

LE CONCEPT DE FORCE

La notion de force, couramment utilisée dans la physique classique, est en apparence une notion très simple. En fait, elle soulève de nombreux problèmes. Très tôt, certains critiques ont contesté son bien-fondé et y ont vu une fiction commode plutôt qu'une réalité. De plus, avec les progrès de l'électromagnétisme, de la relativité et de la physique atomique et nucléaire, il est apparu une multiplicité de types de « forces » et de nouvelles interprétations, dont la cohérence n'est pas encore assurée. Ce cours est tiré d'un article de Max Jammer et retrace les principales étapes d'une évolution qui va du triomphe de la mécanique newtonienne aux interrogations actuelles.

La science a pour but de donner une description complète et peut-être aussi une explication des phénomènes naturels à l'aide d'un minimum de concepts et de principes de base. La réussite de Newton est d'avoir montré dans son fameux traité les « Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica » (1687), comment on peut établir en physique théorique, à l'aide de concepts d'espace, de temps, de masse et de force un système cohérent qui rende compte pratiquement de tous les phénomènes physiques connus à l'époque.

1. De l'expérience de l'effort à la notion de force

La notion de force est apparue très tôt dans l'histoire de l'humanité à la suite de la prise de conscience de l'effort que nous faisons lorsque nous bougeons nos membres et de la résistance qu'il faut surmonter lorsque nous soulevons un objet lourd.

La notion de force fut ensuite projetée sur les objets inanimés et considérés comme la cause de leur mouvement. Le premier à utiliser le terme de force dans un sens scientifique fut Aristote qui considérait les forces comme causes de mouvement, mais les limitait aux modes d'action par contiguïté. Par exemple lorsqu'on pousse ou tire un objet. En conséquence, la cause du mouvement des objets célestes était attribuée à des agents immatériels, des « âmes » ou des « intelligences ». Kepler les appelait les forces gravitationnelles des âmes dans ses premiers ouvrages sur les planètes. Puis lorsqu'il se rendit compte que l'« âme » appliquée à une planète décroît lorsque la distance entre cette planète et le Soleil croît, il conclut qu'il s'agissait d'une quantité physique, qu'il appela désormais force et la considéra comme une force d'attraction magnétique produite par le Soleil. La dynamique du mouvement planétaire est le premier exemple d'une reconnaissance méthodologique systématique, à laquelle on s'est toujours tenu depuis. C'est la seule méthode scientifique pour identifier les forces et leurs propriétés : elle est fondée sur des interférences faites à partir des aspects phénoménaux des régularités dans la variation du mouvement. Ceci a permis d'introduire des forces dans toutes les branches de la physique : théorie de la gravitation, de l'élasticité, électromagnétisme, physique nucléaire...

C'est grâce à Newton que les actions de pousser ou de tirer peuvent être expliquées à l'aide d'un système unique de concepts en terme d'action de forces :

- ✓ Tout corps se maintient dans son état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite tant qu'aucune force n'agit sur lui (C'est la première loi du mouvement de Newton) : $\vec{a} = \vec{0}$ si $\vec{F} = \vec{0}$
- ✓ Il postula également que la force d'un corps est déterminée par le produit de la masse du corps en question par son accélération (telle est l'essence de la deuxième loi du mouvement de Newton) :
$$\vec{F} = m\vec{a}$$
- ✓ Enfin, il se rendit compte que pour que sa dynamique soit cohérente il lui fallait postuler aussi, que si un corps exerce une force sur un autre corps, celui-ci exerce sur le premier une force de grandeur égale mais de direction opposée (troisième loi du mouvement de Newton, sur l'action et la réaction) : $\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = -\vec{F}_{2 \rightarrow 1}$

2. Les forces : réalité ou fictions méthodologiques

La deuxième loi de Newton que l'on résume souvent par « la force est égale à la masse multipliée par l'accélération » est-elle une loi empirique, une vérité a priori (postulat), une définition de la masse ou de la force ?

