GALILEO GALILEI

L'ÉTUDE DU MOUVEMENT

par : André Ross
professeur de mathématiques
Cégep de Lévis-Lauzon

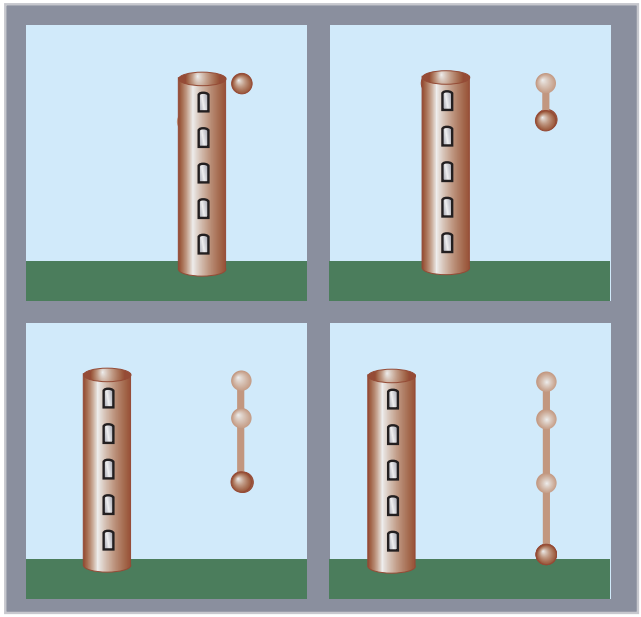
INTRODUCTION

Une partie des travaux de Galilée sur le mouvement, bien qu'ils ne furent publiés qu'en 1638, sont antérieurs à ses observations avec la lunette. Galilée avait compris que pour réussir à faire adopter le modèle copernicien et enlever toute crédibilité au modèle ptoléméen, il fallait donner une nouvelle explication du mouvement. Dans le modèle de Ptolémée, les mouvements terrestres étaient expliqués par la théorie du mouvement d'Aristote. Les corps lourds tendent à retrouver leur place naturelle parce qu'ils sont constitués d'une forte proportion de l'élément terre.

Les modèles dans lesquels la Terre est en mouvement autour du Soleil et sur elle-même n'étaient pas compatibles avec cette théorie du mouvement. Celle-ci permettait même de formuler des objections aux mouvements de la Terre. Puisque les corps lourds se déplacent plus rapidement que les corps légers, les corps lourds devraient tomber dans le sillage de la Terre si celle-ci était en mouvement.

Un philosophe de la nature qui accepte la philosophie aristotélicienne adopte le raisonnement suivant.

> *Si la Terre bouge, quand le grave (corps lourd) tombe du sommet d'une tour, le sol sur lequel est érigé la tour est en mouvement. Cela signifie que, dans le temps nécessaire pour que le grave atteigne le sol, le sol lui-même s'est déplacé. Or, nous voyons que le grave frappe le sol au pied de la perpendiculaire tracée du sommet de la tour à la base de celle-ci. Il n'y a aucun doute possible, le grave atteint le sol en un point différent de celui que nous devrions observer si la Terre était en mouvement. La Terre est donc immobile.*



Si la Terre était animée d'un mouvement diurne, un corps qu'on laisse tomber d'une tour s'éloignerait de la tour dans sa chute.

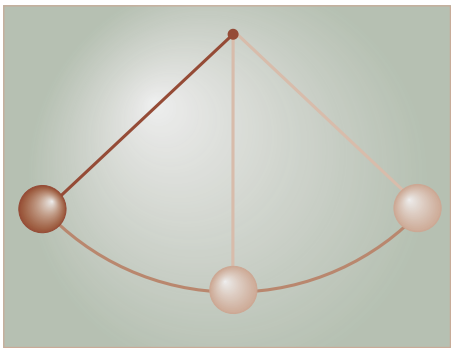
C'est dans l'ouvrage *Discours et démonstrations mathématiques* publié à Leyde en 1638, que Galilée fait la synthèse de sa théorie du mouvement. Il utilise cependant les résultats auxquels il et parvenu dans les discussions entre les protagonistes du *Dialogue sur les deux grands système du monde, ptoléméen et copernicien* publié à Florence en 1632. Nous allons tenter de refaire la démarche de Galilée dans son étude du mouvement.

