe des travaux virtuels, sur lequel il entendait fonder toute la statique : la même "force" qui peut lever un poids de cent livres à deux pieds peut en lever un de deux cents livres à la hauteur d'un pied ou quatre cents à un demi-pied.

Ce principe est énoncé par Descartes dans un petit traité de mécanique joint en appendice à une lettre du 5 octobre 1637 adressée à Constantin Huygens (*Explication des engins par l'aide desquels on peut avec une petite force lever un fardeau fort pesant*).

Descartes, comme on l'a noté, s'efforçait de ne pas distinguer la force du travail. Car, autrement, toute idée de force ne pouvait à ses yeux que renvoyer à quelque "qualité occulte". Descartes s'efforçait, en d'autres termes, de ne considérer toute force qu'en acte, c'est-à-dire comme un effet et nullement comme une cause. C'est ainsi qu'il ne parlait pas de la "force" déployée par un homme pour lever un poids mais de son "action"<sup>49</sup>.

En dynamique, la formule  $mv$  de la quantité de mouvement conduisait à déterminer la force uniquement par la vitesse et réciproquement, selon une vision assez intuitive : il est évident qu'un choc est d'autant plus fort que la vitesse est plus grande et réciproquement.

Pour Descartes, nous l'avons dit, le mouvement était un état naturel. Dès lors il devenait inutile de distinguer entre la force à l'origine du mouvement et la force créée par le mouvement. Cette approche peut sembler résolument moderne et elle l'était en effet en son temps. Moderne ne signifie pas obligatoirement fertile, néanmoins, et cette conception empêcha aussi bien Descartes de chercher plus avant un équivalent dynamique du travail, soit un "travail disponible" tenant notamment au fait que, dans le cas de la chute des corps, le sol peut jouer le rôle de "réservoir de quantité de mouvement"<sup>50</sup> - une énergie potentielle dirions-nous - associé au mouvement, qu'il déterminait pourtant dans la statique à travers son principe des travaux virtuels. Cela, c'est Christian Huygens qui le fit.

*Huygens. La critique des lois du choc cartésiennes.*

Dès 1652, Huygens avait critiqué les règles du choc cartésiennes et notamment la quatrième règle (*Principes*, §49) indiquant qu'un corps en repos ne peut être mis en mouvement par un plus petit que lui. Dans une communication au *Journal des Sçavans* du 18 mars 1669, intitulée *Règles du mouvement dans la rencontre des corps*<sup>51</sup>, Huygens soulignait que la quantité de mouvement des différents corps ne se conserve pas en valeur absolue lors des chocs : les mouvements de signes contraire s'empêchent ou s'annulent

---

<sup>49</sup> Voir H. Carteron « L'idée de la force mécanique dans le système de Descartes » *Revue philosophique* T. XCIV, 1922, pp. 243-277.

<sup>50</sup> Voir M. Le Bellac *Introduction à la mécanique*, Paris, Belin, 1985, p. 113.

<sup>51</sup> in *Œuvres complètes*, La Haye, M. Nijhoff, 1888-1944, T. XIX.

(leurs vitesses baissent). La quantité qui se conserve n'est pas  $mv$  mais  $1/2mv^2$  (5° & 6° règles)<sup>52</sup>.

Huygens découvrit également ceci d'étonnant qu'on peut multiplier le mouvement au moyen de chocs successifs : un corps au repos reçoit plus de mouvement d'un autre, plus ou moins grand que lui, quand s'interposent entre eux  $n$  corps que lorsqu'ils entrent en contact directement ; surtout si les  $n$  corps intermédiaires forment avec eux une progression géométrique continue. La quantité de mouvement  $mv$ , découvrait ainsi Huygens, peut non seulement diminuer mais elle peut encore être augmentée<sup>53</sup>.

Revenons en effet au principe des travaux virtuels, au nom duquel Descartes pouvait affirmer qu'en tombant de quatre aunes, un corps d'une livre acquiert autant de force qu'un autre de quatre livres tombant d'une aune. D'après les lois de Galilée, nous l'avons vu, lorsqu'un corps tombe, sa vitesse est proportionnelle à la racine carrée de la hauteur de sa chute. Le premier corps aurait donc une vitesse de  $\sqrt{4} = 2$  et le second une vitesse de  $\sqrt{1} = 1$  et leurs quantités de mouvement respectives seraient différentes :  $1 \times 2$  pour le premier et  $4 \times 1$  pour le second. La règle du mouvement de Descartes, fondée sur la conservation de la quantité de mouvement, n'est pas en accord avec sa définition du travail.

En effet, si l'on mesure la force qui anime chacun des corps par le principe des travaux virtuels, l'équivalence des quantités de mouvement est non seulement prise en défaut mais le produit  $mv$  aboutit même à une impossibilité manifeste. Car si la force d'un corps est égale à sa quantité de mouvement, au corps de quatre livres d'une vitesse 1 (*i.e.* : capable de l'élever à une aune) correspondrait dans le corps d'une livre une vitesse 4, soit la possibilité pour lui de remonter à 16 aunes, ce qui ne peut se voir, car dans un tel cas de figure, un mouvement reproduirait sa cause (la hauteur de sa chute en l'occurrence) et quelque chose de plus. Le mouvement perpétuel serait possible.

#### ***Le mouvement perpétuel***

*Une illusion pérenne.*

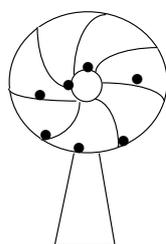
Un mouvement perpétuel serait produit par une machine fonctionnant en circuit fermé sans recevoir aucun apport extérieur d'énergie. L'idée serait née en Inde vers 1150 avec l'astronome et mathématicien Bhaskara. Le dernier brevet concernant une machine à mouvement perpétuel

<sup>52</sup> Voir P. Mouy *Le développement de la physique cartésienne. 1646-1712*, Paris, Vrin, 1934, p. 192 et sq.

<sup>53</sup> Voir P. Costabel « La septième règle du choc élastique de Christian Huygens » *Revue d'histoire des sciences* T. X, avril-juin 1957, pp. 120-131.

fut déposé aux USA en 1868<sup>54</sup>. Mais à lire ce qu'écrit Céline dans *Mort à crédit* (1936<sup>55</sup>), il faut croire que le mouvement perpétuel inspira bien après cette date. Les inventeurs se répartissent en effet par marotte et parmi eux, écrit-il, « les véritables déchainés, les tout à fait sinoques viennent presque tous du « Perpétuel ». Ceux-là, ils sont résolus à n'importe quoi, pour vous prouver la découverte ! Ils vous retourneraient la peau du bide, si vous émettiez un petit doute... C'est pas des gens pour taquiner » (II, p. 406).

Ce fut donc une erreur pérenne que celle fondée notamment sur l'idée qu'à l'aide d'objets mobiles fixés à l'intérieur d'une roue, il est possible d'arriver à une situation telle que le centre de gravité du système soit toujours en dehors du centre de la roue et que celle-ci soit donc toujours sollicitée à tourner, comme dans l'exemple ci-dessous d'une roue à poids roulants se déplaçant à l'intérieur d'alvéoles :



*Une image plus qu'une idée, qui se prête à des illustrations notamment musicales.*

Au mouvement perpétuel correspond l'idée non pas tant d'une répétition que d'une puissance inépuisable, indéfiniment entretenue. Non pas un mouvement indéfiniment continué mais une production indéfinie de travail.

C'est ainsi qu'en musique, le *perpetuum mobile* est un mouvement souvent rapide et virtuose fondé sur le développement ininterrompu et régulier de notes ayant une valeur brève et égale, tout à fait distinct de l'*ostinato*, la répétition inlassable, à la basse, d'une série de notes. La *Toccata et fugue en fa majeur BWV 540* pour orgue de Bach<sup>56</sup>, le scherzo de la Deuxième Symphonie de Schumann (1845), le début du troisième mouvement de la *Troisième symphonie* de Bruckner (1889), le *Perpetuum mobile* d'Ottokar Novacek (1866-1900), les *Trois mouvements perpétuels* pour piano de Francis Poulenc (1918), ainsi que la Septième des *Variations sur un thème de Frank Bridge* de Britten (1937) en sont des exemples célèbres. Le mouvement perpétuel donne l'impression d'un souffle haletant et inépuisable, dont György Ligeti s'est plu à imaginer le dérèglement. Dans son *Continuum* pour clavecin (1968), la musique, comme en un déboîtement de machine, finit par disparaître comme en spirale dans le néant...

<sup>54</sup> Voir B. Gille « La longue histoire du mouvement perpétuel » *La Recherche* n° 114, septembre 1980, pp. 985-987.

