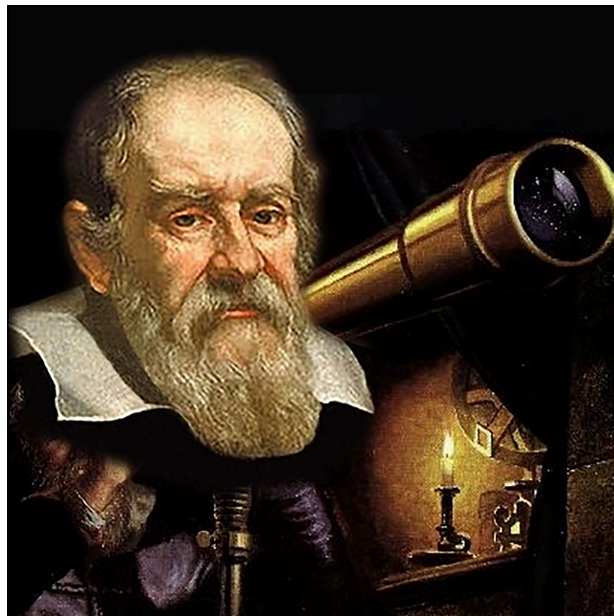


Galilée et ses découvertes, l'évolution de modèles scientifiques et reproduction de ses recherches



Étudiants :

Alexandre DOS SANTOS

Anaëlle L'HOSTIS

Luc BEARD

Ludivine GONZALEZ

Mathéo DESFEUX

Nizar DUQUEH

Enseignant-responsable du projet :

Jérôme THIBAUT

Date de remise du rapport : 15/06/2024

Référence du projet : STPI/PSE/2024 - 26

Intitulé du projet : Galilée et ses découvertes, l'évolution de modèles scientifiques et reproduction de ses recherches.

Type de projet : Histoire des sciences/biblio/expérimental

Objectifs du projet :

Notre objectif est de nous intéresser à la façon dont Galilée a procédé pour établir différentes expériences scientifiques basées sur l'expérimentation, comme la visualisation des cratères de la Lune avec un instrument de son invention qu'est la lunette de Galilée, mais aussi l'élaboration d'une théorie physique reposant sur une expérience avec un plan incliné afin de démontrer que la vitesse d'un élément en chute libre ne dépendait pas de sa masse. Nous allons aussi mettre en perspective, les différents points de vues adoptés avant, pendant et après l'époque de Galilée. Grâce à l'archéologie expérimentale sur ces différents thèmes nous montrerons que Galilée a pu contribuer à faire progresser des modèles scientifiques en prônant l'expérimentation. Point important, nous verrons en quoi les idées et théories de Galilée ont été à la rencontre des modèles astronomiques et théologiques de l'époque.

Mots-clefs du projet :

- Découvertes de Galilée
- Science et religion
- Evolution des modèles astronomiques
- Archéologie expérimentale

Table des matières

Table des matières	4
1. Introduction	5
2. Méthodologie / Organisation du travail	6
3. Travail réalisé et résultats	7
a. Evolution des modèles, influencés par la religion et la démarche scientifique	7
i. Description des différents modèles astronomiques	7
ii. La place de la religion dans le monde scientifique	10
iii. Démarches scientifiques	12
b. Lunette de Galilée	13
i. Un peu d'histoire	13
ii. Fonctionnement théorique de la lunette	14
iii. Fabrication de la lunette	16
c. Ses découvertes	19
d. Plan incliné	22
i. Un peu d'histoire	22
ii. Reproduction de l'expérience	23
4. Conclusions et perspectives	25
5. Bibliographie	26
6. Annexes	27

1. Introduction

Le ciel comme Univers vaste et étrange a toujours suscité la curiosité et l'angoisse de l'homme. Le mouvement des objets célestes constituait une motivation réelle et pragmatique, aussi bien pour les profanes que pour les savants afin de comprendre et de découvrir ces mystères.

Mais l'observation par l'œil nu et les connaissances offertes et validées par les autorités religieuses étaient incapables de mettre en place une explication rationnelle susceptible d'étudier le Soleil et les étoiles. Ces savoirs étaient alors insuffisants pour orienter l'observateur à comprendre ces différents phénomènes dans leur intégralité et leur complexité.

Dans cette perspective, Newton a envisagé dans son livre *Philosophiae naturalis principia mathematica* que la découverte de l'espace n'était pratiquement possible que grâce à l'observation méthodique, permanente et scientifique. Mieux encore, l'accès à l'espace doit être guidé et réalisé par l'utilisation des moyens techniques et leur évolution. Ce sont les lunettes de Galilée qui ont rendu possible la réalisation d'énormes avancées dans le domaine de l'astronomie. "Et pourtant elle tourne" est peut-être la phrase qui marque la ligne de démarcation entre le savoir astronomique avant Galilée et toutes les prouesses accomplies aujourd'hui grâce à ce savant de génie et bien d'autres de même grandeur.

En plus de ses travaux astronomiques, Galilée, né en 1564 en Italie, a révolutionné la physique avec ses expériences sur le plan incliné. En étudiant l'accélération des objets roulant sur un plan incliné, il a démontré que la distance parcourue est proportionnelle au carré du temps. Cette découverte a contesté les idées aristotéliennes et établi les bases de la cinématique moderne.

Alors, comment Galilée a contribué à faire évoluer plusieurs modèles scientifiques par l'expérimentation ? Nous nous intéresserons d'abord à l'évolution des modèles sous l'influence de la religion et de la démarche scientifique. Nous retracerons ensuite son histoire et tenterons de nous mettre à sa place, en reprenant deux de ses expériences les plus connues : la lunette astronomique et le plan incliné.

2. Méthodologie / Organisation du travail

Durant les premières séances nous avons discuté en groupe des grands axes à explorer, des recherches de Galilée à reproduire et des éléments historiques à mentionner. Ces premières séances nous ont également permis de cerner les limites du projet et d'identifier le matériel et les outils nécessaires à sa réalisation.

Nous avons ensuite divisé le groupe en deux pour réaliser les expériences retenues, qui étaient le plan incliné et la lunette de Galilée. La répartition des tâches a été réalisée en tenant compte des compétences, de l'expérience et des préférences de chaque membre du groupe.

Alexandre et Mathéo se sont investis dans la fabrication de la lunette de Galilée et son fonctionnement.

Anaëlle, Luc, Ludivine et Nizar ont pris en charge la construction du plan incliné et la reproduction de l'expérience dans l'optique de retrouver expérimentalement la relation entre la distance et le temps.

En parallèle, Anaëlle et Luc ont travaillé sur l'évolution du modèle scientifique en insistant sur le contexte historique dans lequel s'inscrivent les travaux de Galilée, avec l'intervention régulière des autres membres du groupe.

De plus, la communication s'est avérée être un élément essentiel pour garantir une coordination et une collaboration efficaces dans le groupe. Pour ce faire, nous avons échangé à chaque début de séance pour suivre les progrès et l'avancée du projet. Par ailleurs, nous avons mis en place un groupe de discussion en ligne ainsi qu'un Drive pour partager des idées et travailler ensemble. Tout au long du projet, nous avons également maintenu un dialogue régulier avec notre enseignant encadrant.

3. Travail réalisé et résultats

a. Evolution des modèles, influencés par la religion et la démarche scientifique

i. Description des différents modèles astronomiques

L'astronomie, l'histoire humaine et le progrès scientifique sont intimement liés. Une grande proximité entre religion et astronomie est observable depuis la préhistoire et nous verrons qu'elle se poursuit même à l'époque Galiléenne. Cependant, cette volonté de découverte s'accéléra et se concrétisa avec le « miracle grec » : les ioniens (avec notamment le premier modèle mécanique du monde qui est géocentrique avec une terre cylindrique) puis les pythagoriciens (qui avançaient une système où la terre et le soleil tournaient autour d'un foyer hypothétique commun) font de grandes avancées, puis arrivent Aristote et Ptolémée dont les modèles furent très hautement considérés jusqu'à l'époque de Galilée.

