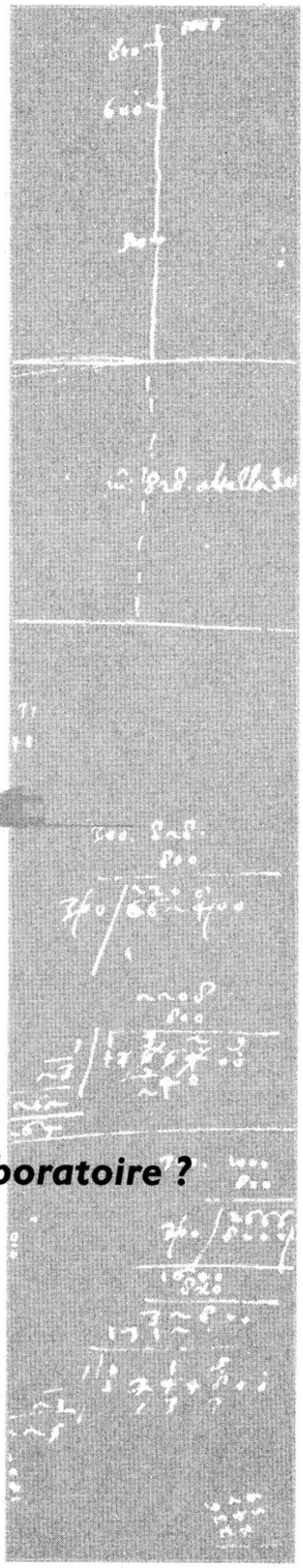
Billes en mouvement et mouvement de la Terre...

Le premier laboratoire ?

A vous de voir, à vous de faire...



I. Comment le mouvement des corps qui tombent est devenu un enjeu...

Et si la Terre tournait sur elle-même et autour du soleil ?

Publiée en 1543, l'hypothèse de Copernic a provoqué un scandale culturel et théologique. Elle va à l'encontre des Ecritures : Josué n'a-t-il pas ordonné au Soleil, et non à la Terre, de s'arrêter afin de lui laisser le temps de gagner une bataille décisive ?

Mais le mouvement de la Terre se heurte à un autre obstacle formidable. Comment la Terre peut-elle bouger sans que nous nous en rendions compte ? Ici, c'est un mouvement physique, celui de la chute des corps, qui est au centre des débats. Les corps pesants rejoignent évidemment le sol par le plus court chemin, c'est-à-dire en ligne droite. Mais si la Terre, c'est-à-dire le sol, bouge pendant qu'une pomme tombe de son arbre, elle ne devrait pas tomber au pied de l'arbre. Elle devrait toucher le sol là où aurait été l'arbre si la Terre était restée immobile.
Et donc, si la Terre tournait, nous ne verrions pas les corps tomber en ligne droite, mais en oblique !

