

MASSE (DE NEWTON A EINSTEIN)

in Lecourt, Dominique (éd.), Dictionnaire d'histoire et de philosophie des sciences, Presses Universitaires de France, Paris, 1999, p. 613-616.

Introduction

Le concept physique de masse, créé par Newton, peut être considéré comme le piédestal de la mécanique classique, en permettant l'expression complète du principe d'inertie et de la loi fondamentale de la dynamique, une fois admis que la masse est une grandeur invariable attachée à un corps, distincte du poids qui est dû à la gravité conçue comme une sollicitation sur les corps qui leur est extérieure. Il était dès lors possible de fonder également, et d'exprimer quantitativement, la loi de la gravitation universelle, dont la force est en raison directe des masses en présence et varie en fonction de leur distance mutuelle. Le concept de masse manifesta sa fécondité dans la physique tout entière ainsi qu'en chimie. Il devait cependant encourir, en même temps que la mécanique, de sévères critiques portant sur la fausse évidence de sa définition, en réalité imprécise (comme "quantité de matière des corps"), et faisant implicitement appel à d'autres grandeurs et à des principes de la physique qui eux-mêmes la supposent. Cette circularité des notions de la mécanique en montre les limites. Plus radicalement encore, la théorie de la relativité restreinte devait conduire à repenser la masse en relation à l'énergie, ce qui entraîna des conséquences considérables, notamment sur la possibilité de pénétrer la matière, "réservoir d'énergie", dans ses éléments constitutifs. Le concept de masse ainsi "relativisé" n'a pas cessé pour autant d'être une des notions-clé de notre connaissance du monde physique, non seulement de la matière, mais de l'Univers, aux diverses étapes de son évolution, qui le peuplent d'"objets" allant des particules aux galaxies.

1. La masse conquise contre le poids et l'extériorité de la gravité : Newton

Le terme "quantité de matière", que Newton devait reprendre pour définir la masse, était utilisé dès le quatorzième siècle avec l'idée de sa

conservation dans tous les changements, et Richard Swineshead envisageait la possibilité de sa mesure mathématique par le produit de la densité et du volume. Jean Buridan en faisait une notion de la dynamique. Cependant le poids, “*pondus*”, était conçu par la pensée scolastique comme une propriété des seuls corps lourds. Galilée lui-même, tout en établissant l'égalité de l'accélération de tous les corps qui tombent d'une même hauteur, ne pensait pas encore la gravité comme extérieure aux corps. Il concevait cependant (en se fondant sur l'équilibre de la balance) l'idée d'une résistance interne au changement de mouvement (le poids du corps sur l'un des plateaux s'oppose à la sollicitation vers le haut qu'il subit de la part de l'autre). Il formula ainsi le principe d'inertie pour le mouvement dans le plan horizontal (dégagé de la pesanteur), tout en maintenant l'idée de la gravité - et donc le poids - comme propriété inhérente aux corps.

C'est à Newton qu'il revint d'établir une distinction nette entre la masse et le poids, en concevant la gravité comme une sollicitation extérieure. Dans ses *Principia Mathematica (Principes mathématiques de la philosophie naturelle, 1687)*, il définit la masse comme la “quantité de matière”, donnée par “la réunion de la densité et du volume” (entendons: le produit des deux), qui lui permet de définir la “quantité de mouvement” de manière plus précise que Descartes - qui l'avait introduite -, comme le produit de la vitesse par la quantité de matière ou masse ($p = mv$).

Newton précise également que la force d'inertie, inhérente au corps (qu'il appelle aussi “*vis insita*”), c'est-à-dire le pouvoir de résister au changement d'état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite (mouvement inertiel), est proportionnelle à la masse du corps. A la formulation de Descartes du principe d'inertie - basée sur la considération de la conservation du mouvement, ce dernier étant conçu dans une perspective géométrique, sans appel à l'inertie comme résistance -, Newton ajoutait ainsi la considération quantitative, en donnant une définition de la *masse d'inertie* ainsi qu'une formulation précise de la *quantité de mouvement*, qui lui donnaient le soubassement aussi bien du principe d'inertie que de la loi de changement du mouvement.

