

4ème cours

La science de l'empire romain et du Moyen Age européen

La science de l'empire romain et du Moyen Age européen n'existe pratiquement pas. Très peu est ajouté aux connaissances grecques, et une grande partie de ce qui avait été acquis est oublié, ou bien n'est plus compris.

Une idée qui n'est pas oubliée est le fait que la terre est sphérique.

(L'idée qu'on entend souvent, et qui est même enseignée à l'école, que durant le Moyen Age on pensait que la terre était plate, est une idée fausse. Par exemple, nous pouvons lire dans Saint Thomas :

... Ad secundum dicendum quod diversa ratio cognoscibilis diversitatem scientiarum inducit. Eandem enim conclusionem demonstrat astrologus et naturalis, puta quod **terra est rotunda**, [Sancti Thomae de Aquino, Summa Theologiae, Prima pars, Quaestio 1, Proemium, Articulus 1].

... les astronomes et les physiciens arrivent aux mêmes conclusions, par exemple que la terre est sphérique, avec des instruments différents : les mathématiques pour les astronomes, l'étude des choses matérielles pour les physiciens...

A l'école on enseigne aussi des choses fausses, quelque fois !)

Les astronomes arabes

Les sciences arabes naissent à Bagdad avec le calife Al-Mansour (754-775) qui reçut une délégation Indienne en 773 qui a amené un livre, aussitôt traduit. Un chapitre concernait la trigonométrie, avec une table de sinus à 25 entrées. L'Almageste de Ptolémée sera ensuite traduit 5 fois.

Principaux astronomes dans l'Islam du Moyen Age :

- **al Battâni** Albatagnus (877-929) (al Raqq sur l'Euphrate)

« Le Ptolémée arabe » utilise la notion de sinus et établit la formule fondamentale de la trigonométrie sphérique.

- Ecole de **Maragha** (Iranian Azerbaijan) : Nsir al-Din as **Tusi** (1201, 1274)

Etudie l'Almageste et cherche d'améliorer les détails de la construction de Ptolémée.

- **Ibn as Shatir** (1304 -1375) (Damas)

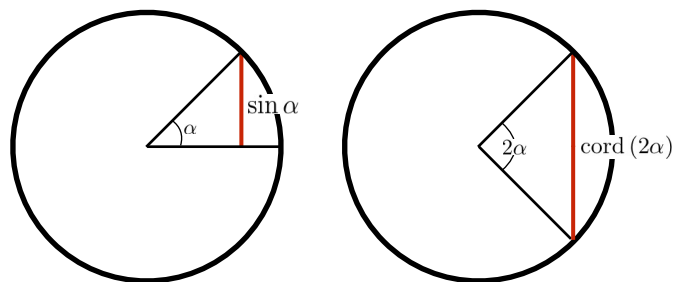
Cherche de corriger des erreurs dans l'Almageste, qui regarde le mouvement de la Lune.

Ces contributions du monde arabe et perse à l'astronomie sont importantes. Mais elles ne représentent que des améliorations marginales du savoir du monde ancien. La vitesse du développement de la science durant ces siècles est incomparablement plus lente que durant la période grecque. Durant le Moyen Age la science ne se développe que dans le monde Islamique, et assez lentement.

La disparition totale de la science autour de la Méditerranée est illustrée par le fait que la fonction trigonométrique utilisée par les astronomes Alexandrines, la « corde », est remplacée par le sinus, qui est pratiquement la même chose, mais avec une dénomination qui vient ... de l'Inde ! Le parcours est le suivant :

- *Corde* en Grec, traduit en *jya* en Hindou.
- Les Arabes utilisent le mot *jiba* qui ne veut rien dire en Arabe: c'est seulement une traduction du mot Hindi, qui a le même son que le mot Hindi *jya*.
- Après un peu de temps, dans les écrits Arabes, le mot *jiba* devient *jaib* qui a une signification qui veut dire "pli".
- Les Européens traduisent les textes anciens de l'Arabe en Latin, et traduisent *jaib* avec *sinus*, qui veut dire pli en latin.

Relation entre sinus et corde : la corde de (2α) est le double du sinus de α :



Cette petite histoire d'un mot montre que la trigonométrie était perdue dans l'Ouest, et y est retournée après être passée par l'Inde !

La lente sortie du Moyen Age européen, grâce au monde Arabe

Les civilisations s'enrichissent quand elles se mélangent, non pas quand elles se renferment.

Premières ouvertures : Frédéric II (1194 – 1250) empereur.

Frédéric II est le premier souverain qui supporte les sciences en Occident. Il lisait neuf langues. Il fait preuve tout au long de son règne d'une large ouverture d'esprit. Il s'intéresse à la culture arabe et reconnaît sa grandeur et son raffinement. Il échange avec des savants et des livres avec al-Kamil, le sultan du Caire.

Son attitude au cours des croisades est particulièrement intéressante : Il tente notamment de concilier les deux partis (croisés et jihad) afin d'instaurer une paix durable et une cohabitation

pacifique. En 1229, Frédéric arrive à signer un traité d'alliance avec al-Kamil qui avait vaincu la cinquième croisade, en échange de la promesse de recouvrer la souveraineté sur Jérusalem, Nazareth et Bethléem. Frédéric entre en roi dans Jérusalem.

