

LA CONSTITUTION DE LA MÉCANIQUE NEWTONIENNE

*

SOMMAIRE

PRÉSENTATION	2
LES ACQUIS AU MILIEU DU XVII^e SIÈCLE	4
Tendances de la philosophie naturelle	
Du Cosmos à l'espace	
Vers l'analyse mathématique	
Grandeurs géométriques et grandeurs physiques	
La statique des poids	
Temps et mouvement	
Création de la vitesse	
Une dynamique indigente	
Synthèse	
L'ÉLABORATION NEWTONIENNE	9
Tableau d'ensemble	
Philosophie naturelle et mathématiques	
Du poids à la masse	
Élaboration de l'accélération	
Inertie et action	
Instantané et continu	
Du corps au système	
Action et réaction	
Gésine du concept de force	
La gravitation universelle	
CONCLUSION	15

PRÉSENTATION

La mécanique rationnelle a été créée, pour l'essentiel, par Isaac Newton. Il l'exposa dans ses *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* et il s'en servit, dans le même ouvrage, pour établir la théorie de l'attraction universelle. La juste célébrité que cette dernière lui a valu a porté ombrage à la première, au point que le public cultivé n'en réalise peut-être ni l'importance, ni même l'existence ; ou du moins situe-t-il mal cette *mécanique rationnelle*. Auparavant, il n'existait d'elle que quelques bribes. Il n'y avait pas de science portant ce nom, ni un autre ; tout juste y avait-il une « statique » pour les poids ; le nom « mécanique » désignait la science des machines, un art pour une bonne part. Après Newton, certains aspects durent être amendés (notion de force, changement de repère) et des compléments furent apportés (rotation, énergie). Malgré un certain inachèvement les *Principia* offrent le spectacle d'une science déjà bien développée, due pour une très large part à un seul homme. On se propose de montrer comment elle fut constituée à son commencement. Une telle quête pourrait intéresser ceux qui se préoccupent des rapports entre théorie et expérience et, en particulier, du rôle qu'y joue la pensée, idées et principes mêlés, à côté du mathématique et de l'empirique. Elle pourrait offrir quelques pistes de réflexion, en particulier, à ceux qui enseignent les rudiments de la mécanique classique. Le développement des pages qui viennent produirait aisément un livre. Mais tant de choses ont déjà été écrites que chacun saura bien trouver les exposés plus détaillés dont il aurait besoin. Ici, c'est un exercice synthétique de repérage qui est proposé.

Il ne s'agit pas de reconstituer le cheminement exact du créateur mais un cheminement possible. Ce n'est donc pas la parfaite vérité historique qui va être présentée ; tout au plus une théorie historique. Elle se doit de s'accorder aux faits connus, qui sont, d'une part, l'état des connaissances et des idées dont Newton est parti et, d'autre part, les aboutissements qui se rencontrent dans les *Principia*. Pour le reste cette théorie sera simple. On fera comme si Newton n'avait pas hésité, ni tâtonné. Il ne s'agit pas de reconstituer par le menu un passé qui nous échappe à jamais, mais d'offrir à voir de quoi la mécanique fut faite.

La fin de cette reconstitution est de mettre en évidence le travail d'élaboration des idées et des principes (ce qui ne veut pas dire faire abstraction de leur rapport à l'expérience). Dans le passé, les légendes voulaient que la gravitation universelle fût sortie tout armée de la tête de Newton, où étaient entrées préalablement les travaux des astronomes. La chute d'une pomme aurait déclenché les *calculs* au bout desquels la théorie de l'attraction universelle aurait été établie. Newton a quelque responsabilité dans le succès de cette caricature, avec son mot d'ordre galiléen d'étude mathématique des forces et du Monde. Voltaire n'a pas peu contribué à la répandre et la tradition empiriste l'a appuyée. Or, avant de calculer, Newton avait constitué une science générale des mouvements, améliorant pour cela certaines conceptions de ses prédécesseurs, en créant de nouvelles et constituant le tout en un système, sinon parfait, du moins organisé solidement. Les notions et les principes y reçoivent la plus grande généralité possible. Puis sont rigoureusement déduits, sur ces bases, des théories plus particulières orientées de manière à aller à la rencontre des expériences, anciennes ou nouvelles. Le plus difficile ne fut pas ce travail de déduction, même si maîtrise et habileté y sont bienvenues ; ce fut la mise sur pied de la partie la plus générale de la théorie. Les principes que l'on y trouve sont aussi appelés lois, ou axiomes. Là encore on est dans l'illusion la plus parfaite si l'on imagine un Newton seulement instruit par ses maîtres d'une sorte de doctrine commune établie, inventant un calcul aussi puissant que nouveau et, ainsi armé, allant chercher ces lois dans des expériences, qu'elles fussent familières ou élaborées. Afin de dissiper cette éventuelle illusion, complétons le tableau par la conception des idées générales nouvelles, la création des concepts.

Les *Principia*, avant même d'énoncer trois lois fondamentales, présentent huit définitions. Autrement dit des notions nouvelles tout à fait générales sont introduites. Certaines sont définies à partir d'autres, comme la quantité de mouvement à partir de la masse et de la vitesse. Certaines sont radicalement nouvelles : ni la masse, ni la force ne peuvent être ainsi dérivées. L'élaboration de cette dernière, à partir de ce qui traînait depuis toujours et de ce que les prédécesseurs avaient déjà tenté, fut si difficile que Newton lui-même ne l'a pas achevée et qu'il y fallut encore deux siècles. Le concept de force se présente dans les *Principia*, au niveau le plus général, sous une bonne demi-douzaine de formes, plus ou moins bien liées les unes aux autres. Les choses étaient suffisamment avancées, certes, pour que pût être établi sur cette base le fait de l'attraction universelle ; mais on était loin encore de la science achevée que nos manuels exposent. Voilà pourquoi un arrêt sur ce moment de l'histoire de la physique offre une occasion de choix de percevoir le travail de pensée par lequel s'effectuent les grandes progressions.

LES ACQUIS AU MILIEU DU XVII^e SIÈCLE

Avant que d'être savant Newton avait été élève. Avec le savoir qui lui avait été transmis, qui s'enrichissait et qui évoluait à cette époque, il avait acquis des manières de penser. Il avait abordé ses propres recherches avec une pensée des choses naturelles qu'il nous faut tenter de reconstituer. Pour le moins, il nous faut disposer du tableau de la situation du savoir et des idées au moment où Newton commence son élaboration ; car celle-ci a consisté à en rejeter une partie et à transmuter puissamment le reste.