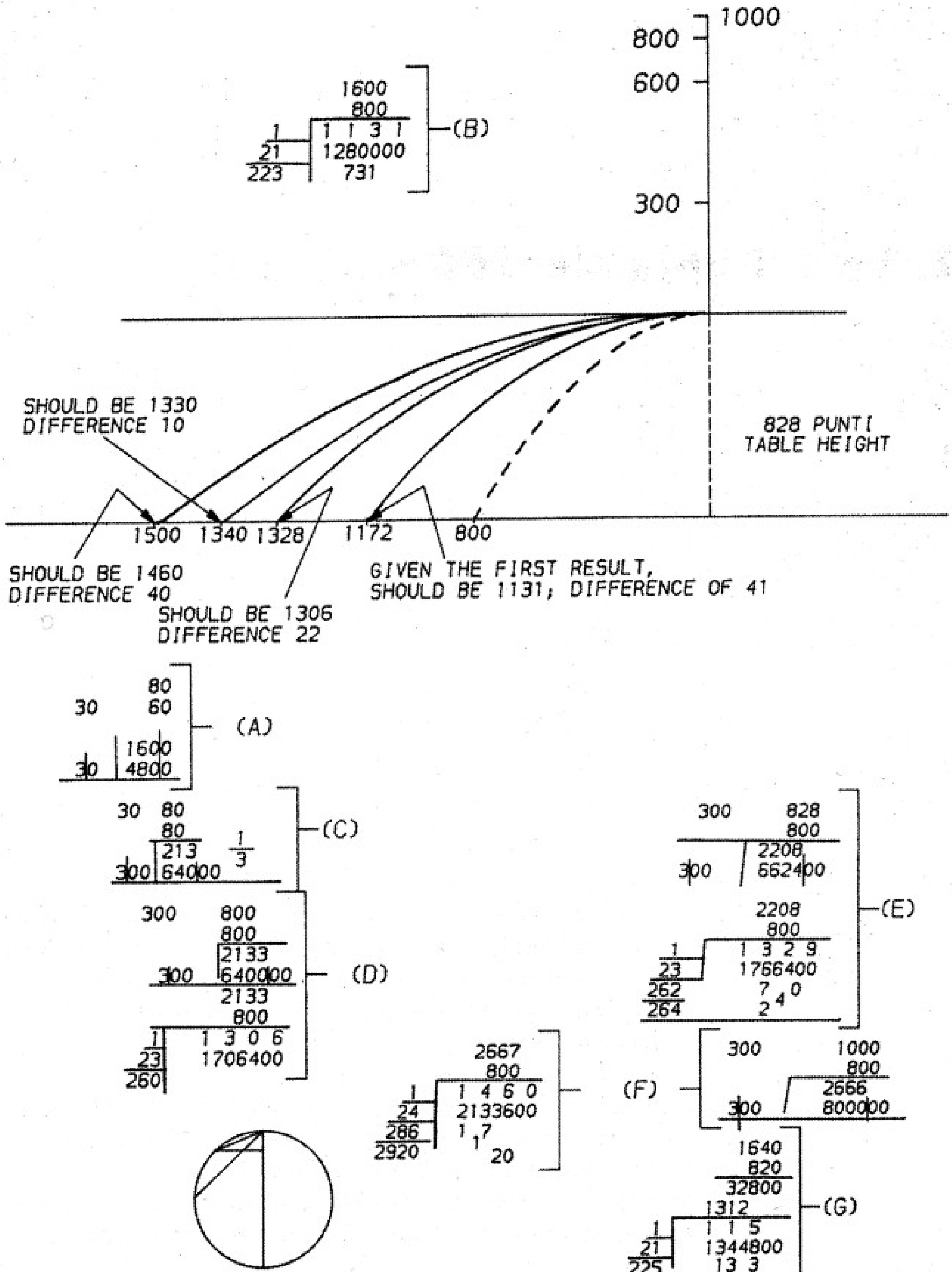
Le mouvement des corps qui tombent est donc devenu un enjeu. Il semble témoigner de ce que la Terre est bel et bien immobile.