Comme le pape Grégoire IX condamnait ce traité, Frédéric est excommunié (deux fois). Le pape Grégoire IX alla même jusqu'à l'appeler l'Antéchrist.

Durant le XII et XIII siècles Aristote est traduit de l'arabe en latin. Dans la même période il y a aussi la traduction de l'Almageste de l'arabe en latin. La culture scientifique commence à arriver en Europe, où elle n'était jamais arrivée.

Les humanistes du XIV et XV siècle.

Au cours des XIV et XV siècles, l'Europe commence à devenir plus riche, à partir de l'Italie et les régions du Sud de la région que l'on appelle France aujourd'hui. Des intellectuels, appelés les « humanistes », développent une passion pour l'antiquité, et cherchent de récupérer les arts et les sciences anciennes. Le rêve est de faire repartir les grands arts et le grand savoir ancien.



Cette merveilleuse fresque, peinte par Raphael, donne une représentation idéale des savants de l'antiquité, comme ils étaient vus et révéérés durant la Renaissance Italienne. Au centre, on voit Platon et Aristote. Autour d'eux, Euclide, Pythagore, Anaximandre, Ptolémée...

Une activité importante des humanistes est l'effort de redécouvrir les textes anciens.

L'Almageste est à nouveau étudié, compris et expliqué. La chute de Constantinople en 1453, signe la fin de l'ancien empire romain et a un effet indirect sur l'Europe : l'arrivée des savants et des livres de Constantinople en Europe.

Finalement, après mille ans de presque immobilité, une explosion étonnante arrive : Copernic.

Copernic



Copernic (Pologne, 1480-1543)

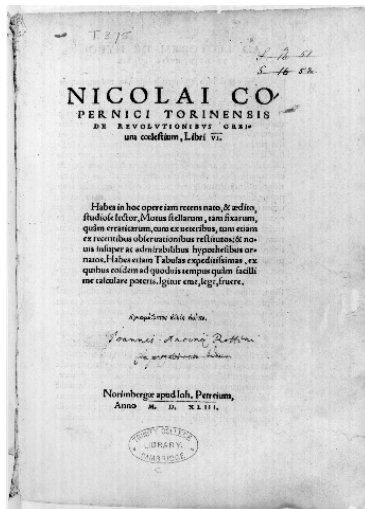
Copernic étudie à Cracovie, ensuite dans les universités italiennes de Bologne, Rome, Padoue and Ferrara, où il absorbe l'esprit de l'Humanisme et de la Renaissance italienne.

Il étudie le Grec, la médecine, les mathématiques, les lois, l'astronomie. Tôt, il a son idée, and travaille toute sa vie sur cette idée. Il travaille seul. Il est un personnage un peu médiéval, très précis, renfermé dans ses recherches. Un chercheur un peu fou, renfermé dans sa petite tour dans un pays perdu du nord.

La grande découverte de Copernic est le fait que la Terre tourne sur elle même, et tourne autour du Soleil. On appelle cette idée le « modèle héliocentrique ».

Copernic arrive à cette idée en étudiant à fond Ptolémée. Son livre, le "*De Revolutionibus*", où il développe sa grande idée, est publié en 1543, au moment où il meurt.

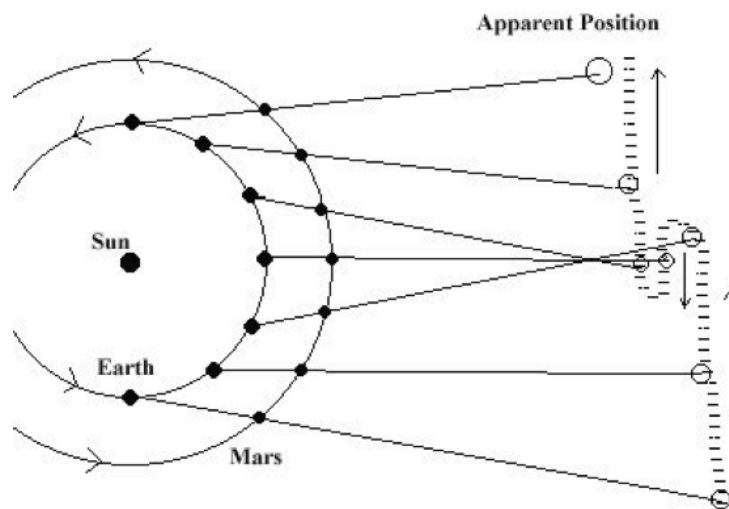
Que veut dire le mot "révolution" ? L'expression "révolution" vient du titre du livre de Copernic, l'un des plus grands « révolutionnaires » de l'histoire de la science.



