

Galilée, la naissance d'une étoile

Lorsqu'il meurt en 1642, Galilée laisse derrière lui mieux qu'une œuvre : un monde nouveau. Par ses découvertes, comme la loi de la chute des corps ou les satellites de Jupiter, par sa méthode de compréhension du monde qui allie expériences rigoureuses et théories audacieuses, et par ses prises de position face à l'Église et au dogme aristotélicien, il fait entrer son siècle dans la modernité. Ce docu-fiction retrace les grandes étapes de cette révolution, mêlant aux reconstitutions historiques des explications scientifiques simples ou les éclairages d'intervenants universitaires comme Michel Toulmonde (observatoire de Paris, université d'Évry), Jean-Philippe Uzan (Institut d'astrophysique de Paris) et Jean-Pierre Brach (École pratique des hautes études). Apparaît alors un Galilée homme de son temps, brevetant ses découvertes pour gagner de l'argent, recherchant les faveurs des princes, mais surtout construisant, contre vents et marées, une pensée totalement nouvelle.

Carte d'identité

DISCIPLINES, CLASSES ET PROGRAMMES

Sciences physiques, 2^{de}. L'Univers en mouvement et le temps.

Sciences physiques, 1^{re}. Forces et mouvements.

Sciences physiques, T^{le}. Évolution temporelle des systèmes mécaniques.

Mathématiques, 2^{de}. Géométrie dans l'espace.

Histoire, 2^{de}. Humanisme et Renaissance.

Découpage et structure

00 min 00 s : Contexte historique et générique

1543 : Copernic fait publier, après sa mort, *Des révolutions des orbés célestes*, premier ouvrage prônant l'héliocentrisme.

1600 : pour avoir soutenu cette théorie, le moine Giordano Bruno est brûlé à Rome en place publique.

03 min 03 s : La chute des corps et l'expérience

À Padoue, le jeune professeur Galilée (né en 1564) n'a qu'une obsession, celle d'expérimenter. Ainsi étudie-t-il la chute des corps : il laisse tomber de grandes hauteurs des boules de tailles et de masses diverses, il mesure leur vitesse quand elles dévalent des plans inclinés. En procédant de cette façon, c'est une révolution qu'il réalise : il est le premier à faire de manière systématique des « tests » sur la nature, à mettre en œuvre ce que l'on nommera plus tard la méthode expérimentale. Ses découvertes, ainsi que la commercialisation d'un compas d'artillerie de son invention, lui permettent de mener bon train et d'entretenir une maisonnée nombreuse.

13 min 33 s : Géocentrisme contre héliocentrisme

Depuis l'antiquité grecque, une seule représentation de l'Univers, reprise par l'Église, existe : celle d'une Terre centrale entourée par un monde supralunaire où gravitent, harmonieusement, les sphères telles que le Soleil et les planètes. En 1543, Copernic propose une nouvelle théorie : c'est le Soleil qui est au centre, et les planètes tournent autour. La théorie n'est pas interdite, mais Giordano Bruno, pour l'avoir soutenue à la fin du siècle, est brûlé en place publique après un procès où le cardinal Bellarmin s'illustre par sa grande sévérité.

20 min 12 s : De la lunette astronomique au *Message des étoiles*

En 1609, Galilée découvre une invention hollandaise récente, la lunette d'observation terrestre. Il la perfectionne et la tourne vers le ciel. C'est une révolution : il observe que, loin d'être une sphère parfaite, la Lune a des reliefs, que quatre satellites tournent autour de Jupiter, que Vénus présente des phases et doit donc tourner autour du Soleil : des faits qui invalident la théorie ptoléméenne de l'Univers. Il compile ces résultats dans un livre, *Le Message des étoiles*. Le succès de l'ouvrage est tel qu'il obtient un poste prestigieux de « premier mathématicien et philosophe du grand-duc » à Florence.

31 min 44 s : Montée des controverses

Parti à Rome pour y présenter sa lunette astronomique, Galilée reçoit un accueil favorable de la part des jésuites qui voient d'un bon œil ses théories. Autre son de cloche du côté des dominicains, très à cheval sur le dogme. La première charge contre

Galilée sera menée par l'un d'entre eux, le père Lorini, à Florence. Dans une lettre restée célèbre, Galilée affirme alors l'indépendance de la science envers l'Église. Parallèlement à ces inquiétudes, Galilée continue de travailler : succès d'un ouvrage sur les corps flottants, et découverte des taches solaires, nouvelle preuve contre les thèses ptoléméennes.

