



Forces et énergie

ÉTATS DU CORPS

Tous les corps, tous les objets de l'Univers interagissent. Une force, au sens large, est le nom donné à toutes les causes externes qui peuvent amener un corps à changer d'état, d'organisation, ou provoquer une modification de son mouvement ou de sa nature. Ces changements très divers correspondent à de nouvelles configurations de la distribution d'énergie. L'énergie est en fait ce que modifie une force qui s'exerce sur un corps : elle est globalement constante, mais se trouve constamment échangée, passant d'un corps à l'autre et d'un état à un autre. Ainsi, dans la nature, tout changement correspond à un transfert d'énergie, à un passage de l'énergie d'une forme à une autre. Ce sont les forces qui provoquent ces transformations.

LES FORCES

L'interaction des corps les uns avec les autres est représentée en sciences physiques par des forces. La recherche fondamentale distingue quatre types de forces fondamentales, mais vise à obtenir une théorie « unifiée », c'est-à-dire qui rende compte de ces forces comme de diverses manifestations d'une même force fondamentale. Ainsi, d'ores et déjà, la force électromagnétique et la force d'interaction nucléaire faible ont été unifiées dans le cadre d'une théorie globale. Au niveau macroscopique, c'est-à-dire au niveau des phénomènes observables dans le quotidien, ces forces se manifestent de manières très diverses : pesanteur, magnétisme, poussée, traction, frottement...

FORCES FONDAMENTALES

La gravité

La gravité est une force d'attraction que tous les corps exercent et subissent du seul fait de leur masse. Deux corps de masse m_1 et m_2 , situés à une distance r , subissent chacun une force F tendant à les rapprocher l'un de l'autre, d'intensité :

$$F = G \cdot m_1 \cdot m_2 / r^2$$

G est une constante, dite constante de gravitation universelle. Elle vaut $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$. La force gravitationnelle est négligeable devant les autres forces aux échelles microscopiques, mais elle est prépondérante à l'échelle humaine (macroscopique). Elle explique le poids des corps sur Terre (pesanteur) et le mouvement des astres. La théorie de la relativité

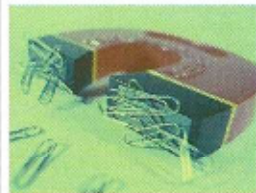
générale en fait une conséquence de la géométrie de l'espace-temps, déformé par la masse des corps.

La force électromagnétique

La force électromagnétique est une force répulsive ou attractive qu'exercent et subissent les corps chargés électriquement. L'intensité de la force F qui s'exerce entre deux corps de charge électrique q_1 et q_2 situés à une distance r est :

$$F = (1/4\pi\epsilon_0) \cdot |q_1 \cdot q_2| / r^2$$

Dans cette expression, ϵ_0 est une constante nommée permittivité du vide, égale à $8,84 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$. Les charges électriques sont des grandeurs algébriques, c'est-à-dire qu'elles peuvent être positives ou négatives (par convention, la charge de l'électron est dite négative et celle du proton positive). Si les deux charges sont de même signe, la force est répulsive, c'est-à-dire qu'elle tend à éloigner les deux corps ; si elles sont de signes différents, la force est attractive et les deux corps tendent à se rapprocher. À notre échelle, la force électromagnétique est moins apparente que la gravité et elle semble se restreindre à un certain



nombre de phénomènes : aimants, circuits électriques, ondes radio... En fait, elle est à la base des liaisons chimiques, des forces de frottement et de la plupart des forces observables.

Les forces d'interaction nucléaire

Ces forces ne sont sensibles qu'à des distances de l'ordre de la taille du noyau d'un atome : la portée de l'interaction forte est de 10^{-8} m , celle de l'interaction faible de 10^{-16} m . Les forces d'interaction nucléaire sont responsables de la cohésion des noyaux et se manifestent dans la désintégration de certains de ses composants. Elles sont indécelables à l'échelle macroscopique. Les recherches ont permis de réunir la force d'interaction nucléaire faible et la force électromagnétique comme deux manifestations d'une même force, dite électrofaible.