Tendances de la philosophie naturelle

La connaissance de la Nature avait été l'objet, pour une part, de la philosophie, les Grecs ayant engagé sur le sujet les recherches libres, riches et prometteuses que l'on sait. Pour une autre part, elle avait pris forme d'*histoires*. Sous la plume du chancelier Bacon, le terme avait encore son sens d'origine, celui de description, sans charge temporelle particulière. Une des plus célèbres était celle des aimants et du magnétisme terrestre, due à Gilbert. Depuis l'Antiquité les histoires naturelles venaient amplifier les connaissances communes, ou que l'on pouvait considérer comme telles : il était de science universelle, dans l'Europe du XVII^e siècle, que les poids des graves se mesurent, et cela à l'aide d'une balance. Ces évocations doivent suffire à rappeler qu'il n'existe pas de savoir naturel, de pensée commune qui serait en quelque sorte le lot de toute l'humanité pré-scientifique. Depuis longtemps déjà, plusieurs époques avaient entrepris de modifier une partie de ce que d'autres leur avaient légué. Si l'on en doutait, que l'on se penche sur la totalité des sens qu'un mot comme « poids » (en incluant la forme latine) a pu avoir et traîne encore parfois (poids d'un corps, poids d'une horloge, etc.). En cherchant leurs connexions, on se fait une petite idée de ce qui a pu se passer au cours des siècles qui nous sont accessibles.

Du côté de la philosophie de l'époque, connaître la nature des choses ne pouvait plus consister déceimment à trouver des qualités intrinsèques, surtout si pesait sur elles le risque d'être qualifiées d'occultes. On sait que cet idéal de dépouillement est poussé à l'extrême dans le mécanisme cartésien. La matière n'y est que l'étendue, affectée par la divisibilité réelle et par les mouvements de ses parties les unes relativement aux autres. Pour bien en juger, cependant, il convient de ne pas confondre cette substance avec la matière perceptible par nos sens, qui n'en est qu'une part. Si cette conception avait valeur de référence, un atomisme lucrécien était néanmoins prisé par certains. Gassendi avait été un éminent représentant de ceux pour qui la matière comporte des constituants ultimes, placés dans le vide. Ces physiciens-là, ne pouvant espérer tout expliquer par figures et mouvements seulement, devaient admettre que les corps possédassent quelques autres qualités premières (la dureté, l'impénétrabilité), desquelles les secondes se pussent déduire (l'attraction magnétique). La chimie était encore alchimie et, si certains avaient clamé le rejet de ses prestiges fallacieux, d'aucuns en attendaient suffisamment pour qu'elle les poussât à explorer des idées nouvelles sur la constitution intime de la matière.

Outre cela, l'étude mathématique des phénomènes terrestres avait déjà fait deux ou trois grands pas, à l'instar de l'étude des cieux. Archimède avait donné l'exemple, avec l'équilibre des poids. Galilée, au sujet du mouvement de ces mêmes graves avait contribué fortement à relancer ce genre d'approche. Elle s'appuie sur l'observation et sur les mesures ; elle aboutit à des propositions qui peuvent aller jusqu'à recevoir une certaine organisation déductive ; elle ne fournit cependant pas l'explication *physique* du phénomène de la chute. Dans les études de ce genre, les grandeurs (distances, durées, poids) se voient représentées par différentes grandeurs sur une figure, presque toujours plane (des longueurs et des aires).

Du Cosmos à l'Espace

Il était acquis, depuis l'Antiquité grecque, que la Terre est sphérique. Chez les Modernes, l'héliocentrisme copernicien avait conquis les gens d'esprit. La désagrégation de l'idée ancienne, toutefois, ne se limitait pas à savoir lequel, du Soleil et de la Terre, tourne autour de l'autre. Aux yeux de qui voulait bien voir, Galilée avait montré le Monde en son unité matérielle. Les raisons de croire le monde sub-lunaire de nature différente du monde supra-lunaire s'étaient évanouies, de sorte que la Terre avait perdu toute raison d'occuper le centre. L'étendue selon Descartes, d'ailleurs, sans limite, est partout la même, aux accidents près que sont les parties et leurs mouvements. De ces derniers viennent nos cieux avec tout ce qui s'y aperçoit : Soleil, comètes, planètes et satellites ; et avec tout ce qui s'y rencontre de choses et de phénomènes (gravité, lumière, magnétisme). Dans cette conception, le poids, comme le reste, n'est plus une qualité intrinsèque ; il devient l'effet d'un mécanisme qu'il s'agit de découvrir.

L'astronomie, dès l'Antiquité, avait décrit avec précision les mouvements des astres (les étoiles, le Soleil, la Lune et les cinq planètes visibles). Puis elle avait cherché à rendre compte de ces apparences en élaborant des conceptions du Cosmos, ou du moins des systèmes, auxquels restent attachés les noms de Ptolémée, de Copernic et de Tycho Brahé. Képler avait modifié l'idée que l'on se faisait des mouvements dans celui de Copernic ; Galilée avait découvert, entre autres, les satellites de Jupiter et les anneaux de Saturne ; on relevait aussi le mouvement de quelques comètes.

L'espace infini dans lequel se trouvent les corps matériels, mais également celui dans lequel prennent place les figures de la géométrie, étaient alors des inventions en cours d'achèvement. Le premier ne va véritablement apparaître qu'avec Newton, peut-on dire, le second s'appuyant sans doute sur lui pour finir d'apparaître. Auparavant Descartes parlait de substance étendue, certes indéfinie quant à l'extension, constituée par les tourbillons en différents cieux. L'espace de la géométrie, lui, ne se rencontre pas chez les Anciens (ce que l'on a appelé depuis géométrie dans l'espace n'était que de la stéréométrie : on étudiait la forme des solides, sans les penser comme immergés dans un espace vide). Un mot comme « espace » désignait surtout ce qui sépare deux corps, ou deux parties de corps ; il pouvait désigner aussi ce qui entoure un corps, de manière indéterminée. Pascal était allé jusqu'à parler de l'espace infini contenu dans un cône : quoiqu'infini, ce n'était pas encore l'espace tout entier ; mais on y était presque *.