Le changement de la quantité de mouvement d'un corps provoqué par une force agissant sur lui est proportionnel à cette force en grandeur et direction, soit $\Delta(m\mathbf{v}) \propto \mathbf{F}$, ce que l'on a exprimé par la suite comme $\mathbf{F} = \frac{d(m\mathbf{v})}{dt} = m \frac{d^2\mathbf{x}}{dt^2}$. La masse apparaît alors comme le coefficient de proportionnalité de la force à l'accélération, et donc comme ce qui exprime le passage de la cinématique (propriétés du mouvement) à la dynamique (propriétés des forces). Elle indique, sous ce rapport, l'équivalence de toutes

les forces quelles que soient leur nature (d'impulsion, de gravitation, électriques, magnétiques, etc., comme Newton le soulignait lui-même).

Newton établit dans le livre 3 des *Principia*, par des expériences sur des pendules, la proportionalité du *poids* (p) et de la *masse* (m) à une hauteur donnée: pour deux corps M et M' , $\frac{p}{m} = \frac{p'}{m'}$, $p = mg$, g étant l'accélération due à la gravité, indépendante de la forme, de la nature et du poids du corps. La masse permet ainsi d'exprimer que la gravité est extérieure au corps: elle reste invariable, mais le *poids* varie en fonction de la distance au centre d'attraction.

Newton proposa alors d'ériger en principe la gravitation universelle de tous les corps, constatée sur Terre ainsi qu'entre les corps célestes (planètes et leurs satellites, Soleil, comètes), la force de gravitation étant proportionnelle à la *masse* ("Tous les corps ont en propre un pouvoir de gravité, proportionnel aux quantités de matière que chacun d'eux contient").

Cette considération était essentielle pour établir ensuite la loi de cette force, celle de l'inverse carré des distances, à partir des lois de Képler du mouvement des planètes et de la loi de Galilée de la chute des corps sur Terre (selon laquelle les espaces parcourus sont en raison des carrés des temps). La force d'attraction de gravitation universelle de Newton, entre deux corps de masses m et m' séparés par une distance d est : $\mathbf{F} = G \cdot \frac{mm'}{d^2}$ (G : constante de gravitation universelle). Cavendish devait vérifier expérimentalement, au dix-neuvième siècle, sur des petites masses, à l'aide d'une balance de torsion, la loi de proportionalité de la force au produit des masses dans l'attraction universelle newtonienne.

2. De la "quantité de matière" aux masses des atomes

Les successeurs de Newton ont généralement adopté ses définitions et notamment celle de la masse. Elle permettait de traiter toute la mécanique des corps en la fondant sur la notion (purement abstraite) de point matériel, c'est-à-dire de point géométrique sans dimension doué de masse. La masse m est une grandeur (que nous disons aujourd'hui scalaire) positive, constante, additive dans les systèmes matériels, invariante dans tout changement de référentiel. Comme coefficient de l'accélération dans la loi de la dynamique, m est la masse d'inertie; en fait, m désigne aussi la masse pesante, paramètre de la loi d'attraction gravitationnelle. En établissant son système des poids et mesures, la Convention définit, en 1793, l'unité de masse, le kilogramme, comme la masse d'un litre d'eau (d'autres définitions, plus précises, ont été adoptées par la suite).

Concept issu de la mécanique, la masse s'imposa universellement en physique et en chimie. Lavoisier découvrit expérimentalement, vers 1785, la loi de conservation de la masse: "La masse totale d'un système fermé reste constante quelles que soient les transformations physico-chimiques dont il peut être le siège". Cette loi révéla l'interêt de l'utilisation de la balance et favorisa le développement de la chimie au long du dix-neuvième siècle, qui eut notamment comme effet la mise en évidence de l'existence des atomes. Que l'on songe, par exemple, aux lois des proportions définies et multiples, de Proust et de Dalton, exprimant les rapport des masses des éléments d'un composé chimique; ou à la classification périodique des éléments de Mendeleiev (1869), reliant les propriétés chimiques des corps à leurs poids atomiques rangés selon l'ordre croissant. Ou encore, à la mesure par J. J. Thomson, en 1897, du rapport $\frac{m}{e}$ de la masse à la charge électrique des rayons cathodiques, identifiés comme étant les électrons. On peut, dans ce sens, attribuer une certaine fécondité à la définition newtonienne de la masse comme mesure de la quantité de matière des corps, malgré son caractère imprécis.