TYPES DE FORCES

À notre échelle, seules les forces électromagnétique et de gravité sont sensibles, mais elles prennent des formes très différentes : on distingue les forces à distance, agissant par la seule présence d'un corps, tels le

poids et la force électromagnétique entre corps chargés, et les forces de contact (poussée, réaction, frottements...) qui sont en fait des interactions électromagnétiques de courte durée entre les atomes constituant les corps en contact.

Les forces à distance

La gravité (attraction terrestre) et la force électromagnétique sont des forces qui agissent à distance. Le magnétisme s'exerce en modifiant la répartition interne des charges électriques des corps : il se crée un pôle positif et un pôle négatif, ce qui a pour effet d'orienter les corps dans une certaine direction.

Pour les situations se déroulant à notre échelle et dans nos conditions habituelles, l'attraction terrestre est la force de gravitation dominante et les variations de distance par rapport à la Terre sont négligeables : on considère que le poids d'un corps ne dépend que de sa masse, et qu'il est toujours dirigé vers le bas. On a :

$$F = m \cdot g$$

ou g est la « constante » caractéristique de l'attraction terrestre ; $g = 9,8 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Les forces de contact

Ce sont les forces « mécaniques » au sens usuel : force de poussée ou de traction lorsqu'un corps en mouvement entraîne un autre, réaction d'un support immobile à la force de poussée d'un corps (sous l'effet, par exemple, de son poids), force de frottement entre deux corps se mouvant l'un par rapport à l'autre (corps solides en contact, corps solide se mouvant dans un fluide...).

EURÉKA !

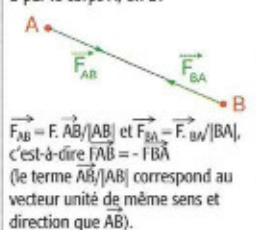
Le célèbre savant et ingénieur Archimède (287-212 av. J.-C.) jaillit un jour de sa baignoire et se mit à courir nu dans les rues en criant : « Euréka ! » (« J'ai trouvé ! » en grec). Il venait de découvrir le principe qui porte son nom, et qui allait lui permettre de résoudre le problème soumis par le roi Hiéron. Celui-ci soupçonnait que sa couronne en or était en réalité faite d'alliage, mais ne savait comment le prouver. La découverte d'Archimède lui en donnait le moyen. Ce principe permet de mesurer la densité (masse par unité de volume) d'un corps par rapport à l'eau sans en mesurer le volume. La couronne coulait moins vite qu'une masse d'or de même poids : elle était moins dense, et comprenait donc un autre métal dans sa composition.

La poussée d'Archimède

La poussée d'Archimède est une conséquence de la gravité : « tout corps plongé dans un fluide subit une poussée verticale dirigée de bas en haut égale au poids du fluide déplacé ». Elle est la cause de la tendance des fluides à s'élever du plus dense, en bas, au moins dense, en haut. C'est elle qui nous fait nous sentir moins lourds lorsque nous nageons.

« GÉOMÉTRIE » DES FORCES

En physique, une force est ce qu'on appelle un « vecteur » : c'est-à-dire qu'elle n'est pas seulement définie par son intensité, mais également par sa direction et son sens. Ainsi la force gravitationnelle entre deux corps supposés ponctuels a pour direction celle de la droite joignant les deux corps, et pour sens celui correspondant à l'attraction. Si \vec{F}_{AB} est la force exercée sur A par le corps B, et \vec{F}_{BA} la force exercée sur B par le corps A, on a :



Le principe de l'action-réaction

L'égalité $\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$ est une loi générale de l'action d'un corps sur un autre : si un corps A exerce une action sur un corps B, ce dernier exerce sur A une action de même nature et intensité, mais en sens inverse.

La notion de point d'application

Pour un corps non ponctuel, les calculs à effectuer sur les différentes forces auxquelles il est soumis imposent de définir pour chacune d'elles un point d'application. Si aucune partie du corps n'est supposée immobile, ce point sera son centre de gravité.