2. Le schéma de 1608...

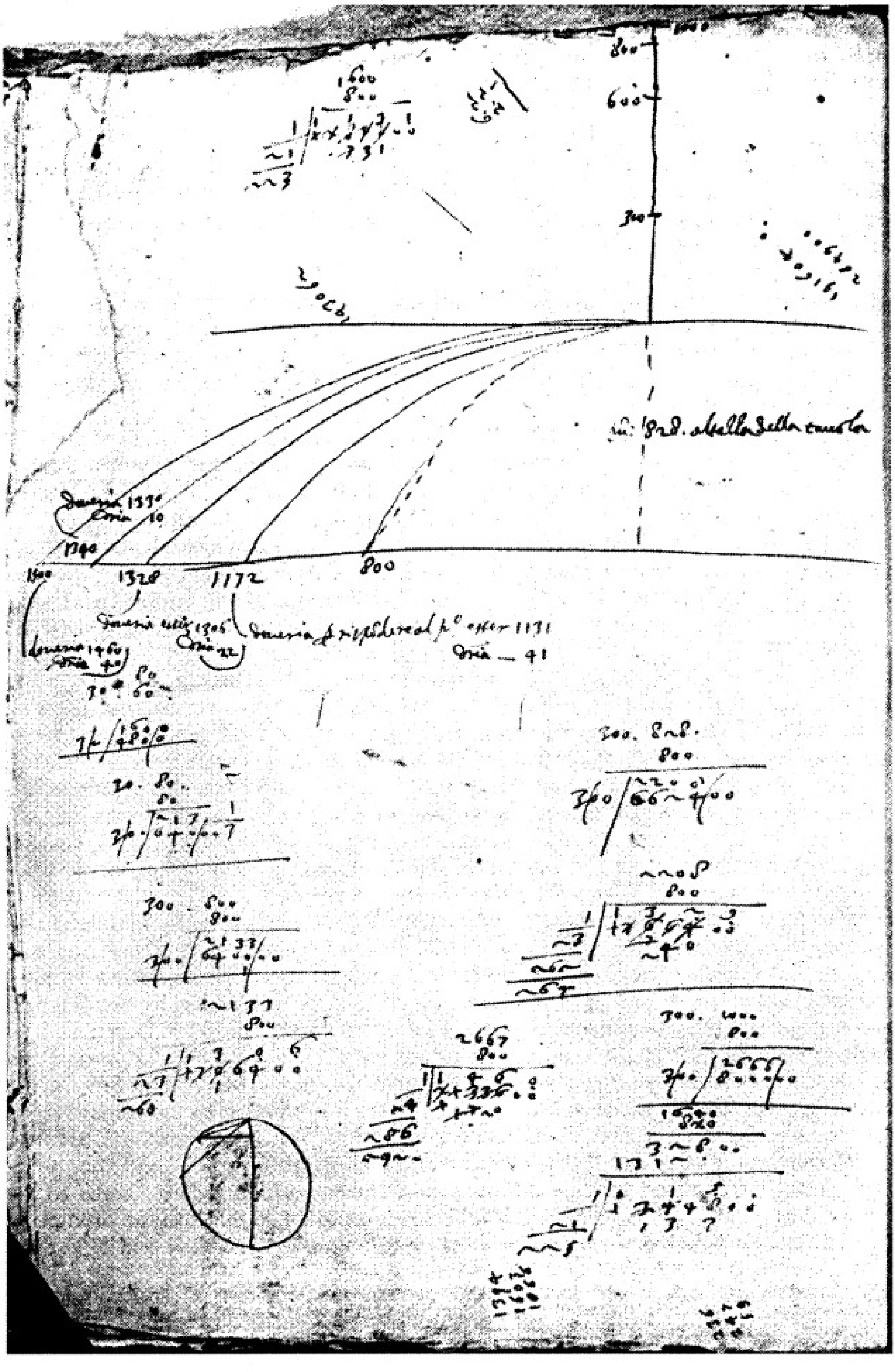
En 1608, Galilée a 44 ans, il enseigne à l'Université de Padoue. Sa renommée d'astronome est déjà honorable mais il est surtout connu pour ses travaux sur le mouvement et l'équilibre des corps. Depuis des années, il poursuit un problème : comment décrire la manière dont les corps gagnent ou perdent sans cesse de la vitesse ?

Définir la vitesse d'un mouvement uniforme est facile : c'est le rapport entre la distance parcourue et le temps mis à la parcourir. Mais lorsque le mouvement est accéléré, la vitesse change tout le temps.
Et si le corps ne parcourt aucune distance mesurable avec une vitesse donnée, comment définir sa vitesse ? Depuis des années, Galilée essaie de répondre, sans succès.

En 1608, il griffonne un schéma et aligne des chiffres. Les chiffres permettent de comprendre le schéma, et la situation qu'il représente. Galilée lâche des billes sur un plan incliné posé sur une table. Pour chaque hauteur de départ, il mesure la distance entre le point d'impact de la bille sur le sol et le bord de la table.