Dans le modèle d'Aristote (en partie inspiré par Platon qui soutenait que le monde était composé de 7 cercles inégaux qui correspondait aux rotation des 7 planètes du système solaire autour de la Terre) tout corps céleste est une sphère et tout mouvement est circulaire et uniforme. De plus, ce modèle est géocentrique : il place la Terre immobile, au centre du monde. Un défaut de ce système est qu'il n'arrive pas à expliquer les variations de luminosité entre les planètes au cours de l'année, qui étaient pourtant apparentes, car il supposait une distance égale entre les planètes et la Terre au cours de l'année. Il distingue deux mondes dont la limite est l'orbite lunaire, au-delà de cette orbite se trouverait le domaine de la perfection tandis qu'il abrite un monde corruptible. On observe donc déjà un lien étroit entre philosophie, religion et modèle astronomique. De plus, la trajectoire des astres serait uniquement circulaire autour de la Terre. Il faut noter que selon les observations de l'époque le modèle d'Aristote semblait adéquat.

Le second grand astronome Ptolémée repris le système d'Aristote en y apportant la modification suivante : Aristote considérait la distance entre la Terre et chaque planète comme constante, Ptolémée réfuta cette supposition et introduit l'idée que les planètes suivaient un petit cycle de rotation non centrée sur la Terre dont la rotation était, elle, centrée sur la Terre. On distingue donc deux cercles, un dont le centre est la Terre : le déférent et un autre dont le centre se situe sur le déférent : l'épicycle. Néanmoins Ptolémée constate lui-même des limites dans son approche des épicycles notamment avec certains épicycles qui décrivent des trajectoires non prévues dans son modèle.

Il est important de noter que, bien que le modèle géocentrique fut très largement adopté, il ne fit néanmoins pas l'unanimité car d'autres savants grecs avancèrent l'hypothèse de l'héliocentrisme tel que Héraclide et Aristarque de Samos. Ce dernier proposait un

système héliocentrique principalement : “Quant à la Terre, elle se déplace autour du Soleil sur la circonférence d'un cercle ayant son centre dans le Soleil.” (Archimède citant un livre perdu d'Aristarque de Samos). Néanmoins la Terre ne tournerait pas sur elle-même selon lui. Il y a également une implication religieuse car le Soleil serait le symbole du feu d'Hestia qui est le feu du foyer du monde.

Après l'époque riche en découverte de la Grèce, il n'y eu que peu de nouvelles découvertes jusqu'à ce que le monde arabo-musulman fasse de nombreux progrès entre le IX^e et XI^e siècle, ils se baseront sur les recherches d'Aristote et Ptolémée.

Ces recherches porteront donc parfois sur les modèles astronomiques proposés par les grecs. On note notamment Nasir al Din al Tusi qui repris les travaux de Ptolémée et essaya de réparer les erreurs de son modèle en l'enrichissant avec le “couple d'al-Tusi” qui permet de résoudre les problèmes des épicycles de Ptolémée. Le principe de ce couple consiste en un cercle qui tourne en glissant à l'intérieur d'un plus grand cercle.

Un autre scientifique arabe dont l'influence fut considérable sur Copernic fut Ibrahim Ibn al-Shatir, il apporte de grandes révisions au modèle de Ptolémée, et formule également l'hypothèse que tous les astres pourraient décrire un mouvement circulaire autour d'un même point sans avoir recours aux épicycles.

Copernic, bien que comme dit précédemment s'inspira des recherches des astronomes arabes, fut l'origine d'une révolution dans les modèles astronomiques suite à la publication de ses œuvres post mortem. En effet, il introduisit le système Copernicien. Ce système, contrairement au système de Ptolémée et toutes ses variantes, était héliocentrique : le Soleil prend place au centre du système solaire. Dans ce modèle, les planètes tournent sur elles même, la Terre ne faisant pas exception, et le Soleil est au centre de l'Univers. Certains historiens supposent que les travaux d'al-Tusi auraient été une source d'inspiration pour Copernic car celui-ci utilise également le couple d'al-Tusi dans son modèle. De plus, al-Shatir pourrait également être une inspiration pour Copernic qui aurait repris son idée d'un mouvement circulaire autour d'un même point, ajoutant que ce point serait le Soleil. Ce modèle bien que très proche de celui utilisé aujourd'hui contient cependant quelques erreurs. En effet, Copernic considérait le mouvement des planètes comme circulaire comme Ptolémée et Aristote. Cependant il fut démontré par Kepler, plus tard, qu'ils sont en fait elliptiques. De plus, on sait aujourd'hui que le Soleil ne constitue pas le centre de l'univers.

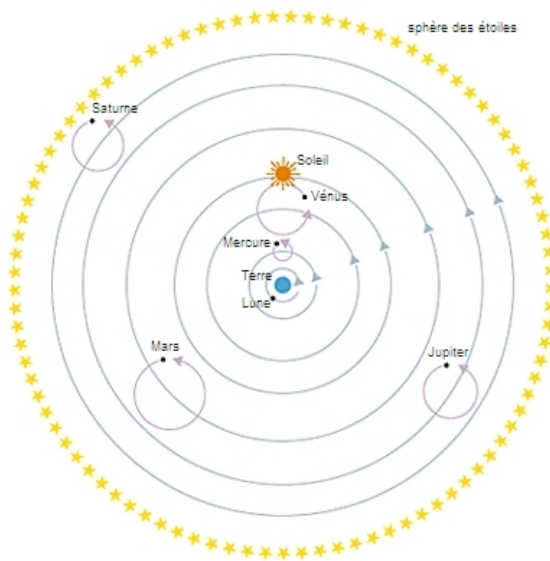


Figure 1: Schéma du système de Ptolémée
(https://www.larousse.fr/encyclopedie/data/images/1003600-Syst%c3%a8me_de_Ptol%c3%a9m%c3%a9e.jpg)

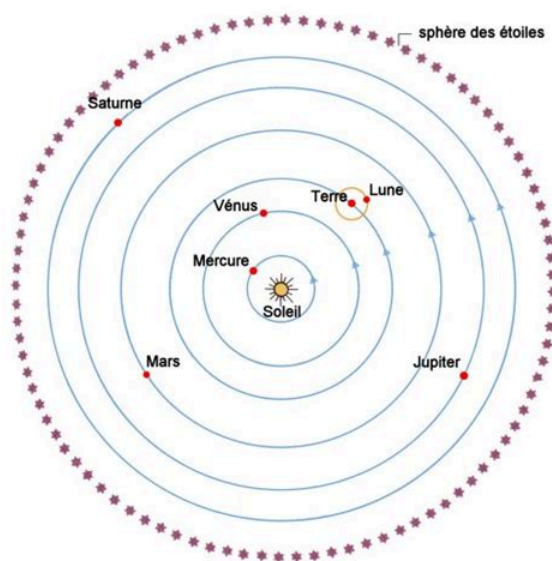


Figure 2: Schéma du système de Copernic
(<http://tm.cblprod.net/image03.html>)

Galilée de son côté a toujours été intimement convaincu de la véracité du modèle copernicien, bien qu'il enseignait à ses élèves le principe de l'école Aristotélicienne et le système de Ptolémée. Il écrit à Kepler en août 1597, "Depuis plusieurs années déjà je me suis converti à la doctrine de Copernic... j'ai écrit sur cette matière bien des considérations, des raisonnements et des réfutations, que je n'ai pas osé publier". Il défendait le système copernicien et va même plus loin en évoquant la possibilité que l'Univers soit infini, et que les étoiles soient d'autres Soleils, autour desquelles tournent d'autres planètes, peut être habitées. Galilée n'a pas forcément peur de défendre son opinion mais il veut pouvoir démontrer sa théorie de manière à ce qu'elle soit irréfutable en apportant des preuves concrètes, ce que nous verrons plus tard. Cependant, le modèle héliocentrique s'opposait au géocentrisme défendu par l'Église. Nous allons donc essayer de comprendre le rôle de l'Église et l'influence des croyances religieuses, vis-à-vis des questions scientifiques qui régissent le monde.

ii. La place de la religion dans le monde scientifique

Cette opposition entre modèles héliocentrique et géocentrique fut rapidement liée à des questions religieuses et philosophiques. Certains passages de la Bible ont également été interprétés comme étant en faveur du géocentrisme avec des passages tels que Genèse 1 :14-18 (Louis Segond)

“Qu'il y ait des luminaires dans l'étendue du ciel, pour séparer le jour d'avec la nuit; que ce soient des signes pour marquer les époques, les jours et les années; et qu'ils servent de luminaires dans l'étendue du ciel, pour éclairer la Terre. Et cela fut ainsi.”

et Ésaïe 40 :22(Louis Segond)

“C'est lui qui est assis au-dessus du cercle de la Terre, Et ceux qui l'habitent sont comme des sauterelles; Il étend les cieux comme une étoffe légère, Il les déploie comme une tente, pour en faire sa demeure.”

