

LA CHUTE DES CORPS

Niveau concerné : Lycée – Terminale S (adaptation possible pour la seconde)

Objectifs : Mettre en oeuvre les concepts de mécanique vus en classe à la lecture critique d'extraits d'un texte historique.

Prérequis : La chute des corps , à utiliser au niveau TS en conclusion, après le cours sur les mouvements de chute verticale avec et sans frottements.

SOURCE : Serge Raynaud, « La chute des corps », *Pour la science, Galilée, Les Génies de la science*, n°1 de la nouvelle série, novembre 1999, pp. 94-96, au sujet de la polémique soulevée par les considérations discutables de Claude Allègre sur la chute des corps. (extrait du CD-ROM *Les génies de la science, Galilée, Pour la science*).

POUR LE PROFESSEUR : Les questions proposées ici ne portent que sur les deux derniers paragraphes de la page 95, quand Galilée parle par la bouche de Salviati. D'autres exploitations de ce texte sont possibles.

TRAVAIL DEMANDÉ AUX ÉLÈVES

Lire attentivement le texte.

1. Quelle est la nature des grandeurs physiques dont il est question dans la phrase : « si fluide, si tenu [...] au mobile ».
2. Questions sur la phrase : « [...] d'où résulte un ralentissement [...] » :
 - 2.1 Quelle grandeur physique subit ce « ralentissement » ?
 - 2.2 Quelle est l'évolution de la vitesse pendant ce « ralentissement » ?
3. Questions sur la phrase : « [...] une grandeur où, s'équilibrant l'une l'autre [...] » :
 - 3.1 Expliquer en quoi l'utilisation de ce terme est incorrect dans le langage de la physique actuelle.
 - 3.2 Quelles sont, en réalité, les 2 grandeurs qui s'équilibrent ?
4. Quelle est la conclusion de la réflexion menée par Salviati ?
5. Dans le paragraphe « Remarquant alors que si l'air [...] deviendraient égales. » : par quel raisonnement Galilée montre-t-il que, si l'influence de l'air peut être négligée, la vitesse de chute de différents solides est alors indépendante de leur masse ?

La chute des corps

Galilée est toujours actuel : la boule de pétanque et la balle de tennis tombent-elles de la même façon?

Une polémique a opposé, en 1999, le Ministre de l'Éducation nationale et des journalistes sur les vitesses de chute comparées d'une balle de tennis et d'une boule de pétanque. Dans le vide, et c'est bien là le message de Galilée, les deux objets tombent à la même vitesse. En présence de frottement, cette affirmation est erronée : dans l'air, la balle de tennis et la boule de pétanque, de taille égale, sont soumises à la même force de frottement, et pourtant elles ne tombent pas à la même vitesse : Galilée avait déjà analysé le problème.

Tout d'abord, l'idée que le principe d'inertie de Galilée soit une simple abstraction est fautive. Le problème de la chute des corps est longuement examiné par Galilée dans son dernier livre les Discours concernant deux sciences nouvelles. L'universalité de la chute libre des corps dans le vide, c'est-à-dire le fait que tous les corps tombent selon le même mouvement dans le champ de gravité si la résistance du milieu a un effet négligeable, y est extrait de la réalité et de la diversité des phénomènes concrets. Galilée décrit en détail la résistance exercée par l'air sur le corps en mouvement. Si la nouvelle physique du mouvement de Galilée a triomphé de la physique d'Aristote, c'est qu'elle correspondait mieux à la réalité.

Les descriptions de Galilée sont essentiellement qualitatives et ne contiennent aucune équation. C'est Newton, quelque 50 ans plus tard, qui a écrit les équations du mouvement d'un corps dans un champ de gravité ; il a aussi envisagé longuement la résistance de l'air, résolvant le problème pour une résistance proportionnelle à la vitesse ou au carré de la vitesse. Cette dernière hypothèse décrit la plupart des expériences de chute des corps dans l'air.