Folio 116v - Transcription by David K. Hill, Isis, 1986, 77, p. 287.



Folio 116v - Biblioteca Nazionale di Firenze.

Le feuillet de 1608 marque un événement.

Il est la trace d'une expérience que Galilée aurait été incapable d'inventer s'il n'avait pas imaginé la réponse qu'il cherchait. Galilée a une hypothèse quant à la manière dont les corps tombent. Il a déjà calculé ce que, selon cette hypothèse, il devrait mesurer ("doveria").
En d'autres termes, l'expérience est une sorte de rendez-vous proposé au mouvement de chute par Galilée : si les chiffres sont ce qu'ils "devraient", l'hypothèse sera confirmée.
Mais le plan incliné ne permet pas seulement à Galilée de confirmer son hypothèse. Il lui donne le pouvoir de la prouver.

Le plan incliné donne au mouvement le pouvoir d'imposer, contre toutes les objections, la manière dont il doit être décrit. En effet, grâce au plan incliné, Galilée n'observe pas simplement le mouvement : il le met en scène sur un mode qui lui permet de faire varier séparément les différents facteurs qui peuvent y intervenir. En d'autres termes, le plan incliné permet de comprendre le mouvement comme une fonction mathématique, c'est-à-dire en termes de variables.

On peut dire que le feuillet de 1608 est la trace de la première démonstration expérimentale. Et donc que le plan incliné est le premier dispositif expérimental, transformant un phénomène en instrument de preuve.
Faire rouler des billes n'avait évidemment, en 1608, rien de nouveau.
Ce sont les gestes de Galilée, les gestes que vous allez refaire qui sont nouveaux, qui inaugurent une nouvelle histoire.

C'est en tentant ces gestes que vous rencontrerez ce dont Galilée a peut-être fait l'expérience en 1608 : la force du laboratoire...

3. Le premier laboratoire ?

Le premier laboratoire, pour démontrer, ne pouvait rien supposer : il devait être transparent. Le plan incliné de Galilée ne suppose aucun autre dispositif, aucun instrument, aucune mesure sauf celle qui est disponible depuis dès millénaires : la mesure des distances.
En particulier, Galilée réussit à interroger le mouvement sans avoir à mesurer le temps. A l'époque, la mesure la plus précise du temps était encore dans la tête : un son scandé de manière rythmique par un musicien entraîné.

La richesse des laboratoires qui se sont succédé est l'ensemble des dispositifs qui, comme le plan incliné, ont réussi à transformer ce qu'ils interrogeaient en témoins fiables, imposant la manière dont ils doivent être décrits. Chacun de ces dispositifs a pu alors devenir un instrument de mesure rendant possible l'invention d'un dispositif nouveau.

Entrez dans un laboratoire d'aujourd'hui et demandez que l'on justifie le fonctionnement de tous les instruments dont ceux qui y travaillent ont besoin : de proche en proche, c'est toute la science expérimentale du passé qui devra se déployer.
Ce faisant, vous remonterez le cours du temps... jusqu'en 1608.

4.1. Ce que dit le point d'impact...

La distance entre le point d'impact et le bord de la table varie en fonction de la vitesse qu'a la bille au moment où elle quitte la table, et celle-ci ne dépend que de la vitesse que la descente le long du plan incliné lui a donnée.

Pour qui en doute :

- Lâchez une bille en différents points du plan incliné, auquel vous pouvez donner l'inclinaison que vous choisirez. Vous pouvez ainsi faire varier la rapidité du mouvement avec lequel la bille roule ensuite sur la table. Et vous constaterez que plus celui-ci est rapide plus le point d'impact est éloigné du bord de la table.

- Faites varier la distance du plan incliné par rapport au bord de la table. Pour une même position de départ de la bille sur le plan incliné, le point d'impact reste le même, quelle que soit la distance parcourue sur la table. Le mouvement sur la table n'a donc pas de conséquences mesurables : il ne fait pas varier la vitesse de la bille.