(il est important de noter que ce sont ici des extraits de Bible en français, néanmoins à l'époque la Bible était très populaire en latin)

On constate que ces passages ne sont pas explicites et que c'est plutôt leur interprétation qui laisserait entendre un sous-texte géocentrique. Bien que jusqu'à l'époque de Galilée elles furent interprétées comme des « preuves » du géocentrisme, la communauté biblique moderne (dans sa majorité) réfute de telles interprétations. Notamment avec le pape Jean Paul II, qui porta une attention toute particulière à réconcilier Galilée en le réhabilitant en 1992. Il est également important de noter le lien entre cette croyance et la scolastique, une philosophie très populaire au Moyen-Âge qui visait à concilier philosophie grecque et religion chrétienne.

Une hypothèse veut que le système aristotélicien fut le seul admis par l'Église de l'époque antique jusqu'à l'arrivée de Galilée. C'est une idée reçue. En effet, déjà à la période antique, les théories d'Aristote sont débattues et ne font pas l'unanimité. Il faut ensuite distinguer le Moyen-Âge, dans le monde musulman de celui dans le monde chrétien. Jusqu'au 13e siècle, les écrits d'Aristote ne sont pas lus dans le monde chrétien et le vecteur principal de diffusion des idées aristotélicienne, Saint Augustin, n'en fait que très peu mention. Ces idées ne sont donc que difficilement répandues. L'idée d'un Aristote faisant loi dans le Moyen-Âge est donc une idée reçue. Le monde musulman quant à lui avait beaucoup plus accès aux écrits antiques et, similairement à l'Antiquité, Aristote y était étudié (et même fort respecté) mais il était là encore sujet à débat. Avec la redécouverte des écrits antiques, Aristote refait son apparition dans le monde occidental, et est rapidement associé à la scolastique or une erreur serait de penser que la scolastique est l'expression directe de l'Église. Pour rappel, la scolastique était une philosophie qui cherchait à concilier apport de la science antique (et tout particulièrement d'Aristote) avec la théologie chrétienne. En effet, la scolastique était enseignée dans des écoles qui étaient relativement indépendantes de l'Église, cette dernière voyait même parfois d'un mauvais œil certaines théories aristotéliciennes, qu'elle considérait comme incompatibles avec ses principes. Ce n'est que lorsque Thomas D'Aquin, au XIII ème siècle, créera une version compatible avec l'Église des théories d'Aristote que celle-ci les acceptera.

Aristote ne fut donc pas la référence intouchable qu'on pensait qu'il était et cela joue un rôle prépondérant dans notre détermination pour savoir si oui ou non, Galilée a révolutionné des modèles scientifiques.

Il faut donc se mettre dans le contexte d'une époque où la religion a une place importante et est au centre de toutes les lois régissant l'Univers, pour comprendre pourquoi Galilée continue d'enseigner à ses élèves le modèle du géocentrisme alors que c'est en contradiction avec ce qu'il pense. Il souhaite attendre d'avoir des preuves concrètes de l'héliocentrisme avant de le défendre publiquement car se heurter aux doctrines religieuses et remettre en question des centaines d'années de croyances qui étaient jusqu'alors irréfutables, était susceptible de peine de mort. Au XVII^{ème} siècle, l'Église interdisait de soutenir n'importe quel modèle astronomique autre que le géocentrisme, comme celui de Copernic par exemple. Par ailleurs, Copernic n'eut pas à s'inquiéter de son sort car il meurt en 1543, en même temps que la parution de son ouvrage controversé ; *De Revolutionibus Orbium Coelestium* (Des révolutions des sphères célestes) prônant l'héliocentrisme. Cependant, ceux qui ont le malheur de s'opposer à l'Église de leur vivant, se retrouvent brûlés vif comme Giordano Bruno en 1600. Il fallut deux siècles pour que l'Église décrète officiellement que la Terre tourne autour du Soleil, soit en 1822 alors que Galilée et d'autres scientifiques avaient fait des découvertes en faveur de l'héliocentrisme de leur vivant. On peut donc se demander comment peut-on lier la théorie, enseignée par les contemporains et validée par l'Église, avec la pratique afin que les théories énoncées soient cohérentes vis-à-vis des phénomènes qui nous entourent.

Cette volonté de l'Église de l'époque d'imposer les théories de la scolastique comme des preuves de son modèle nous fait nous questionner sur ce qui permet d'établir une preuve scientifique au cours du temps.

iii. Démarches scientifiques

Afin de placer Galilée comme révolutionnaire des sciences, il est nécessaire de s'intéresser au-delà de ses découvertes scientifiques, c'est-à-dire à sa démarche scientifique et surtout en quoi elle se démarque de celle de ceux qui le précédaient. Encore une fois, il est difficile de déterminer une démarche scientifique qui représenterait celle du passé car elle fut sujette à débat et la popularité de ces différents courants fluctua beaucoup avec le temps. Néanmoins, on peut s'intéresser en particulier à celle d'Aristote pour deux raisons, la première est qu'elle est considérée comme la première démarche scientifique, elle incarne donc bien les sciences du "passé". La deuxième est que celle-ci était largement adoptée par la scolastique qui était très influente à l'époque de Galilée

La démarche scientifique d'Aristote se base sur une observation sensorielle pour comprendre les lois du monde. Pour lui "la science est la connaissance de l'individu du monde sensible en tant qu'il est intelligible, puisque seulement ce qui est intelligible est universel et nécessaire" selon le spécialiste de la philosophie Aristotélicienne Paolo C Biondi. Aristote place donc l'observation et l'induction comme fondation de sa démarche. Il part du principe que si une théorie marche pour certains cas, alors elle est valable pour tous les autres, tant qu'il n'y a pas de contradiction.

C'est dans ce principe même que se distingue Galilée. En effet, il place l'expérimentation au-dessus de n'importe quel autre concept. Cette démarche scientifique, qui était très rare pour son époque, pourrait provenir d'une habitude qu'un de ses enseignants lui a transmis : Ostilio Ricci, un ami de famille. C'est notamment grâce à lui que Galilée a abandonné ses études de médecine et s'est intéressé aux sciences. Ostilio avait pour habitude d'utiliser l'expérience pour lier la théorie à la pratique, ce qui influença sûrement Galilée dans sa manière d'aborder le monde. Il faut aussi s'intéresser au contexte de l'époque. Jusqu'alors les découvertes scientifiques étaient intimement liées aux croyances et à la philosophie comme nous l'avons vu précédemment avec l'exemple du scolastisme. Bien que le scolastisme ait atteint son apogée vers le Moyen-Age, il était toujours très présent dans les enseignes religieuses et dans l'enseignement universitaire qui était contrôlé par l'Eglise. Le manque de connaissance scientifique n'améliorait pas la situation et ne permettait pas non plus de démentir les spéculations philosophiques des phénomènes qui nous entouraient. Cependant, lorsque Galilée eut des preuves indéniables de certaines théories allant à l'encontre des modèles pré-existants depuis longtemps, comme pour le géocentrisme, il se rendit compte qu'il ne pouvait plus se fier à ce qu'il connaissait. L'expérimentation par répétition et l'observation fut la démarche qu'il instaura afin de pouvoir prouver ses théories. Une des illustrations les plus connues de cette méthode est l'expérience du plan incliné, mais aussi celles menées grâce à la lunette de Galilée, une de ses plus grandes découvertes que nous allons voir juste après.

b. Lunette de Galilée

i. Un peu d'histoire

Les lentilles sont à la base de la création de bons nombres de systèmes optiques, elles possèdent des caractéristiques spécifiques dont deux très importantes pour la réalisation de notre lunette, leur forme (convexité/concavité) et leur distance focale, qui est la distance séparant le centre optique de notre lentille au point où les rayons lumineux convergent tous.

Il semblerait que les traces les plus anciennes d'utilisation de lentilles remontent aux environs de 4000 ans avant JC à Ninive, découvertes par Sir Henry Layard (1817-1894). Ces morceaux de pierres transparentes, des morceaux de cristal de roche, de formes convexes permettaient de faire converger la lumière du Soleil sur un point, afin de brûler la zone visée. Cependant, le lien entre pierres transparentes et optique ne s'est fait qu'à partir de l'Antiquité, chez le philosophe Sénèque qui constate qu'un objet observé à travers un ballon de verre rempli d'eau apparaît plus gros. Mais c'est Moyen-Âge, que la pierre de lecture va se démocratiser auprès des scribes, agissant comme la première loupe utilisable par tous. Le premier type de lentilles à être apparu était donc les lentilles convergentes de forme convexe. Il faudra attendre le XVe siècle, pour que les premiers verres concaves apparaissent.