Les trois lois ont été considérées comme les fondements de la mécanique classique, et par conséquent aussi comme le fondement de la physique classique. Il est donc significatif que le concept de force est le seul parmi les notions mentionnées à apparaître dans les trois lois, ce qui indique le rôle important que la notion était destinée à jouer dans la physique classique et dans la physique moderne.

Newton concevait la force « comme un entité physique « ontologiquement » absolue et réelle, qui se manifestait comme un fait irréductible de l'expérience ». D'après cette citation, la force est un facteur intermédiaire qui nous permet d'inférer des phénomènes à partir d'autres phénomènes : on pourrait en quelque sorte la comparer à ce qu'on appelle la moyen terme M dans certains syllogismes de la logique traditionnelle :

Ainsi (1) « tous les M sont P »

(2) « S est un M »

D'où la conclusion (3) « S est P »

Nombres de physiciens et philosophes ont dénié tout sens ontologique aux forces et ne les ont acceptées que comme des supports méthodologiques. Certains sont même allés plus loin et ont prétendus que la notion de force peut être éliminée complètement de la science physique. Malebranche déclara un jour la notion de force n'est qu'un nom qui n'a d'autre usage que « de mettre à couvert l'ignorance des faux savants ».

Ontologie : En philosophie, l'ontologie est l'étude de l'être en tant qu'être, c'est-à-dire l'étude des propriétés générales de ce qui existe.

3. Les critiques de la conception newtonienne

Les premières oppositions à la conception de force résultèrent de deux facteurs :

- ✓ La première était l'influence considérable de la philosophie de Descartes, avec son intention déclarée de géométriser la physique, de constituer une physique qui devait employer exclusivement des notions mathématiques et où par conséquent la notion de force n'avait aucune place.
- ✓ La seconde était que l'agnosticisme avoué de Newton quant à la nature réelle des forces, et en particulier de la force de gravitation universelle pour laquelle il avait trouvé une formule mathématique et pas d'explication physique.

L'un des adversaires les plus éloquents de Newton sur ce point fut son contemporain Nicolas Malebranche. Selon lui, dans tous les cas où il semble qu'il y ait interaction entre l'esprit et le corps, un événement dans l'un est saisi par Dieu comme l'occasion de produire un événement dans l'autre, si bien que dans de telles interactions la cause apparente ne produit pas elle-même l'effet apparent. Etendant cette dépréciation des causes effectives à la physique proprement dite, Malebranche rejeta catégoriquement l'idée de la force comme cause de mouvement.

Pierre Louis Moreau, pourtant admirateur de Newton émit de sérieuses réserves : « Il y a dans la philosophie moderne aucun mot répété plus souvent que celui-ci (force), aucun qui soit si peu exactement défini ».

Jean le Rond d'Alembert condamnait toutes les forces qu'il s'agisse de pression, de percussion, d'attraction..., car selon lui elles défiaient toute définition précise. Les causes de mouvement et les forces

inhérentes à des corps sont selon lui inacceptables pour la science, car ce sont des êtres obscurs et métaphysiques, qui ne sont capables que de répandre des ténèbres sur une science claire par elle-même. D'ailleurs d'Alembert reconnaissait que strictement parlant, il n'aurait pas dû appeler son ouvrage « traité de dynamique ». « Ce nom, qui signifie proprement la science des puissances ou causes motrices, pourrait d'abord ne pas convenir à ce livre, dans lequel j'envisage plutôt la mécanique comme la science des effets que comme celle des causes ». D'Alembert considère la notion de force comme une insertion inutile, dangereuse, peu scientifique et même illégitime. C'était uniquement en terme d'effets (accélération, ralentissement) que d'Alembert définissait ce qu'il appelait « la force accélératrice » par l'équation : $\frac{du}{dt}$,

où du et dt représentent des accroissement infinitésimaux du temps et de la vitesse. A la suite de Newton, il définissait ensuite « la force motrice » comme le produit de la « force accélératrice » par la masse sans toutefois fournir de définition originale de la masse, concept qu'apparemment il tenait pour connu a priori. La force avait ainsi dans la mécanique de d'Alembert un statut d'une notion de dérivée.