<sup>55</sup> 2 volumes, Paris, Gallimard, 1952.

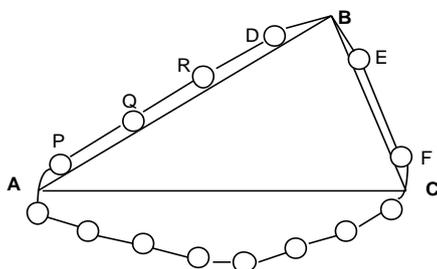
<sup>56</sup> La toccata adopte souvent la forme d'un mouvement perpétuel et les deux termes ont pu ainsi devenir, à tort, synonymes. La célèbre *Toccata en ré mineur* de Bach n'est pourtant en rien un mouvement perpétuel.

\*

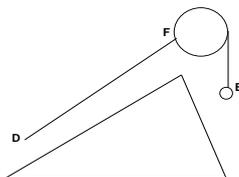
*Importance de l'impossibilité de principe du mouvement perpétuel.*

Simon Stévin fut le premier à fonder une démonstration de mécanique sur l'impossibilité du mouvement perpétuel, l'érigeant ainsi au rang d'un principe de la mécanique (*Hypomnemata mathematica*, 1605<sup>57</sup>).

Un poids repose sur un plan incliné. Sa chute, dès lors, est moins rapide qu'elle ne le serait sur un mur vertical, comme si le poids avait à vaincre l'effort d'un contrepoids plus petit que lui. Quelle loi de statique peut-elle expliquer un tel phénomène, dit "problème de l'équilibre des corps sur un plan incliné" ? Stévin imagina l'expérience suivante, dont le schéma devait d'ailleurs lui servir d'épithète :



*Le triangle ABC, dont le côté AB est deux fois plus long que BC, est entouré d'une chaîne de quatorze boules égales et équidistantes. Le tout est nécessairement en équilibre, note Stévin, car si la "pesanteur apparente" (gravitas secundum situs) des boules EF n'était pas équivalente à celle des boules PQRD, celles-ci, plus lourdes, descendraient et celles-là montraient et ceci indéfiniment. On obtiendrait un mouvement perpétuel, ce qui est absurde. Il faut donc considérer que les pesanteurs apparentes des corps placés sur les plans inclinés AB et BC sont inversement proportionnelles aux longueurs de ces plans, d'où le raccourcissement de la durée de chute. Il en suit que la pesanteur apparente est, par rapport au poids capable de l'équilibrer, égal au quotient de l'hypoténuse AB et de BC, de sorte que le fil DF maintiendra le poids D en équilibre si le poids E est égal à  $D \cdot AB/BC$  :*



*Seulement, si elle paraît manifeste, l'impossibilité du mouvement perpétuel est difficile à fonder.*

Cependant quelle absurdité logique pouvait bien faire valoir Stévin contre le mouvement perpétuel ? Son sentiment est purement instinctif, note Ernst Mach (*La mécanique*, 1883, p. 30 et sq.). *Le mouvement perpétuel est absurde, en d'autres termes, parce qu'on n'a jamais observé rien de tel. La mécanique adopta ainsi pour principe une impossibilité qu'elle n'était*

<sup>57</sup> 2 volumes, Lugduni, Batavorum J. Patii, 1605-1608.

*guère capable de démontrer et qu'elle rattachait simplement au fait qu'aucun système en mouvement n'étant complètement isolable d'un milieu qui lui résiste, le mouvement relatif de ses parties ne peut se faire sans résistance et donc sans finir par s'éteindre.*

C'est encore ce fait qu'invoquent d'Alembert (article "Perpétuel" de l'*Encyclopédie*, 1751-1765<sup>58</sup>) ou Maupertuis (*Lettre XXI*<sup>59</sup>) contre le mouvement perpétuel, dont le mirage, au milieu du XVIII<sup>e</sup> siècle, était loin d'être dissipé : en 1755, l'Académie des Sciences décida de ne plus examiner les trop nombreux mémoires qui lui étaient communiqués à ce sujet !

On ne peut guère en dire beaucoup plus de nos jours.

\*

*Une illustration du principe de la dégradation de l'énergie.*

*Dans les faits, le travail des forces appliquées à un système quelconque pendant un certain temps n'est jamais égal à l'accroissement de la force vive du système mais le surpasse toujours. Tout de même qu'on ne peut construire un mécanisme qui, de lui-même, revienne périodiquement au même état avec une force vive égale ou accrue, note Pierre Duhem, car des forces dissipatives de viscosité exercent un travail toujours négatif, rendant impossible le mouvement perpétuel que Leibniz nommait "physique" (*L'évolution de la mécanique*, 1903, chap. XII<sup>60</sup>).*

D'autre part, la force se conserve et ne saurait créer d'elle-même son propre surcroît, rendant cette fois impossible le mouvement perpétuel que Leibniz nommait "mécanique". C'est ainsi que les oscillations d'un pendule vont s'amortissant du fait des mouvements que le pendule communique à l'air ambiant. Si l'on imagine que tout frottement est supprimé, le pendule sera capable de remonter à la hauteur d'où il est parti mais pas au-delà. *L'impossibilité du mouvement perpétuel est une illustration du principe de la dégradation de l'énergie, lequel ne repose que sur une vérité d'expérience.*

Dans les faits, on assiste à une dégradation de l'énergie que Sadi Carnot devait ériger en loi physique (voir 2. 2. 24.) et que Hermann Helmholtz posera au principe même de la conservation de la force (voir 2. 4. 14.)<sup>61</sup>. Toutes les modifications qui se produisent dans le monde physique, en d'autres termes, sont caractérisées non par des égalités mais par une inégalité qui est toujours de même sens, note Duhem. L'impossibilité du mouvement perpétuel est une illustration de l'irréversibilité physique. Mais ce n'est là finalement qu'une vérité d'expérience, au fondement de la mécanique rationnelle.

*La force d'un mouvement est différente de sa vitesse.*

<sup>58</sup> Reprint en 35 volumes, Stuttgart-Bad Cannstatt, F. Frommann Verlag, 1988.

<sup>59</sup> in *Lettres*, Berlin, 1753.

<sup>60</sup> *op. cit.*

<sup>61</sup> Voir J. Merleau-Ponty *Le mécanisme et les avatars du mouvement perpétuel*, *op. cit.*, 1983.

Un corps qui tombe, souligne Huygens, s'il remonte en vertu de la vitesse acquise, repassera exactement par les mêmes vitesses aux mêmes altitudes. Un pendule, arrivé au bas de sa course, ne possède ainsi une force suffisante que pour remonter à la hauteur exacte d'où il est descendu (*Horologium oscillatorium*, 1673<sup>62</sup>).

Plus généralement, si une masse  $m$  tombant d'une hauteur  $h$  est comme une masse  $h$  tombant d'une hauteur  $m$ , leurs quantités de mouvement définies par le produit  $mv$  pourront ne pas être égales, car la vitesse de  $m$  est  $v_h$  et celle de  $h$  est  $v_m$ . Une équivalence, en revanche, peut effectivement être posée entre leurs "forces vives" définies par le produit  $mv^2$ . Une force vive que Leibniz nommera "*potentia*", la puissance, la force et qui est déterminée par l'effet qu'elle peut produire (la remontée à une hauteur de  $4x1^2 = 1x2^2 = 4$  dans notre exemple), soit par un travail virtuel. La force d'un mouvement doit ainsi être estimée par la quantité de l'effet qu'elle peut produire, ce qui est bien différent de la vitesse qu'il acquiert, conclut Leibniz dans son *Discours de métaphysique* (§17<sup>63</sup>).

\*

### 3.3.9.

*La force vive  $mv^2$ . L'idée d'un travail potentiel.*

Chez Leibniz, la formule  $mv^2$  apparaît pour la première fois dans le *De corporum concursu* (1678<sup>64</sup>). Avec elle, Leibniz est certain de tenir un absolu : la force vive. Une force interne propre aux corps, une "*vis elastica*" qui se manifeste à l'occasion de leur choc avec d'autres corps.

#### *Les notions de chocs élastiques, durs et mous.*

Pourquoi *elastica* ? C'est que la démonstration de Huygens ne concernait que les corps élastiques. Les corps parfaitement durs, en effet, perdent de la force lorsqu'ils se choquent, tandis que les corps élastiques connaissent un instant de compression pendant lequel leur vitesse est nulle et leur force cinétique est emmagasinée comme en un ressort, de sorte qu'en reprenant leur forme, ils retrouveront ou perdront la quantité de mouvement perdue ou gagnée pendant le choc.

<sup>62</sup> *Œuvres complètes, op. cit.*, T. XVII.