Vers l'analyse mathématique

La géométrie euclidienne s'était imposée comme science et comme modèle de rigueur. L'arithmétique, pour une part, l'avait suivie ; les arts du calcul (la part efficiente) n'avaient cessé de se développer et de se renouveler, au point que la géométrie pût s'entremêler avec l'algèbre dans la foulée du *Discours de la Méthode*. L'ensemble se raffinait par l'appréhension de l'infiniment petit (indivisibles de Cavalieri, différentielles de Leibniz) et par l'art du passage à la limite : Newton inventa le calcul des fluxions et, simultanément, il traita les mêmes notions de façon géométrique, faisant appel pour cela au mouvement imaginaire des points et des lignes dans un plan. Ainsi s'ébauchait une science des variations des grandeurs, lesquelles, dans ce contexte, seraient bientôt appelées des fonctions.

* La frayeur célèbre n'est pas attribuée au silence éternel de l'espace infini, mais à celui des espaces infinis (*Pensée*, 201). Plus approprié encore : « Quand je considère [...] le petit espace que je remplis et même que je vois abîmé dans l'infinie immensité des espaces [...] » (*Pensées*, 68).

Grandeurs géométriques et grandeurs physiques

L'acte de mesurer consiste, dans les cas fondamentaux, en une répétition à l'identique d'une démarche : pour mesurer un segment de droite, on reporte une règle. Toute autre méthode pratique est dérivée de cela ; toute méthode théorique y fait allusion, même implicitement. Il est dans nos usages de désigner par « longueur », ou par « aire », le nombre obtenu par l'une de ces voies. Il n'en allait pas de même jadis, où ces mêmes mots désignaient plutôt la figure elle-même : une longueur était un segment, une aire était une portion de surface, plane ou non. Dans le langage d'aujourd'hui encore la longueur n'est pas nécessairement un nombre, fût-il accompagné d'une unité : la longueur d'un rectangle peut n'être que le plus grand de ses côtés, autrement dit un segment.

En outre cette science des grandeurs des figures était mise à contribution pour étudier les combinaisons de grandeurs autres, durées et poids principalement. Ces grandeurs physiques, comme nous disons, en venaient à être analysées à l'instar des grandeurs variables proprement géométriques. Mieux encore : on pouvait en inventer de nouvelles, à commencer par la vitesse. Car diviser une distance par un temps, cela ne se faisait pas ; il fallut commencer par combiner des longueurs et des aires, comme on verra plus loin.

Dans les considérations théoriques, écrire des formules n'était pas encore un usage établi. On n'énonçait d'ailleurs pas des égalités mais, en général, des proportionnalités entre grandeurs : la vitesse d'un mobile est proportionnelle à l'espace parcouru et inversement proportionnelle à la durée du déplacement. Dans les observations, on se contentait de prendre pour unité ce qui se présentait de commode. Pour les distances, c'était le pied de tel pays ; en astronomie, le rayon de la Terre.

Les poids étaient déterminés, c'est-à-dire comparés entre eux, par usage de la balance. Le poids définissait une sorte de quantité de matière, autre que le volume. Le poids d'un corps donnait aussi une idée de son inertie, c'est-à-dire de son aptitude à résister aux efforts faits pour le déplacer.

La statique des poids

Dès l'Antiquité également avait été produite une statique, science des poids et de leurs équilibres. Toute proche de cette « mécanique » qui discourait du plan incliné et des poulies, elle la dépassait par son caractère doublement mathématique : la science des leviers et des balances portait sur des grandeurs, et elle avait pris forme déductive. L'étude de l'équilibre d'un corps grave, notamment, avait conduit à y repérer un point particulier, le centre de gravité. La notion avait fini par être étendue aux systèmes de corps graves, sous l'appellation de centre de gravité commun.

Temps et mouvement

Le temps était représenté par une ligne droite, les points étant les instants et les longueurs étant les durées, sans que sa nature donnât lieu à propos éclairant. On l'appréhendait par l'observation du mouvement des astres, ainsi que par les horloges, qui en permettent une division précise.

Un début de cinématique rigoureuse avait été greffé par Galilée sur la géométrie euclidienne. Une maîtrise géométrique du mouvement uniformément varié suffisait pour l'étude mathématique de la chute des corps et des questions attenantes. En revanche, elle ne permettait pas de dire grand'chose des oscillations d'un pendule. À l'époque on disait d'un mobile conçu comme ponctuel qu'il parcourt un espace, c'est-à-dire un trajet entre deux termes, selon une certaine ligne (droite, cercle, parabole ou autre).

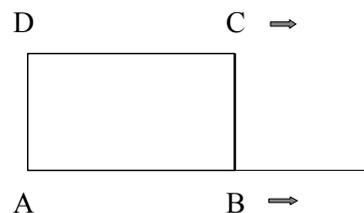
On s'était bien accommodé, en outre, à l'idée qu'un mouvement puisse résulter de la composition de deux autres : les systèmes astronomiques en sont pleins, et le paradigme du déplacement sur un navire en mouvement valait même pour ces vaisseaux que sont les astres.

Création de la vitesse

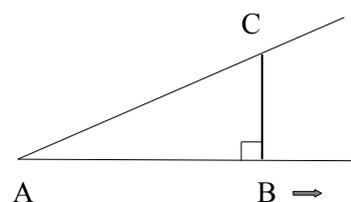
Un mot comme « vitesse » avait été en usage depuis belle lurette sans jamais recevoir les sens quantitatifs précis qu'il a pour nous. Il évoquait plutôt la vivacité du coureur qui arrive le premier ou, du moins, sans tarder en route ; sens qui est resté plus perceptible dans « célérité ».

La création de la vitesse, en tant que grandeur cinématique, s'était faite dans la première théorie rigoureuse du mouvement uniforme, celle des *Discours* de Galilée. Cette vitesse constante apparaît dans des « axiomes » qui déclarent, par exemple, que pour deux mobiles les vitesses sont proportionnelles aux espaces parcourus en un même temps. La vitesse n'en reçoit pas pour autant une définition, mais la lacune logique n'est qu'apparente. On se rend compte, lorsqu'est abordée la théorie du mouvement uniformément varié, que l'usage des figures a servi de support, et même de substrat à la conception. C'est l'usage d'une ligne géométrique mobile qui allait donner de l'être à la vitesse, avant même que la notion ne reçût une définition explicite.