42 min 29 s : Le Dialogue sur les deux principaux systèmes du monde

En 1616, le cardinal Bellarmine fait mettre à l'index les écrits de Copernic, jugés désormais hérétiques. Quand en 1632 Galilée fait publier son *Dialogue sur les deux principaux systèmes du monde*, écrit à la demande du pape Urbain VIII, celui-ci se croit ridiculisé sous les traits du personnage Simplicio, qui présente les idées aristotéliennes. L'inquisition organise alors le procès de Galilée. À 69 ans, il est condamné, outre à abjurer ses écrits, à rester assigné à résidence. Il se consacre à l'écriture du *Discours et Démonstrations mathématiques concernant deux nouvelles sciences*, ouvrage fondateur de la mécanique moderne publié à Leiden en 1638, deux ans avant sa mort.

50 min 35 s : Générique de fin

Le générique est suivi par l'expérience de la chute des corps réalisé sur la Lune par deux astronomes américains.

Pistes pédagogiques

LA MÉCANIQUE AVANT ET APRÈS GALILÉE

Définir la théorie du mouvement chez Aristote et analyser les expériences de Galilée sur la chute des corps.

Les premières études de Galilée (1564-1642) portèrent sur la chute des corps. Il avait devant lui la théorie d'Aristote, constituée et partout admise, arrivée en Occident au début du XII^e siècle. En partant des informations données par le film, on précisera les grands principes de cette physique : les corps ont des mouvements rectilignes qui les ramènent dans leur « lieu naturel » ; les éléments air et feu vont vers le haut, les éléments terre et eau vers le bas. Soumis à des contraintes, les corps ont des mouvements non naturels, que l'on dit violents. Non rectilignes, ils s'épuisent rapidement. Exemple : le boulet de canon. Il part vers le haut (mouvement violent, non naturel, qui épuise l'impulsion première) puis retrouve son mouvement naturel et tombe alors, d'un coup, verticalement.

Jusqu'en 1609, Galilée effectua une première série d'expériences sur la chute des corps. À partir du film, on relèvera les différents tests que Galilée réalisa : chute simultanée de boules de même forme mais de masses différentes ou, inversement, de même masse mais de formes différentes. On précisera alors quels étaient les résultats théoriquement attendus : les boules atteignent le sol ensemble, leur vitesse de chute ne dépend donc ni de leur masse, ni de leur forme. Cependant, on soulignera bien que ces résultats sont, paradoxalement, faux : les vitesses de chute ne sont identiques que dans le vide, un vide impossible à faire au début du XVII^e siècle.

Le film affirme, et cela est vrai en première approximation (se reporter à la Fiche élève du livret), que les boules touchaient toutes le sol au même moment. L'expérience est cependant moins catégorique : on pourra la reproduire facilement en classe. Si le choc au sol des mobiles est sonore, on constatera facilement leur arrivée désynchronisée (l'oreille est sensible à des écarts de temps de quelques centièmes de secondes).

Pour rendre raison à Galilée, on précisera qu'il n'affirma, de manière explicite, sa loi sur la chute des corps dans le vide non à partir de ses premières expériences, mais bien plus tard, dans son *Discours et Démonstrations mathématiques concernant deux sciences nouvelles* rédigé à la fin de sa vie. Sa réflexion s'était alors enrichie de considérations astronomiques.

L'ASTRONOMIE

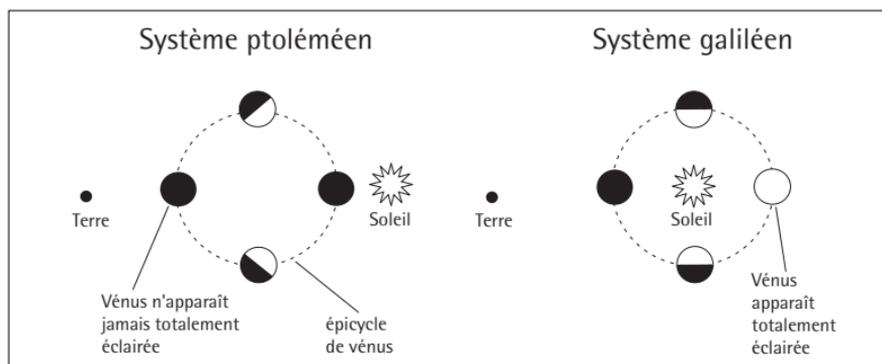
Préciser le système géocentrique de Ptolémée et celui de Tycho Brahé pour percevoir leurs différences par rapport à l'héliocentrisme de Copernic. Répertorier les arguments de Galilée en faveur de l'héliocentrisme. Comparer les trois systèmes pour mettre au jour la nouveauté de Galilée.