Tout d'abord, il faut savoir qu'il est impossible d'attribuer l'invention de la lunette à une personne précise. Une lunette est un dispositif optique composé d'au moins un verre appelé le plus souvent lentille et qui permet d'agrandir, de rétrécir ou d'améliorer la netteté d'une image d'un objet visualisé. Une première mention de la lunette d'approche ou longue-vue, se retrouve en 1538 dans l'*Homocentrica* de Jérôme Fracastor (1478-1553). Au XVI^e siècle, on trouve une description de la lunette, dans le livre *Pantometria* de l'astronome anglais Thomas Digges (1546-1595), relatant les expériences de son père Leonard (1515-1559), et aussi dans ceux de Giambattista della Porta (1535-1615), notamment dans son ouvrage *La Magie naturelle* (1589).

Au XVII^e siècle, les lentilles sont principalement pensées et fabriquées pour corriger la vue de près et ont donc des caractéristiques spécifiques liées à cette utilisation. Les lentilles n'ont pas besoin d'être d'une haute qualité sur l'entièreté de leur surface mais seulement en leur centre puisque la pupille a un diamètre de 2 à 3 mm au maximum quand il y a de la lumière. Une seule petite partie située au centre de la lentille aide l'utilisateur à mieux voir car les lunettes de vue sont placées très proches des yeux.

Ces défauts ne posent donc pas de problème pour corriger la vision, par contre pour fabriquer une lunette pour observer le ciel, ces défauts ne sont plus négligeables. En effet, lorsqu'une lentille sert d'objectif pour une longue-vue, elle est placée à une grande distance de l'œil, c'est alors que l'entièreté de sa surface sert à former l'image d'un objet lointain en son plan focal. C'est donc à ce moment que les lentilles du XVII^e siècle montrent leurs

limites. Les aspérités et irrégularités empêchent la fabrication de lunettes permettant de voir au loin.

C'est pourquoi pour fabriquer la lunette d'approche, Hans Lipperhey (1570-1619) a dû pallier ce problème en masquant les bords imparfaits de la lentille à l'aide d'un diaphragme.

Ainsi, Rolf Willach, un ingénieur et chercheur indépendant spécialisé dans l'optique ayant travaillé à l'institut d'astronomie de Berne, affirme que ce n'est pas grâce à une amélioration significative de la qualité des lentilles que les lunettes ont pu être inventées. Ce serait pour lui, grâce à l'invention du diaphragme, un système mécanique capable de modifier la quantité de lumière passant à travers la lentille pour ajuster la netteté de l'image notamment.

Et justement au cours de mai 1609, Galilée reçoit une nouvelle en apparence insignifiante : l'opticien hollandais, Hans Lippershey, a fabriqué en 1608 un jouet qu'on qualifie "d'instrument pour voir au loin", la lunette d'approche ou longue-vue. La lunette d'approche se compose d'une lentille convergente et d'une lentille divergente. Le choix de ces lentilles est fait afin d'éviter l'inversion de l'image comme c'est le cas en utilisant deux lentilles convergentes. Cependant, les contemporains n'y voient pas d'intérêt scientifique excepté pour Galilée. Il recrée donc cet objet car, pour lui, l'expérience est le premier moyen de découvrir et de vérifier les lois physiques. Par la suite, il observera un monde encore inconnu : le ciel.

La lunette de Galilée est un objet optique composé de deux lentilles, une convexe permettant de faire converger les rayons lumineux provenant d'un objet sur un plan que l'on appelle le plan focal ; et une concave, qui permet de faire diverger les rayons lumineux. Cette lunette est précurseuse des premières observations instrumentales de notre système solaire.

Après plusieurs dizaines d'essais infructueux, Galilée parviendra à produire une première lunette qui permettra d'avoir un grossissement $\times 8$. Le grossissement correspond à l'angle sous lequel est vue l'image formée par le système optique et l'angle sous lequel est vu l'objet à l'œil nu. Après un tel succès, il décide donc d'améliorer sa nouvelle invention. La version finale de cette première lunette astronomique composée d'une lentille convexe et concave dans un tube de plomb, permet d'avoir un grossissement jusqu'à $\times 14$. Enfin, Galilée entreprend la fabrication d'une seconde lunette plus performante et plus ergonomique. Celle-ci permet au scientifique d'atteindre un grossissement $\times 20$.

C'est alors que nous avons décidé de nous mettre dans la peau du scientifique italien afin de déterminer la difficulté de la tâche qu'est d'explorer les cieux, nous allons donc reproduire une lunette de Galilée et discuter de sa précision et de sa difficulté de création.

ii. Fonctionnement théorique de la lunette

Une lunette de Galilée se compose de deux lentilles minces, une lentille mince convergente (L_1) pour l'objectif et une lentille mince divergente (L_2) pour l'oculaire de distances focales respectives f_1' et f_2' , disposées de telle manière que le foyer image de l'objectif et le foyer objet de l'oculaire soient confondus. Le choix d'une lentille convergente et d'une lentille divergente permet au système de former une image droite et non inversée comme c'est le cas pour la lunette astronomique.

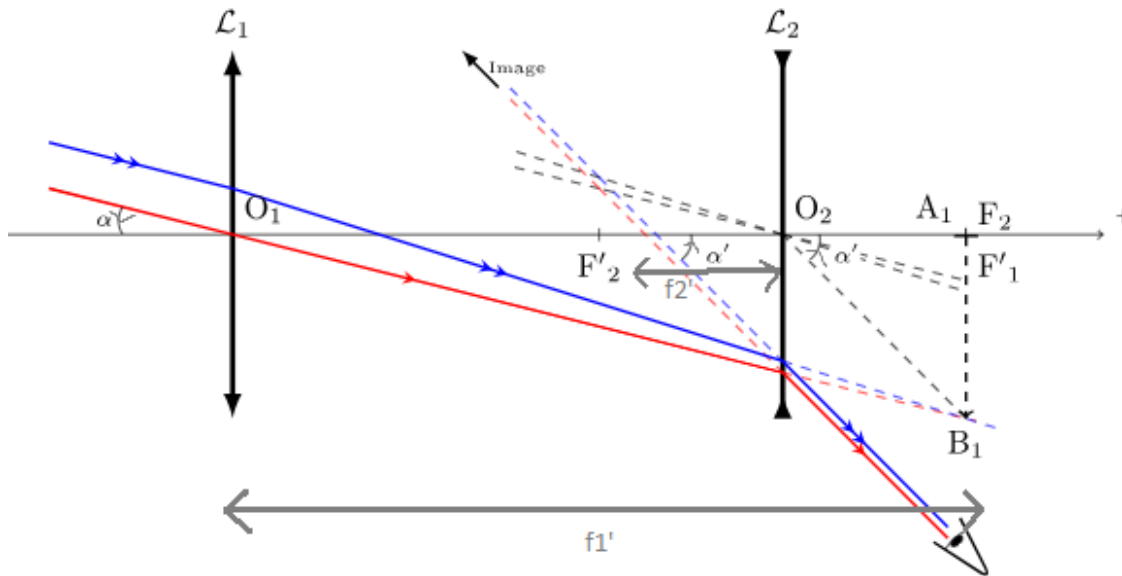


Figure 3: Schéma optique de la lunette de Galilée (Source: <https://www.physagreg.fr/images/schemas/optique/lunette-galilee.svg>)

Il est important de noter que grâce au schéma optique, on peut affirmer que la lunette de Galilée est un système afocal c'est-à-dire que des rayons incidents parallèles entre eux ressortiront de la lunette parallèles entre eux.

Nous allons maintenant démontrer la formule du grossissement:

$$\text{Grossissement : } G = -\frac{f_1'}{f_2'} = \frac{\alpha'}{\alpha}$$

Avec α et α' respectivement l'angle entre l'axe optique et l'angle entre le rayon sortant et l'axe optique

Comme la lunette est orientée vers l'objet, nous pouvons considérer les angles comme quasiment nuls.