L'ÉTUDE DU MOUVEMENT

Le mouvement d'un corps en chute libre est trop rapide pour qu'il soit possible d'en prendre des mesures. Pour procéder à une étude quantitative du mouvement, il faut pouvoir le ralentir ou débuter par un mouvement moins rapide. Galilée choisit deux solutions: étudier le mouvement des pendules et utiliser un plan incliné.

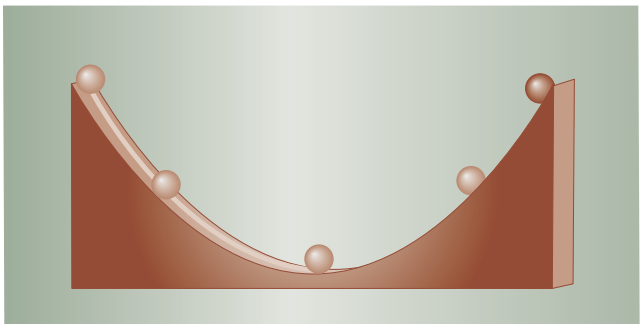
LE PENDULE

Le mouvement d'un pendule pose un problème aux aristotéliciens qui ne peuvent pas l'expliquer. Ils considèrent que c'est un mouvement mixte, sans vraiment définir ce que cela signifie. Le problème est celui-ci.

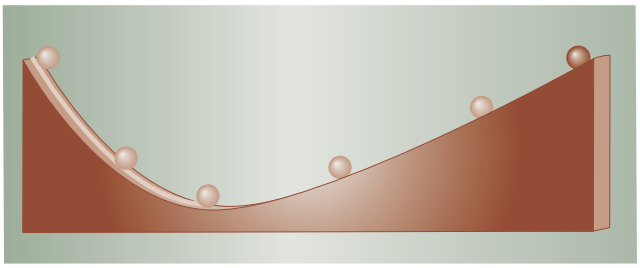


Il est facile de comprendre que le corps lourd suspendu au bout de la corde va descendre pour retrouver sa place naturelle. Une fois qu'il l'a atteinte, pourquoi remonte-t-il? Ne serait-il pas naturel qu'il demeure suspendu au point le plus bas de la trajectoire?

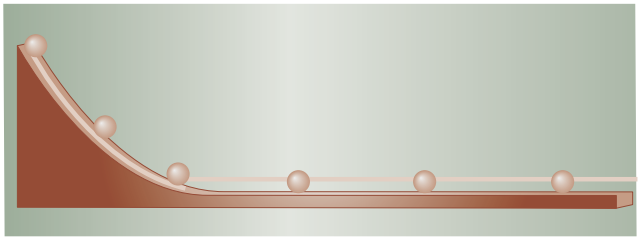
En étudiant le mouvement des pendules, Galilée constate que le corps semble remonter à la même hauteur. Il est possible de faire une étude plus précise de ce mouvement en utilisant un dispositif dans lequel le mouvement s'apparente à celui du pendule.



En modifiant ce dispositif, il peut constater que la bille remonte à peu près à la même hauteur d'où elle a été lancée, même en diminuant la pente et en allongeant le parcours de la remontée. La bille perd graduellement de la vitesse dans la remontée et, en l'absence de frottement, la hauteur atteinte devrait être exactement celle d'où la bille est partie.



Que va-t-il se passer s'il n'y a pas de remontée, que la partie droite demeure horizontale? Par un passage à la limite, Galilée conclut que la bille devrait conserver sa vitesse et rouler indéfiniment.