À partir des informations du film, on précisera l'organisation du monde selon Ptolémée, astronome d'Alexandrie du II^e siècle de notre ère : la Terre est au centre de l'Univers, entourée successivement, et tournant autour d'elle, de la Lune, de Vénus, du Soleil et des autres planètes. Pour expliquer le mouvement apparent rétrograde de certaines planètes, Ptolémée considéra que celles-ci tournaient sur un épicycle, un petit cercle dont le centre décrit lui-même un cercle autour de la Terre. Vénus, quant à elle, décrit un épicycle dont le centre reste sur la droite reliant la Terre au Soleil. La Lune marque la limite entre deux mondes distincts : le monde sublunaire (le nôtre), imparfait, sujet aux changements, composé des quatre éléments, et le monde supralunaire, divin, éternel, harmonieux. Ce monde parfait est composé d'un seul élément, le cinquième ou « quintessence », et les seuls mouvements permis y sont circulaires. Le système de Nicolas Copernic (1473-1543) met le soleil au centre de l'Univers tandis que les planètes, Terre comprise, tournent autour selon des orbites circulaires. De petits épicycles sont conservés pour rendre compte de l'écart entre le mouvement circulaire censé régir les astres et le mouvement elliptique réel. L'ensemble est entouré par la sphère des fixes qui supporte les étoiles immobiles du ciel. Si le système de Nicolas Copernic est révolutionnaire, il ne conserve pas moins plusieurs caractéristiques du système de Ptolémée : mouvements circulaires avec épicycle (qui sera plus tard remis en cause par Johannes Kepler) et univers fini (contesté par Giordano Bruno en 1584). Copernic construisit son modèle dans le but de simplifier les calculs du mouvement des astres et d'en améliorer la précision : il put ainsi donner la position des planètes dans le ciel avec une erreur dix fois inférieure à celles qui entachaient les prévisions des autres astronomes. C'est d'ailleurs bien en terme d'algorithme de calcul qu'il faut considérer le modèle de Copernic : le savant ne fit jamais rien pour publier son système – c'est son disciple Rhéticus (1514-1574) qui s'en chargea –, et se garda bien d'aller affronter les philosophes et les théologiens sur le terrain de la nature du monde. Que l'Église considère longtemps les théories héliocentriques comme de simples « hypothèses de calcul » correspond très exactement à ce qu'en dit – par conviction ou par crainte de représailles – l'astronome lui-même.

Finalement, le système de Tycho Brahé (1546-1601), rapidement évoqué dans le film, est un système géocentrique très proche du modèle de Copernic, mais avec la Terre au centre de l'Univers. La Lune et le Soleil tournent autour d'elle, tandis que Mars, Jupiter, Mercure, Vénus et Saturne tournent autour du Soleil.

On répertoriera les observations que Galilée réalisa en 1610 avec sa lunette astronomique : l'existence de relief sur la Lune, la présence de satellites autour de Jupiter, les phases de Vénus, l'existence de taches solaires, la décomposition de la voie lactée en multiples étoiles. Toutes ces découvertes contredisent la vision aristotélicienne de la perfection du monde supralunaire, les satellites de Jupiter sont des exemples de mouvements qui ne se font pas autour de la Terre, mais c'est l'existence des phases de Vénus qui infirme réellement la théorie de Ptolémée. On réalisera des

schémas illustrant l'apparence de Vénus selon sa position dans les deux systèmes afin de montrer que le système de Ptolémée interdit à la planète d'apparaître complètement illuminée par le Soleil.



En divisant la classe en trois groupes, on pourra faire exposer, et défendre, par les élèves les différentes théories de Ptolémée, de Copernic et de Tycho Brahé afin de mieux percevoir les logiques et les enjeux de ces systèmes et de mettre au jour les novations galiléennes. Pour le système ptoléméen, on ne négligera pas les arguments s'appuyant sur l'autorité des écrits de la Bible (le livre de Josué affirme explicitement que Dieu stoppe la course du Soleil dans le ciel) et celle d'Aristote, sur la conception selon laquelle la Terre est immobile au centre de l'Univers (si elle n'y était pas, elle y tomberait, étant le corps le plus lourd connu ; si elle était en rotation, tous les corps sur Terre, plus légers qu'elle, seraient entraînés vers l'ouest). Le système de Tycho Brahé a l'avantage de pouvoir éluder ces deux derniers problèmes tout en adoptant les avancées coperniciennes. Mais ce n'est que parcourir la moitié du chemin. On mettra finalement en évidence l'audace de Galilée : de la Terre jusqu'au ciel, il unifie les lois physiques. Le système de Copernic n'est possible que si l'on admet le principe d'inertie et l'équivalence entre immobilité et déplacement rectiligne uniforme, car il explique pourquoi on ne « sent » pas le mouvement d'une Terre qui se déplace dans l'espace. Par conséquent, les lois qui s'appliquent sur Terre s'appliquent aussi aux astres.