Dans le cas de la vitesse constante du mouvement uniforme, cela se passe dans un rectangle ABCD de largeur AD fixée. La longueur AB, variable, représente le temps qui s'écoule. L'espace parcouru par le mobile, depuis le départ de ce dernier, est proportionnel à la durée écoulée ; de ce fait, il pourrait être représenté lui aussi par cette même longueur AB. Il parut plus habile, quoique moins naturel, de le représenter par l'aire variable du rectangle. C'est la largeur AD, bien sûr, et donc BC tout aussi bien, qui représente la vitesse. Mais comment en venir à représenter ce qui n'a pas encore reçu de définition ? En faisant comme s'il existait quelque chose d'associé au sentiment de vivacité, qui méritât d'être tenu pour une grandeur et qui serait représenté par la largeur du rectangle. Disons même : en admettant, en décidant qu'il existe quelque chose de représentable par la largeur, et à quoi, par conséquent, est proportionnel l'espace parcouru en un temps donné ; ce en quoi il faut comprendre que, pour deux mobiles, les aires qui représentent les espaces parcourus en un même temps sont proportionnelles aux largeurs des rectangles associés. Ce n'est que plus tard que l'on éprouverait le besoin de mettre des chiffres et des lettres.



Pour Galilée, il était devenu loisible déjà d'envisager des mouvements autres qu'uniformes. Il lui suffit de remplacer le rectangle par un triangle ABC rectangle en B, d'angle A fixé et dont la largeur mobile BC s'accroît lors de l'allongement de AB. C'est par un de ces biais qu'a pu être conçue mathématiquement une vitesse variant « continûment ». Mais la notion d'accélération, même constante, ne fut pas créée dans le prolongement. À l'occasion des expériences, on déterminait ce que nous nommons ainsi en



mesurant l'espace parcouru initialement, en une durée brève. Là où nous écrivons $g = 9,8 \text{ m.s}^{-2}$, Huygens disait que, dans la première seconde de chute, un corps parcourt quinze pieds de Paris.

La reconstitution qui vient d'être proposée entend surtout montrer comment on a pu en venir à accorder de l'existence à une nouvelle grandeur. Galilée n'a évidemment pas inventé l'idée de vitesse, pas même sous son aspect quantitatif : on savait dire qu'un mouvement est deux fois plus rapide qu'un autre. L'invention a été celle de la vitesse en tant que grandeur prenant place dans une théorie cinématique rigoureuse, à côté des mobiles, des espaces et des temps. Pour cela, l'existence de quelque chose a été décrétée ; quelque chose de représentable géométriquement, la représentation étant disponible par avance et servant de matrice à cette création, à cette acquisition d'être, à cette élévation ontique s'il est permis de s'exprimer ainsi. Ce n'était d'ailleurs pas la première fois : la création du temps comme grandeur avait emprunté semblable chemin, quoique bien plus tortueux et, sans doute, avec un rôle plus partagé entre les figures et les nombres.

Une dynamique indigente

Les corps, pouvait-on dire à l'époque, agissent les uns sur les autres, tout comme les hommes agissent sur eux. Selon Descartes, les corps ne le peuvent, dans le fond des choses, que par des chocs et des poussées. Pour qui reste plus près de l'expérience courante, les actions sont parfois aussi des tractions. Une attraction et une répulsion à distance, comme le magnétisme en présente, sont des apparences qui exigeaient une explication physique, mécanique si possible.

Une nouvelle idée de l'inertie faisait également son chemin : on s'écartait de l'opinion qu'il faille faire violence à un corps pour entretenir son mouvement, à moins que divers frottements et autres empêchements ne demandent à être compensés. Les corps ne trouvaient plus le lieu naturel aristotélicien où se reposer. L'état naturel d'un corps n'était plus le repos ; on estimait de plus en plus que c'était le mouvement rectiligne uniforme. Descartes, par ailleurs, avait avancé l'idée d'une quantité de mouvement, sise en un corps, composée de celles de grandeur et de vitesse. Il avait insisté aussi sur l'idée de relativité du mouvement : un corps ne se meut que par rapport à un autre ; et il revient au même de dire que le second se meut par rapport au premier. Seule l'Église avait eu assez d'autorité pour l'obliger à des réserves sur ce sujet si délicat, au passé mal refroidi.

De bonnes lois avaient fini par être trouvées pour les chocs, encore que la démonstration que Huygens avait su en donner limitât leur validité au laboratoire terrestre, autrement dit à ce que nous appelons un champ de pesanteur uniforme. Il y avait fait jouer un rôle à l'idée galiléenne de relativité : tout se passe de la même façon sur un navire, qu'il soit immobile ou en mouvement uniforme et en ligne droite sur une eau paisible.

Quant à l'idée de force, elle restait mal définie et, surtout, dispersée : chacun employait le mot comme il jugeait bon, plus ou moins conformément aux usages vulgaires : un corps a de la force, pour agir ou pour résister, comme en ont un homme ou un animal. D'autres mots concurrençaient « force » : effort, tendance, etc. La force centrifuge, selon Huygens qui avait réussi à l'appréhender mathématiquement, était perçue comme réelle : la pierre qui tourne l'a, et elle tend la fronde avec.

Synthèse

Ainsi la république des savants, acquise au projet de connaître une Nature unifiée, avait-elle remis à l'honneur l'utilisation des mathématiques dans l'étude des mouvements. Cette utilisation était devenue moins restrictive pour les mouvements des astres et elle commençait tout juste à s'étendre aux corps terrestres. Mais on espérait surtout parvenir à comprendre le fonctionnement de toute cette machine. Un concept de force digne de ce nom ne pouvait y contribuer, tant il est manifeste, avec le recul, qu'il n'en existait pas.

L'ÉLABORATION NEWTONIENNE

Tableau d'ensemble

Énumérons d'abord les nouveautés dont on est redevable à Newton, en réservant ici les italiques à l'introduction du vocabulaire qui se rencontre dans les *Principia*.

Les *corps* ont tous une *masse* et un *centre de gravité* ; des corps formant système ont un *centre de gravité commun*. Les corps sont en repos ou se meuvent dans un *espace absolu*, définissant par eux-mêmes des *espaces relatifs*, c'est-à-dire des référentiels mobiles. De même y a-t-il un *temps absolu*, qui est le *vrai* ; ainsi que des *temps relatifs*, ceux des astres et des horloges. Un corps a, par conséquent, un repos ou un *mouvement absolu* et une *vitesse absolue*, qui sont les vrais, tout comme il a des repos et des *mouvements relatifs* ainsi que des *vitesse relatives*, qui ne sont qu'*apparents*. L'*accélération* n'est, en principe, qu'une augmentation de la vitesse absolue. La masse et la vitesse se composent pour donner la *quantité de mouvement*.