Attention : pour que tout cela marche, il faut lâcher la boule, pas la lancer. Si vous lui donnez un élan, c'est-à-dire une vitesse, au départ, rien ne va plus...

4.2. Ce que dit le mouvement de la bille sur le plan incliné...

La vitesse gagnée par la bille ne dépend que de la hauteur de son point de départ sur le plan incliné. Elle ne dépend donc pas de la rapidité de la descente le long du plan incliné, c'est-à-dire du temps mis à effectuer la descente.

Pour qui en doute :

- Faites varier le degré d'inclinaison du plan incliné, mais lâchez la balle toujours de la même hauteur verticale (mesurée à partir du plan horizontal qu'est la table). Le temps de descente et la longueur parcourue le long du plan incliné varient autant que vous voulez, mais le point d'impact, lui, ne varie pas.

- Faites varier tout ce que vous voudrez. Si vous voulez que deux mouvements produisent la même distance d'impact, il y a une solution et une seule : partir de la même hauteur.

Attention : comme le frottement est l'ennemi, vos résultats seront d'autant plus précis que le trajet sur la table est court. Le meilleur résultat correspond donc au cas où l'extrémité du plan incliné coïncide avec le bord de la table.

Vous venez de rencontrer la force du laboratoire : la vitesse gagnée par le boule ne dépend ni de la longueur de la pente parcourue le long du plan incliné, ni de l'angle d'inclinaison du plan, ni du temps de la descente, seulement de la hauteur de départ ! Lorsqu'il est question de vitesse gagnée (ou perdue) "le temps ne compte pas".

Il faudra plus d'un siècle pour que l'ensemble des savants européens s'habituent à ce "fait expérimental" et en comprennent l'importance.

4.3. Ce que dit le mouvement de la bille tombant de la table vers le sol...

Le mouvement de chute libre de la bille depuis la table vers le sol peut être compris comme la somme de deux mouvements : la bille poursuit le mouvement horizontal de vitesse uniforme qui était le sien sur la table et en même temps elle adopte le même mouvement vertical accéléré que si elle tombait en ligne droite. Les deux mouvements se combinent sans que l'un influence l'autre : la bille continue à avancer tout en tombant.

Pour qui en doute :

- Faites partir une bille d'une hauteur déterminée sur un plan incliné et mesurez la distance d'impact. Ajustez un second plan incliné sur la table de manière à ce que la distance entre son extrémité et le bord de la table soit égale à la distance entre l'extrémité du premier et le bord plus la distance d'impact que vous avez mesurée. Mettez sur le sol une plaque métallique pour "repérer l'impact au son". Faites partir en même temps deux billes sur les deux plans à partir de la même hauteur que la première fois.
Au moment où la première bille touche le sol, la seconde atteint le bord de la table.
Elles ont donc toutes deux parcouru la même distance horizontale pendant le même temps, l'une sur la table, l'autre en tombant.

- Gardez la plaque métallique. Faites partir une bille le long d'un plan incliné. Maintenez une seconde bille à l'extrémité de la table, toute prête à tomber. Au moment où vous voyez le première atteindre l'extrémité de la table, lâchez la seconde.
Les deux impacts se produiront (si votre geste est précis) en même temps. La hauteur de chute est la même et les temps de chute sont égaux : quel que soit son mouvement horizontal, la balle tombe avec la même vitesse vers le sol.

4.4. Pour qui voudrait aller plus loin.

- Mesurez les distances d'impact pour différentes hauteurs de départ. Si tout va bien, vous trouverez que les hauteurs sont entre elles à peu près comme les carrés de ces distances.

C'est ce que disent les colonnes de chiffres sur le schéma de Galilée, et c'est l'hypothèse que Galilée voulait sans doute vérifier. Cette relation est en effet la conséquence directe d'une définition mathématique du mouvement de chute accélérée que Galilée avait formulée : "ils reçoivent en des temps égaux des moments égaux de vitesse".