On a donc le développement limité suivant:

$$\sin(\alpha) \approx \alpha \text{ et } \sin(\alpha') \approx \alpha'$$

Pour ce système on a:

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha} \approx \frac{\sin(\alpha)}{\sin(\alpha')} = \frac{\frac{A_1B_1}{f_2'}}{\frac{A_1B_1}{f_1'}} = -\frac{f_1'}{f_2'}$$

Nous arrivons donc au résultat prévu, c'est-à-dire que le grossissement est égal à l'opposé du rapport des distances focales. Grâce à cette formule, nous pourrions vérifier le bon fonctionnement de notre lunette en comparant le grossissement théorique et expérimental.

iii. Fabrication de la lunette

Au départ, l'objectif de notre binôme était de fabriquer une lunette de Galilée suffisamment performante pour observer les cratères de la Lune et ainsi reproduire une des observations de Galilée.

Nous avons tout d'abord réfléchi à la modélisation de la lunette. Nous avons choisi les composants de notre lunette pour être en accord avec la deuxième lunette de Galilée, qui se compose d'une lentille convergente de +1000mm de focale et une lentille divergente de -50mm de focale. Elle possède donc un grossissement de 20 qui permet d'observer les cratères de la Lune. Afin d'obtenir ce grossissement, nous avons donc opté pour une lentille convergente biconvexe ayant une distance focale de +1000mm et une lentille divergente biconcave ayant une distance focale de -50 mm.

Pour le corps de la lunette, nous avons fait le choix des dimensions suivantes, afin de pouvoir respecter les distances focales théoriques tout en pensant que nos lentilles comportaient des valeurs d'incertitudes potentiellement non négligeables : un tube PVC de 83,5 cm de long comprenant l'objectif pour le corps de la lunette et un autre tube PVC de 20 cm de long comprenant l'oculaire, venant s'insérer dans le corps de la lunette. Cela nous fait une lunette d'une longueur maximale de 103,5 cm.

Concernant le maintien en place des lentilles, nous avons choisi de placer quatre vis à une extrémité du corps de la lunette pour faire une sorte d'étau qui maintiendra en place le manchon comportant l'oculaire. Cette solution est plutôt efficace en plus d'être simple à mettre en place. Pour maintenir l'objectif dans son manchon, nous avons fabriqué des supports permettant de maintenir ce dernier dans le manchon.

La principale difficulté que nous avons rencontrée concerne la mise au point de notre lunette pour obtenir une image nette en sortie d'oculaire. En effet, nous avons mis en place le protocole suivant pour essayer de visualiser une image nette :

- Fabrication d'un objet à l'infini grâce à une lampe et une lentille convergente
- Placer l'objectif en sortie de cette lentille
- Placer l'oculaire à une distance de 950 mm soit sa position théorique
- Déplacer le manchon comprenant l'oculaire jusqu'à obtenir une image nette en sortie de la lunette.
- Mesurer la taille de l'image obtenue
- Calcul du grossissement et comparaison avec le grossissement théorique

Or, en nous basant sur les distances théoriques permettant le bon fonctionnement du système, il nous était impossible d'obtenir une image nette à l'infini.

Cette difficulté nous a même poussé à fabriquer une lunette de Galilée sur banc optique avec des lentilles de plus petite focale en valeur absolue afin de vérifier que nos calculs théoriques étaient bons.

Nous avons utilisé une lentille convergente +300 mm et une lentille divergente -100 mm, afin de vérifier si le grossissement escompté était de $\times 3$. Là encore, le rayon lumineux diffusait beaucoup vers le haut, ce qui empêchait de projeter l'image sur un écran. Nous avons donc

utilisé un écran artificiel, qui était un cahier rempli de feuilles blanches, pour pouvoir trouver une image nette et agrandie sur laquelle nous pouvions faire des mesures.

À l'origine, l'objet lumineux avait une taille mesurée à la règle de $(9 \pm 0,5)$ mm d'une extrémité à l'autre dans le sens de la largeur.

À la sortie de la lentille divergente, nous avons une image avec une grandeur d'environ $(32 \pm 0,5)$ mm dans le sens de la largeur.

Étant donné la faible précision de notre image à cause de la diffusion du rayon lumineux, déterminer une image avec un grossissement égal à trois exactement était une mission très compliquée. Le grossissement appartient à l'intervalle $[3,36;3,7]$, c'est 10 à 20% supérieur au grossissement théorique. Cela s'explique par les incertitudes expérimentales, d'une part les incertitudes sur les lentilles mais surtout les incertitudes de mesures sur la taille de l'image et de l'objet.

Il fallait seulement se contenter de prouver que la théorie fonctionnait aux incertitudes près pour pouvoir continuer à nous pencher sur les réglages de notre lunette.

Nous étions donc sûrs que le modèle de la lunette de Galilée fonctionnait. Nous avons donc essayé plusieurs expériences, afin de déterminer les erreurs potentielles de notre manipulation avec notre lunette de Galilée expérimentale.

Dans un premier temps, nous pensions que notre lunette diaphragmait trop la lumière et que cela posait problème pour obtenir notre image à l'infini. Autrement dit, bien que nos lentilles aient un diamètre de 40mm, en réalité l'agencement des tubes diminue grandement la surface traversée par la lumière. Mais après des recherches sur des forums d'astronomie nous avons écarté cette hypothèse car des internautes avaient fabriqué des lunettes plus diaphragmées que la nôtre. Nous pensions alors que l'image se formait trop tôt à l'intérieur du tube, et que notre oculaire n'arrivait pas à se focaliser sur l'image. Cependant, nous avons écarté cette hypothèse dès le départ car nous avons commandé les lentilles chez le fournisseur officiel des lycées et des activités pédagogiques scientifiques : Jeulin.

Afin d'être sûr de cette hypothèse, nous avons démonté notre lunette et commencé à regarder où est-ce que l'image se formait à travers la lentille convergente de l'oculaire.

En isolant la lentille convergente et en essayant d'avoir une image nette à l'infini, nous nous sommes rendus compte que l'image ne se formait pas à la distance indiquée sur la lentille convergente, qui était de + 1000 mm mais bien d'environ environ 700 mm.

Cette mesure prétendait que notre lentille convergente avait une marge d'erreur de 30 %.

Lors de la séance de la semaine qui suivit, nous avons donc décidé de nous pencher davantage sur le problème, et de déterminer si le matériel d'origine n'était pas la cause de notre échec de la construction de notre lunette de Galilée.

Durant cette tentative de reproduction de construction d'une lunette de Galilée, nous avons donc fait face à la dure réalité de la physique expérimentale, qui est caractérisée par un nombre d'échecs important avant de trouver réponse à sa question, ou même de réussir à créer ce que l'on souhaitait.

C'est en ce sens que nous nous rapprochons le plus de Galilée, c'est-à-dire expérimenter, échouer et recommencer afin de réussir à trouver des résultats. Là où Galilée fut un génie de son temps, c'est dans sa volonté inébranlable de réussir à observer le ciel. Après plusieurs

dizaines d'échecs, de construction, de lentilles, infructueuses et imprécises, il réussit tout de même à créer une lentille d'une précision et d'un grossissement remarquable au fil des années. Et justement, grâce à de dernières lentilles plus précises, il put faire des découvertes étonnantes pour l'époque, et même primordiales pour l'astronomie moderne.

c. Ses découvertes

Au mois de mars 1610, Galilée publie un petit livre en latin *Sidereus Nuncius* où il reporte toutes ses observations astronomiques grâce à sa nouvelle invention que nous avons mentionnée précédemment représentée en figure 3, il est le premier à observer le ciel de si près. Il s'intéresse d'abord à l'astre le plus proche de notre planète, la Lune qu'il a représenté dans ses carnets en figure 1. Il découvre qu'elle n'est pas une boule lisse et parfaite mais qu'elle est en réalité accidentée et irrégulière. "Elle est donc montagneuse", se dit Galilée en observant des ombres se déplaçant sur la Lune grâce au Soleil.