<sup>63</sup> *op. cit.*

<sup>64</sup> trad. fr. in Leibniz *La réforme de la dynamique*, Paris, Vrin, 1994. Voir F. Duchesneau *La dynamique de Leibniz*, Paris, Vrin, 1994, p. 112 et sq

En fait, on nomme de nos jours "élastiques" les chocs au cours desquels l'énergie cinétique totale d'un système est conservée, par opposition à sa disparition dans le cas de chocs "mous" (*i.e.* : les deux mobiles n'en font plus qu'un après le choc) ou "durs" (les deux mobiles perdent de la force lorsqu'ils se rencontrent). Si l'énergie de collision est faible, tous les matériaux sont peu ou prou élastiques : les solides sont en effet formés d'atomes solidarisés par des interactions variées – des liaisons – qui se comportent comme de petits ressorts, s'étirent ou se compriment, si les forces subies par les atomes sont faibles.

De là, Leibniz n'hésitera pas à dire que tous les corps ont quelque chose d'élastique<sup>65</sup>. On s'est moqué de lui à ce propos - Maupertuis le premier. Mais c'est pour Leibniz une simple conséquence de son principe de continuité, selon un raisonnement que nous trouvons encore exprimé chez Siméon-Denis Poisson (*Traité de mécanique*, 1833<sup>66</sup>). Tous les corps, sauf ceux qui sont totalement mous, soutient en effet ce dernier, se compriment toujours un tant soit peu quelque durs qu'on les suppose (I, p. 231 et sq.). C'est là l'unique condition, en effet, pour qu'ils puissent échanger leurs vitesses par degrés infiniment petits. Car autrement, s'ils étaient parfaitement durs, ils cesseraient d'agir l'un sur l'autre à l'instant même de leur rencontre pour conserver la forme que celle-ci leur donne (II, p. 27 et sq.).

Leibniz sera même tenté de se servir de cette force vive pour expliquer le mystère de l'Eucharistie<sup>67</sup>.

***Le dogme de la transsubstantiation. Ou quand un miracle pose un difficile problème de physique.***

Le dogme de la transsubstantiation préoccupa beaucoup l'âge classique, ce qui peut paraître tout à fait étonnant aujourd'hui. C'est que l'acceptation ou le rejet de ce dogme, établi par les Conciles de Latran (1215) et de Lyon (1274) et décrété par le Concile de Trente en 1551 (mais l'idée apparaît dès les premiers temps de l'Eglise), qui affirme que le Christ est réellement présent dans l'hostie et le calice non seulement par sa vertu divine mais en chair et en sang par l'effet de la formule sacramentelle "ceci est mon corps", ce dogme servait de pierre de touche pour le discernement des "hérétiques" - c'est-à-dire des réformés, qui ne cessaient de souligner le paganisme des rites catholiques. De là, la défense de ce dogme prit des proportions considérables – certains ont ainsi suggéré que la condamnation de Galilée en 1633 tint, bien plus qu'à sa défense des thèses de Copernic, à son atomisme soupçonné, lequel, niant la réalité

<sup>65</sup> Voir F. Duchesneau *op. cit.*, p. 205 et sq.

<sup>66</sup> 2 volumes, Paris, Bachelier, 1833.

<sup>67</sup> Voir M. Fichant « De la puissance à l'action : la singularité stylistique de la Dynamique » *Revue de métaphysique et de morale* n°1, janvier-mars 1995, pp. 49-82. Ainsi que G. Milhaud *Les lois du mouvement et la philosophie de Leibniz* in *Nouvelles études sur l'histoire de la pensée scientifique*, Paris, Alcan, 1911, p. 215.

même des qualités sensibles du pain et du vin, n'avait plus besoin de postuler un miracle pour expliquer leur maintien lors de la transsubstantiation<sup>68</sup>.

Selon le dogme catholique, seules les apparences ou "espèces" du pain ou du vin subsistaient et il y avait donc bien changement de substance, transsubstantiation. Tandis que beaucoup de protestants défendaient plutôt la consubstantiation ou impanation, déjà défendue par Duns Scot et Guillaume d'Occam, pour dire que le corps et le sang du Christ étaient présents conjointement aux substances du pain et du vin - ce qui n'était néanmoins pas l'avis de Luther, pour lequel la nature divine est de toute manière partout (théorie de l'ubiquité), ni celui des Calvinistes, n'admettant qu'une présence spirituelle et non pas réelle du Christ.

Ce dogme posait un évident problème de physique car, même habités par le corps du Christ, le Pain et le Vin conservaient leur aspect et leurs qualités. Dès lors, comment expliquer que les "espèces" du pain et du vin demeurent en un lieu occupé par un autre corps, celui du Christ en l'occurrence ? Si les espèces des choses peuvent apparaître en un lieu où les substances de ces dernières ne sont plus, comment être sûr que toute notre science n'est pas entièrement fautive ?

A ceci, les scolastiques avaient déjà par avance répondu que seuls les "accidents" du pain et du vin (leur aspect, leur consistance, ...) demeurent, séparés de leur substance (on parlait "d'accidents réels") et que cette séparation a toujours un caractère non-ordinaire et est un miracle.

Une solution que Descartes traite de fiction (*A Mesland*, le 9 février 1645). Selon lui, le corps du Christ occupant exactement la place du pain et du vin communique plutôt à nos sens exactement les mêmes sensations (rappelons que la seule réalité des corps est, pour Descartes, leur extension, voir ci-dessus)<sup>69</sup>.

Mais le dogme invitait également à admettre que les corps ont une réalité qui n'est pas seulement matérielle, c'est-à-dire qui ne disparaît et ne se transforme pas avec leur substance corporelle : le corps du Christ est dans l'hostie, ainsi que dans chacune de ses parties lorsqu'elle est brisée pour être partagée. Les corps, en d'autres termes, ont une réalité spirituelle qui dépasse leur seule présence matérielle puisqu'elle se retrouve en chacun sans se limiter à aucun en particulier. Leibniz put être tenté de croire que la force vive apportait la preuve de l'existence d'une telle réalité spirituelle.

A notre époque, on parlera plutôt de « transsignification » ou de « transfinalisation »<sup>70</sup> mais l'Encyclique *Mysterium Fidei* (1965) dira qu'on ne peut en rester à ces termes pour exprimer de manière exhaustive le mode de présence du Christ dans l'Eucharistie.

<sup>68</sup> Voir P. Costabel « L'atomisme, face cachée de la condamnation de Galilée ? » *La vie des sciences* T. IV n° 4, juillet-août 1987, pp. 349-363 & E. Festa « La querelle de l'atomisme, Galilée, Cavalieri et les jésuites » *La Recherche* n° 224, septembre 1990, pp. 1038-1047.

<sup>69</sup> Voir J. Laporte *Le rationalisme de Descartes*, Paris, PUF, 1950, p. 405 et sq.

<sup>70</sup> Voir E. Schillebeeckx *La présence du Christ dans l'Eucharistie*, trad. fr. Paris, Cerf, 1970.

*Dans sa définition du mouvement, Leibniz est à même de considérer l'effet entier de ce qui le cause.*

Au principe cartésien selon lequel la quantité de mouvement se conserve, c'est-à-dire que les mouvements sont capables d'échanger leur force, Leibniz en substitue un autre affirmant qu'il y a toujours une parfaite adéquation entre la cause pleine et l'effet entier. Ce qui se conserve ainsi n'est pas une sommation de mouvements mais la force que chacun d'entre eux exprime.

Cependant, Leibniz reste bien cartésien en ceci qu'il ne voit dans la force vive qu'un effet et non quelque qualité occulte. Il ne distingue pas entre cause et effet<sup>71</sup>. La force vive n'existe que dès lors qu'un mouvement s'enclenche. Tant que le corps est au repos, Leibniz nomme cette même force "morte" (notre moderne énergie potentielle). *Le mouvement peut dès lors être référé aux caractéristiques du corps qu'il affecte, dont sa vitesse. Leibniz est allé au bout du concept d'inertie.*

*Idée d'une science du mouvement, d'une dynamique.*

La force n'est pas le mouvement mais son principe dans chaque corps, dans chaque substance, qui dépend de sa masse et de sa vitesse et le rend capable de mouvoir ou d'endommager un autre corps. Leibniz lui fait tenir le milieu entre le pouvoir et l'action, la puissance et l'acte, en ce sens qu'elle manifeste avant tout la spontanéité d'une tendance (*Discours de métaphysique*, § 18).