LA MÉTHODE EXPÉRIMENTALE : GALILÉE CONTRE ARISTOTE ?

Définir la méthode scolastique et la méthode expérimentale de construction des connaissances. Préciser le rôle de l'expérience dans les théories de Galilée.

Galilée est l'inventeur de la méthode expérimentale : cette affirmation est un lieu commun de l'histoire des sciences, voire une légende dorée. L'affirmation, sans être fausse, mérite d'être largement relativisée. Le film nous en donne l'occasion.

On précisera avec les élèves les principes de production de connaissances hérités du Moyen Âge : les penseurs se réfèrent à des textes réputés incontestables (à la Bible, en premier lieu, ainsi qu'aux auteurs grecs comme Aristote, Archimède, Pythagore, etc.) et les commentent. Une stricte méthode, la scolastique, régit l'analyse des textes : on clôt une étude par une « dispute », discussion où il s'agit d'exposer les diverses opinions des auteurs recommandés sur un sujet ; de cette dispute apparaissent des connaissances nouvelles.

On relèvera les précisions apportées par Michel Toulmonde et Jean-Philippe Uzan sur la méthode expérimentale : il s'agit de tester la nature, de voir comment celle-ci répond à une question. On « bouleverse » (Uzan) le monde et on regarde ce qui se passe. En cas de controverse, l'argumentation, la lutte oratoire ne saurait prouver quoi que ce soit, seule l'expérience peut trancher. On commentera les exemples de pratique expérimentale donnés dans le film : la chute des corps à la verticale dans l'air ou le long d'un plan incliné, la flottaison de la glace.

On fera alors remarquer l'importance de l'instrumentation chez Galilée : il fit construire des instruments (plans inclinés, pendule), il en adapta d'autres (la lunette terrestre devint lunette astronomique). Cependant, Galilée affirma des lois contre l'expérience sensible. On se demandera à quel point ses principales découvertes, l'héliocentrisme ou la chute des corps par exemple, relevaient de l'expérience (on teste la nature en construisant un dispositif expérimental), de l'observation (on observe ce que nous offre la nature) ou de la spéculation théorique. Ainsi :

- dire que la vitesse de chute est indépendante de la masse s'oppose à l'observation quotidienne, est validé par une expérience, mais une expérience qui rate (dans l'air) et réussit en théorie dans le vide ;
- affirmer que la Terre tourne sur elle-même s'oppose à l'observation quotidienne et aux sensations, ne peut être prouvé par aucune expérience à l'époque de Galilée (la première expérience directe de la rotation de la Terre autour de son axe viendra avec Léon Foucault et son célèbre pendule, au XIX^e siècle) mais s'inclut dans une théorie basée sur l'observation détaillée du mouvement des astres.

On voit alors que la théorie est une manière de comprendre l'expérience et l'observation, et qu'il n'y a pas induction « naturelle » du fait expérimental vers sa représentation géométrique ou mathématique.

On pourra alors prolonger la réflexion sur l'interaction entre théorie et expérience à partir des textes du philosophe Thomas Samuel Kuhn (1922-1996) (*La Structure des révolutions scientifiques*, 1962) et de son concept de paradigme. Rappelons que, selon Kuhn, la science progresse à coup de révolution scientifique, chaque révolution correspondant à un changement de paradigme. Un paradigme désigne l'ensemble des convictions et des dogmes partagés – et donc reconnus comme vrais – par une communauté scientifique en un temps donné. Le paradigme a donc un aspect cognitif (son contenu : idée, théories et connaissances) et un aspect social (son support : la communauté scientifique). Aucune expérience, aucune observation ou élaboration

théorique n'est neutre : tout se fait dans un cadre donné, celui du paradigme. Concernant Galilée, on peut dire, reprenant l'interprétation de Kuhn, qu'il est l'homme par qui le nouveau paradigme scientifique arriva.

À noter que Galilée ne revendiqua jamais la paternité de la méthode expérimentale. Au contraire, il s'est toujours positionné dans la droite ligne de l'empirisme aristotélicien qui donne une place privilégiée à l'observation des phénomènes. S'il s'opposa à quelque chose, c'est à la scolastique. En témoigne cet extrait d'une lettre qu'il écrivit à son ami Johannes Kepler (1571-1630) en 1610, après avoir montré, dans sa lunette, les nouvelles planètes aux professeurs de Pise : « Quels éclats de rire aurais-tu poussé si tu avais entendu les arguments qu'a présentés contre moi, à Pise, en présence du grand-duc, le premier philosophe de cette université, quand il s'efforçait d'arracher du ciel et d'expulser les nouvelles planètes, avec des arguments logiques en guise d'incantations magiques. »

GALILÉE, UNE VIE DANS LE SIÈCLE

Définir les méthodes dont Galilée usa pour mener sa carrière. Résumer les problèmes rencontrés face à l'Inquisition. Définir la notion d'autonomie du champ scientifique.