Le plan incliné permet la démonstration expérimentale de cette définition si et seulement si on admet qu'en chaque instant de sa descente, la vitesse gagnée par la bille ne dépend que de la hauteur dont elle est descendue.
Galilée peut affirmer qu'il sait comment évaluer la vitesse gagnée par la bille en un instant quelconque de sa descente puisqu'il peut évaluer cette vitesse à la fin de la descente, à l'instant où elle passe du plan incliné à la table. Car il s'agit d'un instant quelconque de la descente puisque l'expérimentateur peut le choisir comme il veut, en faisant varier le point de départ de la bille.

Le dispositif de 1608 fait donc deux choses à la fois : il permet une mise en relation systématique entre deux mesures et confirme le principe qui donne son interprétation à cette mise en relation.

5. Ce que Galilée a réussi à démontrer...

- Certains se souviennent peut-être de la formule apprise à l'école :

$$\boxed{\frac{mV^2}{2} = mgh}$$

où m est la masse du corps en mouvement, g l'accélération gravitationnelle.

Elle signifie qu'en chaque instant de la descente d'un corps, la vitesse V gagnée ne dépend que de la hauteur h descendue.
En d'autres termes, l'on peut dire à la bille de Galilée : "Donne moi la valeur de la hauteur (h) dont tu es descendue, et je te dirai combien de vitesse (V) tu as gagné, et cela quel que soit le parcours suivi par ta descente et le temps mis pour franchir ce parcours".

Cette possibilité d'ignorer le détail du chemin au profit d'une seule information a été une immense surprise, et à la fin du 17ème siècle certains ne l'avaient toujours pas acceptée.

Pour nous, elle constitue le privilège extraordinaire des mouvements que l'on appelle dynamiques, à propos desquels la physique a formulé ses grandes lois. Mais attention, ce privilège ne tient que s'il n'y a pas de frottement, c'est-à-dire si l'expérimentateur s'est arrangé pour que les frottements soient négligeables : le plan doit être le plus lisse possible, et la bille bien ronde.

- Parmi les êtres que Galilée a réussi à définir, le plus singulier est le pendule, l'ancêtre des techniques permettant enfin de mesurer avec précision des intervalles de temps.
De même que la vitesse gagnée ne dépend que de la hauteur descendue, la période du battement d'un pendule (en un point donné de la Terre) ne dépend que de la longueur de son fil. Un premier instrument "scientifique" de mesure est né.

- Les corps ne tombent pas "naturellement" à la verticale. S'ils sont en mouvement au moment où ils sont lâchés, ils vont conserver ce même mouvement avec la même vitesse et dans la même direction alors que, dans le même temps, ils tombent verticalement avec une vitesse uniformément accélérée. C'est pourquoi, de manière générale, les corps tombent vers le sol en suivant une trajectoire parabolique, combinant un mouvement uniforme et un mouvement accéléré.
La trajectoire verticale correspond au cas particulier où le corps était immobile lorsqu'il a commencé à tomber.

- Et surtout : la bille a parlé ! Avant Galilée la manière dont les corps tombent était l'enjeu de spéculations et d'interprétations multiples. Désormais, on sait qu'il est parfois possible de donner aux faits le pouvoir d'imposer comment ils doivent être décrits...

6. La Terre peut être en mouvement sans que nous nous en rendions compte...

En 1609, Galilée entend parler pour la première fois du télescope.
Dès 1610, il publie ses observations de la Lune et des satellites de Jupiter dans Le Messager des Étoile" et les présente comme des arguments : la Terre n'est qu'une planète, comme Jupiter.
Le plus farouche des défenseurs de Copernic est né.
Mais ce sont peut-être de modestes billes roulant sur un humble plan incliné qui ont autorisé Galilée à penser qu'il pouvait démontrer la vérité du mouvement de la Terre.

