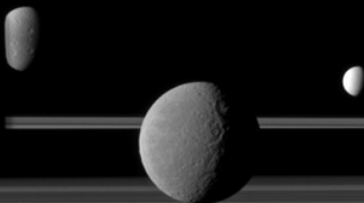


Kepler Unplugged

Damien Gayet - Institut Fourier



Séminaire du magistère mathématiques UJF
Institut Fourier 18 février 2016

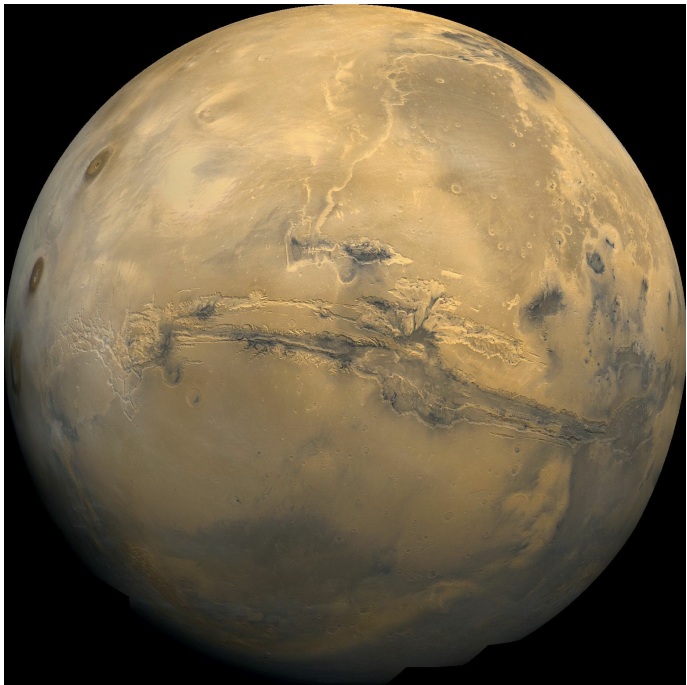
Plan

1. Les trois marches martiennes
2. *Astronomie nouvelle*
3. La pop star des étoiles
4. Les dessous de l'ellipse
5. Questions !
6. Boni

Partie I
Les trois marches martiennes



Léopold Trouvelot 1877



Film *Rétrogradation*

Film *épicycles*

Courte chronologie

Hipparque	-190 , -120
Ptolémée	90-168
Copernic	1473-1543
Tycho Brahé	1546-1601
Galilée	1564-1642
Kepler	1571-1630
Newton	1643-1727

<i>Des orbites célestes</i>	1543
<i>Astronomie Nouvelle</i>	1609
<i>Sidereus Nuncius</i>	1610
<i>Dialogue des deux systèmes du monde</i>	1632
<i>Principes de la philosophie naturelle</i>	1686
<i>La Guerre des Mondes</i>	1898



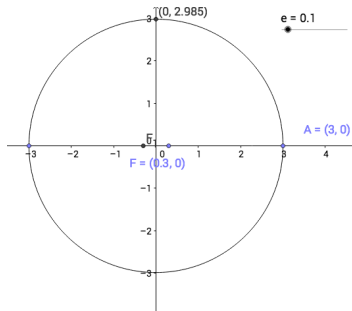
Lune = 30'

$$\frac{c}{a} = \frac{|Foyer-Centre|}{a}$$

$$\frac{a-b}{a}$$

 e

$$\frac{e^2}{2} + O(e^3)$$



Les bonnes résolutions

oeil	1'
Ptolémée	30'
Copernic	30'
Brahé	2'
Galilée 1610	10''
Huygens 1659	2''
Hui	$10^{-3}''$
Lune	30'
Mars	2'' – 25''

	Terre	Mars
e	0,02	0,1
Angle	1°	6°
e^2	$3 \cdot 10^{-4}$	10^{-2}
Angle	1'	30'

Les bonnes résolutions

oeil	1'
Ptolémée	30'
Copernic	30'
Brahé	2'
Galilée 1610	10''
Huygens 1659	2''
Hui	$10^{-3}''$
Lune	30'
Mars	2'' – 25''

	Terre	Mars
e	0,02	0,1
Angle	1°	6°
e^2	$3 \cdot 10^{-4}$	10^{-2}
Angle	1'	30'

Donc Ptolémée et Copernic

- ▶ savaient que le centre de la trajectoire de Mars était à c du Soleil

Les bonnes résolutions

oeil	1'
Ptolémée	30'
Copernic	30'
Brahé	2'
Galilée 1610	10''
Huygens 1659	2''
Hui	$10^{-3}''$
Lune	30'
Mars	2'' – 25''

	Terre	Mars
e	0,02	0,1
Angle	1°	6°
e^2	$3 \cdot 10^{-4}$	10^{-2}
Angle	1'	30'

Donc Ptolémée et Copernic

- ▶ savaient que le centre de la trajectoire de Mars était à c du Soleil
- ▶ ne pouvaient pas distinguer une ellipse d'un cercle décentré de c .

- ▶ Variation de vitesse : $\frac{\Delta v}{v} = 2e + O(e^2)$
- ▶ Pour Mars : 12' par jour. Prise en compte par Ptolémée

Mars copernicienne



Nicolas Copernic (Toruń 1473- Frombork 1543)

Mars parcourt cercle déférent de rayon a sur lequel un premier épicycle tourne à vitesse constante de rayon $\frac{3}{2}ea$, sur lequel un second épicycle tourne à vitesse double, et de rayon $\frac{1}{2}ea$.

Mars parcourt cercle déférent de rayon a sur lequel un premier épicycle tourne à vitesse constante de rayon $\frac{3}{2}ea$, sur lequel un second épicycle tourne à vitesse double, et de rayon $\frac{1}{2}ea$.

$$z = ae^{il} + \frac{3}{2}ea - \frac{1}{2}eae^{2il}.$$

(Le $-$ provient des conditions initiales)

Mars ptoléméenne



Ptolémée

Ptolemais Hermiou 90 - Canope 168

Mars parcourt un cercle excentrique de rayon a à distance ea du Soleil, à vitesse radiale constante du point de vue de l'équant, à ea du centre.