On répertoriera les moyens utilisés par Galilée pour pouvoir poursuivre ses recherches : l'invention, la vente ou l'offrande d'instruments à tel ou tel prince ; le baptême des satellites de Jupiter « astres médicéens », en référence aux Médicis de Florence, en échange d'un poste de mathématicien du grand-duc de Toscane. On opposera alors la conduite de Galilée à l'image traditionnelle du savant hors des vicissitudes du monde et œuvrant exclusivement au bonheur de l'humanité.

On établira alors que le métier de chercheur, élément essentiel de l'autonomie du chercheur et de la recherche, est une invention récente. Il ne sera réellement créé qu'au ^{XIX}^e siècle, ce que l'on mettra facilement en évidence par une recherche documentaire (cf. le cas exemplaire de Lavoisier, sous l'Ancien Régime, qui ne put mener ses recherches que grâce à sa charge bien payée de fermier général du roi).

On pourra alors discuter de l'autonomie, réelle ou illusoire, de la recherche scientifique face aux diverses institutions et discuter des pouvoirs qui tendent à limiter son autonomie : pouvoirs politiques (par exemple au temps de l'URSS), financiers (laboratoires privés ne travaillant que sur des sujets pouvant rapporter de l'argent), religieux, etc.

Que penser alors de l'affirmation de Michel Toulmonde qui date l'acte de naissance de la science à 1615, année où Galilée écrivit une lettre à Christine de Lorraine (1565-1637), grande duchesse de Toscane, et où il y prononce la séparation entre l'Église et la science par une phrase : « Le Saint-Esprit nous enseigne comment on va au ciel, et non pas comment va le ciel » ? La science n'existait-elle pas avant ? Existera-t-elle toujours après ? Ne peut-on définir la science que par opposition à la foi ou aux institutions religieuses ?

En partant du film, on retracera les principaux épisodes du procès Galilée : le concile de Trente qui s'achève en 1563 réactive l'Index et l'Inquisition, le cardinal Bellarmin (1542-1621), membre du Saint-Office, interdit en 1615 de divulguer la théorie héliocentriste du monde et fait mettre à l'index des textes de Copernic. En 1632, Galilée publie avec l'accord du pape Urbain VIII le *Dialogue sur les deux principaux systèmes du monde*, mais le pape passe brusquement du camp des amis à celui de ses plus farouches adversaires. En 1633, Galilée est jugé, obligé de se parjurer et finit son existence en résidence surveillée.

Le film nous invite à voir, pour expliquer le procès, non seulement des raisons théologiques – le livre de Josué affirme que le Soleil tourne autour de la Terre – mais surtout des raisons politiques : la Réforme a porté à son plus haut point d'incandescence la question de la doctrine, dominicains et jésuites s'affrontent à Rome, ce sera ceux qui seront les plus irréprochables sur les questions d'orthodoxie.

Cependant, d'autres interprétations sont possibles. En poursuivant l'interprétation kuhnnienne amorcée plus haut, on pourra alors reconsidérer le rôle de la doctrine dans l'origine du procès. Les problèmes de Galilée avec l'Église sont d'abord le résultat du changement de paradigme : le social, l'une des composantes du paradigme, évolue moins vite que les concepts, et l'attitude de l'Église peut être vue, en dehors de toute considération théologique ou intellectuelle, comme la résistance d'un groupe social face à la remise en cause de son discours légitimant. Autre exemple d'approche, celle d'Arthur Koestler (1905-1938) : l'écrivain fait du cardinal Bellarmin un modèle de tolérance et de Galilée un ambitieux saisi par le démon de la soixantaine (il a 68 ans en 1632). Bellarmin aurait certes interdit à Galilée d'affirmer que la doctrine héliocentrique était vérité absolue, mais l'aurait cependant autorisé à l'utiliser comme hypothèse scientifique. En faisant paraître son discours, Galilée aurait précipité le conflit, fait de la provocation. Koestler écrit ainsi : « Pendant près de cinquante ans, Galilée avait tenu sa langue à propos de Copernic, non par crainte du bûcher, mais pour s'épargner les mauvaises grâces des milieux universitaires. Quand, brusquement saisi par gloire, il se fait engager, il en fit aussitôt une question de prestige. Il avait dit que Copernic avait raison, et quiconque serait d'un avis contraire ferait injure à l'autorité du plus grand savant de l'époque. Voilà ce qui, essentiellement, poussait Galilée à se battre. »

À la lumière de ces trois récits historiques apparaît un Galilée devenu aujourd'hui cas d'école pour toutes les interprétations, aucune n'épuisant définitivement l'ensemble du fait historique.