Les corps *agissent* les uns sur les autres, par contact ou, en apparence du moins, à distance. En l'absence d'*action* extérieure, un corps (Loi I) ou un système (Corollaire IV) restent en état inertiel par rapport à l'espace absolu : *repos ou mouvement rectiligne uniforme* du centre de masse. Une *force interne* (ou *force d'inertie*) est même envisagée pour en rendre compte. Dans une *action*, le corps patient reçoit de la vitesse, laquelle *se compose* éventuellement avec celle qu'il avait déjà, même si leurs *directions* diffèrent ; elle lui vient de ce qu'une *force* lui est *imprimée* par cette action. La *quantité accélératrice* de cette force imprimée est proportionnelle à l'accroissement de vitesse ; il est précisé parfois : *en un temps donné*. La *quantité motrice* de la force est proportionnelle, semblablement, à l'accroissement de mouvement (Loi II). Toute action s'accompagne d'une *réaction* en sens contraire, de même quantité motrice (Loi III).

Les actions de contact prises en compte par la théorie sont avant tout la *traction*, la *poussée*, la *résistance* d'un milieu, la *compression* par un fluide. La théorie générale des *chocs* ne comporte que la conservation de la quantité de mouvement algébrique, en l'absence d'une quelconque notion d'énergie cinétique.

La *force centripète* est l'action qui se manifeste lorsqu'un corps est constamment mû vers un centre, ou du moins lorsqu'il semble en être ainsi, que le mécanisme soit perceptible ou pas. Sa quantité accélératrice peut dépendre d'une caractéristique du corps attirant qui, généralement, se trouve au centre ; celle-ci est appelée *quantité absolue* de la force. La *force centrifuge*, enfin, semble garder un caractère réel, car la théorie des changements de référentiel, qui lui donnera sa juste place, n'en est qu'à ses prémices.

Sur la base de cette *mécanique rationnelle* tout à fait générale, posée comme axiomatiquement, cadre dans lequel plusieurs phénomènes terrestres trouvent leur place mieux que dans tout autre, la grande affaire va être d'élaborer la théorie de la *gravitation universelle*, d'après laquelle tous les corps du *Monde* s'attirent les uns les autres. Elle précise que les quantités accélératrices de ces forces centripètes sont inversement proportionnelles aux carrés des distances et que leurs quantités absolues sont proportionnelles aux masses des corps attirants. Le *poids* d'un corps se pense désormais comme propension à *descendre*, ou à choir *vers* un astre, quel qu'il soit, principalement sous l'effet de cette force centripète.

On note l'absence de toute dynamique rotationnelle, ainsi que celle du travail et de l'énergie. Les principales avancées conceptuelles newtoniennes, au total, portent sur les idées d'espace, d'accélération, de masse, de force imprimée, ainsi que celle de force centripète. Sans la création des quatre premières, il n'y aurait pas eu de lois générales du mouvement. L'élaboration des lois et de leurs corollaires principaux fut imbriquée avec celle de ces idées ; voyons un peu mieux comment.

Philosophie naturelle et mathématiques

La conception mécaniste restant une référence obligée, les actions à distance sont traitées *mathématiquement* et non pas *physiquement* : elles sont analysées dans leurs apparences mesurables ; on ne connaît d'elles que les grandeurs qui leur sont attachées. Quant au mécanisme qui les expliquerait, le soin de le trouver est laissé à d'autres.

L'absolu s'oppose au relatif en plusieurs sens. Le premier et principal correspond, explicitement, à l'opposition du vrai et de l'apparent. Celle-ci touche l'espace et le temps, ainsi que les mouvements et les vitesses. L'observation et l'expérience nous mettent en rapport avec le relatif et l'apparent ; rencontrer l'absolu à travers eux, sans être impossible, se révèle problématique.

Du poids à la masse

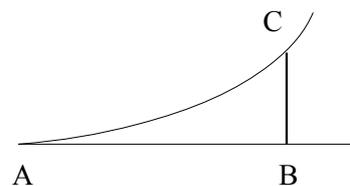
Le poids n'est plus conçu une qualité interne du corps. Il est pensé comme relevant d'une relation entre celui-ci et la Terre, qu'il y ait poussée, attraction ou quoi que ce soit d'autre. Plus grande cette action, plus grande la force motrice imprimée au corps. Cette poussée peut être entravée, ce qui est le cas avec la balance ; ou bien libre, auquel cas elle produit, dans un certain idéal, une chute uniformément accélérée.

Le poids d'un corps devenant susceptible de dépendre de facteurs tels que l'altitude, il fallait créer une grandeur invariante, un nouvel absolu. C'est ainsi que, pour ce qui est de préciser l'idée de quantité de matière, la masse se substitue au poids. Elle est présentée comme combinaison du volume et de la densité, sans plus d'explication. La densité est donc première, dans la théorie, et de nature implicite ; on peut chercher à la comprendre comme une manifestation discrète de la conception atomiste des corps : le mot évoque un nombre, plus ou moins important, d'éléments par volume donné. Puisque rien n'en est dit, nous sommes en droit d'envisager que la création de la notion de masse ait pris le chemin que voici. Pour deux corps de même matière, l'idée de quantité se confond avec celle de volume. Pour des corps de matières différentes, il se peut que les poids diffèrent à volume égal ; auquel cas la quantité de matière dépend d'autre chose, que l'on ne peut concevoir que comme une différence de constitution et que l'on résume, non sans arrière-pensées, par « densité ».

Expérimentalement les rôles sont renversés : la densité se connaît par la masse, et celle-ci par le poids. Les masses ne peuvent être connues, c'est-à-dire comparées entre elles, par les volumes seuls, que dans le cas de densités égales, autrement dit pour des corps de même matière. Précisons que, sinon, les masses sont connues par la comparaison des poids en un même lieu. Près de la Terre, cette comparaison repose sur l'usage traditionnel de la balance. En effet, l'isochronie des oscillations pendulaires prouve la proportionnalité des masses à ces poids, comme le prouverait l'égalité des accélérations si l'on pouvait les observer avec précision. Les masses des corps célestes, quant à elles, se connaissent par les attractions qu'ils induisent à une même distance de leurs centres respectifs, ce qui renvoie à la connaissance des révolutions.