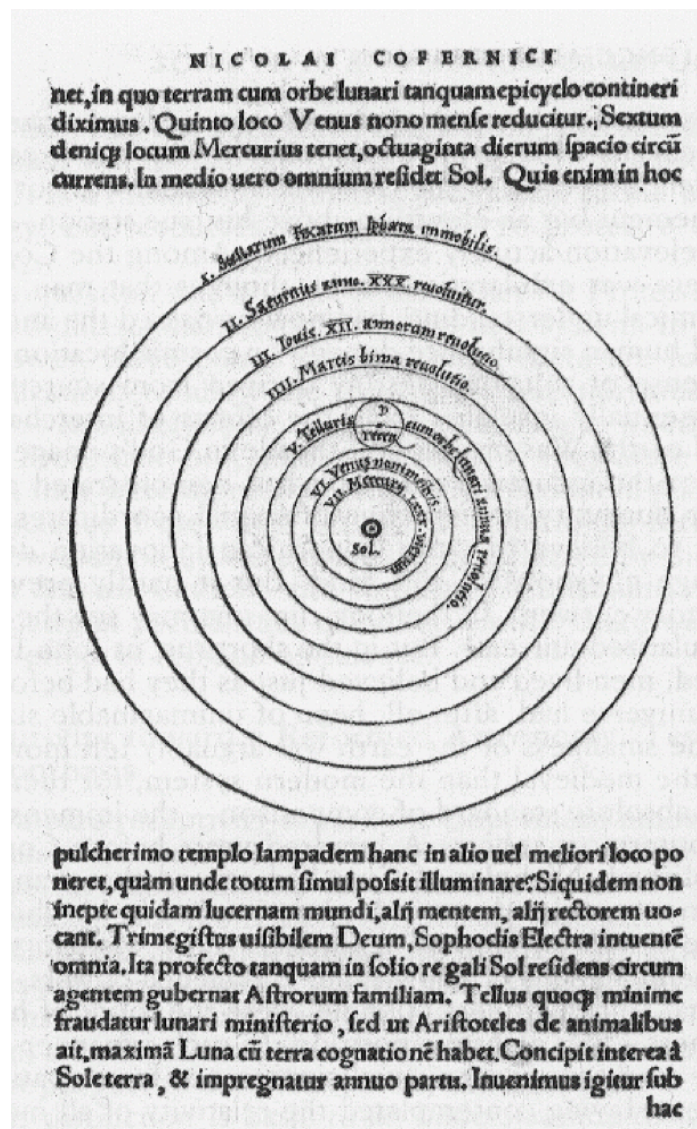
L'idée de Copernic est que les phénomènes célestes sont mieux expliqués comme des mouvements apparents dus au fait que nous (la Terre) nous sommes en mouvement. Comme quand on voit les arbres bouger par la fenêtre d'un train, ce ne sont pas les arbres qui bougent : c'est nous dans le train.

Plus en détail:

- La rotation diurne du ciel peut s'expliquer par la rotation de la terre sur elle même.
- Le mouvement rétrograde de planètes dans le ciel peut s'expliquer par la rotation de la Terre autour du Soleil. Étudiez le schéma suivant. Voyez-vous que, vu de la Terre, Mars à un certain moment semble aller en arrière. ?



Voilà la page du livre de Copernic où l'image du monde avec le Soleil au centre apparaît pour la première fois:



Observez la Terre (avec sa Lune) qui orbite autour du Soleil.

Comment Copernic a compris ça ? Son intuition est que la structure déférent-épicycle représente simplement le mouvement de l'observateur. Mais la démonstration est dans les détails. La clé est en effet dans les données qui sont dans le livre de Ptolémée (Almageste, XI, 3) :

Planète	Cycles de anomalie	Révolutions	Années	Rayon déferrent	Rayon épicycle
<i> Mercure </i>	145	46	46	60	22 1/2
<i> Venus </i>	5	8	8	60	43 1/6
<i> Soleil </i>	1	1	1	60	
<i> Mars </i>	37	42	79	60	39 1/2
<i> Jupiter </i>	65	6	71	60	11 1/2
<i> Saturne </i>	57	2	59	60	6 1/2

Explication :

Pour Mercure, par exemple, tous les 46 ans, on voit la planète Mercure faire 46 rotations autour de la Terre, avec 145 cycles de mouvement rétrograde. C'est à dire, tous les 46 ans, on voit le déferrent de la planète Mercure fait 46 tours, tandis que son épicycle fait 145 tours. Le rayon de l'épicycle (en prenant le rayon du déferrent égal à 1) est déterminé par l'amplitude du mouvement rétrograde.

Observations :

1 : Venus et Mercure sont toujours proches du Soleil. Donc leurs déferrents sont toujours alignés avec le soleil, donc le nombre de révolutions est le même que le nombre d'années.

2 : Pour Mars, Jupiter et Saturne, c'est un tout petit plus compliqué. Dans ce cas, observe que les années sont toujours égales à la somme des nombres de révolutions et des nombres des cycles d'anomalie. Pourquoi ?

Copernic réinterprète tout ça dans le modèle héliocentrique.

Cela donne de suite des informations nouvelles très importantes.