FICHE ÉLÈVE : LA CHUTE DES CORPS DANS LE TEXTE

Exercice de décryptage autour de la question de la chute des corps, avec des élèves de 2^{de}.

« Le livre de la nature est écrit dans la langue mathématique et ses caractères sont des triangles, des cercles et autres figures géométriques », écrivit Galilée. Mais s'il connaissait la géométrie, l'arithmétique lui était inconnue : elle attendait encore d'être inventée. Un exemple : la formule de la vitesse, $v=d/t$, n'apparaît nulle part dans les écrits du savant. Cela ne l'empêcha pas de mener une réflexion pertinente.

Dans *Discours et Démonstrations mathématiques concernant deux sciences nouvelles*, Galilée fait discuter Simplicio, défenseur de l'aristotélisme, et Salviati, partisan des nouvelles théories de Galilée. Écoutons Salviati et essayons de traduire son discours en langage arithmétique.

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

Questions

- Dans l'expérience limite que décrit Galilée, quelles sont les forces qui s'exercent sur le mobile ?
- L'expérience est-elle réalisable au temps de Galilée ?
- A-t-elle été réalisée aujourd'hui ?

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

Questions

- En quoi Galilée, dans ce texte, appuie-t-il son raisonnement sur le principe d'inertie ?
- Décrivez les deux forces qui s'exercent sur le mobile lorsqu'il a atteint sa vitesse limite. Comparez leur intensité, leur sens et leur direction.

- Le texte invite à écrire la force s'opposant au déplacement du mobile sous la forme $\vec{F} = -k\vec{V}$ avec \vec{V} pour vitesse du mobile et k un coefficient dépendant, en outre, de la viscosité du milieu. Justifiez.

Salviati : « Si on prend deux corps égaux, identiques par la matière et par la forme (et pourvus ainsi de vitesses incontestablement égales), et que l'on diminue le poids de l'un dans la même proportion que sa surface (sans altérer la similitude de leur forme), aucune réduction de la vitesse ne s'ensuivra... Si le poids venait à diminuer plus que la surface, il en découlerait pour le mobile un certain ralentissement : et cela d'autant plus que la diminution du poids serait proportionnellement plus importante que celle de la surface. »

Questions

- Montrez que l'observation de Galilée implique que la force F est aussi proportionnelle à la surface du corps : $\vec{F} = -k' S \vec{V}$.
- Démontrez alors la dernière phrase de Galilée. On pourra établir, en la justifiant, la formule de l'intensité de la vitesse selon la modélisation de Salviati : $v = mg/k'S$.

Compléments

LES PHASES DE VÉNUS, PREUVE DE L'HÉLIOCENTRISME

« Vous saurez donc que, voici environ trois mois, Vénus apparaissant le soir, je me mis à l'observer soigneusement à la lunette afin de voir de mes yeux ce dont ma raison ne doutait plus. Je la vis donc d'abord de figure ronde, nette et entière, mais très petite ; elle se maintint en cette forme jusqu'au jour où elle commença à s'approcher de sa plus grande digression ; toutefois, elle croissait en grandeur. Elle commença ensuite à perdre son contour circulaire dans sa partie orientale, la plus éloignée du soleil, et en peu de jours elle se réduisit à un demi-cercle parfait ; et telle elle demeura, sans changer en rien, jusqu'au point où elle commença à se retirer vers le Soleil, s'éloignant de la tangente. C'est alors qu'elle perd sa forme demi-circulaire et se présente comme un croissant qui va s'amincissant de plus en plus, se réduisant à deux cornes très minces, jusqu'à occultation complète ; quand reviendra ensuite le temps de son apparition matinale, nous la retrouverons sous l'aspect d'un très fin croissant, les cornes tournées dans la direction opposée au Soleil ; elle croîtra peu à peu, jusqu'à sa plus grande digression, elle sera alors demi-circulaire et le restera, sans altération, plusieurs jours ; après quoi, elle passera assez vite du demi-cercle au cercle parfait et demeurera ainsi toute ronde pendant plusieurs mois. Mais son diamètre apparent est alors environ cinq fois plus grand qu'il n'était à l'époque de son apparition vespérale. Cette admirable expérience nous a donné la démonstration

sensible et certaine de deux propositions jusqu'à présent douteuses pour les plus grands esprits du monde. L'une est que toutes les planètes sont naturellement ténébreuses (car ce qui arrive à Vénus arrive aussi à Mercure); l'autre est qu'il faut de toute nécessité que Vénus tourne autour du Soleil comme Mercure et comme toutes les autres planètes, chose dont les pythagoriciens, Copernic et moi étions convaincus, mais dont on n'avait pas la preuve tangible que nous avons maintenant en ce qui concerne Mercure et Vénus. »

Lettre de Galilée à Julien de Médicis, 1^{er} janvier 1611.

