

## CONNAISSEZ-VOUS L'HISTOIRE DE NEWTON ET DE LA POMME ?

La force de gravitation est l'une des forces fondamentales de la nature. En 1687, Newton publia à Londres un livre intitulé *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* dans lequel, en partant des lois de Kepler, il parvint à la conclusion qu'il devait y avoir une force d'attraction qui incurvait la trajectoire des planètes et par l'action de laquelle elles ne se déplaçaient pas en ligne droite à une vitesse constante.

La légende raconte que, durant un après-midi d'été, Isaac Newton s'assit sous un pommier ; une pomme lui tomba sur la tête et cet événement l'amena à réfléchir à ce qui allait devenir la loi universelle de la gravitation. Newton eut l'intuition que la force qui tient les planètes en orbite autour du Soleil était de même nature que celle qui attire les objets vers la surface terrestre.

### Qu'est-ce que la force de gravitation entre deux masses ?

Cherchons à comprendre cette force en observant le mouvement de la lune ; pourquoi la Lune reste-t-elle sur son orbite sans s'éloigner de la Terre ?

Tous les corps s'attirent réciproquement avec une force directement proportionnelle au produit de leur masse et inversement proportionnelle au carré de leur

distance. La Terre exerce donc une force gravitationnelle sur la Lune (son satellite) et sur tous les corps qui se trouvent sur la surface terrestre. Dans ce cas, la force de gravitation coïncide avec le poids et le résultat est une accélération vers le centre de la terre : l'accélération de la pesanteur, désignée par la lettre "g". Sur Terre, au niveau de la mer,  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ , mais elle varie en fonction de l'altitude : g diminue à mesure qu'on s'éloigne de la Terre, ce qui fait que le poids des corps diminue de la même manière. La valeur de g peut également être mesurée expérimentalement ; on peut noter qu'elle n'est pas constante en différents points de la surface terrestre, ce parce que la Terre n'est pas parfaitement sphérique mais aplatie aux pôles, et donc l'accélération de pesanteur est plus importante aux pôles et moindre à l'Équateur. La valeur de cette accélération dépend de la masse du corps attracteur, ce qui fait que le poids d'un corps sur la Lune (dont la masse est inférieure à celle de la Terre) est moindre par rapport à son poids sur Terre. La masse, en revanche, est une qualité universelle qui demeure inaltérée en tout point de l'espace.

## **Les effets dans la nature : les marées**

Il existe des conséquences évidentes de la force de gravitation dans la nature : le niveau de la mer subit des mouvements cycliques d'abaissement et de rehaussement, dus à la force d'attraction exercée par la Lune sur

la Terre. La marée haute se produit lorsque la Lune passe sur le méridien d'un lieu, et la marée basse lorsqu'elle se trouve à angle droit avec ce méridien. Newton donna une explication du phénomène : lorsque la surface de la mer est plus proche de la lune, elle subit une plus grande force d'attraction, ce qui provoque le rehaussement du niveau de la mer.

## **Le champ gravitationnel**

La force de gravitation est une force à distance, c'est-à-dire qu'elle agit sur deux corps qui ne sont pas en contact entre eux, et Newton lui-même avait des difficultés à accepter cette idée étrange. Pour expliquer ce phénomène, on introduisit le concept de champ : chaque corps doté d'une masse peut être vu comme la source d'un champ gravitationnel, incluant toute la zone d'espace dans laquelle est présente une masse et dans laquelle d'autres masses éventuelles sont influencées.

## **Loi universelle de la gravitation et théorie de la relativité générale**

Pour en revenir à la pomme de Newton, comment la pomme sait-elle qu'il existe une masse énorme, celle de la Terre, et inversement ? Nous avons eu quelques éclaircissements en 1961 avec la publication de la Théorie

de la Relativité Générale d'Einstein ; elle entraîna une véritable révolution dans la manière de concevoir l'espace. Jusqu'alors, l'espace et le temps étaient considérés comme deux entités détachées, mais Einstein les considérait en revanche comme liées dans un concept appelé espace-temps.

L'espace est déformé par la présence de masses : si l'on imagine l'espace comme un drap, si l'on jette dessus une balle, le drap va se plier ; de grandes concentrations de masses plient l'espace et cela vaut également pour notre planète, où la pomme tombe justement sous l'effet de la courbure de l'espace-temps, due à la masse de la Terre. La gravité « apparaît » donc parce que l'espace-temps se plie en présence d'une grande concentration de matière comme peut l'être une planète ou une étoile. Plus la masse est importante, plus le seront la distorsion et donc les effets de la gravité. La gravité est donc le résultat de la forme courbe de l'espace-temps.