Mars parcourt un cercle excentrique de rayon a à distance ea du Soleil, à vitesse radiale constante du point de vue de l'équant, à ea du centre.

$$z = ea + ae^{i\xi}$$

Mars parcourt un cercle excentrique de rayon a à distance ea du Soleil, à vitesse radiale constante du point de vue de l'équant, à ea du centre.

$$z = ea + ae^{i\xi}$$

avec

$$\frac{\sin(l - \xi)}{ea} = \frac{\sin(\pi - l)}{a}$$

Mars parcourt un cercle excentrique de rayon a à distance ea du Soleil, à vitesse radiale constante du point de vue de l'équant, à ea du centre.

$$z = ea + ae^{i\xi}$$

avec

$$\frac{\sin(l - \xi)}{ea} = \frac{\sin(\pi - l)}{a}$$

soit

$$\xi = l - e \sin l + O(e^3).$$

Mars parcourt un cercle excentrique de rayon a à distance ea du Soleil, à vitesse radiale constante du point de vue de l'équant, à ea du centre.

$$z = ea + ae^{i\xi}$$

avec

$$\frac{\sin(l - \xi)}{ea} = \frac{\sin(\pi - l)}{a}$$

soit

$$\xi = l - e \sin l + O(e^3).$$

Donc

$$\begin{aligned} z &= ae^{il} + \frac{3}{2}ea - \frac{1}{2}eae^{2il} + O(e^2) \\ &= \text{Copernic} + O(e^2). \end{aligned}$$

Mars képlérienne



Johannes Kepler (Weil-der-Stadt 1571-Ratisbonne 1630)

Mars parcourt une ellipse dont le Soleil est un foyer, selon la loi des aires

Une ellipse dont le Soleil est un foyer.

- ▶ E = anomalie excentrique (attention !)
- ▶ ξ = angle au centre
- ▶ l = anomalie moyenne (temps)

$$\begin{aligned} z &= ea + a \cos \xi + ib \sin \xi \\ &= ea + ae^{i\xi} + O(e^2). \end{aligned}$$

Une ellipse dont le Soleil est un foyer.

- ▶ E = anomalie excentrique (attention !)
- ▶ ξ = angle au centre
- ▶ l = anomalie moyenne (temps)

$$\begin{aligned}z &= ea + a \cos \xi + ib \sin \xi \\ &= ea + ae^{i\xi} + O(e^2).\end{aligned}$$

C'est Ptolémée $+O(e^2)$ donc comme Copernic $+O(e^2)$ si ξ varie suivant l comme chez Ptolémée, id est soit

$$\xi = l - e \sin l + O(e^2).$$

On a l'Équation du temps :

$$l = E + e \sin E$$

De plus

On a l'Équation du temps :

$$l = E + e \sin E$$

De plus

$$\frac{\sin E}{\sin \xi} = \frac{b}{a}$$

On a l'Équation du temps :

$$l = E + e \sin E$$

De plus

$$\frac{\sin E}{\sin \xi} = \frac{b}{a}$$

donc

$$\begin{aligned} \xi &= E + O(e^2) \\ &= l - e \sin l + O(e^2). \end{aligned}$$

soit

On a l'Équation du temps :

$$l = E + e \sin E$$

De plus

$$\frac{\sin E}{\sin \xi} = \frac{b}{a}$$

donc

$$\begin{aligned} \xi &= E + O(e^2) \\ &= l - e \sin l + O(e^2). \end{aligned}$$

soit

Conclusion



Oecuménisme avant l'arrivée des lunettes.

Question avant l'heure !

Si la physique décrit la réalité, comment se fait-il que trois théories équivalentes décrivent trois réalités ?



Chacun doit s'efforcer de faire concorder du mieux qu'il peut les hypothèses les plus simples avec les mouvements célestes ; mais si cela ne réussit point, il doit prendre celles des hypothèses qui s'adaptent le mieux aux faits.

L'Almageste

Monde réel



Monde réel



Mesures



Monde réel



Mesures

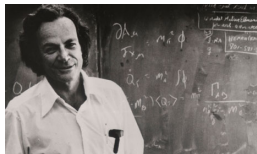


Nombres

Monde réel



Mesures



Théorie physique

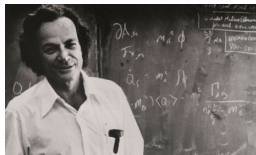


Nombres

Monde réel



Mesures



Théorie physique



Nombres

Remarque

- ▶ Copernic est révolutionnaire par l'héliocentrisme...
- ▶ ... mais réactionnaire par le mouvement régulier...
- ▶ ... mais sa réaction ouvre la voie aux séries de Fourier !
- ▶ Si le développement limité de Kepler est à l'ordre 2, on ajoute deux épicycles et on obtient une théorie aussi juste que les ellipses
- ▶ Si on ajoute des harmoniques supérieures, on obtient une théorie... meilleure que l'ellipse !

Remarque

- ▶ Copernic est révolutionnaire par l'héliocentrisme...
- ▶ ... mais réactionnaire par le mouvement régulier...
- ▶ ... mais sa réaction ouvre la voie aux séries de Fourier !
- ▶ Si le développement limité de Kepler est à l'ordre 2, on ajoute deux épicycles et on obtient une théorie aussi juste que les ellipses
- ▶ Si on ajoute des harmoniques supérieures, on obtient une théorie... meilleure que l'ellipse !

Pourquoi Kepler n'a-t-il pas continué la voie des épicycles ?



Aelita 1924 (Yakov Protazanov)

EDWARD L. ALPERSON
presents



INVADERS FROM MARS

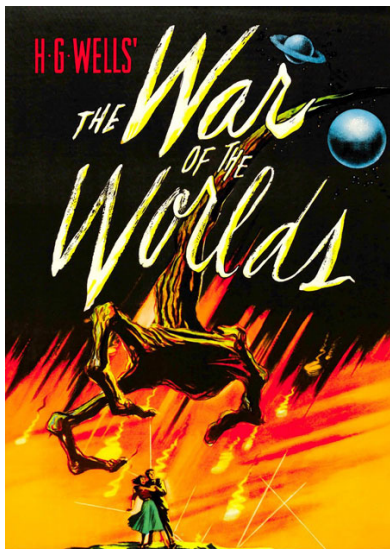
Photographed in **COLOR**

STARRING HELENA CARTER · ARTHUR FRANZ · JIMMY HUNT

with LEIF ERICKSON · HILARY BROCKE · MORRIS ANKRUM · MAX WAGNER · BILL PHIPPS · MILBURN STONE · JANINE PERREAU
AN EDWARD L. ALPERSON PRODUCTION · Released by 20th Century-Fox

PRODUCTION DESIGNED AND DIRECTED BY WILLIAM CAMERON MENZIES · RICHARD BLAKE · EDWARD L. ALPERSON, JR. · RAUL KRAUSHAAR

1953



H·G·WELLS'

THE *War* OF THE *Worlds*

COLOR BY **TECHNICOLOR**

PRODUCED BY GEORGE PAL · DIRECTED BY BYRON HASKIN · SCREEN PLAY BY BARRE LYNDON · A PARAMOUNT PICTURE

VOUS N'EN REVIENDREZ PAS !