GALILÉE, LA SCIENCE ET LA FOI

« Le mouvement de la Terre et le repos du Soleil n'ont jamais pu être contre la foi ou les Écritures saintes, quand elles ont été véritablement prouvées, par des expériences sensibles, avec des observations minutieuses et des démonstrations nécessaires, comme étant vraies dans la nature par les philosophes, astronomes et des mathématiciens; mais dans un tel cas, si quelques passages des Écritures parurent dire le contraire, nous devons affirmer que c'étaient à cause de la faiblesse de notre intellect, lequel n'avait pas pu pénétrer le vrai sentiment de l'Écriture sur ce point particulier: et c'est une doctrine commune et absolument exacte qu'une vérité ne peut être contraire à une autre vérité. »

Galilée, *Considération sur l'opinion copernicienne*, février 1616.

ABJURATION DE GALILÉE

« Moi, Galileo Galilei, fils de feu Vincent Galilée, Florentin, âgé de 70 ans, constitué personnellement en jugement, et agenouillé devant vous, éminentissimes et révérendissimes cardinaux de la république universelle chrétienne, inquisiteurs généraux contre la malice hérétique, ayant devant les yeux les saints et sacrés Évangiles, que je touche de mes propres mains; je jure que j'ai toujours cru, que je crois maintenant, et que, Dieu aidant, je croirai à l'avenir tout ce que tient, prêche et enseigne la sainte Église catholique et apostolique romaine; mais parce que ce Saint-Office m'avait juridiquement enjoint d'abandonner entièrement la fausse opinion qui tient que le Soleil est le centre du monde, et qu'il est immobile; que la Terre n'est pas le centre et qu'elle se meut; et parce que je ne pouvais la tenir, ni la défendre, ni l'enseigner d'une manière quelconque, de voix ou par écrit, et après qu'il m'avait été déclaré que la susdite doctrine était contraire à la Sainte Écriture, j'ai écrit et fait imprimer un livre dans lequel je traite cette doctrine condamnée, et j'apporte les raisons d'une grande efficacité en faveur de cette doctrine, sans y joindre aucune solution; c'est pourquoi j'ai été jugé véhémentement suspect d'hérésie pour avoir tenu et cru que le Soleil

était le centre du monde et immobile, et que la Terre n'était pas le centre et qu'elle se mouvait.

C'est pourquoi, voulant effacer des esprits de vos Éminences et de tout chrétien catholique cette suspicion véhémement conçue contre moi avec raison, d'un cœur sincère et d'une foi non feinte, j'abjure, maudit et déteste les susdites erreurs et hérésies, et généralement toute autre erreur quelconque et secte contraire à la susdite sainte Église : et je jure qu'à l'avenir je ne dirai ou affirmerai de vive voix ou par écrit, rien qui puisse autoriser contre moi de semblables soupçons ; et si je connais quelque hérétique ou suspect d'hérésie, je le dénoncerai à ce Saint-Office, ou à l'Inquisiteur, ou à l'ordinaire du lieu où je serai. Je jure en outre, et je promets, que je remplirai et observerai pleinement toutes les pénitences qui me sont imposées ou qui me seront imposées par ce Saint-Office ; que s'il m'arrive d'aller contre quelques-unes de mes paroles, de mes promesses, protestations et serments, ce que Dieu veuille bien détourner, je me soumetts à toutes peines et supplices, par les saints canons et autres constitutions générales et particulières, ont été statués et promulgués contre de tels délinquants. Ainsi, Dieu me soit en aide et ses saints Évangiles, que je touche de mes propres mains.

Moi, Galileo Galilei susdit, j'ai abjuré, juré, promis, et me suis obligé comme ci-dessus ; en foi de quoi, de ma propre main j'ai souscrit le présent chirographe de mon abjuration et l'ai récité mot à mot à Rome, dans le couvent de Minerve, ce 22 juin 1633.

Moi, Galileo Galilei, j'ai abjuré comme dessus de ma propre main. »

Ressources

À LIRE

Œuvres de Galileo Galilei

- *Le Messager des étoiles (1610)*, Seuil, coll. « Sources du savoir », 1992.
- *Lettre à Christine de Lorraine et autres récits coperniciens (1613-1624)*, LGF, coll. « Classiques de la philosophie », 2004.
- *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde (1632)*, Seuil, coll. « Points. Sciences », 2000.
- *Discours concernant deux sciences nouvelles (1636)*, PUF, coll. « Épiméthée », 1995.