Cette constatation est très importante, cela signifie que le mouvement se continue sans qu'aucune force n'agisse pour le maintenir.

Pour Aristote, l'état naturel, c'est le repos et une force doit s'exercer pour qu'un objet puisse quitter cet état. Avec les expériences sur les pendules, il faut abandonner cette idée. Le déplacement en mouvement rectiligne à vitesse constante d'un objet dans l'espace ne nécessite par l'intervention d'une force qui le pousserait et le maintiendrait en mouvement. Il n'y a plus de différence qualitative entre repos et mouvement. De ces expériences découlent un principe d'inertie dont la formulation moderne, plus générale, est due à Newton.

LE PLAN INCLINÉ

La deuxième solution envisagée pour ralentir le mouvement est l'utilisation d'un plan incliné. Galilée va s'en servir pour établir un lien entre le temps et la distance parcourue. Cependant, l'étude quantitative de la chute des corps pour déterminer un lien entre le temps et la distance parcourue, suppose que l'on me-

sure le temps.

Il n'y a pas, à l'époque, d'instrument précis de mesure du temps, il faut en inventer. Galilée qui a une formation de musicien peut mesurer des intervalles de temps égaux en chantant un air. C'est ce qu'il fait dans ses premières investigations. Par la suite, il utilisera un récipient rempli d'eau et percé à sa base d'un petit trou soudé à une mince canule par laquelle l'eau s'écoule. L'eau qui s'écoule pendant un certain temps est recueillie dans un récipient de verre et soigneusement pesée. Les poids d'eau ainsi obtenus mesurent le temps écoulé, aucune autre unité de mesure n'entre en jeu.

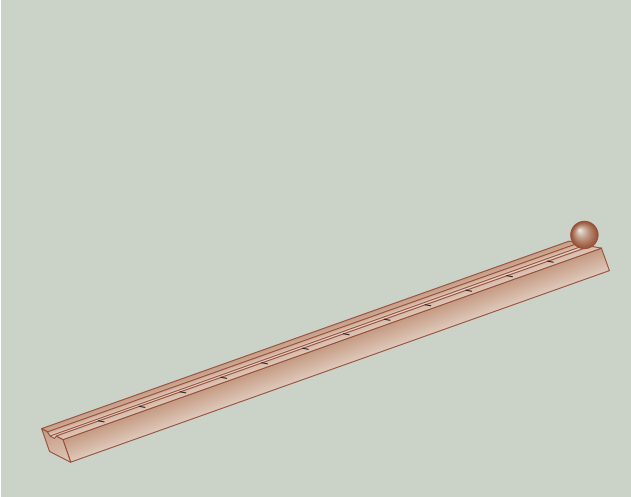
En fait, ce que Galilée mesurait s'exprimait en termes de proportions. Rappelons qu'une proportion est l'égalité de deux rapports et que des quantités sont proportionnelles lorsque leurs rapports sont égaux. En l'absence de nombres décimaux, les proportions sont interprétées par la théorie géométrique des proportions d'Euclide. Dans cette théorie, on peut faire le rapport de deux grandeurs seulement lorsque celles-ci sont de même type. Ainsi, on peut faire le rapport de deux longueurs, le rapport de deux aires ou le rapport de deux poids. On ne peut, comme on le fait maintenant, diviser une longueur par un temps pour décrire une vitesse. Ce ne sont pas des grandeurs de même type.

Le rapport des poids d'eau recueillies est égal au rapport des temps écoulés.