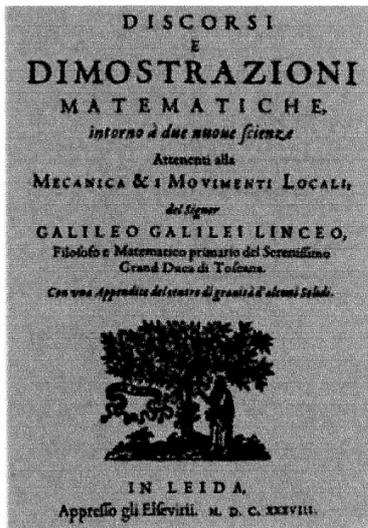
Si Galilée ne pouvait étudier la chute libre dans le vide, sous sa forme pure, Newton le pouvait et affirmait avec raison que, dans le vide, une plume de duvet et une pièce d'or tomberaient avec des vitesses égales. Il insistait même sur le fait que cet argument s'applique à l'espace interstellaire où il n'y a pas de résistance au mouvement des planètes. Les descriptions quantitatives de Galilée sont précises et modernes. Elles sont confirmées, de façon remarquable par la connaissance que nous avons aujourd'hui des lois qui décrivent la résistance de l'air. Il ressortira des citations de Galilée et de leur confrontation avec les lois connues aujourd'hui que Galilée disposait d'une expérience concrète des divers comportements observés sur les mouvements étudiés.

Galilée et la chute des corps

La chute des corps dans le vide est l'objet de la deuxième partie des discussions de la première journée de son Discours. Ces discussions sont introduites par un célèbre échange :

Simplicio : «Aristote s'élève contre certains anciens qui introduisaient le vide à cause du mouvement, disant que celui-ci ne pourrait avoir lieu sans celui-là. S'opposant à cette thèse, Aristote démontre que, tout au contraire, la réalité du mouvement rend le vide impossible [...] des mobiles de poids différents se meuvent dans le même milieu avec des vitesses inégales ayant entre elles même proportion que les poids [...] les vitesses du même mobile dans différents milieux sont inversement proportionnelles à la densité de ces milieux [...] un mobile devrait dans le vide se mouvoir instantanément; or le mouvement instantané est impossible, donc on ne peut introduire le vide à cause du mouvement.

Salviati: [...] Je doute qu'Aristote ait jamais vérifié expérimentalement



La Science

Nov 1999 - (CO RM)

s'il est vrai que deux pierres, dont l'une est dix fois plus pesante que l'autre et qu'on laisse tomber au même instant d'une hauteur de cent coudées, par exemple, aient des vitesses si différentes que la plus grande touche déjà terre alors que l'autre n'a même pas descendu dix coudées.

Simplicio : On voit pourtant d'après ses propres paroles qu'il a fait l'expérience...

Sagredo : Mais moi qui en ai fait l'essai, seigneur Simplicio, je vous assure qu'un boulet d'artillerie pesant cent ou deux cents livres, ou même davantage, ne précédera même pas d'une palme, en touchant terre, une balle de mousquet dont le poids n'excède pas une demi-livre, et cela après une chute commune de cent coudées. »

La loi d'universalité de la chute des corps peut être masquée par des forces exercées par le milieu sur le corps en mouvement; Galilée le sait.

Salviati : «Nous nous proposons de rechercher ce qui arriverait à des mobiles de poids très différents dans un milieu dont la résistance serait nulle... et si nous trouvons qu'effectivement des mobiles de poids spécifiques variables ont des vitesses de moins en moins différentes selon que les milieux sont de plus en plus aisés à pénétrer, qu'en fin de compte dans le milieu le plus ténu bien que non vide, et pour des poids très inégaux, l'écart des vitesses est très petit et presque insensible, alors nous pourrions admettre, me semble-t-il avec une très grande probabilité, que dans le vide les vitesses seraient toutes égales [...]