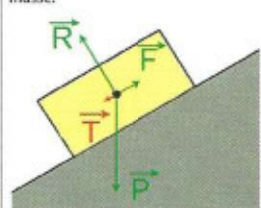
En divisant le corps en de nombreuses parties, chacune soumise à son poids, on peut déterminer selon le poids de chacune le point tel qu'une force égale à la somme des poids partiels, appliquée en ce point, ait les mêmes effets sur le corps que la somme des effets de chacune des forces partielles : c'est le centre de gravité.

La force résultante

Lorsque plusieurs forces s'appliquent au même point, on définit la « résultante » de ces forces comme leur somme vectorielle. Le corps se comporte alors comme s'il n'était soumis qu'à cette force

résultante. Si cette résultante est nulle, on dit que les forces s'équilibrent et que le corps est pseudo-isolé : son mouvement est alors rectiligne uniforme (c'est-à-dire qu'il ne subit aucune accélération) et il n'échange aucune énergie avec l'extérieur. Sinon, il subit une accélération \vec{a} obéissant à la loi fondamentale de la dynamique : $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$

c'est-à-dire que son accélération est inversement proportionnelle à sa masse.



Dans le cas d'un corps de masse m posé sur un support en pente, les forces sont au nombre de trois, s'appliquant à son centre de gravité :

- le poids \vec{P} du corps, dirigé vers le bas ;
 - la réaction \vec{R} du support, perpendiculaire à celui-ci, correspondant à sa rigidité (le corps ne s'enfoncé pas dans le support) ;
 - les forces de frottement \vec{f} , dépendant de la vitesse relative de déplacement du corps et du support et, surtout, de la nature des surfaces en contact (la glace provoque moins de frottements qu'une surface irrégulière comme le bois).
- Il est à noter que la réaction du support, ainsi que les forces de frottement s'exercent en réalité à la surface de contact. Cependant, le corps étant solide, c'est-à-dire supposé indéformable, tout se passe comme si elles s'exerçaient sur son centre de gravité. La résultante T de ces trois forces détermine le mouvement du corps : si son intensité T est égale à zéro, le corps persévère dans son état (mouvement uniforme ou repos) ; sinon il subit une accélération égale à T/m .

CHAMP DE FORCE ET POTENTIEL

Les forces à distance sont créées par la seule présence d'un corps, pesant ou chargé. Dans de nombreux cas, ce corps est immobile par hypothèse (par exemple, l'attraction exercée sur la Terre par une pomme est bien trop faible pour mettre en mouvement la masse terrestre : la Terre est considérée comme immobile, et elle n'intervient dans le problème que par la force d'attraction qu'elle exerce).

Le champ de force

Tout autre corps subit ainsi de la part du corps immobile une force qui ne dépend que de sa position dans l'espace ; c'est-à-dire que l'on

L'énergie au quotidien

Énergie électromagnétique,



comme celle des aimants

Énergie chimique,



comme celle du feu

Énergie cinétique,



due à la vitesse

Énergie potentielle de gravitation,



utilisée par les barrages

L'énergie finit toujours par se dissiper sous forme de chaleur,



qui n'est que l'énergie cinétique désordonnée des molécules.

peut associer à chaque point de l'espace un vecteur « champ » qui, multiplié par le facteur correspondant au type de force (masse pour la gravité, charge électrique pour la force électromagnétique), donne la force que subit, subirait ou subira un corps placé à cet endroit.

En chaque point de l'espace, le vecteur champ « se dirige » vers un autre point de l'espace : un corps plongé dans le champ sans vitesse initiale et qui n'est pas soumis à d'autres forces se dirigera donc, d'un point donné, selon une ligne qui ne dépend que de ce point.

Chacune des lignes ainsi définies est une ligne du champ de force.

Ces lignes sont rayonnantes autour d'un centre dans le cas d'un champ créé par une masse ou une charge ponctuelle, et parallèles dans le cas d'un champ créé par une surface plane (la Terre considérée comme plate à l'échelle du laboratoire, ou les plaques chargées présentes dans un tube cathodique).

Dans ce dernier cas, le champ est dit « uniforme » s'il présente la même valeur en tout point.