## **POURQUOI LES PLANÈTES ONT-ELLES DES ORBITES ELLIPTIQUES ?**

Nous savons tous que les lois de Kepler décrivent le mouvement des planètes, mais elles n'expliquent pas les causes qui ont déterminé ces mouvements.

La question est donc la suivante : pourquoi les pla-

nètes tournent-elles autour du Soleil plutôt que de s'en éloigner en ligne droite ? Nous savons qu'un corps que l'on laisse tomber se précipite vers le sol, alors pourquoi cela ne se produit-il pas avec les planètes ? Je vais chercher d'y répondre brièvement.

On a démontré que le mouvement d'un point sujet à une force centrale était plan et que sa trajectoire était soit en ligne droite soit conique ; pourquoi alors les planètes ont-elles une trajectoire elliptique ?

On peut démontrer cela à partir du théorème de la conservation de l'énergie, en faisant un rapport entre énergie cinétique du corps et énergie gravitationnelle. Un corps quelconque que l'on laisse tomber se précipite vers le sol car son énergie cinétique est nulle ou presque et ne suffit pas à contrebalancer l'énergie gravitationnelle. Imaginez-vous que vous lanciez un corps vers le haut : le corps, quoi qu'il arrive, après s'être élevé quelques temps, finit par retomber vers le sol. Si vous le lancez plus fort, sa trajectoire s'allonge, jusqu'à en arriver au point d'un lancer où il atteindra la vitesse de libération et ne retombera plus. Les planètes, en revanche, possèdent une vitesse, et donc une énergie cinétique, qui contrebalance l'énergie gravitationnelle.

Comment les planètes ont-elles acquis cette vitesse ? Leur vitesse initiale était celle apportée par la rotation du proto-système solaire : le grand disque de matière incohérente en rotation a commencé à se condenser pour donner naissance aux planètes qui adoptèrent la

vitesse de leur région du disque. Nous savons que les forces centrales dévient les corps au mouvement rectiligne ; le Soleil possède son champ de force de gravitation et la Terre tendrait à se déplacer en ligne droite et uniforme si le Soleil ne l'attirait par sa gravité au point d'incurver sa trajectoire pour en faire une boucle fermée.

La forme de l'orbite (elliptique) dépend de la vitesse initiale au point initial. En effet, cela se produit parce s'il y a un corps dans l'espace à une certaine distance du Soleil, il n'existe qu'une vitesse qu'il puisse posséder en ce point à laquelle son orbite serait circulaire ; avec des vitesses inférieures, l'orbite devient elliptique.

Pour prendre l'exemple de notre Terre, à la distance du Soleil à laquelle elle se trouvait aux premiers temps du système solaire, sa vitesse a rendu son orbite elliptique.

## **Pourquoi les planètes et les étoiles ont-elles une forme sphérique ?**

Mais ne vous est-il jamais arrivé de vous demander pourquoi la Terre et toutes les planètes que vous connaissez, ainsi que les étoiles, possèdent une forme sphérique ? En réalité, la Terre n'est pas parfaitement sphérique, elle est légèrement aplatie aux pôles à cause de la force centrifuge. Jupiter est encore plus aplatie car elle tourne beaucoup plus rapidement que la Terre ;

certaines étoiles deviennent des ellipsoïdes, car elles tournent très vite.

La vitesse d'une planète le long de son orbite varie en fonction de sa proximité par rapport au Soleil : ce parce que le Soleil attire la planète par sa force de gravité ; si la planète ne tournait pas, elle entrerait en collision avec lui. En tournant sur son orbite, la planète exerce une force centrifuge égale et opposée à la force gravitationnelle. Plus elle est proche du Soleil, et plus la force d'attraction gravitationnelle est importante, et donc plus la force centrifuge doit l'être également, et la planète tourne donc plus rapidement sur son orbite. Lorsque les planètes orbitent vers les périhélies (le périhélie est le point en correspondance duquel la planète se trouve à la plus petite distance du Soleil) elles suivent la direction initiale du Big Bang, alors que lorsqu'elles orbitent vers les aphélies (le point de l'orbite où la planète se trouve à la plus grande distance du Soleil, l'opposé du périhélie) elles suivent la direction opposée.

## **Force centrifuge et force centripète**

C'est le principe qui explique que les planètes en orbite n'entrent jamais en collision avec celles qui orbitent autour d'autres étoiles, sinon une telle collision, ou une avec une étoile, serait inévitable tôt ou tard. Dans le cas du système solaire, les petites planètes devraient être attirées par la grande masse du Soleil et le percuter.



Mais cela ne se produit pas, car cette force d'attraction (appelée également force centripète, car elle est dirigée vers le Soleil, qui est au centre du système) est parfaitement équilibrée par la force centrifuge développée par le mouvement de révolution des planètes.