Si la Terre était en mouvement, comment expliquer, par exemple, que la pomme qui tombe d'un pommier touche le sol au pied de ce pommier ? Galilée peut désormais répondre : même si la Terre était en mouvement la pomme tombera au pied du pommier. Ou plus précisément, sa chute sera verticale du point de vue du pommier et de notre point de vue à nous, qui regardons la pomme et le pommier.

En effet, si la Terre est en mouvement, nous partageons tous ce mouvement : non seulement l'observateur et le pommier, tous deux plantés sur le sol, mais la pomme également. Car la pomme, pendant qu'elle tombe, continuera le mouvement qu'elle avait au moment où elle s'est détachée de sa branche. Exactement comme la bille, au moment où elle quitte la table, continue le mouvement qu'elle avait sur la table alors qu'elle tombe sur le sol.

Le dispositif de Galilée lui permet d'affirmer que la manière dont un corps tombe dépend de sa vitesse au moment où il commence sa chute. Et donc, si la Terre est en mouvement, le pommier ainsi que la pomme attachée à la branche sont en mouvement, et la pomme qui se détache et tombe continuera en tombant le mouvement de la Terre et du pommier. Elle accompagnera donc le mouvement du pommier, et tombera à son pied.

En revanche un observateur extra-terrestre, qui observerait la Terre en mouvement, c'est-à-dire ne partagerait pas ce mouvement, pourrait voir la pomme suivre une superbe parabole, pareille à celle que suivent les billes tombant de la table après avoir roulé le long du plan incliné. Pareille aussi à celle d'une bombe tombant depuis un avion en mouvement.

Galilée a démontré que la Terre pouvait être en mouvement : la chute des corps ne s'y oppose plus. Mais c'est un autre astronome, Johannes Kepler, qui a véritablement mis la Terre en mouvement.

Depuis l'Antiquité une conviction avait guidé tous les astronomes, y compris Copernic et Galilée : seule la perfection du cercle permettait de comprendre la perfection régulière du Ciel.
En 1609, Kepler ose "briser le cercle".
Il montre que l'ellipse, et non le cercle, permet de mettre d'accord la description mathématique du mouvement des planètes et les données de l'observation astronomique. Le Soleil n'est pas au centre, il est situé à un des deux pôles de l'ellipse.
Depuis Kepler, l'astronomie obéit à une nouvelle exigence de perfection, non plus celle du cercle, mais celle d'un accord aussi précis que possible entre mathématiques et observation.

Galilée n'a jamais reconnu l'importance de la découverte de Kepler...

7. Construire la parabole...

Soit la bille quittant la table avec une vitesse de direction horizontale V, ce qui signifie qu'avec cette vitesse elle parcourt dans le temps t une distance horizontale x selon la formule $x = Vt$

Son mouvement de chute verticale répond quant à lui (Galilée le montrera plus tard) à la formule $y = \frac{gt^2}{2}$ où g est la constante gravitationnelle, et y le déplacement vertical effectué après un temps de chute t

A chaque instant de la chute, la position de la bille est donc donnée par deux chiffres, celui qui mesure son déplacement dans la direction horizontale et celui qui mesure son déplacement dans la direction verticale.
La parabole est la réponse à la question : pour une valeur x de son déplacement horizontal, quelle sera la valeur y de son déplacement vertical ?

En effet, pour se déplacer à l'horizontale d'une valeur quelconque, x, la bille a dû poursuivre son mouvement pendant un temps de valeur $t = \frac{x}{V}$

Pendant ce temps, nous savons qu'elle a du parcourir une distance verticale de valeur $y = \frac{gt^2}{2}$

$$y = \frac{g}{2}t^2 = \frac{g}{2}\left(\frac{x}{V}\right)^2 = \frac{g}{2}\frac{x^2}{V^2} = \frac{g}{2V^2}x^2$$

Comme g et V sont des constantes, $\frac{g}{2V^2}$ est une constante,

et on retrouve ($y = ax^2$) le cas particulier le plus simple de la définition d'une parabole, qui répond à la formule canonique : $\boxed{y = ax^2 + bx + c}$

CQFD