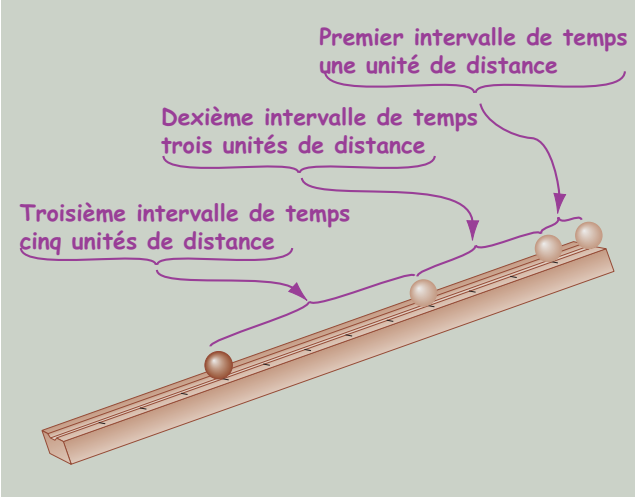
$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{t_1}{t_2}$$

Laissons Galilée relater l'expérience :

> *On utilise un plan incliné de 12 coudées environ (1 coudée ou brasse florentine valait 0,583 mètre), large d'une demi-coudée et épais de trois doigts, dans lequel a été creusé un canal parfaitement rectiligne d'une largeur à peine supérieure à un doigt, à l'intérieur duquel peut glisser une boule de bronze très dure, parfaitement arrondie et polie. Pour diminuer le frottement, on a garni le canal d'une feuille de parchemin bien lustrée.*



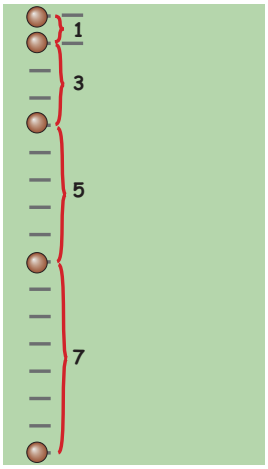
Les différences et proportions entre les poids donnent les différences et proportions entre les temps. La précision était telle qu'aucune discordance n'apparut jamais entre ces opérations maintes fois répétée.



Au lieu de définir une vitesse moyenne, comme nous le faisons aujourd'hui, Galilée raisonne sur le quotient de deux vitesses, sans définir le mot vitesse en des termes qui permettraient de distinguer vitesse moyenne et vitesse instantanée.

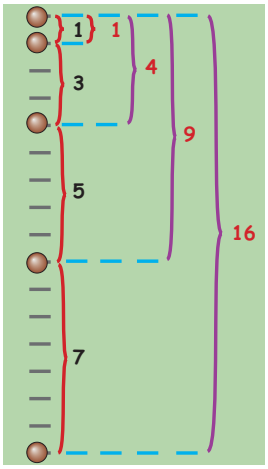
Intervalles de temps et distances

Durant un premier intervalle de temps, le corps parcoure une unité de distance. Durant le deuxième intervalle, il parcoure trois unités de distance. Durant le troisième intervalle, il parcoure cinq unités de distance. Durant le quatrième intervalle, il parcoure sept unités de distance.



Distance totale parcourue

Après une unité de temps, une unité de distance. Après deux unités de temps, quatre unités de distance. Après trois unités de temps, neuf unités de distance. Après quatre unités de temps, seize unités de distance.



La distance parcourue par un corps en chute libre est proportionnelle au carré des temps.

$$\frac{d_2}{P_1} = \frac{t_2^2}{t_1^2}$$

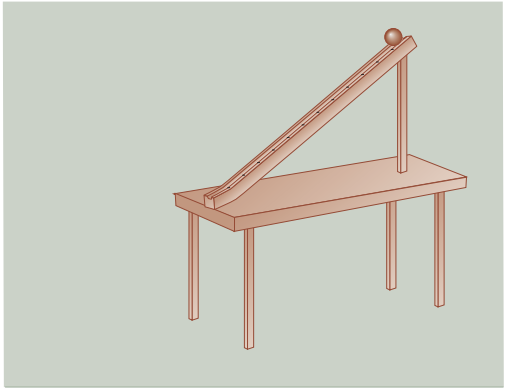
Temps de parcours	Distance parcourue
1	1
2	4
3	9
4	16

En écriture moderne, cette propriété s'écrit :