Cela, cependant, ne doit pas être interprété comme une affirmation selon laquelle la force serait comme un élément animant la matière. La force est plutôt comme le fait de la *direction* du mouvement - nous disons effectivement, en termes modernes, que la force vive, l'énergie cinétique, est une énergie "ordonnée". En ce sens, souligne Leibniz, référée à chaque corps particulier, elle permet de distinguer mouvements relatifs et mouvements absolus (voir 2. 2. 12.). De là, surtout, apparaît la possibilité d'une science du mouvement, d'une "dynamique", dont Leibniz sera le premier à forger le mot en 1690.

L'élément premier de cette dynamique, nous l'avons vu, est pour Leibniz le conatus, soit la différentielle de vitesse entre le mouvement déjà produit et le mouvement en train de se produire à l'instant. L'intégrale instantanée des conatus est ce que Leibniz nomme l'*impetus* ; soit la force vive, en regard de la force morte définissant le conatus.

---

<sup>71</sup> Voir G. Milhaud *op. cit.*, p. 213.

L'*impetus*, toutefois, n'est pas encore le mouvement réel. Il est instantané et représente plutôt son impulsion.

L'*impetus*, nous l'avons vu, était une notion connue de longue date. Mais chez Vinci, Benedetti, Alessandro Piccolomini, ou Galilée encore, il représentait une qualité conférée par le moteur au mobile et qui ne pouvait donc que tendre à s'affaiblir sans cesse. Il n'était pas référé à la nature propre du mobile, c'est-à-dire à son inertie, comme Descartes, le premier, le concevra. Pour ce dernier, l'*impetus* correspondait en effet au mouvement tangentiel que suivrait un corps si son mouvement n'était pas empêché.

*Seule la force existe. Le mouvement, lui, est une abstraction issue d'un calcul.*

La force vive  $mv^2$  est l'intégrale de l'expression  $mvdv$ . En effet,  $v$  étant la vitesse d'un mobile en un instant donné, elle s'accroît à chaque instant d'une différentielle  $dv$  et  $mv^2$  représente ainsi ce dont procède tour à tour chacune des positions successives du mobile. *Le mouvement ne correspond donc à aucune donnée actuelle. C'est une abstraction*<sup>72</sup>. *Au-delà de la force qui l'enclenche, souligne un commentateur, le mouvement, étant une chose successive, n'existe pas pour Leibniz, non plus que le temps, parce que toutes ses parties n'existent jamais ensemble. La force, elle, existe toute entière à chaque moment de la durée*<sup>73</sup>.

*Une conception relativiste de la masse.*

La dynamique requiert donc deux principes : l'impulsion des corps, leur *vis activa* ou force vive et une *vis passiva*, leur résistance ; principes tous les deux corrélés à la masse des corps. L'addition de forces ne peut jamais conduire à baisser leur total dans l'univers, puisqu'elles sont toutes positives, définies par une vitesse qui est au carré.

En même temps, le simple fait de la masse, lui, interdit que la quantité de force totale augmente dans l'univers. Ainsi, un changement quelconque dans le mouvement d'un élément quelconque, en grandeur ou en direction, doit toujours être accompagné d'un changement compensateur dans le mouvement d'un ou plusieurs autres éléments.

Comme le souligne M. Guérault (p. 162 et sq.), le principe qui guide Leibniz est celui selon lequel le positif dans le monde, donc les éléments de mouvement entre autres, quelle que soit leur direction, ne peuvent que s'ajouter et jamais s'entredétruire. Et comme il voit dans la force vive la véritable réalité du mouvement, Leibniz refuse de faire de la

---

<sup>72</sup> Voir L. Brunschvicg *L'expérience humaine et la causalité physique*, Paris, Alcan, 1922, p. 217.

<sup>73</sup> Voir P. Costabel *Leibniz et la dynamique*, 1960, p. 53 et sq.

masse une force réelle, à la différence de Newton nous le verrons. La masse, pour lui, ne correspond à aucune réalité positive et n'est qu'une *limitation* de la force active : elle ne diminue pas positivement la vitesse reçue - cela serait agir. Elle en modère simplement l'effet. Elle ne requiert donc pas un principe particulier d'explication. Elle renvoie simplement au fait de l'existence de la matière.

\*

*La masse, contingence première.*

Au total, la physique de Leibniz ne fait intervenir aucun principe métaphysique dans l'explication des corps ; rien d'occulte, rien qui ne puisse être rendu par une stricte définition mathématique. Comme le souligne M. Guérout (*op. cit.*), si la force est un principe immatériel assimilable à l'âme, la métaphysique de Leibniz n'est pas pour autant le complément d'une science imparfaite mais la conséquence nécessaire d'une physique autonome.

Voir la longue note que M. Guérout consacre au fatalisme moral que semblent impliquer les conceptions leibniziennes (p. 182).

Leibniz peut donc être rangé parmi les mécanistes. Il est même tout à fait cartésien, a-t-on souligné, dans sa volonté de ramener l'unification du monde aux lois du mouvement d'impulsion<sup>74</sup>.

En même temps, Leibniz voit dans leur force - qui, dans sa conservation même est un principe et ne correspond à aucune existence matérielle ponctuelle ou instantanée - la réalité même des corps et cela lui ouvre la voie d'une continuité entre physique et théologie, que le mécanisme cartésien, nous l'avons vu, avait rompue<sup>75</sup>.

Si Leibniz reprend Descartes, ainsi, c'est avant tout quant à la certitude de pouvoir ramener toute réalité physique à une nécessité logique ou géométrique. Les lois du mouvement, souligne Leibniz, ne sont pas absolument démontrables géométriquement et ceci parce que le fait de la masse est premier. *Pour être fondée en raison, la dynamique suppose donc quelque chose qui n'est pas logiquement nécessaire : que la force se*

---

<sup>74</sup> Voir Y. Belaval *Leibniz face à Descartes* in (collectif) *Leibniz. Aspect de l'homme et de l'œuvre*, Paris, Aubier Montaigne, 1968, p. 193 et sq.

<sup>75</sup> Voir E. Boutroux *La philosophie allemande au XVII<sup>e</sup> siècle*, Paris, Vrin, 1929, chap. IX.

*conserve, soit que la cause du mouvement se prolonge dans l'univers, inaltérée en ses effets. Or cela renvoie, souligne Leibniz, non pas à une nécessité aveugle réglant les phénomènes physiques mais à un principe d'ordre et de perfection, à une sagesse régissant le monde (Essais de Théodicée, 1710, III<sup>e</sup> partie, §§ 345-349<sup>76</sup>).*

D'une grande richesse, la réflexion leibnizienne était également d'une considérable nouveauté. Apparemment, face à Descartes qui excluait Dieu de l'analyse du monde, nous l'avons vu, il peut sembler que Leibniz réintroduit Dieu dans l'ordre du monde. En fait, avec Leibniz et pour la première fois, Dieu n'est plus un au-delà de la science. Il trouve au contraire sa place à la pointe des conclusions de celle-ci, en continuité avec elle mais sur un autre plan. *Et Leibniz de découvrir alors que la finalité du monde ne peut plus résider dans son ordonnancement, c'est-à-dire dans la perfection de ses lois mais bien paradoxalement dans la contingence de ces dernières, c'est-à-dire dans leur impossibilité à se fonder elles-mêmes.*

*Modernité de Leibniz et confusions que ses idées suscitérent.*

Au total, Leibniz réalise une critique du mécanisme - et surtout de ses prétentions à rendre compte des phénomènes sous tous leurs aspects - à partir des principes mêmes de la mécanique. Une démarche dont la subtilité même explique les nombreuses confusions que suscitérent des idées qui, de fait, n'apportaient pas grand-chose à la science mécanique en tant que telle.

Bertrand Russell voyait deux forces dans la force vive leibnizienne, l'une, primitive, étant comme la loi d'une série - à travers elle, la matière est essentiellement active, c'est-à-dire source de ses propres changements - tandis que l'autre force, dérivative, est l'état présent actuel d'un mouvement tandis qu'il tend à l'état futur. Cette dernière force seule possède quelque utilité en mécanique, soulignait Russell, la première n'étant invoquée par Leibniz que pour des raisons purement "métaphysiques" (*La philosophie de Leibniz*, 1900, p. 104 et sq.<sup>77</sup>). Leibniz parlait lui plutôt de "philosophie supérieure" (*Théodicée*, § 346) et l'interprétation de Russell n'est guère pertinente si elle affirme qu'il y a deux forces pour Leibniz, deux réalités distinctes et présentes comme telles dans le monde physique.

*Pourtant, que dit la physique de Leibniz traduite en termes modernes ? Que l'énergie totale d'un système se conserve et que le fait de la masse est premier, c'est-à-dire*

---

<sup>76</sup> Paris, GF Flammarion, 1969.

<sup>77</sup> trad. fr. Paris, Alcan, 1908.