De plus, il décrit les cratères que nous connaissons maintenant de motifs "comme sur la queue d'un paon". Il va encore plus loin en estimant l'altitude des montagnes. Pour effectuer ses approximations, Galilée a besoin de connaître la longueur de l'ombre projetée par la montagne sur la Lune mais aussi la valeur de l'angle incident de la lumière de Soleil. Ce dernier peut être estimé en fonction des phases de la Lune. Grâce à des calculs de trigonométrie, il conclut que la Lune possède des montagnes plus hautes que celles présentes sur Terre. Elle est donc plus accidentée que la Terre. Bien que ses calculs restent des approximations, ses valeurs se révéleront plus tard être tout de même proches de la réalité. Il dévoile aussi le mystère de la "lumière cendrée de la Lune", qu'on appelle communément le clair de Terre, qui est l'éclairement de la Lune par la lumière solaire renvoyée par la Terre. C'est la lumière du Soleil reçue par la Terre renvoyée sur la Lune. Elle correspond à la partie moins éclairée que l'on peut tout de même distinguer, en figure 2. Galilée expose que cette lumière provient de la Terre, qui réfléchit la lumière du Soleil vers la Lune, permettant ainsi de voir la partie de la Lune qui n'est pas directement éclairée par le Soleil.

Bien sûr, il ne s'arrête pas au satellite de la Terre. Il décide donc d'observer les autres planètes du système solaire tout en améliorant le grossissement de ses lunettes astronomiques. Tout d'abord Jupiter, plus précisément ses trois petits astres. Dans un premier temps, il pense que ce sont des étoiles. Cependant, en étudiant le mouvement de Jupiter et la position de ses astres, il remarque qu'ils se déplacent autour de celle-ci. Ils les appellent donc des planètes. Cette preuve irréfutable appuie la théorie qu'il pense depuis longtemps, si Jupiter a des planètes tournant autour d'elle et non autour du Soleil alors ce serait possible que la Terre tourne autour du Soleil, une théorie réfutée par la religion.

Ensuite, il s'intéresse à Saturne et ses anneaux qu'il fut le premier à observer, or sa lunette n'était pas assez performante pour les voir clairement. Il imagine que ces deux tâches de part et d'autre de Saturne, comme on peut le voir dans la représentation I de la figure 3, sont des satellites. Enfin, il décide d'observer Vénus. En décembre 1610, Galilée dit à Kepler "La mère des amours imite les figures de Diane". Cette phrase annonce une découverte capitale : Vénus a des phases, comme la Lune. Ce qui montre que Vénus peut se trouver devant le Soleil mais aussi derrière or dans le modèle de l'époque, les astres ne peuvent pas se croiser donc ont une place fixe. Encore une preuve soutenant la théorie de l'héliocentrisme.

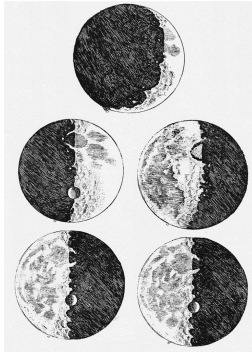


Figure 1: Dessin de Galilée de la surface de la Lune



Figure 2 : Clair de Terre prise par Martial Figenwald à l'aide d'une lunette

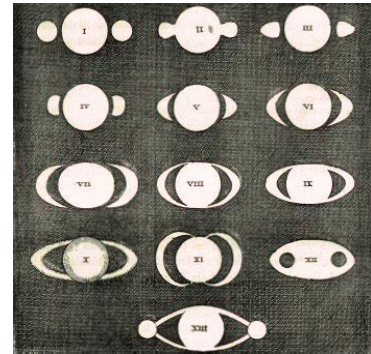


Figure 3 : Dessins de Christophe Huyghens représentant l'évolution de la perception de Saturne

Ses découvertes lui ont valu une invitation à Rome, fin mars 1611, pour les présenter à des personnes illustres comme le pape Paul V. Cependant, ses idées se répandent de plus en plus dans le monde scientifique et ne plaisent pas à tous. Bien que certains le soutiennent et admirent son travail, d'autres restent sceptiques et hostiles. Notamment Roberto Bellarmine, qui a participé à la condamnation à mort de Giordano Bruno, qui souhaite mener un procès contre Galilée avec le soutien de l'Inquisition, car il juge que certaines de ses théories sont non conforme à la foi catholique. De plus, Bellarmine, un fervent croyant et non partisan de Galilée, profite des contradictions entre l'Écriture et la théorie de Copernic pour attaquer Foscarini, un élève de Galilée, en disant que cette manière de pensée est "très dangereuse, et de nature non seulement à indigner philosophe et théologiens, amis aussi à faire du tort à notre sainte foi en contredisant l'Église". Galilée se retrouve tiraillé entre sa foi et ses idées scientifiques. Il choisit donc de se rendre à Rome pour défendre ses idées et tenter de les prouver devant l'Église et les inquisiteurs. Il essaye donc de prouver que les idées de Copernic ne sont pas en contradiction avec les croyances religieuses en exposant les découvertes astronomiques que nous avons évoquées précédemment, mais aussi en soutenant que les textes bibliques ne doivent pas être interprétés de manière littérale lorsqu'il évoque le cosmos. Ce qu'il réussit à faire auprès de quelques personnes qui n'avaient malheureusement pas une place importante dans l'Église, pour qu'il s'en sorte sans sanction. Il finit par obtenir une audience de Bellarmine le 26 février 1616 cependant l'Inquisition a déjà rendu un verdict : "L'idée que la Terre tourne autour du Soleil est idiote, absurde, philosophiquement et formellement hérétique, car elle contredit explicitement la doctrine de la Sainte Écriture". Si Galilée continue de se proclamer copernicien, il risque la prison.

Galilée met du temps à se remettre de cet échec cependant il ne change pas pour autant d'avis. Il publie en 1632, *Dialogue sur les deux principaux systèmes du monde* demandé par le pape Urbain VIII, qui n'est autre que le cardinal Barberini, un ami de Galilée. Cet ouvrage met en scène trois personnages débattant ensemble, Salviati pour l'héliocentrisme, Simplicio pour le géocentrisme et Sagredo sans opinion prévalente. La pape spécifie à Galilée de ne pas prendre parti pour un personnage, donc de rester neutre sur la

question. Cependant, il ne respecte pas cette consigne et montre clairement sa préférence pour le système héliocentrique en se moquant de Simplicio, dont le nom est peu flatteur, qui déplut fortement au pape et à l'Église.

A 69 ans, il est convoqué à Rome devant le tribunal inquisiteur catholique sous menace de torture et le 22 juin 1633 il renonce publiquement à ce qu'il a défendu toute sa vie, l'héliocentrisme. Ses amis étant morts ou craignant la colère de l'Église n'ont pas pu l'aider afin qu'il s'en sorte aussi bien qu'avant. Il est condamné à l'emprisonnement à vie. Il se fait donc assigner à résidence un an plus tard à Arcetri en Florence, où il y séjournera jusqu'à la fin de ses jours. Il passe le restant de sa vie à rédiger ce qu'il a découvert et publie clandestinement un livre sur la mécanique à Amsterdam, Discours et démonstrations mathématiques concernant deux sciences nouvelles, en 1638 où l'on peut retrouver les traces de la deuxième expérience que nous allons étudier dans ce rapport : le plan incliné.

d. Plan incliné

i. Un peu d'histoire

En 1638, Galilée publie donc *Discours et démonstrations mathématiques concernant deux sciences nouvelles*, traduit de l'italien *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*. Il y expose notamment ses expériences et découvertes en mécanique ainsi que sur la résistance des matériaux. Dans ce livre, il décrit avec précision les expériences qu'il a réalisées sur l'étude du mouvement à l'aide de trois personnages, semblables à ceux présents dans son ouvrage *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* et ayant des convictions différentes. Le premier, Salviati, est un noble florentin et porte-parole de Galilée et le second, Sagredo, est un noble vénitien neutre et curieux. Enfin, le dernier, Simplicio, est un partisan d'Aristote.

Dans son ouvrage, Galilée s'intéresse à la chute des corps. Il fait l'hypothèse que, dans le vide, tous les corps chutent à la même vitesse de manière indépendante de leur masse. Ainsi, selon Galilée, la différence de vitesse de chute entre deux corps de masse différente, observée sur la Terre, ne s'expliquerait pas par cette différence de masse mais par la résistance de l'air. Cette hypothèse est contraire à la pensée d'Aristote qui affirmait que les corps lourds ont une vitesse de chute supérieure aux corps plus légers. Cependant, cette hypothèse est réfutée par Galilée, puisqu'elle ne permet notamment pas d'expliquer pourquoi deux corps de même masse mais de forme différente n'ont pas une vitesse de chute identique. C'est pourquoi Galilée fait l'hypothèse que la différence de vitesse observée entre la chute d'un corps lourd et celle d'un corps léger ne s'explique pas par leur différence de masse, mais par la résistance de l'air. Il suppose alors que dans le vide, ces deux corps chuteraient à la même vitesse. Pour Galilée, le vide signifierait une absence totale de matière dans un milieu. Il n'y aurait ainsi pas de résistance de l'air ce qui permettrait à deux objets de masse différente d'avoir une vitesse de chute identique.