3. Critiques de la masse newtonienne

Dans sa remise en cause des notions "métaphysiques" de la mécanique, Ernst Mach n'épargna pas la définition newtonienne de la masse (*La Mécanique*, 1883). "Quantité de matière" lui paraissait une expression obscure pour définir une grandeur comme la masse, même si l'on comptait les atomes, dont l'hypothèse sous-tend la définition newtonienne - hypothèse à laquelle Mach était d'ailleurs opposé. Pour Mach, la masse mesure la résistance au changement de mouvement, qui croit avec elle. Son origine est expérimentale: c'est l'expérience qui "nous fait découvrir dans les corps l'existence d'une caractéristique particulière déterminante d'accélération", constatée par exemple dans le principe de l'égalité de l'action et de la réaction. Se fondant sur l'idée de la "dépendance mutuelle des phénomènes" et sur l'exigence d'éliminer "toute obscurité métaphysique" (ce qui était aussi bien sa manière de définir toutes les grandeurs physiques), Mach proposa donc de comprendre Newton en définissant la masse par l'accélération. Choissant un corps comme unité, on dira qu'un autre corps "est de masse m lorsque ce corps, agissant sur le [premier], lui communique une accélération égale à m fois l'accélération qu'il reçoit par la réaction du [premier] sur lui". Dans la définition de Mach, le concept de masse et le principe d'action et de réaction

correspondent à une même constatation expérimentale. La masse est alors mesurable par le poids (pour une même valeur de g), sans faire appel à la quantité de matière.

Poincaré proposa également une critique de la définition classique de la masse, assez proche de celle de Mach, en faisant observer que la force, l'accélération et la masse, qui figurent dans la loi de la dynamique newtonienne, sont impliquées dans leurs définitions respectives, qui ne sont pas indépendantes. Il faut, en réalité, faire intervenir, dans une définition satisfaisante de ces grandeurs liées, le principe d'action et de réaction, si l'on veut par exemple définir l'égalité de deux forces. Ce principe lui-même est, comme tous les principes physiques, et bien que d'origine expérimentale, formulé de manière systématique comme une convention utile. En définitive, les définitions de concepts comme la masse sont des conventions qui nous permettent de connaître les phénomènes de manière approchée.

En voulant rapporter les grandeurs physiques à des grandeurs seulement observables, Ernst Mach effectua une critique vigoureuse des concepts newtoniens d'espace, de temps et de mouvement absolu. Il s'interrogea donc aussi sur la nature de la masse d'inertie, coefficient de l'accélération, dont le support, en mécanique newtonienne, est l'espace absolu. Mach proposa que les propriétés d'inertie des corps résultent de leurs interactions avec tous les autres corps, proches ou lointains, en particulier les très grandes masses réparties dans l'Univers. Einstein devait dénommer cette proposition "principe de la relativité de l'inertie", puis "principe de Mach": elle lui fut utile dans son cheminement vers la théorie de la relativité générale (pour penser la covariance générale) puis dans son application à la cosmologie. Il l'abandonna cependant car, prise au sens strict, elle suppose l'action instantanée à distance qui s'oppose au concept de champ.