1. D'abord le rayon des orbites des planètes peut être déduit par cette table. Pour Venus et Mercure, tout simplement, c'est le rayon de l'épicycle, si le rayon du déferrent est le rayon de l'orbite de la Terre.

Pour les planètes externes, c'est le contraire : le rapport entre le rayon du déferrent et le rayon de l'épicycle est le rapport entre le rayon de l'orbite de la planète et le rayon de l'orbite de la Terre. Donc par exemple pour Saturne on a :

$$6 \frac{1}{2} / 60 = R_{\text{terre}} / R_{\text{saturne}}$$

En prenant $R_{\text{terre}} = 60$, on a $6 \frac{1}{2} / 60 = 60 / R_{\text{saturne}}$, or $R_{\text{saturne}} = 10\ 750$.

Donc on trouve :

Planète	Rayon orbite
<i>Mercur</i> e	22,50
<i>Venus</i>	43,16
<i>Terre</i>	60
<i>Mars</i>	91,14
<i>Jupiter</i>	313,04
<i>Saturne</i>	553,84

Mais plus que cela ! On a aussi les périodes des orbites!

Pour les Planètes externes est facile : le nombre de révolutions autour de la terre est le même que le nombre de révolutions autour du Soleil (parce que ces planètes tournent autour du Soleil *et* de la Terre.) Donc, Mars, par exemple, fait 42 révolutions en 79 ans. Donc sa période est $79/42$ ans = 687 jours. Le même calcul est valable pour Jupiter et Saturne.

Pour Mercure, c'est plus difficile. En 46 ans son épicycle fait 145 tours, donc il passe à côté de la Terre 145 fois. Combien de tours du Soleil a fait Mercure dans cette période ?

Pensez à deux voitures sur un circuit. Combien de tours a fait la deuxième voiture (Mercure) si elle a dépassé la première (Terre) N_1 fois, tandis que la première a fait N_2 tours ? La réponse est clairement $N=N_1+N_2$. Comme Mercure tourne plus vite que la Terre, donc, il fait $145+46$ tours autour du Soleil, durant les 46 ans. Donc sa période est $46/(145+46)$ ans = 88 jours. Même pour Venus.

Tous ensemble :

Planète	Rayon orbite (unité arbitraire)	Période (jours)
<i>Mercur</i> e	22,50	88
<i>Venus</i>	43,16	225
<i>Terre</i>	60	365,25
<i>Mars</i>	91,14	687
<i>Jupiter</i>	313,04	4 345
<i>Saturne</i>	553,84	10 750

On gagne:

- simplicité: élimination des épicycles !!
- explication de l'alignement
- on obtient les *dimensions* des orbites (parce que il faut fixer toutes les échelles) (confirmé par les phases de venus par Galilée, après 70 ans)
- ces dimensions sont en accord qualitative avec les périodees. (Anticipation III lois de Kepler)
- explication cinématique simple du mouvement rétrograde des planètes; explication d'une simplicité étonnante de la complexité des mouvements des planètes.
- un système avec moins de paramètres, plus de simplicité, plus de choses expliqués.

Copernic reconstruit entièrement le système de Ptolémée sur cette base.

Le monde change encore une fois, d'une façon très drastique, comme au temps de Anaximandre. Maintenant, la Terre n'est plus le centre de l'Univers, et elle bouge.

Les conséquences de la révolution Copernicienne : Galilée et Kepler

La découverte de Copernic déclenche un grand débat savant en Europe. Est ce que la Terre est *vraiment* en mouvement? Deux écoles opposées s'opposent.

Il y avait plusieurs arguments *contre* Copernic:

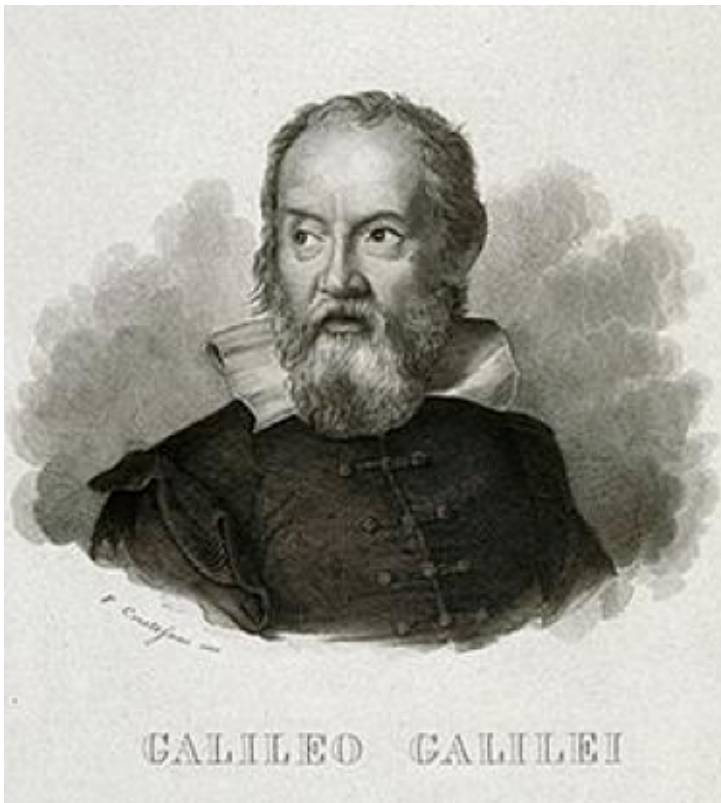
- Le système de Copernic ne fonctionne pas mieux que celui de Ptolémée. Pourquoi accepter une hypothèse absurde, comme l'idée que la terre bouge, pour ne rien vraiment gagner en capacité de prédire ?
- Si la terre bouge si vite (30Km/s autour du soleil), pourquoi nous ne nous apercevons pas?