Dans son livre, Galilée décrit en particulier deux expériences de mécanique. La première porte sur l'étude du mouvement d'un pendule et la seconde sur le mouvement d'une bille de bronze glissant le long d'un plan incliné. Ces deux expériences permettent de simuler le mouvement d'un corps en chute libre, Galilée n'avait pas les moyens de reproduire la chute d'un corps dans le vide. En effet, la première pompe à vide, permettant de créer un vide partiel, a été inventée quelques années plus tard par Otto von Guericke en 1654. Ces expériences ont l'avantage de ralentir fortement le mouvement, par rapport à la chute libre et donc d'en simplifier l'étude. Il va ainsi réussir à montrer par l'expérience que la distance parcourue est proportionnelle au carré du temps.

Nous nous sommes principalement intéressés à l'expérience du plan incliné. Ainsi, grâce à cette expérience, nous pouvons montrer que la distance parcourue, par un corps en chute libre, est proportionnelle au carré du temps. Galilée a lui-même construit son plan incliné en bois dont il précise les dimensions dans son livre. Ce plan incliné était assez grand

puisqu'il mesurait environ 7 mètres de long. Un exemplaire de ce plan se trouve au musée Galilée à Florence.

Lors de cette expérience, Galilée fait face au problème de la mesure du temps. En effet, à cette époque, aucun instrument ne permet de mesurer le temps avec précision. Ainsi, il commence par utiliser son oreille. Il dispose le long de son plan incliné des petites clochettes, qu'une boule de bronze tapera au fur-et-à-mesure de son passage sur le plan. Il place les espaces d'abord à équidistance et constate que les sons produits ne sont pas réguliers. Il les déplace donc pour obtenir des sons de cloches réguliers et relève la distance entre ces clochettes. Il observe ainsi que la bille accélère.

Galilée utilise ensuite l'eau pour améliorer la précision de ses mesures. En effet, il utilise un récipient percé pour prélever un volume d'eau, proportionnel au temps que la bille met pour parcourir le plan incliné. Le volume d'eau récupéré était donc pesé pour obtenir une équivalence en temps. Ainsi, grâce à la mesure de ces volumes d'eau, il a pu démontrer que la distance parcourue est proportionnelle au carré du temps.

ii. Reproduction de l'expérience

Nous avons souhaité reproduire l'expérience du plan incliné en construisant nous-même un plan incliné, semblable à celui de Galilée mais de plus petite taille. Le but était de se rapprocher au maximum des moyens utilisés à l'époque par Galilée. Nous avons reproduit les deux protocoles décrits précédemment, d'abord en utilisant des clochettes et ensuite, en mesurant le temps à l'aide de l'eau.

Ainsi, nous avons commencé par placer les quatre clochettes sur notre plan incliné à intervalles réguliers, comme l'avait fait Galilée. Nous avons fait l'hypothèse que la bille était suffisamment lourde pour avoir une vitesse constante, c'est-à-dire que les clochettes ne ralentissaient pas son parcours. Nous avons évidemment remarqué que les sons produits n'étaient pas réguliers. Nous avons donc pu confirmer cette évidence désormais pour nous : la bille accélère.

Nous avons ensuite tenté de déplacer les clochettes pour que les sons produits deviennent réguliers. Nous avons constaté que ce n'était pas évident de trouver avec précision les emplacements des clochettes. Nous avons tout de même relevé les distances qui séparaient les clochettes.

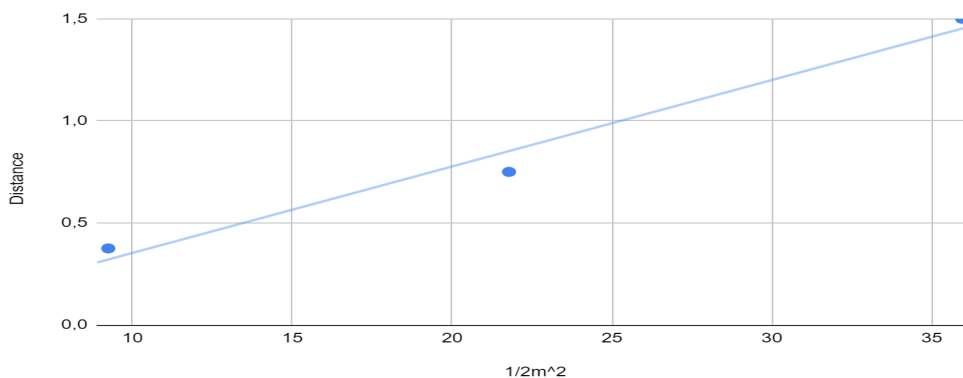
	la première et la deuxième	la deuxième et la troisième	la troisième et la dernière
Distance entre les clochettes	21 cm	40 cm	51,5 cm
Distance entre les clochettes (théorique)	25.3 cm	42.2 cm	59.1 cm

Tableau des distances entre les clochettes

Les distances trouvées expérimentalement sont cohérentes par rapport aux valeurs attendues cependant l'écart peut s'expliquer par le fait que la bille a un temps de parcours très court. Ainsi il est difficile de trouver avec précision les emplacements des clochettes seulement au son. Néanmoins, cette imprécision montre en effet que la bille a un mouvement accéléré car plus la bille parcourt de distance plus sa vitesse croissante rend difficile l'expérience car la portion du plan dans laquelle on peut placer une clochette tout en entendant un son régulier devient plus grande quand la bille accélère. Il est alors cohérent que le dernier intervalle soit celui avec le décalage le plus important de sa valeur théorique.

Enfin, nous avons utilisé l'eau pour mesurer le temps. Nous avons, en premier, récupéré une masse d'eau correspondant au parcours complet du banc ($m = 8,48 \text{ g}$), puis nous avons relevé une masse d'eau correspondant au parcours de la moitié ($m_{1/2} = 6,6 \text{ g}$) puis d'un quart du banc ($m_{1/4} = 4,3 \text{ g}$). Pour chaque distance, nous avons effectué plusieurs fois la mesure de la masse d'eau pour calculer une moyenne.

droite de proportionnalité



Masse d'eau moyenne en fonction de la distance

Dans les deux cas nous avons pu nous aussi vérifier que la distance était proportionnelle au carré du temps, soit la formule $d = 1/2 \times k \times t^2$. Cette formule sera démontrée plus tard, en 1687, par Isaac Newton, grâce au calcul intégral.

4. Conclusions et perspectives

Galilée a fait de nombreuses découvertes durant toute sa vie jusqu'au moment de mourir en 1642 à Arcetri, à l'âge de 77 ans. Il a vécu dans une époque où les croyances religieuses et les découvertes scientifiques étaient intimement liées, surtout lorsque le domaine du divin comme l'espace entre en conflit avec la réalité soutenue par certains scientifiques. Bien qu'il s'exposait à des risques en réfutant le géocentrisme, Galilée n'a cessé de placer l'expérimentation au-dessus de tout et a notamment créé la lunette de Galilée. C'est grâce à ses expériences qu'il apporta des preuves tangibles de l'héliocentrisme et bien plus encore sur d'autres domaines, comme la chute des corps avec le plan incliné. Il laissa aussi derrière lui des méthodes et des connaissances, qui ont permis à de nombreux scientifiques de continuer à travailler sur ses recherches plus tard.

De plus, il a été le premier à observer le ciel d'aussi près, notamment les planètes du système solaire. Cependant, nous n'avons jamais évoqué Neptune, qui est la planète la plus éloignée du Soleil. Un raisonnement logique serait de penser qu'il n'a simplement pas pu l'observer à cause du faible taux de grossissement des lunettes astronomiques de son époque. Mais l'histoire démontre le contraire grâce aux recherches de deux savants anglophones Charles Kowal et Stillman Drake en 1980. Il est bon de savoir qu'avant 1980, la première observation de Neptune était attribuée à Lalande en 1795, qu'il avait d'abord confondue avec une étoile, puis en 1846 où Galle l'identifie en temps que planète. A leur plus grande surprise, ces deux chercheurs découvrent que Galilée avait observé à deux reprises un astre qu'il n'a pas pu définir dans ses carnets en 1612. Grâce aux avancées technologiques et aux calculs précis d'ordinateurs, ils ont remarqué que l'emplacement de cette astre reporté par Galilée correspondait à une minute d'angle près, à l'emplacement de Neptune en 1602. Lalande n'est donc pas le premier à avoir observé Neptune mais c'est bien notre savant italien. De plus, Galilée a répandu l'utilisation de la lunette pour la recherche astronomique, permettant notamment à Huygens de découvrir en 1655 la nature des deux tâches de part et d'autre de Saturne ou encore les anneaux d'Uranus en 1671.