*irréductible aux autres lois physiques. Quant à ce qui fonde la mécanique, la physique contemporaine ne sait pas en dire beaucoup plus en l'état actuel.*

\*

*La querelle des forces vives ou le destin malheureux de la complexe réflexion leibnizienne.*

Finalement la force d'un corps est-elle équivalente à  $mv$  ou à  $mv^2$  ? Question d'une inutilité parfaite pour la mécanique, dira d'Alembert. Mais question sur laquelle reposera une querelle, dite "querelle des forces vives", qui agita le monde savant pendant trente ans au début du XVIII<sup>e</sup> siècle. Le débat, en fait, portera essentiellement sur la question de savoir si la force désigne une vertu propre aux corps ou n'est qu'une façon commode d'exprimer un simple effet.

D'Alembert récuse le principe leibnizien selon lequel l'effet est dans sa cause et la force d'un mouvement, ainsi, forcément proportionnée à sa vitesse (*Traité de dynamique*, 1753<sup>78</sup>). Tout en ramenant la conservation de la force vive aux lois newtoniennes de la mécanique (2<sup>e</sup> édition, 1758), il affirme que la force n'est qu'un effet qui peut varier avec les mouvements. Elle ne correspond qu'à l'action d'une même cause qui peut trouver à différemment s'appliquer<sup>79</sup>. Pour autant, d'Alembert ne parvient pas à clore la querelle<sup>80</sup>.

Contre Daniel Bernoulli (*Hydrodynamica*, 1738<sup>81</sup>), d'Alembert avait déjà voulu établir que la mécanique des fluides ne fait pas appel à la conservation des forces vives (*Traité de l'équilibre et du mouvement des fluides*, 1744<sup>82</sup>). Contre Leibniz, d'Alembert raisonne selon le modèle atomiste newtonien : les atomes sont inélastiques. Cela signifie que leurs mouvements relatifs cessent instantanément quand ils se heurtent - et si leurs quantités de mouvement sont égales, soutient même Newton, ils s'arrêtent immédiatement - sans amortir l'énergie perdue ou gagnée lors du choc. La conservation de la force vive, ainsi, ne paraît plus être une loi générale de la nature. Et d'Alembert d'en limiter

---

<sup>78</sup> Paris, Gabay, 1990.

<sup>79</sup> Voir V. Le Ru *Jean le Rond d'Alembert philosophe*, Paris, Vrin, 1994, chap. V & VI.

<sup>80</sup> Voir L. Laudan "The vis viva Controversy, a Post-Mortem" *Isis* no 2, vol. 59, 1968, p.131-143.

<sup>81</sup> in *Die Werke von Daniel Bernoulli*, Basel, Birkhäuser, 1982-1987, Band 3 Mechanik.

<sup>82</sup> Bruxelles, Culture et Civilisation, 1966. Ce point – qui concernait plus précisément la loi de Torricelli (1644) voulant que la vitesse d'éjection d'un jet d'eau par un trou percé au fond d'un récipient est proportionnelle à la racine carrée de la hauteur du liquide – faisait l'objet d'un débat ayant impliqué Newton et ayant déjà opposé Daniel Bernoulli à son père Jean. Voir M. Blay *La science du mouvement des eaux*, Paris, Belin, 2007.

l'application dans l'article "Force" de l'*Encyclopédie* (1751-1765)<sup>83</sup>. D'Alembert refuse de considérer la force comme une cause. Son attitude est clairement positiviste : il refuse une notion non directement mesurable qui renvoie à l'en soi, à la nature des choses<sup>84</sup>. Et, comme la plupart du temps, un tel positivisme ne peut se targuer de s'en tenir aux faits et rejeter les chimères "métaphysiques" que parce qu'il oublie de voir ses propres préjugés.

Quel est le fond du problème en effet ? Si la force se mesure par  $mv$ , elle ne peut être prise pour un principe interne qui anime les corps – ceux-ci sont leur mouvement actuel, soumis au mouvement des autres corps, comme chez Descartes. Si elle se mesure par  $mv^2$ , elle est inhérente aux corps au sens où ceux-ci semblent recéler plus de force qu'ils n'en manifestent effectivement et il se peut, comme le croient certains, qu'elle les anime. Dans ses *Principes philosophiques sur la matière et le mouvement* (1770<sup>85</sup>), Diderot assimile ainsi la "force morte" inscrite dans les corps matériels à une réserve d'activité et donc de sensibilité.

Diderot reprend ce faisant la distinction introduite par John Toland entre l'*external local motion* (force de choc ou de translation) et l'*internal energy* ou *autokinesy* (*Letters to Serena*, 1704, 5<sup>o</sup> lettre<sup>86</sup>).

Un certain Jean Denyse contestait ainsi le principe de conservation du mouvement en ce qu'il conduit à croire que le monde peut se passer de Dieu (*La nature expliquée par le raisonnement et par l'expérience*, 1719<sup>87</sup>). Bref,  $mv^2$  semble conduire au matérialisme tandis que  $mv$  suppose l'instantanéité du mouvement et donc la création continuée au sens cartésien (voir 1. 11. 14.). Parmi les partisans de  $mv$ , on rencontre peu d'athées a-t-on noté - tout au plus des agnostiques comme d'Alembert.

Il convient néanmoins de souligner qu'un tel débat ne se posait guère pour Leibniz, qui ne pensait pas la force comme une réalité physique mystérieusement logée au cœur des phénomènes. La force, au sens leibnizien, traduit la conservation d'un mouvement. Elle est présente dès qu'on pense le mouvement plus qu'instantané, comme s'il était discontinu en chaque point d'un mouvement.

---

<sup>83</sup> Voir J-P. Sérís *Machine et communication*, op. cit., p. 264 et sq.

<sup>84</sup> Voir M. Paty « La position de d'Alembert par rapport au matérialisme » *Revue philosophique* n°1, 1981, pp. 49-66. D'Alembert peut-il pour autant éviter tout postulat quant à la nature des choses ? Voir M. Muller *Essai sur la philosophie de Jean d'Alembert*, Paris, Payot, 1926, chap. IV.

<sup>85</sup> *Œuvres philosophiques*, Paris, Garnier, 1964.

<sup>86</sup> trad. fr. *Lettres philosophiques*, Londres, 1768.

<sup>87</sup> Paris, C. Joubert, 1719.

Mais ce ne sont pas là les seules questions fondamentales que la querelle agita, souligne Yvon Belaval (*La crise de la géométrisation de l'univers dans la philosophie des lumières*, 1952<sup>88</sup>). S'il y eut querelle, c'est que la mesure même des choses ne permettait pas de décider. Les mathématiques ne nous apprennent donc rien ! Elles nous donnent la loi mais ne disent rien de la cause et encore moins de la substance. Diderot annonce que le règne des mathématiques n'est plus, dans ses *Pensées sur l'interprétation de la nature* (1753<sup>89</sup>). La géométrisation de l'univers n'est qu'un rêve...

La querelle se cristallisa en effet autour de la difficile question du partage entre vérités rationnelles et vérités accessibles uniquement à travers l'expérience.

D'un côté, un Daniel Bernoulli (*Examen principiorum mechanicae*, 1726<sup>90</sup>), un Leonhard Euler (*Mechanica, sive motus scientia analytice exposita*, 1736<sup>91</sup>) avaient tenté d'envisager la mécanique comme une science rationnelle et de la fonder ainsi sur quelques définitions logiquement ordonnées<sup>92</sup>.

Contre eux, Lazare Carnot affirmera le caractère purement expérimental de la mécanique, réduisant celle-ci à la seule étude de la communication du mouvement, abstraction faite de toute idée de cause<sup>93</sup> (*Essai sur les machines en général*, 1783<sup>94</sup> ; *Principes fondamentaux de l'équilibre et du mouvement*, 1803<sup>95</sup>). En quoi nous voyons s'opposer deux dimensions que Leibniz, lui, ne séparait pas.

Mais Leibniz n'était guère lu, quand il n'était pas tout simplement rejeté comme un pur métaphysicien - une tournure que prenait d'ailleurs effectivement sa pensée à travers la forme que lui avait donnée son disciple Christian Wolff.

En fait de force, Carnot ne veut connaître que la quantité de mouvement  $mv$  - la simple résistance, l'inertie qu'un corps est susceptible d'opposer à un changement d'état et qui donne la mesure de la force capable de le surmonter.

L'idée de communication, qui deviendra fondamentale dans la théorie des machines, n'en suppose pas moins la conservation de la force, mise en lumière par Huygens et Leibniz, à travers l'idée d'une transformation de la force en un effet susceptible de restituer lui-même de la force.

---

<sup>88</sup> *Revue internationale de philosophie*, n° 21, 1952, pp. 337-355.