JOHN CARPENTER
**GHOSTS
OF MARS**

NATASHA HENSTRIDGE ICE CUBE JASON STATHAM PAM GRIER

SCREENPLAY BY JOHN CARPENTER AND PRODUCTION DESIGNER STUART KING ICE CUBE NATASHA HENSTRIDGE "JOHN CARPENTER'S GHOSTS OF MARS" JASON STATHAM PAM GRIER CLEO DUNNILL LINDA CASSETTY
DIRECTOR OF PHOTOGRAPHY JOHN CARPENTER EXECUTIVE PRODUCERS ROBERT ROYCEMAN STEVE ROYCEMAN HOWARD BERGER PRODUCED BY JOHN CARPENTER AND STATHAM PRODUCED BY WILLIAM CLAYTON DIRECTOR OF PHOTOGRAPHY GARY S. WELLS

PRODUCED BY STATHAM KING SCREENPLAY BY STATHAM KING AND JOHN CARPENTER DIRECTED BY JOHN CARPENTER

www.ghostsofmars-movie.com

WARNER BROS. PICTURES
A TIME WARNER COMPANY

WARNER BROS. PICTURES
A TIME WARNER COMPANY

WARNER BROS. PICTURES
A TIME WARNER COMPANY

WARNER BROS. PICTURES
A TIME WARNER COMPANY

WARNER BROS. PICTURES
A TIME WARNER COMPANY

WARNER BROS. PICTURES
A TIME WARNER COMPANY

WARNER BROS. PICTURES
A TIME WARNER COMPANY

WARNER BROS. PICTURES
A TIME WARNER COMPANY

WARNER BROS. PICTURES
A TIME WARNER COMPANY

WARNER BROS. PICTURES
A TIME WARNER COMPANY

WARNER BROS. PICTURES
A TIME WARNER COMPANY

WARNER BROS. PICTURES
A TIME WARNER COMPANY

WARNER BROS. PICTURES
A TIME WARNER COMPANY

WARNER BROS. PICTURES
A TIME WARNER COMPANY

WARNER BROS. PICTURES
A TIME WARNER COMPANY

WARNER BROS. PICTURES
A TIME WARNER COMPANY

WARNER BROS. PICTURES
A TIME WARNER COMPANY

WARNER BROS. PICTURES
A TIME WARNER COMPANY

WARNER BROS. PICTURES
A TIME WARNER COMPANY

WARNER BROS. PICTURES
A TIME WARNER COMPANY

WARNER BROS. PICTURES
A TIME WARNER COMPANY

WARNER BROS. PICTURES
A TIME WARNER COMPANY

WARNER BROS. PICTURES
A TIME WARNER COMPANY

WARNER BROS. PICTURES
A TIME WARNER COMPANY

WARNER BROS. PICTURES
A TIME WARNER COMPANY

WARNER BROS. PICTURES
A TIME WARNER COMPANY

WARNER BROS. PICTURES
A TIME WARNER COMPANY

WARNER BROS. PICTURES
A TIME WARNER COMPANY

WARNER BROS. PICTURES
A TIME WARNER COMPANY

WARNER BROS. PICTURES
A TIME WARNER COMPANY

WARNER BROS. PICTURES
A TIME WARNER COMPANY

WARNER BROS. PICTURES
A TIME WARNER COMPANY

WARNER BROS. PICTURES
A TIME WARNER COMPANY

WARNER BROS. PICTURES
A TIME WARNER COMPANY

WARNER BROS. PICTURES
A TIME WARNER COMPANY

WARNER BROS. PICTURES
A TIME WARNER COMPANY

WARNER BROS. PICTURES
A TIME WARNER COMPANY

WARNER BROS. PICTURES
A TIME WARNER COMPANY

WARNER BROS. PICTURES
A TIME WARNER COMPANY

WARNER BROS. PICTURES
A TIME WARNER COMPANY

WARNER BROS. PICTURES
A TIME WARNER COMPANY

WARNER BROS. PICTURES
A TIME WARNER COMPANY

SANTA BRINGS CHRISTMAS FUN TO MARS!

Blast off for Mars...
with Santa
and a pair
of Earth Kids!
Science-Fun-Fiction
at its height!

JOSEPH E. LEVINE presents

SANTA CLAUS CONQUERS THE MARTIANS

IN SPACE-BLAZING
COLOR

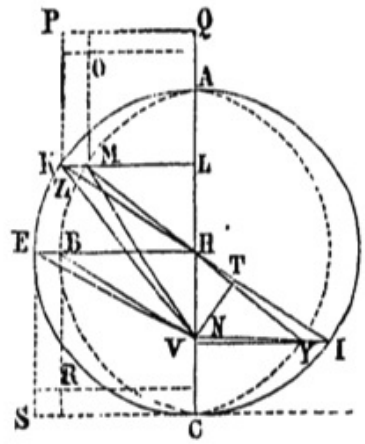
SAT.-SUN.
MATINEE
SPECIAL

SEE: The Martians Kidnap Santa!
Santa's North Pole Workshop!
The Fantastic Martian Toy Factory!
Earth Kids Meeting With Martian Kids!
Space-ship Journey from Earth to Mars!
Santa Turn Mars-Robot Into a Mechanical Toy!

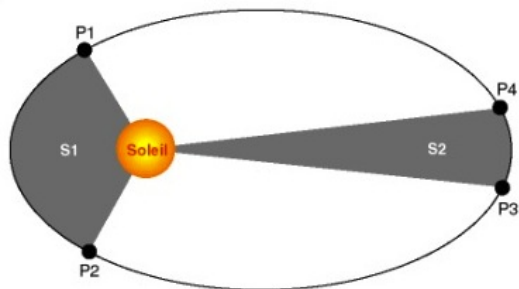
About "MORRAY
FOR SANTA CLAUS"
On Film - Screen Records

Walt Disney World - Fantasy Film Studios - Buena Vista Home Video - All Rights Reserved

Partie II
Astronomie Nouvelle



Les deux premières lois de Kepler



- ▶ Chaque planète parcourt une ellipse dont le Soleil est un foyer
- ▶ L'aire balayée en un temps donné est toujours la même



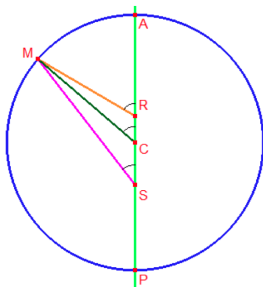
Site Paillart N°1

Pierre Gallais



Ce qui m'importe, n'est pas seulement de faire savoir au lecteur ce que j'ai à dire, c'est surtout les raisons, les subterfuges et heureux hasards qui m'ont conduit à mes découvertes. Lorsque Christophe Colomb, Magellan, les Portugais racontent comment ils s'égarèrent dans leurs voyages, non seulement nous leur pardonnons, mais nous regretterions de ne pas avoir leur récit, sans lequel le grand divertissement serait perdu.