Élaboration de l'accélération

Newton poursuit la constitution galiléenne de la cinématique par la création mathématique du mouvement varié quelconque. Il le fait dans la même veine graphique : alors que Galilée avait envisagé un triangle rectiligne, il introduit un triangle mixtiligne. La vitesse n'est toujours pas vraiment un quotient ; c'est plutôt un rapport, au sens euclidien du terme ; mais hétérogène, il faut bien en venir à le dire : celui d'une distance à une durée.



L'emploi fait par Newton du mot « accélération », très rare d'ailleurs, est conforme à l'étymologie : accroissement de la vitesse, sans plus. Ce que nous désignons de ce mot, et qui devrait plutôt s'appeler, dans cet esprit, « taux d'accélération », se rencontre dans les *Principia* sous l'appellation de « force accélératrice ». L'expression est l'abréviation de « quantité accélératrice de la force ». Cette quantité est parfois proportionnelle à la seule variation de vitesse, parfois elle est aussi inversement proportionnelle à la durée du changement. En d'autres termes, Newton ne sépare pas clairement ce que lui-même appelle « accélération » et ce que nous désignons ainsi, l'accroissement et le taux d'accroissement. Le flou qu'il entretient, en disant que la quantité accélératrice est proportionnelle à l'accroissement de vitesse reçu *en un temps donné*, ne relève pas de la simple maladresse. Cette imperfection témoigne sans doute de la réticence que provoquent encore les rapports de grandeurs hétérogènes (ici d'une vitesse à un temps). En outre, comme il sera vu plus loin, elle entretient chez Newton l'espoir quelque peu excessif qu'il place dans son concept de force, quant à son pouvoir unificateur.

Pour ce qui est de mesurer une force accélératrice, c'est-à-dire de la comparer à une autre, on se contente généralement de mesurer le déplacement initial induit : on fait en sorte de comparer les déplacements dans la première seconde. La détermination de l'accélération de la pesanteur, notamment, passe par la détermination de la hauteur de la chute initiale d'un pendule.

Inertie et action

L'état inertiel, repos ou mouvement rectiligne uniforme, suppose, en théorie, que les positions soient référées à l'espace absolu. En pratique, comme on ne sait pas trouver ce dernier, on se sert du système solaire. C'était le plus grand système de corps connu et les mouvements y sont lents à l'échelle de nos expériences. Son centre de masse coïncide presque avec celui du Soleil ; en vertu de quoi la cosmologie newtonienne est quasi copernicienne (et vice versa).

Newton avait cru bon d'attribuer à chaque corps une force interne, par laquelle le corps résiste aux actions ou bien agit lui-même lors d'un choc. Il l'affirme proportionnelle à la masse du corps, sans raison ni justification. La première Loi (le principe d'inertie), déclarant le mouvement rectiligne uniforme aussi naturel que le repos, rend superflue cette notion, qui d'ailleurs n'intervient que fictivement dans les démonstrations.

Allons jusqu'à tenter une interprétation du principe d'inertie, dans le respect des conceptions déjà exposées, qui évite toute référence directe à l'expérience. L'action donne du mouvement (en fait, un supplément de quantité de mouvement) par l'impression d'une force. Si l'on admet la réciproque, à savoir que toute adjonction de mouvement vient d'une action, alors il en va de même de toute soustraction (puisque soustraire c'est déjà, dans ce domaine, ajouter l'opposé). Aussi le mouvement acquis ne peut-il se perdre que par une action contraire. Ce qui vient d'être proposé ne se rencontre pas tel quel dans les *Principia* mais, en regardant de près, c'est un fil de pensée que l'on y croise. L'interprétation a été poussée dans ce sens pour faire valoir l'épaisseur et la richesse de la pensée qu'il convient de placer entre l'énoncé des lois et l'expérience dont on a longtemps prétendu qu'elle a produit seule ces dernières, de manière en quelque sorte directe. L'induction, sur ce sujet, est un mythe facile. La réalité fut une élaboration, c'est-à-dire avant tout un tâtonnement, et non des moindres.

Instantané et continu

Les actions qui s'exercent sur un corps prennent soit un caractère instantané (choc) soit un caractère continu. Parmi ces dernières, certaines sont dirigées vers un centre et reçoivent l'appellation de force centripète : la gravité, les tractions réalisées à l'aide d'une corde ou d'une

fronde, l'action magnétique. Il est tentant d'analyser les actions continues et d'établir leurs lois comme si elles consistaient en une succession de petites actions instantanées infiniment rapprochées. La démonstration d'une propriété telle que la loi des aires consiste alors à l'établir dans le cas d'une succession discrète d'actions instantanées, puis à passer à la limite pour rendre l'action continue.

De telles démonstrations, à la vérité, n'ont que l'apparence de la rigueur, et Newton ne l'obtient que par la vertu d'un subterfuge. Dans le cas de l'action continue, on peut tenir compte du temps pendant lequel se produit une certaine variation de vitesse. Dans une action instantanée, cela ne se peut ; on ne peut prendre en compte que cette variation. C'est sans doute pour avoir voulu faire servir les actions instantanées à l'analyse des actions continues que Newton est resté sur une hésitation dans sa création du concept de force imprimée, entre une impression « en un temps donné » et une impression dont l'aspect temporel est occulté.

Dans l'expérience, les grandeurs des actions continues se connaissent par des mesures statiques : par équilibre avec une autre, laquelle est fondamentalement un poids ; ou alors par des mesures dynamiques : par la masse et l'accélération séparément (exemple de la force centrifuge).

Du corps au système

Le corps se voit attribuer, comme qualités mécaniques : l'étendue, avec une forme et une limite ; la solidité pour certains ; la mobilité ; une densité, uniforme ou variée ; une masse et un centre de masse (dit centre de gravité). Cela peut être modifié, si l'expérience y incite : la dureté parfaite peut laisser place à la mollesse ou à l'élasticité ; et une fois posée l'hypothèse de l'attraction universelle, tout corps aura un poids vers un astre donné : poids de la Lune vers la Terre, poids vers le Soleil ; poids variable, il est vrai, avec la distance.

En outre, tout comme un corps est le système de ses parties, un système de corps en vient à être considéré lui-même comme un corps, pour certaines des qualités du moins : l'existence d'un centre de masse commun permet d'accorder au système des états cinématiques. L'inertie, en particulier, lui est reconnue : comme un corps, il reste au repos ou en translation rectiligne uniforme en l'absence d'actions externes*.