Salviati : *L'expérience qui consiste à prendre deux mobiles de poids aussi différents que possible et à les lâcher d'une hauteur donnée pour observer si leurs vitesses sont égales, offre quelques difficultés ; car si la hauteur est importante, le milieu que le corps, en tombant, doit ouvrir et repousser latéralement par son mouvement, gênera beaucoup plus le faible moment du mobile le plus léger que la force considérable du plus lourd, et sur une longue distance le corps léger demeurera ainsi en arrière. »*

Ces difficultés ont conduit Galilée à confirmer sa démonstration par des expériences de chute le long d'un plan incliné et surtout par les expériences d'oscillations de deux pendules. La vitesse étant plus faible, la résistance de l'air est alors moins gênante. C'est de cette façon que Galilée a prouvé, par l'expérience, l'universalité de la chute libre et c'est avec la même technique que les expériences les plus précises ont été réalisées pendant les trois siècles suivants. C'est seulement récemment que des expériences précises de chute dans le vide ont pu être faites à l'aide de «tours de chute libre».

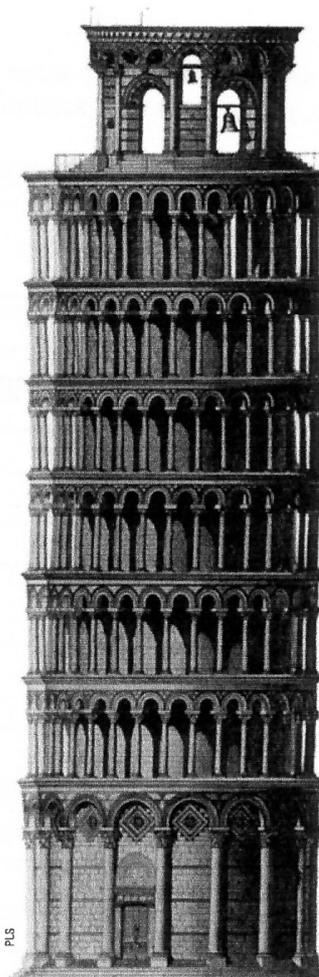
Pour emporter la conviction, Galilée a longuement discuté la résistance de l'air au mouvement :

Salviati : «*Si fluide, si ténu et si tranquille que soit le milieu, il s'oppose en effet au mouvement qui le traverse avec une résistance dont la grandeur dépend directement de la rapidité avec laquelle il doit s'ouvrir pour céder le passage au mobile ; et comme celui-ci par nature va en accélérant continuellement, il rencontre de la part du milieu une résistance sans cesse croissante, d'où résulte un ralentissement... si bien que la vitesse d'une part, la résistance du milieu de l'autre atteignent à une grandeur où, s'équilibrant l'une l'autre, toute accélération est empêchée, et le mobile réduit à un mouvement régulier et uniforme qu'il conserve constamment par la suite. »*

L'objectif de Galilée est de montrer que les mouvements seraient les mêmes dans le vide, mais pour convaincre, il lui faut comprendre les mouvements réels et donc comprendre la résistance de l'air. Il oppose le mouvement d'une vessie gonflée à celui d'un morceau de plomb :

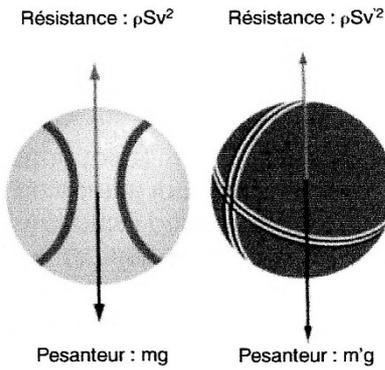
Salviati : «*Remarquant alors que si l'air offre une très grande résistance au léger mouvement de la vessie, il ne s'oppose que faiblement au poids du plomb, je tiens pour certain que l'avantage résultant de sa suppression totale serait si important pour la vessie, mais si petit pour le plomb, que leurs vitesses deviendraient égales [...]*

Salviati : *Si l'on prend deux corps égaux, identiques par la matière et par la forme (et pourvus ainsi de vitesses incontestablement égales), et que l'on*



P.S.

L'inclinaison de la tour de Pise à l'époque de Galilée.