- ▶ Angle entre les plans de Mars et de la Terre



- ▶ *Hypothèse par procuration* : Ptolémée avec centre qui n'est pas au milieu de l'équant et du Soleil - différence en $O(e^2)$. Soixante-dix tentatives pour trouver le bon équant !
- ▶ Les longitudes sont parfaites, mais pas les distances.

- ▶ Ajoute un équateur à la Terre. La précision ne change pas.
- ▶ Première "fausse" loi : *la vitesse angulaire eccentric est inversement proportionnelle à la distance au Soleil.*

$$\rho \dot{\xi} = cste.$$

- ▶ Donc

$$t = \int \rho(\xi) d\xi$$

(somme chez K.).

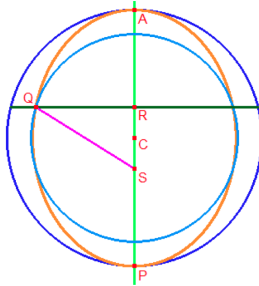
- ▶ Trop difficile. Utilise plutôt l'**a**ire pour simplifier.

- ▶ Retour à la bissection de l'excentrique : les distances sont bien respectées mais cette fois, erreur de 8' aux octants pour les longitudes.

- ▶ Retour à la bissection de l'excentrique : les distances sont bien respectées mais cette fois, erreur de 8' aux octants pour les longitudes.

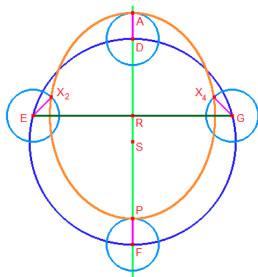
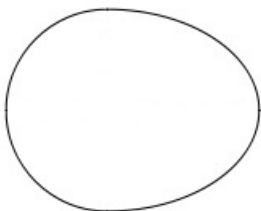
Cette différence est plus petite que l'incertitude des observations de Ptolémée, incertitude qui, de l'aveu de cet astronome, était au moins de dix minutes. Mais la bonté divine nous ayant fait présent dans Tycho-Brahé, d'un très-exact observateur ; [...] Ces huit minutes qu'il n'est plus permis de négliger, m'ont mis sur la voie pour réformer toute l'astronomie.

- ▶ Teste la loi "la vitesse angulaire excentrique est inversement proportionnelle à la distance au Soleil".
- ▶ Donne une distance qui diffère de l'hypothèse par procuration en $O(e^2)$.

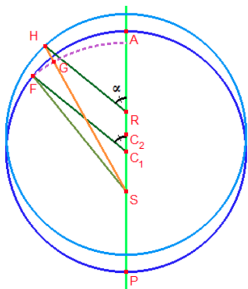


- ▶ La trajectoire est un ovale : *La conclusion est tout simplement que le trajet de la planète n'est pas un cercle - il s'incurve de deux côtés et s'étale aux autres bouts. Cette courbe s'appelle une ovale.*

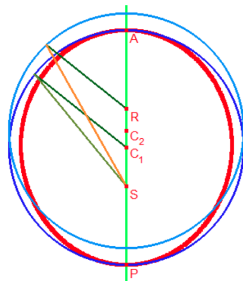
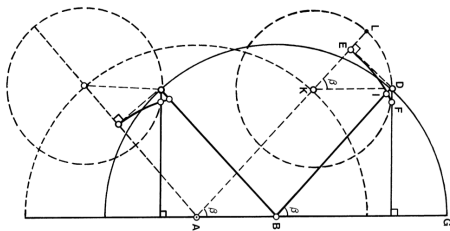
Juste au moment où je m'occupais d'ajuster mon ovale, un hôte indésirable entra chez moi par une porte secrète pour me déranger.



- ▶ Remarque que $b = a \sqrt{1 - e^2}$ mais ne fait pas encore le lien avec l'ellipse.
- ▶ Reprend un epicycle, cette fois parcouru à vitesse constante. N'arrive pas à effectuer les calculs.

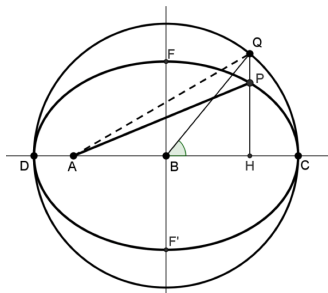


- ▶ Modèle basé sur les deux modèles faux. Forme *joufflue* (buccosa). Nouvel échec.



- ▶ Choisis F plutôt que I .
- ▶ *Comme si je me réveillais d'un songe. Ellipse.*

L'Équation de Kepler



$$\frac{PH}{QH} = \frac{b}{a} \implies \frac{\text{Aire}(APC)}{\text{Aire}(AQC)} = \frac{b}{a}$$

et

$$\text{Aire}(AQC) = \frac{ea}{2} \sin E + a^2 E.$$

Donc

$$l = E + e \sin E.$$

$$\text{Lagrange 1771 : } E = l + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^n}{n!} (\sin^n l)^{(n)}$$

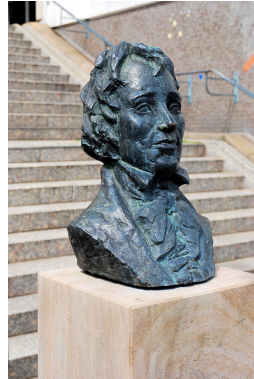
$$\text{Bessel 1852 : } E = l + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} J_n(ne) \sin(nl)$$



$$\text{Lagrange 1771 : } E = l + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^n}{n!} (\sin^n l)^{(n)}$$
$$\text{Bessel 1852 : } E = l + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} J_n(ne) \sin(nl)$$



$$\text{Lagrange 1771 : } E = l + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^n}{n!} (\sin^n l)^{(n)}$$
$$\text{Bessel 1852 : } E = l + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} J_n(ne) \sin(nl)$$



$$\text{Lagrange 1771 : } E = l + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^n}{n!} (\sin^n l)^{(n)}$$

$$\text{Bessel 1852 : } E = l + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} J_n(ne) \sin(nl)$$

Remarque sur les lois du temps

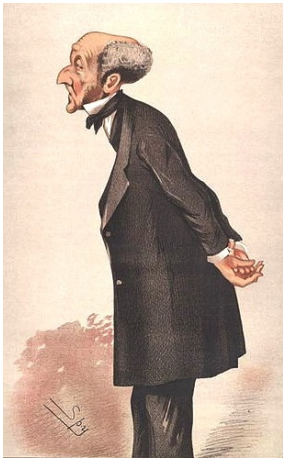
On a en fait :

$$\rho = a(1 + e \cos \xi),$$

donc

$$\rho^2 \dot{\theta} = cst \Leftrightarrow \rho \dot{\xi} = cst$$

Donc sa "fausse loi de la vitesse inverse" est... la loi des aires !