Enfin, ses travaux concernant la chute des corps ont inspiré de nombreux scientifiques intéressés par l'étude des mouvements. Par exemple, Descartes qui se penchera sur l'étude de l'ouvrage *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, reprochera à Galilée de ne pas avoir cherché plus loin, notamment en ce qui concerne les causes de l'héliocentrisme. Car contrairement à Kepler, Galilée a observé l'espace mais il est important de souligner que l'on retrouve plus d'écrits concernant l'étude du mouvement des objets sur Terre, que celles des planètes comme la gravité. Galilée et Kepler ne se sont d'ailleurs jamais rencontrés mais ils avaient conscience de leurs travaux respectifs, qui ont contribué à la découverte de la fameuse loi de la gravitation énoncée par Newton en 1687.

Notre projet a été très enrichissant malheureusement nous n'avons pas eu le temps d'évoquer des axes qui semblaient pertinents. Notamment comment Galilée a-t-il fait pour estimer la hauteur des montagnes de la Lune ? Aurait-il pu estimer une valeur de l'accélération de la pesanteur à la surface de la Terre, notamment grâce au plan incliné ? Est-ce que d'autres théories scientifiques de Galilée ont été aussi débattues par l'Eglise et sujettes à des controverses ?

5. Bibliographie

- “Galilée, Le Messenger Des Étoiles” livre de Jean-Pierre Maury, Découvertes Gallimard, 1986
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Galil%C3%A9e_\(savant\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Galil%C3%A9e_(savant)) : Page wikipédia sur Galilée (25/05/2024)
[https://www.treccani.it/enciclopedia/ostilio-ricci_\(Dizionario-Biografico\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/ostilio-ricci_(Dizionario-Biografico)/) : Article parlant de la vie d'Ostilio Ricci, un des premier enseignant de Galilée
https://www.persee.fr/doc/rhs_0048-7996_1965_num_18_2_2414 : Extrait d'un article publié en 1965 et écrit par Dominique Dubarle sur la méthode scientifique de Galilée
https://fr.wikipedia.org/wiki/Dialogue_sur_les_deux_grands_syst%C3%A8mes_du_monde : Page wikipédia du livre “Dialogue sur les deux grands système du monde” écrit par Galilée (25/05/2024)
<https://www.nationalgeographic.fr/sciences/Galilée-le-physicien-devenu-astronome-de-genie> : Page rédigé par National Geographic sur Galilée et ses découvertes
https://www.icem-pedagogie-freinet.org/sites/default/files/N91_Galilée.pdf : Document pédagogique retraçant les grandes découvertes de Galilée en les contextualisant
<https://www.zeiss.fr/vision-care/sante-oculaire-et-soin-des-yeux/comprendre-la-vision/l-histoire-des-lunettes.html>
<https://www.snof.org/encyclopedia/les-lunettes-%C3%A0-travers-les-temps> : Articles sur l'histoire de la création de la lunette
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Diaphragme_\(optique\)#Principe_de_fonctionnement_optique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Diaphragme_(optique)#Principe_de_fonctionnement_optique) : Page intéressante sur les diaphragmes (08/05/2024)
https://fr.wikipedia.org/wiki/Lunettes_de_Galil%C3%A9e : Page Wikipédia sur les lunettes de Galilée
“The long route to the invention of the telescope” livre de Rolf Willach, 1er Janvier 2008
<https://telescopehistory.wordpress.com/2012/02/27/test-2/> : Article de Yuri Petrunin sur le développement des télescopes
<https://www.dailymotion.com/video/xgl4ab> : Vidéo d'une reconstitution historique de l'expérience du plan incliné de Galilée de Curiosphère TV
<https://pixees.fr/plan-incline-de-Galilée/> : Article décrvant le protocole de construction et de manipulation du plan incliné publié en Mars 2020 par le site Pixees
<https://www.youtube.com/watch?v=5j-4A1WBS1k> : Vidéo complémentaire de l'article ci-dessus expliquant l'expérience du plan incliné de Galilée
https://media4.obspm.fr/public/ressources_lu/pages_kepler/mctc-aristote.html : site interessant sur le modèle d'aristote
<https://astronomes.com/histoire-astronomie/astronomie-grecque/> : site interessant sur les différents modèles grecs
<https://fr.wikipedia.org/wiki/H%C3%A9liocentrisme> : article utilisé en partie pour comprendre le modèle de copernic
<https://jcmarot.com/wp-content/uploads/2019/05/discours.pdf> : extrait du livre “Discours concernant deux sciences nouvelles” écrit par Galilée
<https://accromath.uqam.ca/2016/10/la-chute-des-corps/> : site sur l'écolution de la pensée concernant la chute des corps

6. Annexes

Protocole de construction du plan incliné :

Pour construire notre plan incliné, nous avons besoin de plusieurs éléments :

- planches de bois
- une tige filetée
- une bille
- clochettes
- matériel pour couper et assembler les différents composants (scie, perceuse, colle à bois, écrous, vis...)

Nous avons commencé par rassembler le matériel déjà disponible à l'INSA. Nous avons pu récupérer les planches de bois dont nous avons besoin ainsi qu'une tige filetée et des écrous. Nous avons également pu rassembler les clochettes et la bille.

Nous avons choisi d'utiliser une baguette d'angle (et de la coller sur une planche plus solide) comme endroit pour faire glisser la bille. Celle-ci nous a permis de ne pas avoir à faire une rainure dans une planche, ce qui aurait été techniquement compliqué. De plus, nous avons choisi de réduire la longueur de la planche principale à 1,5 mètre, par manque de matériel et de place (le plan initial faisant environ 7 mètres). Enfin, nous avons choisi de ne pas construire un support avec un angle d'inclinaison précis car l'inclinaison ne change rien au résultat de l'expérience.

Enfin, nous avons assemblé notre plan selon les étapes suivantes :

- découpe des planches de bois aux bonnes dimensions (baguette d'angle et planche support de celle-ci)
- assemblage de la baguette d'angle et de la planche (utilisation de colle et de vis)
- découpe de plus petites planches (pour construire un support qui permet de maintenir notre planche principale inclinée)
- assemblage de ces petites planches à la planche principale à l'aide de vis
- découpe et assemblage deux planches sur les extrémités du plan
- mise en place de la tige filetée à l'aide des deux planches précédentes
- disposition des clochettes sur la tige filetée



Protocole de fabrication de la lunette de Galilée:

Pour construire notre lunette nous avons besoin de plusieurs éléments:

- Lentille divergente (Biconcave) ($f' = -50$ mm)
- Lentille convergente (Biconvexe) ($f' = 1000$ mm)
- Tube PVC Ø50 mm de longueur 83,5 cm
- Manchon Ø50 mm
- Tube PVC Ø40mm de longueur 20 cm
- Manchon Ø40 mm
- Pistolet à colle
- 4 vis à pied plat
- Support imprimés en 3D pour l'objectif

Pour fabriquer notre lunette nous avons pu récupérer du matériel déjà présent à l'INSA comme les tubes PVC, les manchons, les vis et le pistolet à colle. En ce qui concerne les supports, nous les avons modélisés sur Solidworks puis nous les avons imprimés grâce à l'imprimante 3D du département STPI. Nous avons ensuite commandé les deux lentilles sur le site Jeulin.

Nous avons choisi ces lentilles car c'est celles qui nous permettaient de nous rapprocher du modèle original de la lunette de Galilée en termes de performance.

Nous avons suivi les étapes suivantes:

- Découpe des tubes aux dimensions souhaitées
- Impression des supports en parallèle
- Perçage de 4 trous dans le tube PVC de 83,5 cm de longueur afin d'y placer les vis et de pouvoir bloquer la position de notre oculaire
- Collage de l'oculaire dans le manchon Ø40 mm
- Mise en place de l'objectif dans le manchon Ø50 mm à l'aide des supports