<sup>89</sup> *Œuvres philosophiques*, Paris, Garnier, 1967.

<sup>90</sup> *Die Werke von Daniel Bernoulli*, Band 3 Mechanik, Basel-Boston-Stuttgart, Birkhäuser, 1987.

<sup>91</sup> 2 volumes, Petropoli Academiae Scientiarum, 1736.

<sup>92</sup> Voir M. Blay « Leonhard Euler : un sommet de la pensée scientifique au XVIII<sup>e</sup> siècle » *La Recherche* n°146, juillet-août 1983, pp. 974-976.

<sup>93</sup> Voir J-P. Sérès *op. cit.*, chap. VI.

<sup>94</sup> Paris, Nyon l'aîné, 1786.

<sup>95</sup> Paris, Deterville, an XI-1803.

Carnot en vient ainsi à parler d'une "force d'inertie", soit la quantité de mouvement qu'un corps imprime à tout autre venant le tirer de son état. Un concept qu'Euler, lui, avait rejeté comme contradictoire, la force étant ce qui est capable de changer l'état d'un corps et l'inertie, au contraire, la propriété du même corps de pouvoir demeurer dans le même état. De sorte qu'une force d'inertie ne se manifeste que lorsqu'un corps résiste à une action extérieure (*Lettres à une princesse d'Allemagne*, 1760, II, Lettre 66<sup>96</sup>).

Euler réagissait alors au fait que la Première loi de Newton (voir ci-après) était nommée "Principe d'inertie", posant comme une force d'inertie.

Ce point illustre parfaitement la querelle : fallait-il distinguer entre la force et la quantité de mouvement ?, renvoyant ainsi la première à quelque entité mystérieuse, distincte en tous cas des effets du mouvement (la composition de la masse et de la vitesse). Cela même que Leibniz avait voulu régler mais qu'on ne comprit pas. Rejetant l'idée d'une impulsion primitive animant les corps - Euler critique les leibniziens, les "wolffiens", qui soutiennent que tout corps, en vertu de sa nature propre, fait des efforts continuels pour changer son état (*Ibid.*, II, Lettre 5°). Euler entend néanmoins considérer la force comme un concept premier ; comme Newton.

\*

### **3. 3. 10.**

*La mécanique de Newton.*

De la notion d'inertie, on crut d'abord pouvoir conclure à l'inexistence des forces. Descartes veut ainsi expliquer tous les phénomènes physiques par la seule loi de la conservation de la quantité de mouvement, corollaire du principe d'inertie. Mais pour rendre compte du mouvement des astres, Newton fera appel à la notion de force. Les astres, en effet, sont animés d'un mouvement curviligne et non uniforme. Pour l'expliquer, il faut admettre qu'une force vient du dehors agir sur eux – l'attraction, à laquelle, cela est bien connu, il ramène le mouvement des astres.

---

<sup>96</sup> 2 volumes, Paris, Charpentier, 1859.

Dans ses *Principes de la philosophie naturelle* (1697<sup>97</sup>), Newton part ainsi du fait premier de l'existence de forces : magnétiques, électriques et gravité. Quant à la nature exacte de ces forces - cela aussi est bien connu - Newton entendait ne pas faire d'hypothèses (voir 2. 4. 16.). Toutefois, s'il ne faisait pas de ces forces des causes, il les considérait comme des réalités indubitables, permettant de rendre compte des phénomènes<sup>98</sup>. En quoi il recueillait l'opposition des cartésiens, qui l'accusaient de réintroduire les qualités occultes dans la science. De sorte que - et là est l'origine de notre querelle des forces vives - tout en étant posée comme une réalité première, la force n'est définie par Newton que par son effet. Elle est la cause de l'accélération ou de la tendance à l'accélération d'un corps (définition IV). *La force n'est pas une réalité purement mécanique chez Newton, quoique sa nature puisse parfaitement, pour le calcul, demeurer ignorée. En quoi Newton, dont les forces mystérieuses furent rapidement invoquées comme autant de qualités occultes, passe pour un savant et Leibniz, qui s'efforçait d'éclaircir le statut physique de telles forces, pour un métaphysicien.*

Au total, Newton formule trois lois de la mécanique :

- 1) tout corps persévère dans un état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite à moins que quelque force n'agisse sur lui et ne le contraigne à changer d'état ;
- 2) les changements qui surviennent dans le mouvement sont proportionnels à la force motrice et se font dans la ligne droite dans laquelle cette force leur est imprimée ;

A la suite de cette loi, Newton énonce pour la première fois de manière précise le principe du parallélogramme des forces ; que Daniel Bernoulli tentera plus tard de démontrer au titre d'une vérité géométrique<sup>99</sup>.

La force est définie comme le taux de changement de la quantité de mouvement en fonction du temps, ce qui revient à dire qu'elle est proportionnelle non à la vitesse mais à l'accélération (a)<sup>100</sup> :

$$F = d/dt (mv) = mdv/dt = ma$$

---

<sup>97</sup> trad. fr. Paris, C. Bourgeois Ed., 1985.

<sup>98</sup> Voir R. S. Westfall *Force in Newton's Physics*, London, MacDonald, 1971.

<sup>99</sup> Voir E. Mach *op. cit.*, p. 45 et sq.

<sup>100</sup> Ce n'est toutefois pas la formulation exacte de Newton. Voir M. Blay *Les Principia de Newton*, Paris, PUF, 1995, p. 48.

La quantité de mouvement totale d'un système de corps en interaction est une constante.

Cela, il convient de le souligner, ne sera plus vrai dans le cadre de la théorie de la Relativité, où la masse change avec la vitesse :

$$m = m_0 (masse au repos) / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

Tandis qu'en mécanique quantique, la quantité de mouvements de particules représentées comme des ondes (voir 2. 1. 14.) ne saurait être  $mv$ . La masse est alors remplacée par le nombre d'ondes au cm et la loi de conservation de la quantité de mouvement est maintenue<sup>101</sup>.

3) l'action est toujours égale et opposée à la réaction, y compris dans le cas d'action à distance (gravitation).

Si a exerce sur b une force  $F_{ab}$ , b exerce en retour une force  $F_{ba}$  égale et opposée. Deux masses  $M$  et  $m$  qui agissent l'une sur l'autre se communiquent ainsi des vitesses opposées  $V$  et  $v$  qui sont dans un rapport inverse de sorte que les quantités de mouvement sont égales et contraires :  $MV + mv = 0$ . C'est ainsi que l'on ne peut s'élever dans les airs en soulevant sa chaise ; comme le baron de Munchhausen, tombé dans une mare avec son cheval, tire sur la queue de celui-ci pour s'en extraire. Arthur Schopenhauer a donné une étonnante illustration à ce principe : en visite en des lieux célèbres, note-t-il, beaucoup d'hommes veulent y graver leur nom, c'est-à-dire réagir à l'impression que ces lieux leur communiquent (*Le monde comme volonté et comme représentation*, 1818, IV, 57, p. 397<sup>102</sup>). Cette troisième loi de Newton correspond sans doute à l'une des perceptions globales du monde les moins immédiatement intuitives qui soit. Nous verrons cependant plus loin que cette loi est le seul principe de la mécanique moderne qu'Aristote avait pressenti.

Pour Newton, les forces mécaniques sont au nombre de trois. Proportionnelle à la masse d'un corps est une *vis insista* (l'inertie), une force qui réside dans la matière et qui correspond au pouvoir que celle-ci possède d'offrir une résistance. En regard, la force capable de changer son état est une *vis impressa*, une force imprimée, qui peut être produite par un choc, une pression ou par la *vis centripeta*, la force centripète qui fait tendre un corps vers quelque centre de son mouvement selon une action à distance (la gravité).

La force imprimée se dédouble en force motrice et en force accélératrice, proportionnelles toutes deux à la masse du corps  $m$  et la première à la seconde. La force accélératrice est une action instantanée

---

<sup>101</sup> Voir R. Feynman *Cours de physique*, 1963, trad. fr. en 5 volumes, Paris, Interéditions, 1993, I, pp. 141-142.

<sup>102</sup> trad. fr. Paris, PUF, 1989.

(impulsion différentielle), que Newton pose pourtant comme proportionnelle à la durée de l'impression, confondant ainsi la force et l'impulsion qu'elle produit, selon la vieille notion de l'impetus<sup>103</sup>.

On remarque ainsi qu'à chaque corps est inhérente une caractéristique de mouvement que l'expérience permet seule de découvrir : sa "masse d'inertie", *sa masse, que Newton est le premier à distinguer du poids* (voir 2. 4. III.) et qu'il définit par la quantité de matière, soit comme le produit de la densité d'un corps - car l'univers de Newton fait place au vide (voir 2. 2. 13.) - par son volume, selon une formule qui sera souvent critiquée, puisque la densité elle-même ne peut être définie que comme la masse d'une unité de volume<sup>104</sup>.