Les planètes les plus proches du Soleil, et donc celles attirées par une force gravitationnelle centripète majeure, doivent la contrebalancer en développant une force centrifuge opposée, par le biais d'un mouvement de rotation plus rapide. Les planètes les plus éloignées et attirées par une force moindre peuvent tourner plus lentement (selon les lois de Kepler). Nous savons déjà tant de choses sur notre Univers, et il nous en reste tant à découvrir !

## **POURQUOI VOUS N'AVEZ JAMAIS RIEN COMPRIS À LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE**

Dès le début de l'étude de la relativité, il a été difficile d'introduire l'attraction gravitationnelle dans la relativité restreinte. Einstein se demanda alors s'il n'était pas possible d'étendre le premier principe de la relativité restreinte, selon laquelle les lois de la physique ont la même forme dans tous les systèmes de référence inertiels, et développa la relativité générale qui complète et dépasse la relativité restreinte.



## De la relativité restreinte à la relativité générale

Aucune expérience qu'on puisse effectuer en milieu clos, dans un espace restreint et dans un temps limité (par exemple dans un ascenseur) ne permettra aux personnes qui s'y trouvent de déterminer si elles sont dans un ascenseur en chute libre (en présence de gravité) ou dans une navette sujette à une force totale nulle (c'est-à-dire un moyen de transport qui accélère de manière constante).

Il est important que la durée soit brève car si l'expérience était suffisamment longue, on sentirait l'impact de l'ascenseur avec le sol et on comprendrait qu'on n'est pas dans une navette.

Le même effet peut être obtenu dans une station spatiale tournant autour de son axe : les personnes qui y vivent ressentent une force-poids très importante, due à la force centrifuge apparente et perçoivent comme verticale la direction qui pointe vers l'axe de rotation.

En analysant ces expériences idéales, Einstein formula le principe d'équivalence, un des principes fondamentaux de la théorie de la relativité générale. Selon ce principe, dans une zone limitée de l'espace-temps, il est toujours possible de choisir un système de référence de manière à simuler l'existence d'un champ gravitationnel uniforme donné ou, au contraire, de manière à éliminer l'effet d'une force gravitationnelle constante.

Selon Einstein, tout ce qui se produit dans un système de référence inertiel se produit également dans un système de référence accéléré ; Einstein énonça donc le principe de relativité générale : les lois de la physique ont la même forme dans tous les systèmes de référence (on ne parle plus uniquement des systèmes de référence inertiels comme dans la relativité restreinte). À ce stade, même l'axiome de la vitesse constante de la lumière doit être abandonné : si dans un système de référence inertiel (par exemple dans une navette spatiale qui n'accélère pas) la lumière se propage en ligne droite, dans un système accéléré par rapport au premier (par exemple une navette dont les moteurs tournent) la trajectoire de la lumière se révèle courbe. Cela signifie que la vitesse vectorielle de la lumière change à chaque point, car elle est tangente à la courbe.

## **De nouvelles approches de l'espace-temps**

Einstein introduisit également d'autres idées fondamentales : la présence de masse courbe l'espace-temps et les corps sujets à la gravité sont comme des particules libres qui se déplacent en suivant les géodésiques (les courbes les plus courtes) de l'espace-temps. Durant des millénaires, l'unique espace étudié a été l'espace euclidien selon lequel il existe une unique parallèle reliant un point extérieur à une droite. Durant les premières

décennies du XIX<sup>e</sup> siècle, on découvrit qu'il était possible de construire de nouvelles théories géométriques dans un espace courbe non euclidien.

Selon Einstein, la présence de masses courbe l'espace-temps, mais sa géométrie varie d'une zone à l'autre : les parties les plus proches de la masse se courbent d'avantage. Les masses se déplacent et dictent la courbure de l'espace-temps, mais c'est ce dernier qui dicte les mouvements des masses. Cela nous fait comprendre à quel point l'Univers dans lequel nous vivons est complexe et merveilleux, si bien qu'Einstein disait ceci : « Vous trouvez curieux que je considère la compréhensibilité du monde comme un miracle ou comme un éternel mystère. Eh bien, à priori, on devrait s'attendre à un monde chaotique, qui ne peut en aucune façon être saisi par la pensée. On pourrait et même on devrait s'attendre à ce que le monde soit soumis à la loi dans la mesure seulement où nous intervenons avec notre intelligence ordonnatrice. Ce serait une espèce d'ordre comme l'ordre alphabétique des mots d'une langue. L'espèce d'ordre, par contre, créé par exemple par la théorie de la gravitation de Newton est d'un tout autre caractère. Car si les axiomes de la théorie sont posés par l'homme, le succès d'une telle entreprise suppose un ordre d'un haut degré du monde objectif qu'on n'était, a priori, nullement autorisé à attendre. C'est cela le miracle, qui se fortifie de plus en plus avec le développement de nos connaissances ».