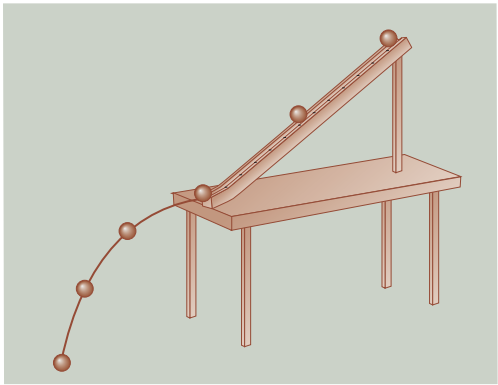
$$d = ct^2$$

COMPOSITION DES MOUVEMENTS

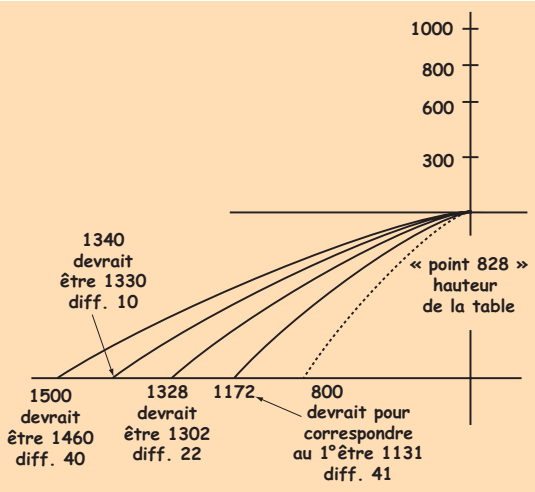
Galilée a réalisé des expériences sur la composition des mouvements de la façon suivante. Il installe un plan incliné sur une table. Ce plan incliné est muni d'un déflecteur, pour que le mouvement de la bille soit horizontal en quittant le bord de la table.



La vitesse de la bille en quittant le bord de la table dépend de la hauteur à partir de laquelle il laisse rouler la bille. Il peut alors déterminer à quelle distance la bille touche le sol et vérifier si cette distance est conforme à ce que prédit le modèle parabolique.

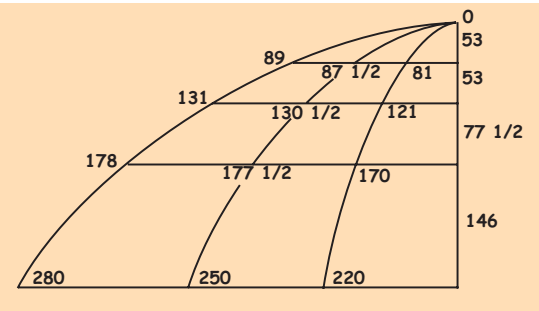


La figure suivante est une reproduction de la page de notes prises au cours de cette expérience. Sur cette page, Galilée représente sur une verticale les hauteurs de départ de la bille. Il indique également la distance des points d'impact observés et les distances attendues ainsi que les différences entre ces valeurs.



C'est la première fois dans l'histoire qu'un tel rapport d'expérience est fait. Les notes indiquent que Galilée voulait comparer les résultats expérimentaux et les valeurs prédites par un modèle et qu'il a calculé les différences entre les distances prédites par le modèle et les valeurs expérimentales.

Pour bien s'assurer que son modèle théorique de la composition des mouvements est valide, Galilée disposant successivement différents plans horizontaux et il enregistre, pour chacun d'eux, les points d'impact avec la plus grande précision possible. Voici la reproduction de ses notes.



Interprétation du mouvement diurne

Ces travaux sur l'inertie et la composition des mouvements ont permis à Galilée de répondre à l'objection du corps lourd tombant d'une tour. Lorsqu'ils observent un corps tombant d'une tour, l'aristotélicien et le galiléen voient la même chose, mais ils interprètent différemment ce qu'ils voient.