Lazare Carnot distinguait deux façons d'aborder l'étude de la mécanique : la considérer comme la théorie des forces en tant que causes du mouvement ou comme la théorie du mouvement lui-même. La première approche est plus simple et donc généralement adoptée à des fins pédagogiques, « mais elle a le désavantage d'être fondée sur une notion métaphysique et obscure qui est celle de force. Car quelle idée nette peut présenter à l'esprit en pareille matière le nom de cause ! Et que peut-on entendre dans le langage précis des mathématiques par une force ? ». Carnot comme d'Alembert acceptait la notion de masse sans se rendre compte que ce concept présente une difficulté semblable à celle de force.

4. L'élimination des notions métaphysiques

Pour construire en mécanique un système logiquement cohérent, libre de tout ingrédient métaphysique, il faut éliminer non seulement la force mais aussi la masse, ou plutôt la « quantité de matière » comme on l'appelait généralement. Barré de Saint-Venant fut le premier à le reconnaître. Il mit l'accent en 1865 sur le fait que dans tous les problèmes de mécanique terrestre ou céleste, les forces n'apparaissent ni dans les données initiales, ni dans les résultats finals des problèmes. Ce sont simplement des concepts auxiliaires destinés à faciliter le calcul. Les forces feraient place aux lois, non seulement géométriques, mais aussi physiques. Mais il comprit que pour parvenir à ce but, une définition stricte de la masse devait précéder celle de force. Dans sa définition de masse, Barré de Saint Venant anticipait sur l'idée essentielle de la fameuse définition de la masse (inerte de Mach), c'est-à-dire l'idée de définir le rapport entre les masses de deux corps à l'aide du rapport inverse des accélérations produites par leur interaction.

La mécanique traditionnelle reconnaissait deux catégories de forces :

- les forces ordinaires, comme la gravitation qui trouvent leur origine dans des entités physiques, la plupart du temps d'autres corps et qui sont généralement indépendantes du mouvement du corps sur lequel elles agissent.

- les contraintes, c'est-à-dire des forces qui ont pour origine les conditions géométriques auxquelles un corps en mouvement est soumis (par exemple, la condition selon laquelle le poids d'un pendule est contraint de se mouvoir selon un cercle).

Hertz proposa de réduire les forces ordinaires à des contraintes. Pour cela il postula des masses cachées douées de mouvement non observable. Hertz n'a pas réussi à atteindre l'élimination géométrique des forces gravitationnelles que l'on trouve chez Einstein parce que, encore influencé par les philosophies de Kant et de Newton, il n'a pas conçu la possibilité d'abandonner l'espace d'Euclide et le temps de Newton et d'opter à leur place un continuum espace-temps riemannien.

5. Einstein : la gravitation comme propriété de l'espace - temps

En 1915, Einstein a démontré qu'un mouvement non uniforme, qui suit en général des lignes non droites dans un espace euclidien, mouvement dont la physique newtonienne attribuait la cause à des forces de gravitation, devient un mouvement selon une géodésique, c'est-à-dire un mouvement indépendant de toute force. La gravitation dans le cadre de la théorie générale n'a plus les caractéristiques d'une force, mais devient une propriété de l'espace et du temps.

6. Problème posé par la multiplicité des types de forces

Peut-on ainsi éliminer toutes les forces connues à l'aide d'une théorie plus générale ?

Il existe quatre types d'interaction :

- Interaction forte associée aux mésons d'intensité relative 1
- Interaction électromagnétique associée aux photons d'intensité relative 10^{-2}
- Interaction faible associée aux bosons d'intensité relative 10^{-13}
- Interaction gravitationnelle associée aux gravitons d'intensité relative 10^{-40}

La gravitation n'est qu'une des nombreuses forces connues dans la nature. Il est vrai qu'elle a joué un rôle dominant en cosmologie à cause de sa grande portée, mais à l'échelle atomique ou nucléaire, elle est plutôt insignifiante comparée aux forces électromagnétique et à d'autres interactions.