John Stuart Mill
Londres 1806- Avignon 1873

L'objet de Kepler était de déterminer le chemin réel décrit par chaque planète, ou disons la

*planète Mars [...]. Pour faire cela il n'y avait **pas d'autre moyen que l'observation directe** : et tout ce que pouvait faire chaque observation était de rendre sûr un grand nombre de positions successives de la planète ; Ce que Kepler fit mieux que cela, ce fut de trouver **quelle sorte de courbe ces différents points pourraient produire**, en les supposant joints tous ensemble. Il exprima la série entière des positions observées de Mars par [...] une **ellipse**.*

John Stuart Mill, *Système logique inductive et déductive*,
1843



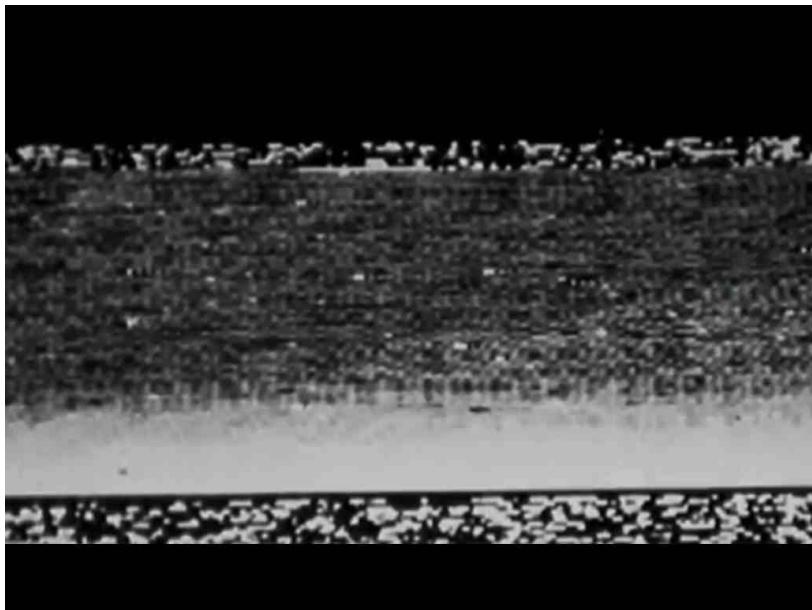
Harriet Taylor Mill
(Londres 1807- Avignon 1858)



A Feminin
Philosopher

Je nie que quiconque connaisse ou puisse connaître la nature des deux sexes, tant qu'ils n'auront été étudiés que dans leur relation réciproque actuelle. Tant que les conditions de l'égalité sont absentes, personne ne peut démontrer l'existence de différences naturelles entre les femmes et les hommes.

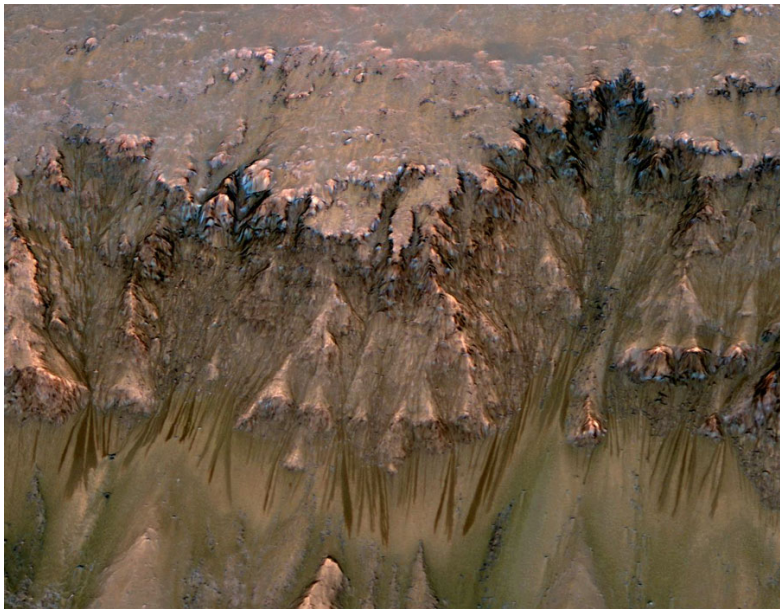
J. S. Mill, *L'Assujettissement des femmes*, 1873