Et finalement l'argument le plus fort:

- La physique est contre cette hypothèse, parce le Ciel est différent de la Terre: dans le ciel, les choses bougent en cercles. Sur la Terre, les choses bougent en ligne droite, en haut et en bas.

Tout cela change avec Galilée.

Galilée



Galileo Galilei. Pisa 1564 – 1642

Galilée est considéré comme le fondateur de la science moderne. Il donne plusieurs contributions majeures à l'idée même de science.

Galilée a une personnalité flamboyante, polémique, politique. Il écrit des pamphlets virulents. Il se bagarre avec tout le monde, même avec l'église, qui, au début était assez favorable à ses recherches.

Galilée est convaincu du système Copernicien, et le défend fortement. L'un de ses livres est le "*Dialogo sui massimi sistemi*" (Dialogue entre les Grands Systèmes). Les grands systèmes sont celui de Ptolémée et celui de Copernic. Galilée explique en détail le système de Copernic, et présente les arguments en faveur.

Les grandes contributions de Galilée sont :



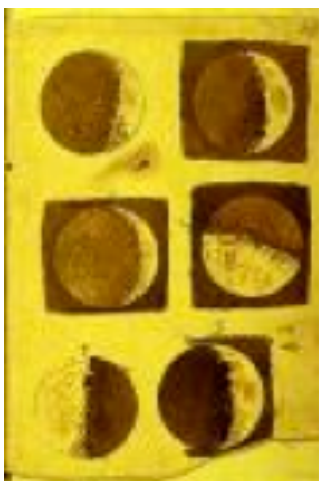
Telescopio dei Galilei, Museo di Fisica e Storia Naturale, Firenze

Télescope de Galilée.

1. Utilise un **télescope**, qui vient d'être construit par des artisans du nord de l'Europe, pour étudier le ciel. De suite il fait une série d'observations étonnantes:

- Les satellites de Jupiter
- Les montagnes de la lune ...
- Les phases de Venus

Toutes ces observations confirment indirectement le système de Copernic. Par exemple une étrange anomalie du système de Copernic était le fait que la Terre, et seulement la Terre semblait avoir une lune. Les Satellites de Jupiter indiquent que la Lune est un satellite come des autres, et non pas une anomalie dans le système, ou une spécialité de la Terre.



Page des notes de Galilée avec dessins de la lune (avec ses montagnes) vue par le télescope.

2. Il comprend que par rapport à un référentiel qui se déplace selon un mouvement droit et uniforme, tout se passe comme dans un référentiel qui n'est pas en mouvement.

Donc, le mouvement de la Terre n'est pas en contradiction avec nos observations (c'est la réponse à Ptolémée, et à ses arguments contre l'idée que la Terre bouge.). Aujourd'hui on appelle cette idée la "relativité galiléenne".

3. En ayant pris au sérieux le système de Copernic, Galilée en tire des conséquences qui vont avoir une influence immense sur l'humanité.

Le raisonnement de Galilée est le suivant.

- Dans le ciel il y a des régularités.
- Les astres suivent des lois mathématiques exactes et simples
- La terre est un astre comme les autres
- Donc il doit y avoir des régularités sur la terre aussi !

Donc le grand programme de Pythagore et Platon, décrire la Nature avec des lois mathématique, doit bien s'appliquer à la Terre aussi !

Galilée est fortement influencé par Platon. Il cherche des régularités ! Il cherche la "vérité cachée derrière les choses". Vu le succès de l'astronomie, il sait que des lois existent en ciel. En considération du succès du Copernicanisme, confirmé par ses observations célestes, il devient convaincu que, au fond, Platon doit avoir raison.

Donc : *il cherche les lois exactes et mathématiques, qui gouvernent le mouvement des corps.*

Et il les trouve!

Aristote avait fondé sa physique du mouvement sur l'observation que le mouvement naturel des corps lourds est de tomber. Galilée se demande *comment* tombent-ils. Avec quelle lois mathématique exacte ? Il la cherche.

Là, il a un série d'intuitions géniales:

- Ne pas se contenter de regarder, mais faire des observations dans les quelles, on va créer exactement la situation qu'on veut étudier : Galilée invente *les expériences scientifiques*.

C'est le dernier élément manquant à la liste des instruments de la science moderne.