Pour l'aristotélicien, le mouvement de la pierre est un mouvement simple « ou naturel » d'un corps qui tente à rejoindre sa place naturelle.

Pour Galilée, ce n'est pas un mouvement simple mais un mouvement composé qui dépend de deux facteurs. L'un de ces facteurs est dû à la pesanteur qui agit le long de la verticale. L'autre facteur s'explique par le fait que le corps lorsqu'il est au sommet de la tour possède une vitesse horizontale, la même que la tour, laquelle dépend du mouvement de la Terre.

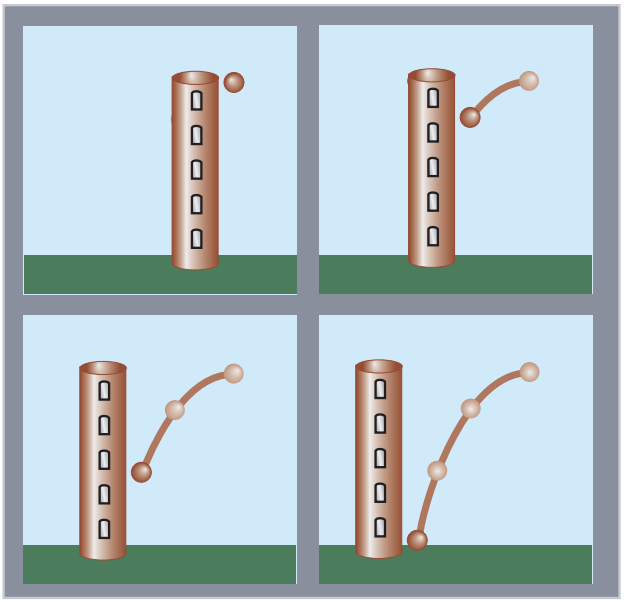
Dans *Dialogues sur les deux grands systèmes du monde*, Simplicio s'exclame :

> *Mais, si elle se meut transversalement, comment se fait-il que je la voie se mouvoir tout droit à la verticale? C'est tout simplement nier le sens manifeste, et s'il ne faut pas croire le sens, par quelle autre porte entrer en philosophie?*

Ce à quoi Salviati répond:

> *Par rapport à la Terre, à la tour et à nous, qui nous mouvons tous de conserve avec le mouvement diurne, en même temps que la pierre, le mouvement diurne est comme s'il n'était pas, il reste insensible, imperceptible, et n'a aucune action; seul est observable pour nous le mouvement qui nous fait défaut, le mouvement de la pierre qui rase la tour en tombant.*

Le corps tombant d'une tour est animée du même mouvement que la tour et l'observateur. Celui-ci ne perçoit donc que le mouvement qui lui fait défaut. Ce qui ne serait pas le cas pour un observateur extraterrestre.



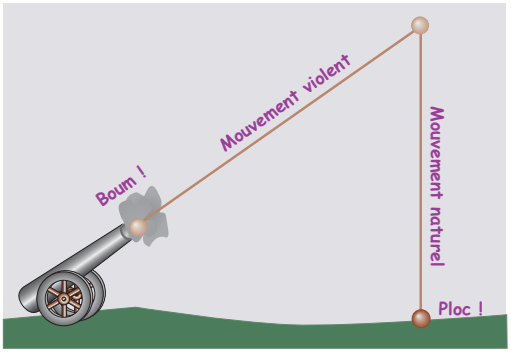
Galilée est un fin pédagogue qui veut convaincre son lecteur. Il sait que l'idée du mouvement transversal qui se compose avec le mouvement de la chute du corps n'est pas facile à admettre pour ses contemporains. Il choisit des exemples permettant au lecteur de comprendre les principes en faisant appel à des situations qui lui sont familières ou qu'il peut facilement imaginer. Voici comment il explique que le mouvement perçu est relatif à l'observateur.