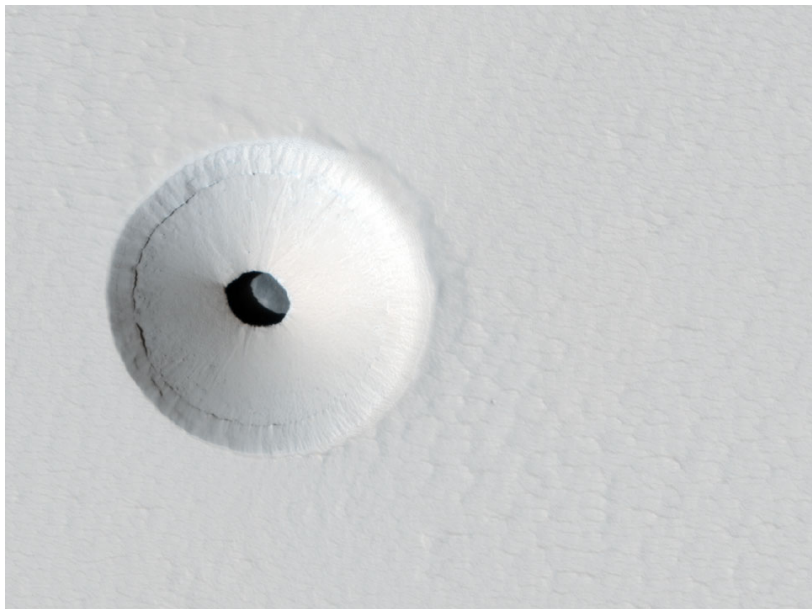


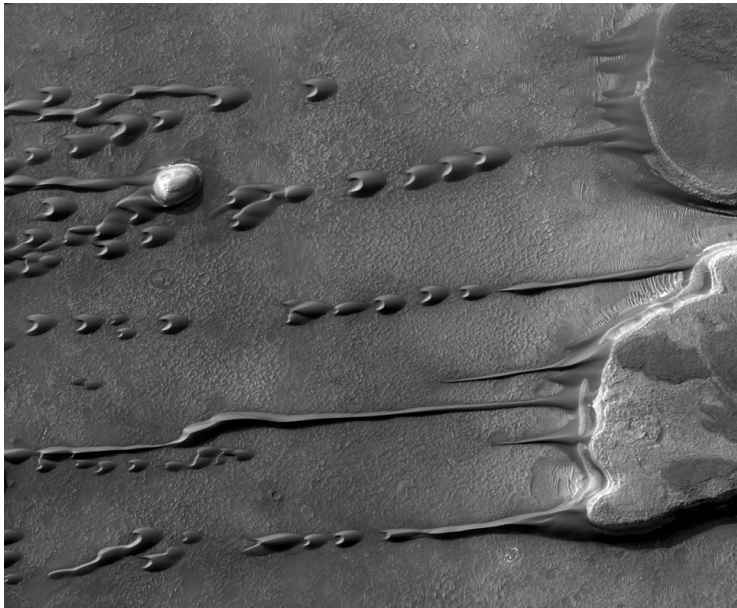
Mars 3 1971 (URSS)

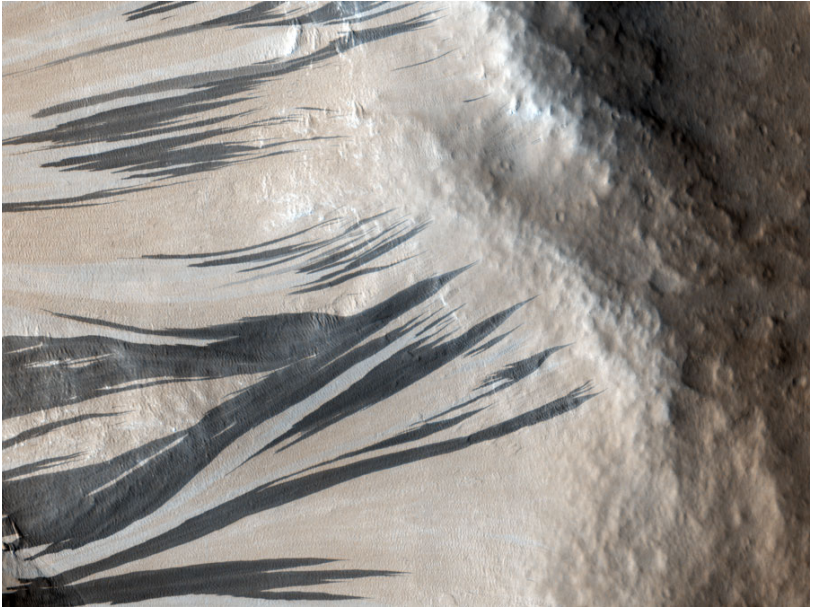


Viking 1976 (USA)

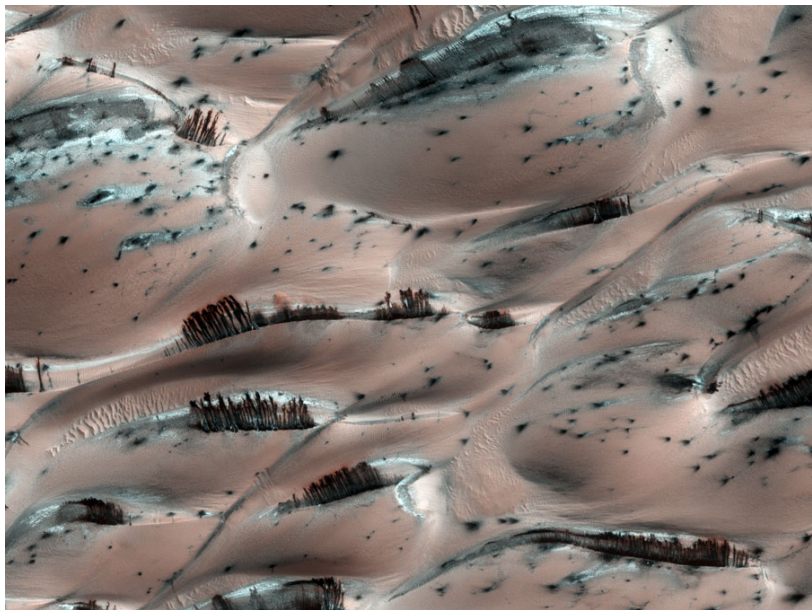


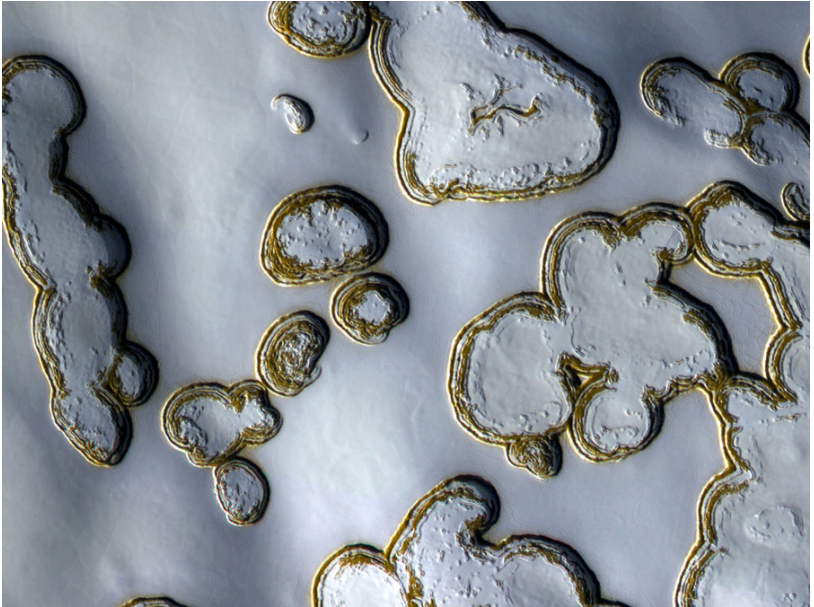












Partie III
La pop star des étoiles





- ▶ Naissance en 1571 à Weil der Stadt (200 habitants et franche !) dans le Saint Empire romain germanique,
- ▶ Grand-père maire de Weil...