4. De la masse électromagnétique à la masse relativiste : Einstein et la matière-énergie

Des expériences effectuées sur les électrons des rayons cathodiques mirent en évidence, dans les dernières années du dix-neuvième siècle, une variation de leur masse avec la vitesse. Cette "masse électromagnétique", engendrée par effet de self-induction électromagnétique, fut pensée tout d'abord en opposition à la masse "vraie", "matérielle", ou "mécanique", supposée invariante, à laquelle elle s'ajouterait. Il apparut, avec les électrons de vitesse très élevée émis par la radioactivité β , que leur masse totale variait avec la vitesse, sans laisser de résidu constant, qui serait la

masse mécanique (newtonienne). L'idée naquit alors chez de nombreux physiciens que la mécanique ne constituait plus le fondement de la physique, et qu'elle devrait désormais au contraire être fondée sur la théorie électromagnétique. La théorie de la relativité, en refondant l'ensemble des théories physiques - mécanique et électromagnétisme - sur la base d'une nouvelle cinématique, retrouverait directement ces résultats sans calcul par des modèles de l'électron, rendant vain le programme de la "vision électromagnétique du monde".

Avec la théorie de la relativité restreinte d'Einstein (1905), la réforme de la cinématique effectuée par une nouvelle définition de l'espace et du temps, soumis au principe de relativité et au caractère fini des vitesses de propagation, marque ses effets sur les grandeurs dynamiques en relation. La loi fondamentale de la dynamique demeure sous la forme $\mathbf{F} = \frac{d}{dt}(\mathbf{p}) = \frac{d}{dt}(m\mathbf{v})$, où $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ est la quantité de mouvement, mais m n'a plus la même définition qu'en mécanique classique : c'est la masse d'inertie relativiste, qui varie avec la vitesse du corps, selon la loi de variation $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$, augmentant indéfiniment quand la vitesse tend vers la limite c ,

vitesse de la lumière. Le coefficient m_0 est dit *masse propre* ou *masse au repos*: il n'est autre que la masse de la mécanique newtonienne, retrouvée à la limite des vitesses petites par rapport à celle de la lumière (pour $v \ll c$, $m = m_0$).

Comme conséquence de la théorie, Einstein mit en évidence l'équivalence de la masse et de l'énergie, avec la formule $E = mc^2$. L'émission d'énergie lumineuse L , par exemple, s'accompagne d'une perte de masse $\frac{L}{c^2}$, et toute énergie possède la propriété d'inertie. La masse est l'énergie interne des corps, et s'échange, comme l'énergie, dans les interactions. La nature de la masse s'en trouve dès lors profondément changée : elle n'est plus absolument conservée et additive dans les interactions. Les lois de conservation de la masse et de l'énergie ne sont plus valides séparément : seule est conservée l'énergie totale dans la nouvelle acception (énergie relativiste). Les échanges d'énergie qui se produisent dans les interactions correspondent à des modifications des masses ($\Delta m = \frac{1}{c^2} \cdot \Delta E$) qui ne sont négligeables que tant que les échanges d'énergie restent faibles (dans les actions mécaniques, gravitationnelles, ou chimiques) : ils peuvent être mis en évidence avec les énergies plus élevées des transmutations

radioactives (et ils sont, de nos jours, d'une importance considérable avec la libération de l'énergie nucléaire et la production de particules élémentaires).

Dans la nouvelle définition "relativiste" de la masse, la masse "au repos" ou "masse propre", m_0 , garde une signification privilégiée : elle est un invariant relativiste pour tout changement de référentiel d'inertie : $(m_0c^2) = E^2 - (pc)^2$. Il existe cependant la possibilité que la masse propre d'un corps soit nulle (comme celle du photon) : dans ce cas, sa vitesse est constamment c , qui est, précisément, la vitesse de la lumière (et l'on ne peut parler de masse "au repos").

5. Masses d'inertie et masse gravitationnelle. Le principe d'équivalence

Malgré leur égalité, les masses pesante et d'inertie sont deux grandeurs dont la signification physique est bien différente. L'une, par la loi (d'attraction de gravitation) qui la met en œuvre est une sorte de "charge" gravitationnelle (en analogie avec la charge électrique dans la loi de Coulomb), et l'autre est un simple coefficient des accélérations. La physique classique prend acte de cette égalité, vérifiée dans la loi de la chute des corps (elle rend compte de l'observation de Galilée, que tous les corps tombent avec la même accélération, quelle que soit leur nature, leur densité et leur volume: c'est que $\gamma = \frac{m_p}{m_i} g = g$) : la mécanique l'inclut avec succès dans ses calculs, mais sans en fournir d'explication. Elle fut vérifiée avec une très grande précision dans des expériences réalisées de 1890 à 1909 par L. Eötvös.