Un corps atteint sa vitesse limite de chute quand les deux forces sont égales, la résistance de l'air proportionnelle à la surface et la force de pesanteur proportionnelle à la masse.

diminue le poids de l'un dans la même proportion que sa surface (sans altérer la similitude de leur forme), aucune réduction de la vitesse ne s'ensuivra... si le poids venait à diminuer plus que la surface, il en découlerait pour le mobile un certain ralentissement : et cela d'autant plus que la diminution du poids serait proportionnellement plus importante que celle de la surface. »

L'équation du mouvement

Cette compréhension de la chute des corps dans l'air est pleinement confirmée par les équations que nous écrivons aujourd'hui. Pour ne pas alourdir le discours, nous supposons que le corps étudié est une boule lisse et rigide suffisamment dense pour que nous puissions négliger la poussée d'Archimède. De surcroît, à l'instar de Newton, nous supposons que la résistance de l'air est proportionnelle au carré de la vitesse, hypothèse valable pour les situations comme la chute dans l'air de la hauteur de la tour de Pise.

Quand la résistance est négligeable, c'est-à-dire dans le vide, l'équation de Newton est particulièrement simple puisque l'accélération est égale à une constante g et les mouvements sont donc les mêmes pour tous les corps, pourvu que les conditions initiales soient identiques. Comme l'accélération est uniforme, la vitesse de chute est proportionnelle au temps et la hauteur de chute au carré du temps. Dès que la résistance de l'air intervient, les deux mouvements ne sont plus identiques. La vitesse limite, atteinte lorsque la résistance de l'air compense totalement la force de gravitation, est proportionnelle à la racine carrée du poids mg de la boule (m est la masse de la boule), et inversement proportionnelle à la racine carrée de la surface transversale de la boule, de la densité de l'air et du coefficient de traînée. Cette variation rappelle tout à fait la description de la vitesse du mouvement selon Aristote, mais comme le dit clairement Galilée, cette vitesse limite n'est atteinte dans l'air qu'après un temps de chute d'autant plus long que la résistance est plus faible. Dans le vide, de densité nulle, cette vitesse, effectivement infinie, n'est jamais atteinte.

La vitesse limite dépend uniquement du rapport de la masse à la surface de la boule, ce qui est exactement l'argument de Galilée. Comme le coefficient de traînée est constant, la résistance de l'air est effectivement proportionnelle à la surface : l'équation du mouvement dépend alors seulement du rapport de la force de résistance à la masse, soit du rapport de la surface à la masse.

Considérons par exemple une boule de pétanque d'une masse de 700 grammes et d'un diamètre de 7,5 centimètres ainsi qu'une balle de tennis ayant à peu près le même diamètre que la boule de pétanque, mais une masse égale à 58 grammes. Laissons tomber ces objets de la tour de Pise, haute de 51 mètres. Pour la boule de pétanque, la vitesse limite 76,7 mètres par seconde est nettement supérieure à celle atteinte en chute libre dans le vide au moment de l'impact (31,6 mètres par seconde). En revanche, pour la balle, la vitesse limite est égale à 22,1 mètres par seconde, inférieure à la vitesse qui serait atteinte en chute libre : la balle est très ralentie.

Ces raisonnements qualitatifs, à la Galilée, sont confirmés par le calcul du retard en temps de chute d'un objet par rapport à l'autre. Le retard entre le cas réel et le cas sans frottement est de 0,05 seconde pour la boule de pétanque et de 0,57 seconde pour la balle. Évidemment, Galilée ne pouvait faire cette expérience, mais il pouvait comparer le retard de l'impact au sol de la boule par rapport à l'impact au sol de la balle, tous deux calculés dans l'air, soit 0,52 seconde. Ces différences sont appréciables. La balle est à 10,6 mètres du sol lorsque la boule de pétanque touche le sol. Cette différence est appréciable à l'œil et encore plus à l'oreille (l'oreille distingue des écarts de quelques centièmes de seconde). Qu'il ait ou non réalisé ses expériences lui-même, Galilée connaissait ces difficultés et c'est pourquoi il a accordé une telle importance à la résistance de l'air.

Ainsi, les expériences de chute des corps dans l'air sont-elles parfaitement décrites par les arguments de Galilée qui avait compris que le paramètre pertinent pour décrire les effets de la résistance de l'air est bien le rapport de la masse et de la surface. ■