Il y a deux autres catégories de forces : les interactions fortes et faibles.

Soumettre les forces électromagnétiques à un traitement similaire à celui qu'Einstein a fait subir à la gravitation est très difficile. Car la seule gravitation a déjà demandé la restriction des libertés structurales de l'espace-temps riemannien à un tel point qu'il ne reste aucune possibilité d'imposer des conditions analogues à la géométrie de cet espace-temps pour incorporer les forces électromagnétiques. Il ne semblait y avoir que deux possibilités :

- ✓ ou bien généraliser la structure riemannienne du continuum espace-temps à quatre dimensions (pour obtenir par exemple deux courbures et également une torsion)
- ✓ ou bien conserver le caractère riemannien de cet espace-temps, mais augmenter le nombre de ses dimensions.

7. L'action à distance

Jusqu'ici la physique n'a pas pu se débarrasser de la notion de force.

En essayant d'expliquer comment les forces agissent, peut-être pourrons nous justifier leur existence.

Les forces comme la gravitation agissent-elles par contact en tirant ou en poussant ou agissent-elles à distance sans l'intervention d'un milieu intermédiaire ?

Newton hésitait à ce sujet. Dans les Principia, il se limite aux aspects phénoménologico-mathématiques de la gravitation sans discuter de sa nature. En 1693, il écrivait : « Que la gravitation puisse être essentielle et inhérente à la matière, qu'un corps puisse agir sur un autre à toute distance à travers l'espace vide, sans nul intermédiaire, de sorte que l'attraction ne soit pas conduite de proche en proche d'un corps à l'autre, c'est à mon sens d'une telle absurdité qu'elle n'a pu venir à l'esprit d'aucun homme tant soit peu versé dans les choses philosophiques. »

Pourtant cette « absurdité » fut en fin de compte acceptée. Les forces agissant à distance eurent même la suprématie sur la matière tangible. Notamment pour Roger Boscovich en 1758 qui avança que la matière consiste en des centres non étendus de force (points) qui, agissant dans l'espace vide exercent une action répulsive à très courte distance, une action alternativement attractive et répulsive à mesure que la distance croît et finissent par obéir à la loi de l'inverse du carré de Newton à des distances macroscopiques.

L'idée même qu'un corps peut agir là où il n'est pas avait perdu son caractère irrationnel.

8. L'électromagnétisme et la notion de champ

Ces considérations furent d'une importance décisive pour l'interprétation de la nature des forces électromagnétique, car elles conduisirent à la notion importante de champ électromagnétique et de là à la notion de champ en général.

En 1831, Michael Faraday découvrit que la puissance de l'induction électrique dépend de façon significative du diélectrique situé entre les conducteurs, que le diélectrique s'il est coupé porte des charges opposées à ses bords et que les lignes d'induction sont incurvées, il en conclut que l'induction électrique est produite par « l'action de particules continues agissant tour à tour l'une sur l'autre et non par une action à distance. » C'est aux forces qu'il attribue les propriétés physiques comme la dureté et la conduction. Le mécanisme de propagation de ce qui était auparavant considéré comme une action à distance était maintenant associé aux forces elles-mêmes, dont il considérait qu'elles remplissaient l'espace.

La théorie de l'induction et de phénomènes semblables en terme de lignes de force marque le début de la théorie moderne des champs.

Maxwell en donna une formulation mathématique :

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \operatorname{rot} \vec{B} &= \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\ \operatorname{div} \vec{B} &= 0 \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \end{aligned}$$

Le développement des théories de la gravitation et de l'électromagnétisme n'a pas entraîné une décision définitive quant au mode d'action des forces. En fait, la tendance générale semble favoriser l'idée que les formalismes en terme d'action à distance et les théories des champs sont des formulations physiquement équivalentes d'interactions dynamiques.