Le champ \vec{g} de gravitation est uniforme lorsque l'on se place dans les conditions habituelles (Terre considérée comme plate, différences dues à l'altitude négligeables).

• De même le champ électrique \vec{E} entre deux plaques

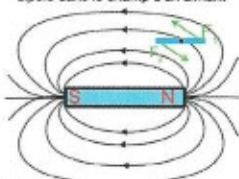
chargées l'une négativement, l'autre positivement, est uniforme. Les lignes de champ sont alors des droites parallèles entre elles, dans la direction du champ (c'est-à-dire perpendiculaires aux plaques).

Cas du champ magnétique

Le champ magnétique est un champ de force d'un caractère bien spécifique : il induit dans certaines matières (essentiellement métalliques) une polarisation, c'est-à-dire que les charges électriques réparties à l'intérieur du corps s'ordonnent de manière à former deux pôles magnétiques, dénommés nord et sud en référence au champ magnétique terrestre.

Le corps se trouve alors soumis à ce qu'on appelle un « couple » de forces, dont les points d'application se trouvent de part et d'autre de son centre de gravité. Les forces s'exercent aux pôles sont égales en intensité mais de sens opposés, de sorte que le corps ne se déplace pas ; mais comme elles ne s'appliquent pas au même endroit, il pivote afin de placer son pôle nord « au plus près » du pôle sud de l'aimant, et son pôle sud « au plus près » du nord négatif de l'aimant. Ainsi, lorsqu'on place de la limaille de fer sur une feuille de papier autour d'un aimant, les particules s'orientent et

disposent dans le champ d'un aimant



s'arriment les unes aux autres, formant des lignes joignant les deux pôles de l'aimant : elles matérialisent les **lignes de champ**.

L'ÉNERGIE

Si la masse est la mesure de l'inertie d'un corps relativement au mouvement, l'énergie est en quelque sorte la mesure de ses changements d'état : un corps ou un système de corps qui n'échange pas d'énergie avec l'extérieur ne subit aucune modification de son état ni de son mouvement, qui est alors rectiligne et uniforme. Toute modification de l'état d'un corps se traduit par un échange d'énergie.

TRAVAIL

Le travail permet la correspondance entre l'action d'une force et l'énergie échangée. Il est l'énergie échangée pendant que le point d'application d'une force se déplace. Ainsi une force F constante tirant un corps sur une longueur l effectue un travail :

$$W = F \cdot l$$

Ce travail est dit « moteur ».

Si le corps se déplace en sens inverse de la force, le travail est $W = -F \cdot l$; il est alors dit « résistant ».

D'une manière générale, si la direction du déplacement fait avec la direction de la force un angle α , on a :

$$W = F \cdot l \cdot \cos \alpha$$

Ainsi, une force s'exerçant perpendiculairement au déplacement n'effectue aucun travail : elle ne contribue pas au mouvement du corps.

THÉORÈME DE L'ÉNERGIE CINÉTIQUE

Un corps de masse m et de vitesse v est porteur d'une énergie liée uniquement à sa vitesse, dite « énergie cinétique ». Elle représente l'énergie qu'il cède s'il est arrêté brusquement (c'est l'énergie que doit absorber un obstacle, par exemple). Sa formule est :

$$E_c = 1/2 (m \cdot v^2)$$

La vitesse est dans cette expression à la puissance deux : c'est ce qui explique que les dégâts causés, par exemple, par un accident de la route augmentent beaucoup alors que la vitesse n'augmente que peu.

ÉNERGIE POTENTIELLE

L'énergie potentielle représente de l'énergie « emmagasinée » par un corps, qui peut se libérer dans certaines conditions. C'est par exemple le cas d'un ressort que l'on maintient comprimé. Lorsqu'on laisse le ressort se détendre, il exerce une force susceptible de transmettre un certain travail à un autre corps : ce travail correspond à l'énergie potentielle.