*La mécanique newtonienne n'évacue en rien la question de la finalité du monde.*

La résistance est ainsi fondée, selon Newton, sur une force réelle au sein des corps, ce que Descartes et Leibniz, nous l'avons vu, refusaient tout à fait d'admettre. Plus généralement, par rapport à eux, le monde de Newton est plein de forces, dont le jeu suppose de plus l'intervention directe de Dieu pour être prolongé.

Pourtant, on ne peut manquer de souligner la proximité des conclusions de ces deux savants qui sont, avec Descartes, les plus grands penseurs de la mécanique à l'âge classique. Tous deux admettent que les mouvements réels dans le monde se fondent en dernier ressort sur un phénomène de résistance des corps, soit sur le fait premier de la masse que l'expérience seule est à même de découvrir. Tous deux y devinent, soit la possibilité d'un choix métaphysique, soit celle d'une intervention divine. Et si l'on note, avec E. Mach, qu'après Newton, la réflexion mécanique n'apportera pratiquement aucun concept nouveau, on mesure que *c'est de manière tout à fait abusive que l'on identifie a priori mécanisme et matérialisme. Ce que le mécanisme permet plutôt rationnellement de fonder, c'est la contingence du monde, mettant ainsi en lumière, au lieu de la biffer, la question de sa finalité.*

\*

**3. 3. 11.**

---

<sup>103</sup> Voir G. Barthelemy « De la force accélératrice dans les *Principia* » *Revue d'histoire des sciences* XL/3-4, 1987, pp. 273-279. Ainsi que A. Koyré *Etudes newtoniennes*, Paris, Gallimard, 1968, p. 105 et sq.

<sup>104</sup> Voir E. Mach *op. cit.*, p. 210 et sq.

*La synthèse de Lagrange. La mécanique devient une technique.*

A la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, Joseph-Louis Lagrange réduira la mécanique à quelques formules algébriques générales, dont le développement donne toutes les équations nécessaires pour la solution de chaque problème concernant le mouvement de n'importe quel système de points matériels et de coordonnées (*Mécanique analytique*, 1788<sup>105</sup>).

Cessant de raisonner de manière géométrique pour n'utiliser que des opérations algébriques, il fera de la mécanique, sous ses différents aspects (statique et hydrostatique ; dynamique et hydrodynamique), une simple branche de l'analyse.

En mécanique, la méthode analytique, note Pierre Duhem, ramène les lois gouvernant les phénomènes à des formules générales, sans se livrer à aucune hypothèse quant à la nature des mouvements par lesquels ces phénomènes peuvent s'expliquer. Ceci par opposition à une méthode synthétique ou hypothético-déductive qui part d'une reconstruction intellectuelle de la nature des phénomènes pour en déduire des lois et les comparer aux phénomènes réels, s'exposant évidemment aux critiques quant au caractère aventureux de ses hypothèses (*L'évolution de la mécanique*, pp. 180-181).

Lagrange retient quatre principes fondamentaux de la dynamique : conservation des forces vives, conservation du mouvement du centre de gravité, conservation des moments ou principes des aires, principe de la moindre quantité d'action.

Et quant à l'équation fondamentale de la dynamique, il la tire du principe de d'Alembert : les mouvements imprimés à un système mécanique sont équilibrés par la somme des mouvements d'inertie et des mouvements virtuels résultant des liaisons (*i.e.* : les restrictions imposées au mouvement)<sup>106</sup>. La dynamique paraît n'être qu'une extension de la statique : le mouvement se ramène à un problème d'équilibre<sup>107</sup>.

Le principe de d'Alembert peut être présenté ainsi : soit un nombre quelconque de particules matérielles dont chacune est sous l'influence d'une action motrice déterminée quant à son intensité et à sa direction, de sorte qu'on soit en état d'assigner le mouvement que chaque particule devrait prendre si elle était isolée. Par suite des liaisons qui existent entre les particules, l'action que chacune subit a son retentissement dans tout le système. Il faut donc tenir compte, pour déterminer le mouvement réel de chacune, de l'action à laquelle elle est soumise et de l'influence qu'exercent sur elle les actions subies par toutes les autres.

Comme en statique la méthode des multiplicateurs permet à Lagrange de calculer le travail virtuel de chaque réaction selon les liaisons qui s'exercent sur chaque point

---

<sup>105</sup> Sceaux, Gabay, 1989.

<sup>106</sup> Voir M. Paty « Science et philosophie à l'époque des Lumières » *La Recherche* n° 152, février 1984, pp. 166-177.

<sup>107</sup> Sur tout ceci, voir W. Barroso Filho *La mécanique de Lagrange*, Paris, Karthala, 1994, chap. 8.

matériel, il s'agira en dynamique de déterminer, pour un système de corps disposés les uns par rapport aux autres d'une manière quelconque, le mouvement que chacun doit prendre compte tenu de l'action des autres corps. De là, chaque mouvement imprimés à chacun des corps sera considéré comme constitué de deux mouvements dont l'un est réellement suivi - c'est le mouvement recherché - et l'autre, qu'on peut évaluer par le principe des travaux virtuels, est détruit du fait des contraintes.

Lagrange définit la force vive comme égale, pour un système en mouvement, au travail des forces agissant sur lui - ce que nous appelons l'énergie cinétique ( $1/2 mv^2$ ) ; sachant que, en termes modernes, lorsque l'énergie mécanique totale d'un système est constante, le travail des forces extérieures qui lui sont appliquées est nul.

Lagrange ouvrait ainsi la voie au principe de la conservation de l'énergie : toute diminution de ce que Leibniz nommait la force morte et de ce qu'Hermann Helmholtz nommera la "force de tension" (S), doit être compensée par un accroissement égal de force vive.

A partir de là, la notion d'énergie potentielle n'est pas absolument claire en physique. On peut la définir comme la fraction de l'énergie totale d'un corps, qui peut donner lieu à une transformation du système par modification de son état énergétique. Mais quelle est la réalité d'une telle énergie ? Comme l'avait vu Leibniz, convertible en force vive, elle est plus qu'un simple rapport mais totalement liée à l'état donné d'un système, elle n'est pas non plus une substance.

Enfin, Lagrange établit une équation générale du mouvement, déduite d'une fonction - dite "fonction de Lagrange" - qui exprime la différence entre énergie potentielle et énergie cinétique et qui correspond à la généralisation du principe de moindre action.

#### ***Le principe de moindre action***

*Maupertuis et le principe de Fermat.*

Pour qu'un corps soit porté d'un point à un autre, il faut qu'il déploie une certaine *action* qui dépend de sa vitesse et de l'espace parcouru. En 1744, Maupertuis pouvait ainsi définir l'action comme le produit de la masse d'un corps par sa vitesse ainsi que par l'espace qu'il parcourt (soit  $mvs$ ), tout en posant pour principe que, lorsqu'il arrive quelque changement dans la nature, la quantité d'action nécessaire à ce changement est toujours la moindre qu'il est possible. Maupertuis, qui souleva ainsi une polémique à peine moins forte que celle des forces

vives, s'inspirait en l'occurrence d'un "principe d'économie naturelle" introduit en optique par Pierre de Fermat (1601-1665) un siècle plus tôt<sup>108</sup>.

Ce que nous connaissons toujours comme le "principe de Fermat" énonce que le trajet d'un rayon lumineux entre deux points est tel que le temps de parcours de la lumière est un extremum ou est, peut-on dire encore, "stationnaire"<sup>109</sup>.

Dans l'Antiquité, Hiéron d'Alexandrie (Ier siècle ap. JC) puis Héliodore de Larisse (fin III<sup>e</sup>-début IV<sup>e</sup> siècle), déjà, avaient suggéré que l'égalité de l'angle d'incidence et de l'angle de réflexion de la lumière réfléchié dans un miroir s'explique si l'on admet qu'elle suit le plus court chemin. Fermat usait du même présupposé pour décrire la réfraction, prenant comme minimum non pas le plus court chemin mais le trajet réclamant le moins de temps. De là, il tirait que la lumière doit aller moins vite en passant d'un milieu plus rare à un milieu plus dense, ce qui, dans son esprit, contredisait Descartes - et ce qui contredisait tout autant l'optique newtonienne selon laquelle la vitesse des corpuscules lumineux croît dans les milieux plus denses qui exercent sur eux une plus forte attraction (sur tout ceci, voir 2. 4. 10.).