9. La mécanique quantique et le problème de l'interpénétrabilité

Les conceptions post-newtoniennes sur la nature de la force sont étroitement liées à une certaine façon de considérer la relation entre force et matière. De ce point de vue, l'affirmation de Kant selon laquelle la matière doit être définie de telle sorte que les forces attractives et répulsives ne soient pas considérées comme des notions surajoutées à celle de matière, mais des conditions nécessaires de la possibilité même de la matière, ont exercé une grande influence.

Kant : « Ce n'est que lorsque j'attribue à ce qui occupe un espace le pouvoir de repousser tout objet extérieur mobile qui s'en approche que je comprends qu'il est contradictoire qu'un objet puisse pénétrer dans l'espace qu'occupe un autre objet ». En d'autres termes, l'impossibilité logique de l'occupation simultanée d'un même espace par deux substances nous contraint à attribuer à la matière des forces de répulsion. Mais de l'existence de la répulsion, Kant déduit celle de l'attraction, car s'il en était autrement la matière se dissiperait elle-même à l'infini et on ne rencontrerait aucune matière définie dans un espace défini.

La gravitation newtonienne, tout comme la géométrie euclidienne, furent attribuées par Kant au cosmos sensible non comme objets de connaissance mais comme conditions préalables de l'intelligibilité de l'expérience.

Maxwell dans son traité sur la théorie dynamique des gaz (1867) critiqua le point de vue de Kant. Il remarqua que « les doctrines qui affirment que toute matière est étendue et que deux portions de matière ne peuvent se trouver ensemble en un même lieu étant déduites de nos expériences avec des corps

sensibles ne s'appliquent pas à la théorie des molécules ». Le rejet par Maxwell de l'impénétrabilité de la matière en microphysique prend toute sa signification si l'on réfère à la mécanique quantique moderne. Celle-ci, qui représente des paquets d'ondes qui selon le principe de superposition, peuvent fort bien s'interpénétrer, refuse l'impénétrabilité des particules telles que les électrons (Principe de Pauli).

En fait l'ordre logique est maintenant complètement inversé : ce n'est plus la répulsion ou l'attraction qui est cause de l'évitement ou de l'approche mutuels, c'est le principe de Pauli qui implique ces phénomènes. L'idée de contrainte causale ou dynamique qui caractérisait la conception classique est maintenant complètement éliminée.

10. Conclusion

Il existe quatre types d'interaction :

- Interaction forte associée aux mésons d'intensité relative 1
- Interaction électromagnétique associée aux photons d'intensité relative 10^{-2}
- Interaction faible associée aux bosons d'intensité relative 10^{-13}
- Interaction gravitationnelle associée aux gravitons d'intensité relative 10^{-40}

L'existence d'une telle variété de forces pose un problème énorme à la recherche future. Toutes ces forces sont-elles intrinsèquement liées l'une à l'autre et, s'il en est ainsi, ne sont-elles que les diverses manifestations d'une force unique dans la nature ?

Dans son état présent, la physique et tout particulièrement la théorie des particules élémentaires ne semblent pas encore suffisamment avancées pour qu'on puisse répondre à cette question de façon un tant soit peu raisonnable.

TABLE DES MATIERES

LE CONCEPT DE FORCE.....	1
1. DE L'EXPERIENCE DE L'EFFORT A LA NOTION DE FORCE	1
2. LES FORCES : REALITE OU FICTIONS METHODOLOGIQUES	2
3. LES CRITIQUES DE LA CONCEPTION NEWTONIENNE	2
4. L'ELIMINATION DES NOTIONS METAPHYSIQUES	3
5. EINSTEIN : LA GRAVITATION COMME PROPRIETE DE L'ESPACE - TEMPS	4
6. PROBLEME POSE PAR LA MULTIPLICITE DES TYPES DE FORCES.....	4
7. L'ACTION A DISTANCE	4
8. L'ELECTROMAGNETISME ET LA NOTION DE CHAMP	4
9. LA MECANIQUE QUANTIQUE ET LE PROBLEME DE L'INTERPENETRABILITE.....	5
10. CONCLUSION	6