Un corps plongé dans un champ de force et livré à la seule action de ce champ entre deux points A et B aura acquis, arrivé au point B, une certaine vitesse v , donc une certaine énergie cinétique E_c correspondant au travail de la force entre A et B. Cette énergie ne dépend que de la position de A et B et de la masse m du corps. Cette énergie « acquise » par le corps correspond à une différence d'énergie potentielle, c'est-à-dire qu'on attribue à chaque point de l'espace un potentiel V , défini à une constante additive près.

Le travail de la force lorsqu'une masse m se déplace de A à B est :

$$m \cdot (V_A - V_B)$$

L'énergie potentielle du corps au point A (E_{p_A}) se définit ainsi :

$$E_{p_A} = m \cdot V_A$$

Forces conservatives : cas du poids

Une force est dite conservative si le travail de cette force pendant qu'un corps se déplace du point A au point B ne dépend que de la position relative de A et B (et pas du chemin parcouru entre les deux). C'est le cas notamment du poids, considéré comme un champ de force uniforme.

Comme le poids ne travaille pas sur la composante horizontale du déplacement, le travail du poids ne dépend que de la différence d'altitude entre les deux points. On a :

$$W_{P(A,B)} = P \cdot (z_A - z_B)$$

L'énergie potentielle de gravitation d'un corps de masse m situé à l'altitude z est donc :

$$E_p = m \cdot g \cdot z$$

Elle représente l'énergie cinétique acquise par le corps en chutant jusqu'à l'altitude zéro. Cette énergie est celle utilisée par exemple dans les barrages hydrauliques : l'eau chutant de la hauteur du barrage transforme son énergie potentielle de gravitation en énergie cinétique, qu'elle communique à la turbine. Un alternateur transforme ensuite cette énergie en électricité.

CONSERVATION ET TRANSFORMATIONS DE L'ÉNERGIE

Un système isolé ou pseudo-isolé n'échange pas d'énergie avec l'extérieur, tous les transferts se font à l'intérieur du système. (Dans le cas d'un corps dans un champ de force, le système considéré est constitué du corps et du champ.) Les modifications de l'état du système correspondent à des transferts d'énergie d'un élément du système à un autre (transfert d'énergie cinétique, par exemple, lors d'une collision) ou à des transformations de l'énergie.

Par exemple, un corps en chute libre de A à B dans un champ de gravitation acquiert une énergie cinétique E_c correspondant à la différence d'énergie potentielle entre A et B :

$$E_c = E_{p_A} - E_{p_B}$$



L'énergie des forces de frottement se transforme, elle, en chaleur.

EXEMPLE DU PENDULE

Un pendule idéal est une masse ponctuelle m suspendue à un fil de longueur l supposé rigide. Dès lors qu'il est animé d'une vitesse initiale, il oscille autour de sa position d'équilibre, le long d'une trajectoire en arc de cercle, centrée sur le point d'attache du fil. La position du pendule est repérée uniquement par l'angle α que fait le fil avec la verticale. Il est soumis à deux forces : son poids P et la tension T du fil. Lorsque $\alpha = 0$, les deux forces s'annulent : le pendule est à l'équilibre, mais son énergie cinétique lui fait quitter cette position. En dehors de cette position, la résultante des forces est tangentielle à la trajectoire, de valeur :

$$F = P \cdot \sin \alpha$$

Puisque la tension du fil est en tout point perpendiculaire à la trajectoire, son travail est nul ; la vitesse acquise en

passant d'une position repérée par l'angle α à la verticale ($\alpha = 0$) est égale au travail du poids sur le dénivelé correspondant, soit en passant de $z = l \cdot (1 - \cos \alpha)$ à $z = 0$.

L'énergie potentielle est maximale aux extrémités de l'arc de cercle, où la vitesse du pendule s'annule (lorsqu'il fait demi-tour). Elle est nulle pour $\alpha = 0$, c'est-à-dire quand le fil est vertical et que la vitesse du pendule est maximale. Un pendule en oscillation réalise ainsi la transformation répétée de son énergie potentielle de gravitation en énergie cinétique, et vice versa.

CHALEUR

La chaleur est l'énergie cinétique des molécules composant les corps, animées d'un mouvement désordonné plus ou moins rapide. Elle se transmet par contact, en diffusant avec une rapidité qui dépend de la nature des corps en question.