> *Enfermez-vous avec un ami dans la plus vaste cabine d'un grand navire, et faites en sorte que s'y trouvent également des mouches, des papillons et d'autres animaux volants […]; puis, alors que le navire est à l'arrêt, observez attentivement comment ces petits animaux volent avec des vitesses égales quel que soit l'endroit de la cabine vers lequel ils se dirigent.*
> *Faites alors se déplacer le navire à une vitesse aussi grande que vous voudrez; pourvu que le mouvement soit uniforme et ne fluctue pas de-ci de-là, vous n'apercevrez aucun changement dans les effets nommés, et aucun d'entre eux ne vous permettra de savoir si le navire avance ou bien s'il est arrêté.*
> *Les papillons et les mouches continueront à voler indifféremment dans toutes les directions. Et on ne les verra jamais s'accumuler du côté de la cloison qui fait face à la poupe; ce qui ne manquerait pas d'arriver s'ils devaient s'épuiser à suivre le navire dans sa course rapide.*

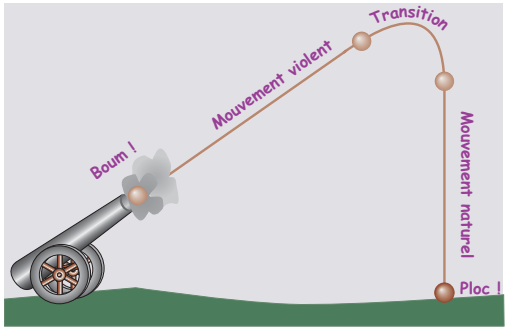
Dans ce texte, Galilée explique que le mouvement que l'observateur perçoit est celui qu'il n'a pas et que s'il partage un mouvement avec tout ce qu'il l'entoure, ce mouvement ne lui est pas perceptible.

COMPOSITION ET MOUVEMENT VIOLENT

Dans la théorie d'Aristote, *un objet ne peut être animé de deux mouvements simultanément*. De plus, l'état naturel d'un corps est le repos. Pour qu'un corps se déplace, il faut qu'une force s'exerce sur celui-ci et continue de s'exercer tout le temps de mouvement. Dans le cas d'un projectile, comme un javelot, lorsqu'il quitte la main, il possède quelque chose que la main lui a communiqué (Buridan l'appelle l'*impetus*) et qui le déplace dans l'espace même lorsqu'il n'est plus en contact avec la main. Après un certain temps, l'impetus s'épuise et l'objet retombe *naturellement* au sol, où il reste au repos. Ces deux mouvements ont lieu séparément, l'un après l'autre. Dans une telle approche, la description de la trajectoire d'un boulet de canon est celle de l'illustration suivante.

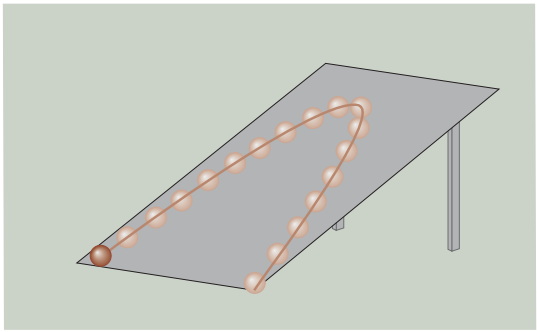


La conception évolue légèrement avec Nicolo Tartaglia (1499-1557) qui considère que le mouvement naturel débute un peu avant que le mouvement violent ne soit complètement épuisé.



Galilée réalise quelques expériences sur la trajectoire des projectiles en utilisant une bille trempée dans l'encre. Voici sa description de cette expérience.