De fait, le principe de Fermat fut généralement rejeté, jusqu'à ce que Maupertuis l'exhume pour tenter de le réconcilier avec les attendus newtoniens (le mémoire dans lequel il énonce le principe de la moindre action s'intitule *Accord des différentes lois de la nature qui avaient jusqu'ici paru incompatibles*, 1744<sup>110</sup>).

La vitesse est effectivement plus grande dans les milieux plus denses, déclare en substance Maupertuis et c'est parce que la quantité d'action doit être la plus petite possible. De là, il n'hésite pas à étendre ce principe à toute la dynamique. Il fait de l'action - à travers laquelle la force, rapportée à l'espace, est saisie à l'œuvre, menée dans le temps et comme guidée dans son effet - le concept premier, coiffant tous les autres. Si à suivre Leibniz l'action totale de deux corps se choquant se traduit par la somme des deux forces vives dues aux vitesses perdues, cette somme est toujours un extremum, ajoute Maupertuis, qui voit là une marque de la sagesse du Créateur et la preuve même de son existence<sup>111</sup>. L'action est première et non la conservation des mouvements, rendant l'univers capable de se suffire à lui-même.

\*

---

<sup>108</sup> Voir W. Barroso Filho *op. cit.*, chap. 1, ainsi que P. Brunet *Etude historique sur le principe de moindre action*, Paris, Hermann, 1938 & S. Bachelard *Les polémiques concernant le principe de moindre action au XVIII<sup>e</sup> siècle*, Paris, Palais de la Découverte, 1961.

<sup>109</sup> Une fonction est stationnaire en un point si toutes ses dérivées partielles sont nulles en ce point. De tels points sont généralement des points où la fonction est soit minimale, soit maximale. Sur la portée du principe de Fermat, voir P. Léna & A. Blanchard *Lumières : une introduction aux phénomènes optiques*, Paris, Interéditions, 1990, pp. 44-52.

<sup>110</sup> in *Œuvres*, 5 volumes, Paris, Gauthier-Villars & fils, 1891-1922. Voir I. Ekeland *Le meilleur des mondes possibles*, Paris, Seuil, 2000, p. 57 et sq.

<sup>111</sup> Voir M. Guéroult *Leibniz. Dynamique et métaphysique*, 1967. Note sur le principe de la moindre action chez Maupertuis. On fit querelle à Maupertuis d'avoir pris son concept d'action à Leibniz. Un emprunt que M. Guéroult juge très plausible. Voir également L. Couturat *La logique de Leibniz*, 1901, Reprint Hildesheim, G. Olms Verlag., 1969, p. 229 et sq. & p. 577.

*Des critiques que s'attirera Maupertuis pour avoir reconnu, au sommet de la mécanique, un principe finaliste.*

Les historiens de la mécanique critiquent en général beaucoup Maupertuis. R. Dugas (*op. cit.*) souligne notamment que son principe, tel qu'il l'énonce, est parfaitement gratuit et tout métaphysique. Métaphysique, le principe de moindre action l'est certainement et c'est bien cela qu'on refuse de voir le plus souvent : *au sommet de la mécanique, Maupertuis a placé un principe parfaitement finaliste, affirmant qu'une relation est toujours comme par avance définie entre l'effet du mouvement et son déclenchement - comme si le premier déterminait directement le second, ce qui est la définition même d'une action finalisée.*

*Or l'évolution ultérieure de la mécanique ne démentira pas la généralité que Maupertuis prêtait à son principe.* Lagrange l'étendra à tout système de corps agissant les uns sur les autres, après qu'Euler l'ait rendu applicable à la mécanique : pour tout corps mis en mouvement par des forces, la trajectoire suivie est toujours moindre que tout autre chemin imaginable, c'est-à-dire qu'elle rend extrémale l'intégrale  $\int m v ds$  (*Methodus inveniendi lineas curvas maximi minimive proprietate gaudentes*, 1744<sup>112</sup>).

Lagrange, lui, remplace la masse par une quantité exprimant la différence entre énergie potentielle (T) et énergie cinétique (V), de sorte qu'est rendue extrémale l'intégrale  $S = \int_{t_1}^{t_2} (T-V) dt$ .

*Au total, la mécanique atteindra une forme achevée sans avoir réglé la question de la force.*

En 1833, William Rowan Hamilton donnera une nouvelle forme à l'équation de Lagrange, définissant l'intégrale d'une fonction qui, décrivant un système mécanique, détermine les variations de sa vitesse et de sa position au cours du temps. Une équation que l'on nomme le "hamiltonien" et qui fut comme le dernier mot de la mécanique classique, laissant finalement indiscutée cette métaphysique de la force introduite et couronnée par la moindre action de Maupertuis.

De sorte que le statut mécanique de la force ne cessera de longtemps d'être discuté par les théoriciens de la mécanique. La force sera, par exemple, reconnue comme une notion première irréductible par Ferdinand Reech (*Cours de mécanique*, 1852<sup>113</sup>), tandis qu'Adhémar Barré de Saint-Venant la jugera dérivée : un simple vecteur ayant pour

<sup>112</sup> Lausannae, apud M-M. Boucquet, 1744.

<sup>113</sup> Paris, Carilian-Goeury & V. Dalmont, 1852.

grandeur le produit de la masse par l'accélération moyenne de ses points vers ceux d'un autre corps (*Principes de la mécanique fondés sur la cinématique*, 1851<sup>114</sup>).

Barré de Saint-Venant fait également de la masse une notion dérivée : le rapport de deux nombres exprimant combien de fois un corps et un autre contiennent de parties qui, heurtées deux à deux l'une contre l'autre, se communiquent par le choc de vitesses opposées égales.

Entre ces deux auteurs, Laplace représentait déjà une sorte de voie moyenne : la nature de la modification singulière en vertu de laquelle un corps est transporté d'un lieu vers un autre est et sera toujours inconnue. On peut la nommer force, à condition de ne pas oublier que cela n'est nullement une définition positive renvoyant à quelque réalité dont, dans les faits, nous ne connaissons que les effets et les lois d'action (*Mécanique céleste*, 1798<sup>115</sup>).

*La force considérée comme une idée première et indéfinissable.*

Les Anglais, remarquait Henri Poincaré, enseignent la mécanique comme une science expérimentale. Sur le Continent, on la présente comme une science déductive et a priori. Or, ce sont les Anglais qui ont raison (*La science et l'hypothèse*, 1902, chap. VI<sup>116</sup>). Cependant, si les principes de la mécanique n'ont d'autre source que l'expérience, faut-il admettre qu'ils ne sont qu'approchés et provisoires ? demandait Poincaré au début d'un siècle qui verra effectivement remettre en cause ces principes, que l'on croyait évidents, avec la théorie de la relativité et la mécanique quantique.

Ces principes, répondait Poincaré, sont conventionnels - la masse, ainsi, correspond à un coefficient qu'il est commode d'introduire dans les calculs - même s'ils ne sont pas arbitraires, puisqu'ils sont fondés sur des expériences. Au-delà, avons-nous besoin d'une définition positive de la force ? C'est là une idée première, ajoutait Poincaré, c'est-à-dire irréductible et par là indéfinissable. Nous savons tous à quoi il est fait référence lorsque nous en parlons, parce que nous en avons tous l'intuition psychologique directe dans l'effort. Dès lors, il importe peu de savoir ce qu'elle est. Il suffit de pouvoir la mesurer. Quand on dit que la force est la cause d'un mouvement, on fait de la

---

<sup>114</sup> Paris, Bachelier, 1851.

<sup>115</sup> Paris, Champs Flammarion, 1968.

<sup>116</sup> Paris, Flammarion, 1968.

métaphysique et cela ne sert à rien, puisque cela ne nous permet guère de la mesurer. Nous ne savons pas même si ce que nous mesurons est la cause ou l'effet du mouvement.

C'est n'est pas ici le lieu de discuter des limites d'un tel positivisme qui, aboutissant de fait à un intuitionnisme peu critique, n'évite guère la métaphysique, malgré ses proclamations. *Soulignons seulement que notre vision commune du progrès des sciences n'attire guère l'attention sur le fait que celles-ci ne se délivrent si facilement de la "métaphysique" qu'en choisissant de ne pas trop éclaircir les termes de leurs discours.* La mécanique en offre un exemple frappant - et dommageable dans la mesure non seulement où notre perception du monde même est interrogée<sup>117</sup> mais alors même qu'on confie volontiers à l'approche mécaniste de rendre compte du vivant.

\*

\* \*

---

<sup>117</sup> Voir P. Painlevé *Les axiomes de la mécanique et le principe de causalité*, Bulletin de la Société française de philosophie - A. Colin, 1905, p. 49.