La chaleur est une quantité d'énergie, et ne doit pas être confondue avec la température : en effet deux litres d'eau à 10 °C, par exemple, portent deux fois plus d'énergie calorifique qu'un litre à 10 °C, bien qu'ils soient à la même température. L'énergie nécessaire pour augmenter de 1 °C la température de 1 kg d'un certain matériau est une caractéristique de ce matériau, appelée capacité calorifique.

Les différentes transformations de l'énergie ont toutes un terme commun. En effet, les machines idéales (sans frottement) n'existent pas, et on observe toujours une déperdition d'énergie. Ce n'est bien sûr pas une disparition, mais une conversion de l'énergie en une forme dispersée, désordonnée, où elle n'est plus utilisable directement : la chaleur.

Les frottements (entre solides, entre solide et fluide, etc.) sont la principale cause de cette déperdition. Ils consistent en interactions électromagnétiques faibles et de courte durée entre les atomes et molécules des corps en contact. Ces interactions transforment l'énergie cinétique des corps en somme de minuscules énergies électromagnétiques, qui, lorsque cessent les liaisons (nécessairement de faible portée par rapport au niveau macroscopique), se transforment à leur tour en énergie cinétique d'atomes et molécules individuels, c'est-à-dire en chaleur.

ÉNERGIE LUMINEUSE

Comme toute énergie de rayonnement, l'énergie lumineuse est une forme particulière d'énergie électromagnétique. Elle est transportée par des corpuscules appelés photons, qui sont le support des ondes lumineuses, des ondes radio et des rayonnements nucléaires (rayons X...). Cette énergie se transforme usuellement en chaleur ou en énergie chimique.

Outre le cas des désintégrations nucléaires et de certaines réactions chimiques, l'énergie lumineuse est produite par

l'échauffement des corps (comme dans un **fer chauffé au rouge**).

ÉNERGIE CHIMIQUE

Certaines réactions chimiques, certains changements d'état dégagent de la chaleur ou de la lumière lorsqu'ils se



produisent, comme la **combustion du bois** ; ce sont les réactions exothermiques. D'autres au contraire absorbent de la chaleur (évaporation de l'eau) ou de l'énergie lumineuse (comme la photosynthèse) ; ce sont les réactions endothermiques.

Cela provient du fait que les liaisons entre atomes (provenant d'interactions électromagnétiques) nécessitent toujours l'apport d'une certaine quantité d'énergie. Si les liaisons existantes dans les produits de la réaction sont plus énergétiques que les liaisons dans les réactifs, la réaction nécessite un apport d'énergie ; dans le cas contraire, elle en dégage.

On parle pour ce phénomène d'énergie potentielle chimique, dont la nature ultime est électromagnétique. Les réactions exothermiques transforment l'énergie potentielle chimique en chaleur (énergie cinétique désordonnée) et en rayonnement, les réactions endothermiques faisant l'inverse.

L'ÉQUIVALENCE MASSE-ÉNERGIE



quantique et la théorie de la relativité restreinte.

En relativité restreinte, une nouvelle composante s'ajoute pour former l'énergie globale d'un corps, en plus de son énergie cinétique et des diverses énergies potentielles que l'on peut définir : il s'agit de son énergie au repos, notée E_0 , qui ne dépend que de sa masse. C'est la célèbre équation :

$$E_0 = m \cdot c^2$$

où c est la vitesse de la lumière. L'énergie fantastique dégagée par les réactions nucléaires vient du fait qu'un noyau possède une masse légèrement inférieure à ses composants : lors de la fusion, une certaine quantité de matière se transforme en énergie. Le facteur c^2 (vitesse de la lumière au carré) est énorme, ce qui explique que la disparition d'une infime quantité de matière libère une quantité énorme d'énergie.

En fait, l'énergie au repos est la forme d'énergie correspondant aux forces d'interaction nucléaire. On peut, en quelque sorte, considérer la masse d'un corps comme de l'énergie potentielle « solidifiée ».