Réfléchissant sur la loi de la chute des corps et sur l'égalité de la masse d'inertie et de la masse gravitationnelle, c'est-à-dire sur le fait que le mouvement d'un corps dû à l'action de la gravitation est indépendant de sa masse, Einstein eut l'idée, dès 1907, de l'équivalence entre un mouvement uniformément accéléré et un champ de pesanteur homogène, qui devait le conduire à la théorie de la relativité générale. Il fit de la coïncidence entre les valeurs des deux masses un principe fondamental de la nature, qu'il dénomma "principe d'équivalence" (de la masse d'inertie et de la masse gravitationnelle). En lui adjoignant le principe de relativité généralisé (ou covariance générale), il déduisit (au terme de son travail de 1911 à 1915) la structure de l'espace-temps, déterminée uniquement par les masses des corps physiques qu'il contient, qui agissent comme sources du champ. Le mouvement d'un corps suit les équations, purement géométriques, des géodésiques de l'espace-temps.

6. Masses et interactions fondamentales

La masse exprimant une énergie, on peut lui appliquer, en physique quantique, la relation d'inégalité de Heisenberg ($\Delta E \cdot \Delta t \geq h$), ce qui permet de concevoir la notion de *particule virtuelle* échangée entre deux particules au cours de leur interaction. L'échange correspond à une fluctuation d'énergie $\Delta E \geq mc^2$ (m étant la masse de la particule virtuelle), qui s'effectue dans un intervalle de temps $\Delta t \leq \frac{h}{mc^2}$. On rend compte ainsi de la masse des particules échangées dans une interaction en fonction de la portée de celle-ci (masse du méson π des forces nucléaires, portée infinie des forces électromagnétiques - la masse du photon qui les propage étant nulle -, masse élevée des bosons intermédiaires transmetteurs de l'interaction faible - W^\pm , Z^0 , $m_{W,Z} \approx 90$ GeV -, liée au caractère presque ponctuel de cette dernière).

Cependant la physique ignore encore aujourd'hui l'origine des masses des particules élémentaires et la raison des différences de masses entre les trois leptons chargés (électron, muon, tauon), ou de celles entre les quarks. Selon les théories actuelles, les effets de masses se manifestent dès que certaines symétries sont brisées. La connaissance des brisures de symétrie responsables de la différenciation des interactions (mécanisme de Brout-Englert-Higgs) éclairera peut-être dans le futur la question des masses des particules.

BIBLIOGRAPHIE

CROMBIE, A. C., *Augustine to Galileo. The history of science. A.D. 400-1650*, Falcon Press, London, 1952; tr. fr. J. d'Hermies, *Histoire des sciences, de Saint Augustin à Galilée (400-1650)*, Paris, PUF, 1958, 2 vols. - EINSTEIN, A., *Collected papers, vol. 2: the Swiss years, 1900-1909*, ed. J. Stachel et al., Princeton, Princeton University Press, 1989. - *Oeuvres choisies, 2 et 3 : Relativités I et II*, éd. par F. Balibar, O. Darrigol, J. Stachel et al., Paris, Seuil, 2 vols., 1993. - MACH, E., *La mécanique* (1883), Hermann, Paris, 1904; ré-éd., 1923. - NEWTON, I., *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, Société Royale, Londres, 1687; 2ème éd., 1713; 3ème éd., 1926. - PATY, M., *La matière dérobée*, Archives contemporaines, Paris, 1988. - *Einstein philosophe*, Paris, PUF, 1993. - POINCARÉ, H., *La science et l'hypothèse*, Paris, Flammarion, 1902; 1970.

Michel PATY