- ▶ fils de Katharina Guldenmann : *petite, maigre, sinistre et querelleuse*

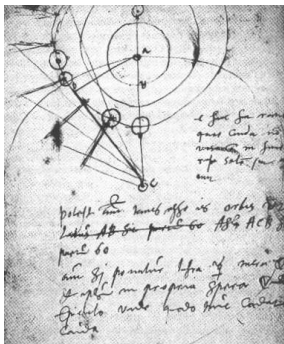


- ▶ fils de Katharina Guldenmann : *petite, maigre, sinistre et querelleuse*
- ▶ et du mercenaire Heinrich Kepler : *homme vicieux, inflexible, querelleur et destiné à mal finir. [...] Traita ma mère extrêmement mal, finalement s'exila et mourut.*

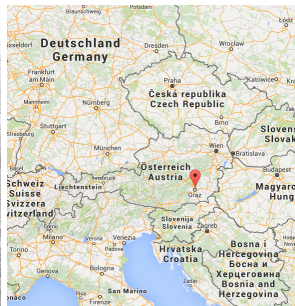
Kepler par lui-même : *Cet homme a en toutes choses une nature canine. Son apparence est celle d'un petit chien. [...] Son corps est agile, nerveux et bien proportionné. Même ses appétits étaient semblables : il aimait ronger les os et les croûtons de pain, et il était si glouton qu'il attrapait tout ce qu'il voyait.*

Kepler par lui-même : Cet homme a en toutes choses une nature canine. Son apparence est celle d'un petit chien. [...] Son corps est agile, nerveux et bien proportionné. Même ses appétits étaient semblables : il aimait ronger les os et les croûtons de pain, et il était si glouton qu'il attrapait tout ce qu'il voyait.

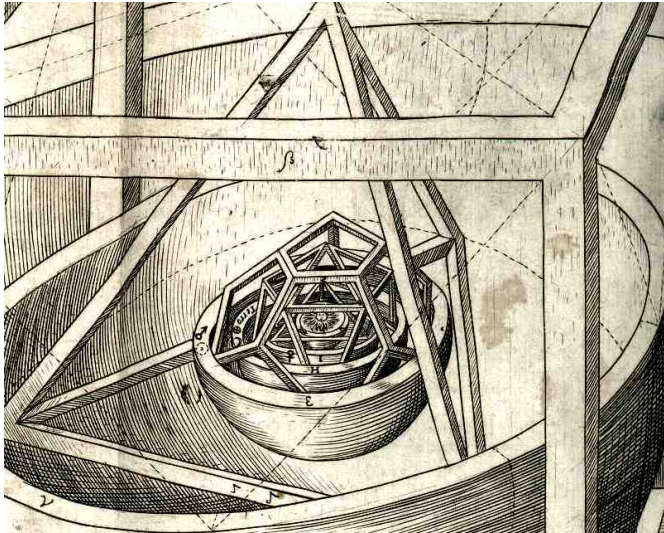
Il était religieux jusqu'à la superstition. À dix ans quand il lut pour la première fois la Sainte Écriture... il déplora qu'à cause de l'impureté de sa vue, l'honneur d'être prophète lui fût refusé.



- ▶ 1577 : sa mère l'emmène voir la comète du haut d'une colline
- ▶ 1580-82 : travaux agricoles
- ▶ 1589 : son père disparaît
- ▶ 1591 : maîtrise de l'université de Tübingen



- ▶ 1594 : renonce à la théologie et prend un poste d'enseignant de mathématiques au collège protestant à Graz.
- ▶ 150 florins par an - plus 20 florins pour l'almanach astrologique. Doit enseigner la rhétorique, Virgile, l'histoire et l'éthique.



- ▶ 1596 : *Mysterium Cosmographicum* (Replerus)



- ▶ 1597 : premier mariage avec Barbara Müller, fille d'un riche meunier et deux fois veuve,



- ▶ 1597 : premier mariage avec Barbara Müller, fille d'un riche meunier et deux fois veuve, *grasse et simple d'esprit*.



- ▶ 1597 : premier mariage avec Barbara Müller, fille d'un riche meunier et deux fois veuve, *grasse et simple d'esprit*.

Elle est gênée, embarrassée dans tout ce qu'elle fait. Elle accouche aussi avec difficulté. Tout est dans la même veine

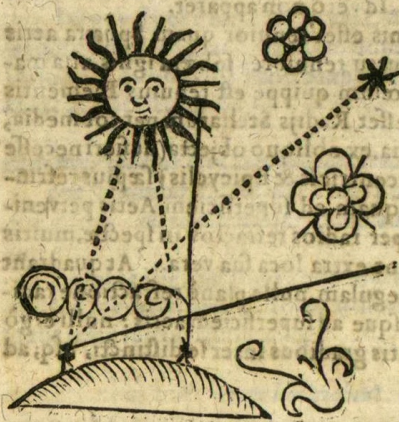
paret. Nam hæc impuritas ætheri commixta, die noctem infert, nocti diem.

1. Interdum enim obsidet solem materia fuliginosa,

obtrudens Solis radios; ut anno cædis Cæsaris penè toto; sic anno Chr 1547. cum quatrduo toto sanguineus solis vultus apparuit, non in uno solum loco, sed per totam Europam.

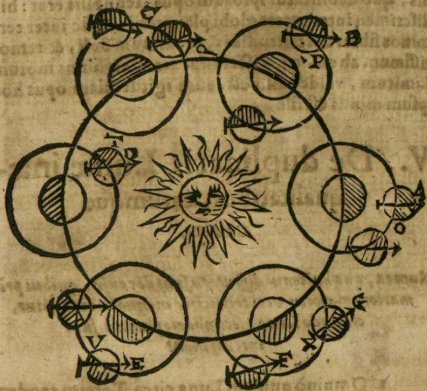
Si hæc materia fuisset humilis & in aere ceu velum obtentum soli, nõ impedivisset ra-

dios solis tam latè, nec nisi in uno aliquo loci: si dixeris, humilem fuisse, sed latissimè terris super inductam, ut



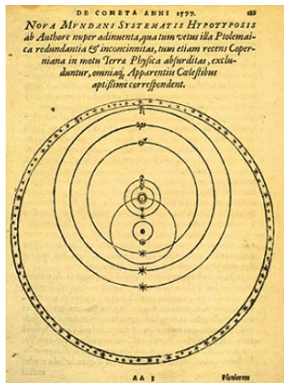
lum; ut translata Lunâ in locum oppositum; fiat permutatio plagatum & secundum amicam attrahatur Luna à specie corporis Telluris, secundum inimicam verbò repellatur: eaque ratione motus eius etiam in longum vel inciteretur vel remittatur: itemque alias fibras corporis oportet concipere, quibus Lunæ conficiantur digressiones ab Ecliptica.