Pour les besoins de certaines démonstrations, l'étendue des corps donne lieu à division à l'infini. Ce traitement mathématique n'est pas incompatible avec une conception atomiste dont on a quelques raisons de penser que Newton la nourrissait ; les *Principia* n'en disent rien, l'idée affleurant seulement, notamment dans la notion de densité.

Action et réaction

L'idée d'une action dans laquelle un corps est agissant et l'autre patient demande à être complétée. L'expérience montre, dans plusieurs situations, qu'il y a action en retour, ou réaction. C'est le cas du magnétisme, mais aussi celui de l'homme qui tire un fardeau : la résistance qu'il ressent peut être pensée comme une action du fardeau sur l'homme. Newton pose qu'il y a réaction en toute circonstance. Il pose en outre que la réaction égale l'action sous le rapport de la quantité motrice, d'où s'ensuit qu'un système isolé conserve un état inertiel.

Newton attribuait à sa troisième Loi, celle de l'action et de la réaction, un pouvoir unificateur supérieur à ce qui lui a été reconnu depuis. Envisageons cela à travers trois ou quatre cas paradigmatiques : le choc, le sceau et la fronde, l'aimant.

* Newton n'utilise pas « système » en ce sens général, réservant le mot aux astres, selon l'usage cosmologique.

Dans le cas du choc la loi correspond à la conservation de la quantité algébrique de mouvement : ce que l'un des corps perd de quantité de mouvement dans un sens, l'autre le gagne dans le même sens. La force motrice, tant de l'action que de la réaction, correspond à ces deux changements égaux. On retrouve là l'espoir de pouvoir faire relever toutes les actions, tant instantanées que continues, des mêmes lois.

Une bille tournant dans un sceau bien rond subit une action continue de la part de celui-ci, une succession continue de chocs infiniment petits, en vertu de quoi son mouvement est constamment détourné. C'est la réaction exercée par la bille sur la paroi du seau que Newton assimile à la force centrifuge dont cette bille dispose. La situation est alors toute semblable à celle d'une pierre tournant dans une fronde, laquelle présente un lien matériel et visible entre la pierre et le centre.

Des aimants, enfin, feront mouvement l'un vers l'autre dans les expériences où la liberté en leur en est donnée. Sur ce modèle, il est bien permis de concevoir la gravitation comme action toujours réciproque, même si l'observation de la réaction est souvent délicate à envisager directement. Lorsqu'on observe une action, par exemple dans l'attraction d'un corps par un autre, l'observation de l'effet de la réaction, à savoir le mouvement du second vers le premier, demanderait de pouvoir repérer leur centre de masse commun et le mouvement vers lui de chacun des deux corps. À défaut, on admet que la loi d'action et de réaction s'applique *.

Gésine du concept de force

On voit que la pensée newtonienne envisage habituellement deux êtres, le corps agent et le corps patient, mais aussi un troisième qui est l'action elle-même, sans compter la réaction. Comme la vitesse avec Galilée, la force commence à subir une élévation ontique, mais de manière plus lourde, moins achevée, et cependant essentielle. La force, qui était jusque là manière d'agir, ou capacité à agir, commence à devenir l'être à part entière qu'elle est dans notre mécanique. Ce n'est pas bien clair pour la notion de force imprimée, laquelle ressemble à ce dont il est question lorsqu'on dit qu'un corps est poussé, ou tiré, avec force ; sinon que désormais il y a toujours force... même faible. La force centripète manifeste plus clairement son entité. La principale difficulté est de s'y retrouver entre tant de notions voisines.

Sans doute faut-il suivre avec ténacité le fil offert par la notion d'action. C'est une notion première, et de ce fait sans définition dans les *Principia*, tout comme celle de corps. Comparée à celle-ci, partout présente, la notion d'action se fait discrète. Elle s'estompe même très rapidement dans l'œuvre, sans avoir donné lieu à quantification, au bénéfice de celle de force. Pourtant l'action possède un certain degré de réalité, même si sa durée est susceptible d'être limitée. Remarquons qu'elle présente deux aspects : la direction (pour nous : direction et sens) et la grandeur (scalaire, dirions-nous). La force imprimée, en fait, n'est autre que cette grandeur. Elle se mesure principalement par la quantité de mouvement donnée au corps patient dans la direction où se fait l'action (Loi II). Et l'action imprime, par voie de conséquence, une quantité accélératrice de force, qui donne au corps un surcroît de vitesse dans la direction de l'action. Tout cela, éventuellement, « en un temps donné ». À ce stade, la moderne notion de force, grandeur vectorielle, est plus semblable à cette action qu'à la seule force imprimée, cette dernière n'étant que l'intensité de l'action et se dédoublant, qui plus est, en quantité motrice et quantité accélératrice. À tout le moins, la force imprimée dispose de réalité dans la mesure où il en est reconnu à l'action.

Dans le cas des actions centripètes que la Nature nous révèle (magnétisme, mouvements des astres), Newton déplace encore le sens de « force » en disant que la force imprimée vient de la force

* Son universalité n'empêche pas Newton de la mettre entre parenthèses au nom du caractère mathématique de ses théories lorsqu'il l'estime nécessaire pour avancer.

centripète *. Pour cette dernière, il ouvre ainsi la possibilité d'accéder à un statut ontique à peu près égal à celui des corps. Dans l'Univers ainsi pensé, il pourra exister en permanence, en un sens plus ou moins plein de ce verbe, des corps et des forces centripètes. Une force centripète a d'office, avec ses quantités motrice, accélératrice et absolue, une direction, de sorte qu'elle est un type d'action tout proche de notre concept de force. Le caractère restrictif que constitue l'existence d'un centre ne gêne d'ailleurs guère Newton qui n'hésite pas à s'en libérer occasionnellement.

Il est postulé implicitement que la quantité accélératrice d'une force centripète est fonction de la distance du corps attiré au centre, ainsi qu'à une caractéristique de celui-ci, la quantité absolue, et à rien d'autre **; du moins la théorie n'envisage-t-elle que cela. Cette quantité absolue témoigne d'une idée causale, d'une idée de puissance liée au corps placé au centre. Or, dans l'univers envisagé, celui de la mécanique théorique, la seule caractéristique intrinsèque reconnue au corps, hormis volume, forme et solidité, est la masse. À partir du moment où les attractions présentent une symétrie sphérique, les quantités absolues, en vertu de cela ainsi que de la troisième loi, ne peuvent qu'être proportionnelles aux masses des corps attirants.