Il comprend qu'il faut étudier des situations "idéales", en faisant abstraction de tout phénomène complémentaire:

Quand les choses tombent, elles sont ralenties par l'air. Il s'intéresse à la chute des corps "quand il n'y a pas d'air". Non pas parce que cela nous intéresse en soit, mais pour briser un problème complexe en éléments plus simples.

Autre idée: il considère une situation simplifiée : Au lieu de faire tomber les objets libres, il les fait rouler le long d'un "plan incliné" :



Le Plan incliné de Galilée

Il construit ainsi le premier "laboratoire scientifique" de l'histoire, pour étudier la chute des corps.

L'étonnante découverte des la première lois (mathématique) de nature sur terre

Galilée fait rouler des boules le long d'un plan incliné.

Il découvre que

- Si la longueur parcourue dans un premier temps T est L , alors:
- la longueur dans le deuxième temps T est $3L$,
- la longueur dans troisième temps T est $5L$,
- la longueur dans quatrième temps T est $7L$.

C'est à dire : si je prenne un pendule qui va fait une oscillation par seconde, et je marque la position de la boule qui roule le long du plan incliné à chaque oscillation, j'obtiens:

I - I - - I - - - - I - - - - - I - - - - - I - - - - - I - - - - - I - - - - - I - - - - -

1 3 5 7 9 11

La chose surprenante est que cela reste vrai:

- quel que soit le matériel de la boule,
- quel que soit le poids et la dimension de la boule,
- quel que soit l'inclinaison du plan,

Donc, ça doit être vrai même dans la limite dans laquelle le plan est vertical !

Donc, celle si est une *loi universelle de la chute de tous les corps* !

Galilée l'appelle "la lois des nombres impairs"

Galilée est étonné. Il écrit qu'il n'y a pas plus grand bonheur qu'à avoir vu pour la première fois la clarté mathématique cachée derrière les apparences !

Observez: tout le monde aurait pu faire cette expérience, n'importe quand. Mais personne n'avait vraiment pris au sérieux l'idée Pythagorique/Platonique qu'il y a des régularités mathématiques derrière tous les phénomènes.

Il faut ensuite comprendre ce qu'il y a derrière cette "lois des nombres impairs". Galilée y met deux ans. Nous on ira plus vite:

D'abord observez que

1

$$1+3 = 4$$

$$1+3+5 = 9$$

$$1+3+5+7 = 16$$

$$1+3+5+7+11 = 25$$

Les carré parfaits!

Donc dans un temps T, L=1

dans un temps 2T L = 4

dans un temps 3T L = 9

dans un temps 2T L = 16

...

c'est à dire: "les distances vont comme le carré des temps" !

donc

$$x = c t^2$$

donc la vitesse est proportionnelle au temps:

$$v = dx/dt = 2c t$$

et donc l'accélération est constante

$$a = dv/dt = 2c$$

Deuxième observation. La constante c est la même pour chaque boule et chaque dimension et poids. Elle est égale à la moitié de l'accélération. Elle change avec l'inclinaison, dans la manière suivante, mais dans la limite où le plan est vertical, elle devient :

$$a = 9,8 \text{ m/s}^2 \sim 10 \text{ m/s}^2$$

Celle-ci est une constante "universelle" qui détermine la chute de tous les corps. Elle ne dépend ni du poids ni de la dimension de la boule, ni de rien.

Observez:

- approximations : Galilée néglige la friction avec l'air, ne regarde pas la vraie chute, mais une chute "retardée par le plan incliné", et considère la limite.
- construction de situation artificielle : le plan incliné.
- interrogation de la nature : Expérience, et non pas simple observation.
- platonisme : il sait déjà qu'il doit y avoir une loi, et il la cherche.
- vitesse et accélération : Il comprend que la clé de tout est l'accélération. Personne avant Galilée n'avait mis l'accent sur l'*accélération*.

L'importance de ce résultat est énorme: *il y a des lois mathématiques qui gouvernent le mouvement de tous les corps*. Ciel: cercles. Terre: accélération vers le bas constant ! Deux lois différentes, mais des lois partout.

La loi:

$$x = c t^2$$

est la première loi scientifique trouvée, valable pour des objets sur la Terre.

La confrontation avec l'église.

Galilée se trouve en difficulté avec l'église catholique, qui commence à s'opposer au copernicanisme.

Il subit plusieurs procès pour ses livres, et à la fin, il se sauve en abjurant sa théorie, c'est à dire avec une déclaration publique où il rejette ses propres idées. (La tradition veut qu'il jure, mais juste après il dit "e pur si muove", qui veut dire, "quand même elle bouge". 'Elle' est la Terre, bien sure).