Sur Galilée

- BELLONE Enrico, *Galilée : le découvreur de monde*, Belin, Pour la science, coll. « Les génies de la science », 2003.
- BRECHT Bertold, *La Vie de Galilée*, L'Arche éditeur, coll. « Scène ouverte », 1993.
- CHAREIX Fabien, *Le Mythe Galilée*, PUF, coll. « Science, histoire et société », 2002.
- CLAVELIN Maurice, *Galilée copernicien : le premier combat (1610-1616)*, Albin Michel, coll. « Bibliothèque de l'évolution de l'humanité », 2004. Prix Geigner de l'Académie des sciences morales et politiques.
- GEYMONAT Ludovico, *Galilée*, Seuil, coll. « Points. Sciences », 1992. Ouvrage devenu un classique, fondateur du renouveau des études galiléennes.
- KOESTLER Arthur, *Les Somnambules : essai sur l'histoire des conceptions de l'Univers*, Presses Pocket, coll. « Pocket », 1985.
- MAURY Jean-Pierre, *Galilée : le messager des étoiles*, Gallimard coll. « Découvertes Gallimard. Sciences et techniques », 2005.
- STENGERS Isabelle, *Les Affaires Galilée*, in SERRES Michel (dir.), *Éléments d'histoire des sciences*, Bordas, coll. « Les référents », 2003, pp. 223-273.

Réflexions sur la révolution scientifique

- GINGRAS Yves, KEATING Peter, LIMOGES Camille, *Du scribe au savant : les porteurs du savoir de l'Antiquité à la révolution industrielle*, PUF, coll. « Science, histoire et société », 2000. Très bon panorama des transformations de la science (sociologie critique bourdieusienne).
- SHAPIR Steven, *La Révolution scientifique*, Flammarion, coll. « Nouvelle bibliothèque scientifique », 1998. Très bon panorama des bouleversements intellectuels qui secouèrent l'Europe avant, pendant et après Galilée, conçu par l'un des fondateurs du « programme fort » en sociologie des sciences.

Science et religion

- CHÂTELLIER Louis, *Les Espaces infinis et le Silence de Dieu : science et religion, XVI^e-XIX^e siècle*, Aubier, coll. « Historique », 2003.

- MINOIS Georges, *L'Église et la Science : histoire d'un malentendu*, Fayard, 1990 et 1991 (vol. 1, *De Saint Augustin à Galilée* et vol. 2, *De Galilée à Jean-Paul II*).
- RUSSELL Bertrand, *Science et Religion*, Gallimard, coll. « Folio essais », 1990.

À VOIR

- *Un Soleil, neuf planètes*, CNDP, La Cinquième, coll. « Galilée », série *Des phénomènes et des hommes*, 1998, réf. 002K1051 (1 VHS, 2 x 26 min).
- LUBTCHANSKY Jean-Claude, *Galilée : le messager des étoiles*, CNDP, BBC, La Sept/Arte, Trans Europe Films, Gallimard Jeunesse, coll. « Côté télé », 2001, réf. 755B0234 (1 VHS, 54 min ; 1 livret pédagogique).
- VERHAEGHE Jean-Daniel, *Galilée ou l'Amour de Dieu.*, Koba Films Vidéo, 2005 (1 DVD, 90 min).
- YOUNG Nic, *Le Chemin des étoiles*, BBC, Le Monde, coll. « Ces jours qui ont changé le monde », 2006 (1 DVD, 50 min).

À CONSULTER

- <http://dogma.free.fr/txt/JB-Science01.htm> : « Science et religion : l'irréductible antagonisme », un article de Jean Bricmont, gardien de l'orthodoxie scientifique.
- <http://galileo.rice.edu/> : le très complet site du projet de recherche sur Galilée (en anglais).
- <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k94896v> : édition française numérisée des œuvres complètes de Galilée sur le site de la BNF.
- <http://membres.lycos.fr/pseudofree/buburtpe/Terminale/liens/p8.htm> : « La relativité galiléenne et ses conséquences », un TPE pour les T^e S.
- <http://num-scd-ulp.u-strasbg.fr:8080/view/authors/Galilei,Galileo.html> : ouvrages de Galilée numérisés par l'université de Strasbourg (en latin).
- www.aim.ufr-physique.univ-paris7.fr/CHARNOZ/homepage/GRAVITATION/gravitation.html : une bonne histoire, par un astronome, du concept de gravitation.
- www.imss.fi.it/index.html : le site du musée d'Histoire des sciences de Florence (en anglais et en italien).