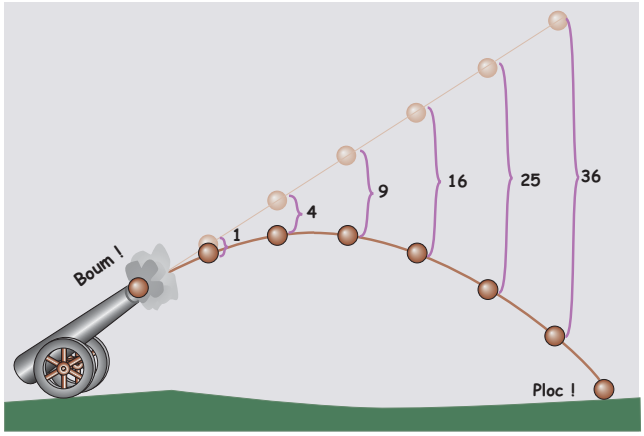
> *Je prends une bille de bronze parfaitement ronde et pas plus grande qu'une noix, et je la lance sur un miroir de métal, tenu non pas perpendiculairement, mais un peu incliné, de telle façon que la bille puisse rouler sur sa surface et je la presse légèrement dans son mouvement : elle laisse alors la trace d'une ligne parabolique très précise et très nette, plus large ou plus étroite selon que l'angle de projection sera plus ou moins élevé. Ce qui d'ailleurs constitue une expérience évidente et sensible sur la forme parabolique du mouvement des projectiles.*



Grâce à ces expériences, il est en mesure d'affirmer qu'un projectile est en chute libre durant toute la durée du mouvement. La trajectoire du projectile est déviée de la ligne droite. Cependant, les distances entre la ligne droite et la trajectoire sont dans le rapport des carrés des temps.

Temps de parcours	Déviation (chute)
1	1
2	4
3	9
4	16
5	25
6	36

Comme la figure suivante en fait l'illustration, après un intervalle de temps, la chute est de 1 unité de distance. Cette unité de distance représente la déviation par rapport à la trajectoire rectiligne de la théorie de l'impetus. Après deux intervalles de temps, la chute est de 4 unités de distance. Après trois intervalles de temps, la chute est de 9 unités de distance et ainsi de suite.



CONCLUSION

Par son étude du mouvement, Galilée a posé les fondements de la dynamique. Il a également développé une autre façon de faire de la science. Selon lui, la connaissance scientifique ne devait dépendre que des activités scientifiques, de l'observation et de la mesure, et non des arguments philosophiques et théologiques.

Jusqu'alors, les mathématiques et la science étaient considérés comme des composantes mineures de la connaissance. Elles deviennent avec lui des composan-

tes majeures. Avant lui, la philosophie devait avoir réponse à tout, mais ses travaux ont montré qu'il y a de grands domaines de la connaissance et de grandes questions auxquelles la philosophie ne peut répondre.

Galilée a réalisé des expériences qui ont permis de montrer que l'on peut parvenir à la connaissance des faits scientifiques par l'expérimentation et l'observation. Cependant, il ne suffit pas d'observer pour faire de la science. Le disciple d'Aristote et le disciple de Galilée voient la même chose en regardant un corps lourd tomber d'une tour, mais ils ne l'interprètent pas de la même façon.

L'interprétation se fait dans un cadre théorique. L'aristotélicien interprète les faits observés dans le cadre de la philosophie d'Aristote, un univers géocentrique dans lequel le mouvement est expliqué par la tendance des corps à retrouver leur place naturelle. Le disciple de Galilée interprète les faits dans le cadre d'un univers héliocentrique dans lequel le mouvement ne nécessite pas un moteur actif pour se maintenir.

Le mouvement perçu par un observateur est relatif à l'observateur, selon que celui-ci est en mouvement ou non. L'observateur en mouvement perçoit les mouvements que lui-même n'a pas, que ce soit dans une cabine ou un ascenseur. Galilée a ouvert la porte à l'utilisation des modèles mathématiques pour décrire la relation entre les variables des phénomènes physiques. Les mathématiques de son époque n'offraient pas un éventail très diversifié de méthodes et de procédures de modélisation. Les travaux de Newton, de Leibniz vont permettre le développement d'un langage mathématique plus apte à décrire les relations entre les variables que la théorie des proportions.