En complet contraste avec la notion de force centripète, continuent d'exister « dans » les corps, des forces centrifuges, mais qui ne durent que ce que durent les révolutions ; et la notion, d'ailleurs, est peu théorisée.

Le statut des forces est donc varié. L'unité est assurée par les grandeurs qui leur sont attachées : quantité accélératrice et quantité motrice, la force d'inertie faisant radicalement exception. La force imprimée est proche de ce que nous appellerions intensité de l'action ; la force centripète est un type d'action (mais on se retient de le dire) ; toutes prétendent à l'instantanéité autant qu'à la continuité.

La gravitation universelle

Selon la loi d'inertie, les révolutions des astres signalent des forces centripètes. Chacune en produisant une autre en réaction, aucun corps du Monde ne peut être parfaitement immobile. Seul le centre de masse du système solaire, au mieux, pourrait l'être.

Les forces observées, ou plutôt déduites des considérations de l'astronomie d'observation, sont donc en partie relatives, aurait dû avouer Newton : puisque la Lune ne fuit pas tangentiellement, le mouvement qu'elle fait vers la Terre, est mesuré par rapport à cette dernière ; laquelle est en mouvement, entre autres, vers la Lune. Le mouvement de la Lune qui a été pris en compte est donc relatif et non absolu ; or c'est par lui que se connaît l'attraction terrestre. Dans cette phase de constitution de la théorie de la gravitation universelle, on est dans l'erreur, à rigoureusement parler.

Mais il n'y a pas erreur de méthode pour autant. En partie parce que les inégalités de grandeur des astres invitent à espérer des inégalités de masses telles que le corps attirant bouge nettement moins que le corps attiré : l'erreur n'en est que moins à craindre et l'apparent, le relatif, n'en est que plus proche du réel. Et surtout parce que la théorie de la gravitation universelle ne résulte pas seulement de ces diverses considérations particulières ; elle n'est pas l'aboutissement déductif d'une preuve bâtie sur elles. Vient un moment où Newton déclare prendre comme principe, comme hypothèse en somme, que tous les corps s'attirent, et qu'il suivent en cela les lois jusque là suggérées par ce qui se déduisait des « phénomènes ». Formant ainsi, tout d'un coup, une idée, une représentation du Monde, il lui reste à en déduire les particularités et voir si elles s'accordent aux différentes observations, compte tenu des diverses marges d'incertitude.

* On sait que le mot « force » est utilisé également pour abrégé les appellations des grandeurs attachées à la force imprimée (motrice, accélératrice) ; mais c'est accessoire ici.

** L'éventuel mouvement du centre, notamment, n'intervient pas.

CONCLUSION

On voit ainsi ce que les successeurs vont s'attacher à améliorer ou à compléter. Le cadre spatio-temporel sera maintenu jusqu'à la Relativité restreinte, ainsi que la masse comme caractéristique invariante d'une portion donnée de matière. La cinématique demande achèvement, hors de toute considération dynamique, ne serait-ce que pour le mouvement rectiligne uniforme. Les progrès du calcul infinitésimal vont y contribuer puissamment. La création de l'énergie, dont le germe est la *force vive* de Leibniz, permettra d'autres présentations de la mécanique rationnelle ; elle permettra aussi de la lier à d'autres parties de la physique. Auparavant, le concept de force aura été simplifié : plus de force interne ; achèvement de l'identification à la notion d'action, grandeur et direction mêlées ; libération complète par rapport à la quasi-nécessité d'un centre ; prédominance de la grandeur motrice, l'accélération devenant une notion purement cinématique (la force accélératrice, qui tente d'en tenir lieu, se doit d'être une accélération absolue). La théorie du changement de référentiel, ébauchée dans les *Principia* à la va-comme-je-te-tire, permettra de donner à la force centrifuge son statut de force fictive. Ce qui concerne la rotation, plus largement, devra trouver place, ne serait-ce que la dynamique de rotation des solides. C'est, en tout cas, une mécanique rationnelle imparfaite qui a servi à établir la gravitation universelle, et qui y a réussi. Rappelons les principales qualifications qui peuvent accompagner « force » : interne, imprimée, centripète, centrifuge, motrice, accélératrice, absolue.

Observons combien créations d'idées et positions de principes vont ensemble. Tout en comportant leur part d'empirie, les idées sont de nature théorique (ce qui ne veut pas dire seulement mathématique) : on constitue mentalement un univers qui prétend représenter la réalité. Car une théorie n'est jamais qu'une idée trop vaste et trop riche pour être pensée d'un coup ; il y faut un déploiement progressif, déductif éventuellement.

Observons aussi que la création de la mécanique rationnelle n'a pas reposé sur des progrès mathématiques ni cinématiques notables. En revanche, il y a fallu une mise en place d'ensemble : notions enrichies d'espace et de temps, invention de la masse, affirmation de l'inertie, greffe de l'idée de force sur celle d'action, puis déplacement. Cette dernière donne encore lieu à hésitation entre une conception comme action (la force centripète et ses diverses qualités) et comme modification (la force imprimée de la Loi II). La tentative, à son propos, de lier l'instantané et le continu constitue un échec inavoué, peut-être même non reconnu. La Loi III, enfin, que l'on prétend souvent issue de la seule expérience commune, apparaît aussi comme extension du principe d'inertie à ces corps généralisés que sont les systèmes.

Quant à la part empirique des choses, ne perdons pas de vue que, si certains faits sont simples (des corps lâchés tombent d'eux-mêmes), d'autres sont hautement élaborés. Ce que Képler a dit des cieux n'est en rien plus réel, avant la mécanique newtonienne, que ce qu'en avaient dit Copernic et Tycho Brahé. Une fois intégrés à l'univers newtonien, avec ses concepts et ses lois, les mouvements ne sont pas seulement décrits plus simplement par Képler que par ses prédécesseurs ; ils sont véritablement tels que les lois de Képler les décrivent. Il est vrai désormais que Mars parcourt une simple ellipse, parce que cela peut se déduire des différentes lois. La vérité du système copernicien amendé par Képler est relative au cadre newtonien qui s'est imposé. Le mouvement de la Terre autour du Soleil n'est un fait que relativement à ce cadre théorique.

*