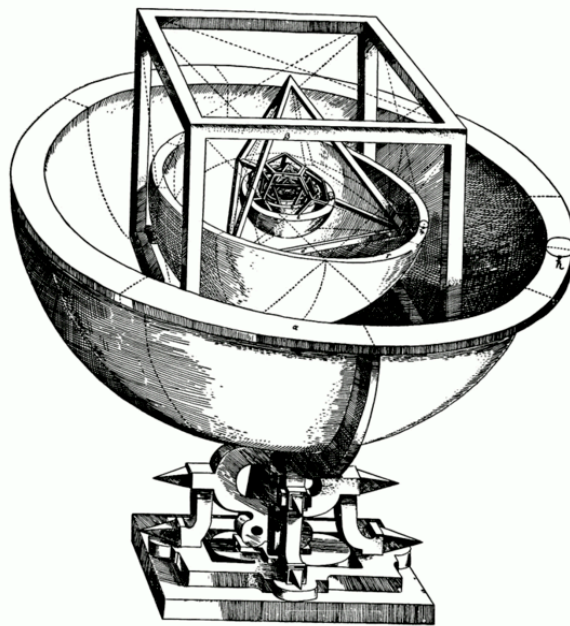
Cette confrontation entre Galilée et l'église devient le symbole d'une lutte entre la religion et la science comme système d'explications du monde.

Kepler

Johannes Kepler : Weil-der-Stadt (Baden-Württemberg, Allemagne) (1571-1630)

Tandis que Galilée découvre les lois exactes du mouvement des corps sur la Terre, Kepler découvre celles des corps dans le ciel.

Kepler travaille à la cour de Prague. Il suit d'abord une idée farfelue: les diamètres des orbites sont déterminés par les solides platoniques l'un dans l'autre. Mais le problème posé est intéressant : comment sont déterminées les orbites des planètes ?



I

Image du modèle (faux) du système solaire de Kepler, dans son *Mysterium Cosmographicum* (1596).

A la mort de Tycho Brahé en 1601, Kepler est désigné comme mathématicien impérial à la cour de Rodolphe II, de Habsbourg, Empereur du Saint Empire et roi de Bohême et de Hongrie : A nouveau, après deux mille ans des Ptolémées, les princes soutiennent la recherche scientifique ! (Mais il ne faut pas exagérer dans l'admiration de ces princes : le devoir primaire de Kepler était de fournir des *prédictions astrologiques* à l'empereur.... Vous pensez que c'est stupide ? Même des présidents d'état d'aujourd'hui ont des astrologues ! La stupidité est dure à mourir !)

Comment passer d'une mère sorcière à un fils grand scientifique.

La mère de Kepler, Catherine — qu'il qualifie même de « petite, maigre, sinistre et querelleuse » — fut élevée par une tante qui finit sur le bûcher pour sorcellerie. En 1615, elle même, alors âgée de 68 ans, est accusée de sorcellerie. Kepler, persuadé de son innocence, va passer six années à assurer sa défense auprès des tribunaux et écrire de nombreux plaidoyers. Elle passe quand même une année enfermée dans la tour de Güglingen aux frais de Kepler, ayant échappée de peu à la torture. Finalement, défendue par son fils, elle est acquittée le 28 septembre 1621. Affaiblie par ces dures années de procès et d'emprisonnement, elle meurt six mois plus tard.

Kepler raconte dans un compte (le *Somnium*, le rêve), que la mère l'accompagne dans le système des planètes et lui explique les sentiers des planètes, en volant sur un balai. Sa mère était dévouée apparemment à un culte solaire, et dans le rêve lui explique que « le Soleil est la cause des mouvements des planètes ».

La science de Kepler

- Foi dans l'existence des lois exactes.
- Grande intuition: le Soleil doit être la clé de tout: Le soleil doit exercer une "force" sur les planètes.

Pas crucial: oublier les cercles !! Ce ne sont pas les cercles qui sont importants ! C'est la trajectoire de la planète, quelle qu'elle soit.

Pour arriver là, c'est un parcours long :

- Premier modèle Copernicien révisé (toujours des cercles), en utilisant les données de Tycho Braille, riche danois fou qui avait construit le premier grand observatoire "moderne" et avait recueilli de nombreuses observations beaucoup plus précises que dans le passé. Pour la première fois, le monde moderne recommence à faire des observations précises, à la hauteur des observations des grecs anciens.

Kepler calcule à nouveau tout le système de Ptolémée (avec les mêmes principes), mais de manière beaucoup plus précise. Il écrit des nouvelles tables astronomiques avec la position des planètes, bien meilleures que les anciennes ou celles de Copernic. Il devient célèbre comme astronome.

- **MAIS**: pour la planète Mars les prédictions du modèle ne collent pas exactement avec les observations : 8 minutes d'arc qui manquent. 8 minutes d'arc est très peu ! Une petite fraction du rayon apparent de la Lune.

Il cherche pendant des années à refaire mieux le système, mais il n'y arrive pas. Puis, il a l'intuition complète: *les trajectoires sont des ellipses*. Et de là, il trouve trois lois desquelles le mouvement des planètes suit parfaitement:

- Trois lois simples qui gouvernent toutes les planètes:
- Première loi : Les trajectoires des planètes sont des ellipses
- Deuxième loi : La vitesse est proportionnelle à l'inverse du carré de la distance du Soleil.

Mais peut être la loi la plus importante du point de vue historique c'est la

-Troisième loi:

Pour la comprendre, il faut reconsidérer Ptolémée. Les rayons des orbites des planètes ne sont pas déterminés dans le modèle de Ptolémée. Seulement le rapport entre l'excentricité et l'épicycle est déterminé, parce que le modèle est invariant d'échelle.

Avec Copernic, tous les épicycles qui correspondent au mouvement apparent de la Terre sont de la même longueur, donc il faut "agrandir les orbites des planètes extérieures", pour les mettre à la bonne échelle. Donc, on y déduit la dimension des orbites des planètes. Et comme Ptolémée avait déjà leurs périodes, on a les données périodes/rayons.

Planète	Rayon orbite (unité arbitraire)	Période (jours)
<i>Mercur</i> e	22,50	88
<i>Venus</i>	43,16	225
<i>Terre</i>	60	365,25
<i>Mars</i>	91,14	687
<i>Jupiter</i>	313,04	4 345
<i>Saturne</i>	553,84	10 750

Avec cela, Kepler observe que :

Troisième loi : Les temps et les rayons sont en proportion cube/carré : $R^3/T^2 = \text{constante}$: avec la même constante pour toutes les planètes. (La lune n'est pas une planète)

Planète	Rayon orbite R (unité arbitraire)	Période T (jours)	R^3/T^2
<i>Mercur</i> e	22,50	88	1,5
<i>Venus</i>	43,16	225	1,6
<i>Terre</i>	60	365,25	1,6
<i>Mars</i>	91,14	687	1,6
<i>Jupiter</i>	313,04	4 345	1,6
<i>Saturne</i>	553,84	10 750	1,5

Avec les deux grands résultats de Kepler et Galilée, Newton va résoudre le puzzle des lois du mouvement. Ce sera le prochain, et dernier cours.

Résumé 4

- Après mille ans de progrès très lent de la connaissance scientifique, à la sortie du Moyen âge Européen, un groupe d'intellectuels cherche de reconstruire le savoir ancien perdu. Les anciens textes grecs sont traduits de l'Arabe en Latin. On étudie Aristote. On recommence à discuter la Science.
- Copernic reprend l'Almageste, et re-interprète le système épicycle-déférent comme la description des mouvements apparents par rapport au mouvement de la Terre. Cela aura des conséquences immenses pour l'humanité entière.
- Galilée (Galileo Galilei) comprend *que si la Terre est une planète comme les autres, alors il doit y avoir des lois mathématiques aussi sur la Terre*, pas seulement en ciel. Il les cherche, et il trouve la loi avec laquelle les corps tombent: l'espace est proportionnel aux carrés des temps: $x=1/2 g t^2$, où : $g=9,8 \text{ m/s}^2$.
- Les contributions de Galilée sont nombreuses et majeures:
 - Utilise le télescope pour regarder le ciel et découvre phénomènes jamais observés, qui confirment l'idée de Copernic: satellites de Jupiter, phases de Venus, montagnes de la Lune.
 - Commence la science expérimentale: construire des situations simples et contrôlées, pour faire des mesures précises, et en déduire de résultats de validité générale.
 - Comprend que l'*accélération* est la clé pour comprendre la dynamique, et qu'un corps en mouvement reste en mouvement s'il n'y a pas des forces à l'arrêter.
- Kepler améliore le système de Copernic. Il abandonne l'idée que les mouvements doivent être expliqués par des compositions de cercles. Il comprend que les trajectoires des planètes sont des ellipses (Loi 1). Et que la vitesse est telle que l'aire parcourue est constante (Loi 2).
- Le système de Copernic, à la différence du système de Ptolémée permet d'évaluer le rayon de l'orbite des planètes, parce que les épicycles apparents doivent être de la même dimension que le rayon de l'orbite de la Terre. Grâce à ça, Kepler observe qu'il y a une relation entre rayons et périodes: les cubes des rayons sont proportionnels aux carrés des périodes: $T^2/R^3 =$ même pour toutes les planètes (vrai aussi pour les satellites de Jupiter) (Loi 3).

Devoir:

1. En utilisant la 3ème loi de Kepler, calculer la *vitesse* à laquelle se déplacerait une « petite lune », en orbite autour de la Terre *juste au-dessous des montagnes*, c'est-à-dire, avec un rayon orbital égal au rayon de la Terre. (Rappelez vous que de la dimension angulaire de la Lune que vous avez mesurée, et de la comparaison de la Lune avec l'ombre de la Terre durant une éclipse, nous avons évalué, suivant Hipparque, la distance de la lune à 60 fois le rayon de la Terre.) Si vous êtes capables, calculez aussi *l'accélération* de cette lune sur cette orbite basse.

2. Le résultat des expériences de Galilée est qu'une boule a une accélération constante. Cette accélération est de plus en plus faible quand l'inclination est mineure. Il a aussi vérifié que si la boule monte un plan incliné, elle décélère, et sa décélération est de plus en plus faible si l'inclination est mineure. De là, il en tire que sur un plan, s'il n'y avait pas de frottement une boule continuerait sans jamais s'arrêter (contrairement à ce que tout le monde avait pensé depuis des siècles). Quel est le raisonnement de Galilée ? Comment arrive-t-il à cette conclusion ?