In presenti schemate sunt expressi situs aliquos Terræ sum circumiuncto cœlo luna, circa Solem euntis: & in cœlo Lu-





- ▶ 1598 : Contre-Réforme : banissement des pasteurs et professeurs luthériens sous peine de mort.
- ▶ 1599 : Kepler peut seul rester. Amende pour avoir enterré sa fille selon le rite protestant. Autodafé de 10000 livres à Graz. Relevé de ses enseignements.



Tycho Brahe (1546 - 1601)



Tycho Brahé (1546 - 1601)

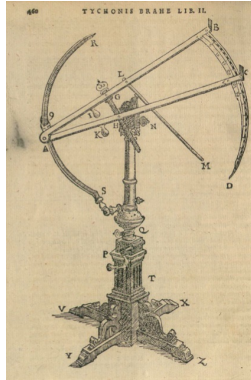
N'importe lequel de ses instruments vaut plus que ma fortune et toute celle de ma famille ensemble... Voici ce que je pense de Tycho : il est superlativement riche, mais il ne sait pas se servir de ce qu'il a, comme c'est le cas de la plupart des riches. Donc il faut essayer de lui dérober ses richesses.



Frederik II (1534 -1588)



L'île de Hven



Uraniborg



Prague en 1600

- ▶ 1600 : Rencontre avec Tycho Brahé, en exil du Dannemark à Benatzky près de Prague, siège du Saint Empire Romain Germanique.
- ▶ 1600 : refuse de se convertir au catholicisme à Graz : doit s'exiler (en 6 semaines et trois jours). Repart à Prague avec famille.



Petr Vok z Rožmberka
Rodolphe II, Hans von Aachen, 1606

- ▶ 1601 : Tycho Brahe meurt après un dîner chez Petr Vok z Rožmberka
- ▶ 1601 : Kepler devient mathématicien impérial
- ▶ 1601 : *De Fundamentis astrologiae certioribus*
- ▶ 1609 : *Astronomia Nova* et les deux premières lois

interitus mutuo, uneparata, veluti apponit præ-
fert delineatio. Hic licet ad mutuam Stellarum ap-
propinquationem minimè cogitationem appulsem,

Ori.



* * *

Occ.

hæc sperare tamen cepi, quoniam pacto Iuppiter ab om-
nibus prædictis fixis posset orientalis reperiri, cum
à binis ex illis pridie occidentalis fuisset: ac proinde
veritus sum ne forte, secus à computo astronomico, di-
rectus foret, ac propterea motu proprio Stellas illas
anteuertisset: quapropter maximo eum desiderio se-
quentem expectavi noctem; verum à spe frustratus fui,
nubibus enim vndiquaque obductum fuit celum.

At die decima apparuerunt Stellæ in eiusmodi ad
Iouem positu: duæ enim tantum, & orientales ambæ.

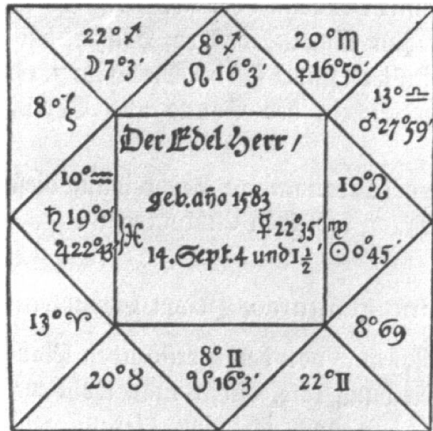
Ori.

* * ○

Occ.

aderant, tertiâ, vt opinatus fui, sub Ioue latitante.
Erant pariter veluti, antea in eadem rectâ cum Ioue oc-

- ▶ 1610 : Kepler soutient Galilée pour sa découverte des satellites de Jupiter



Horoscope (1608) pour
 le général Albrecht Wallenstein (mort en 1634)

- ▶ 1611 : Rodolphe II abdique. Kepler part s'installer à Linz, en Autriche protestante.

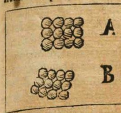
- ▶ 1611 : Son épouse et deux de leurs cinq enfants décèdent
- ▶ Redevient professeur et mathématicien pour 400 florins par an



- ▶ Refuse de signer la Formule de Concorde à cause de l'eucharistie. Excommunié par les luthériens !

NIX SEXANGVLA.

Iam si ad structuram solidorum quam potest fieri
artissimam progrediaris, ordineq; ordinibus super



ponas, in plano pri^o co
aptatos, aut erūt qua-
drati a aut trigonici b: si
quadrati, aut singuli
globi ordinis superioris
singulis superlabūt
ordinis inferioris: aut
contra singuli ordinis
superioris sedebunt in-
ter quaternos ordinis inferioris. Priori modo tangitur
quilibet globus à quatuor circumstantibus in eodem
plano, ab vno supra se, & ab vno infra se: & sic in vni-
uersum à sex aliis, eritque ordo cubicus, & compressio-
ne facta fient cubi: sed non erit artissima coaptatio.
Posteriori modo præterquam quod quilibet glo-
bus à quatuor circumstantib. in eod. plano tangitur,
etià à quatuor infra se, & à 4. supra se, & sic in vniuersū
à duodecim tangetur, sicut que compressione ex glo-

contingnationem ex
hunc instructum hab
tissimum figura ad fi-
re impressus est: nihil
corpusculi Apis, nihil

Hoc animaduert
non quem Apis ipsa e
Deus ipse, Apicula: et
illi has architecturæ si

Atque hiciam den-
stinationem, conside-
n. de hoc sine dici poss
Phyicos, qui ad solar
ram respiciunt, vt illa
præsentat. Cum. n. lo
vacuo, tantum hæc fig
sexangulum: ex iis sex.
Capacitatē autē sibi j

Potestque ampliar
siderationem, in hunc



E. Impone semper an-
gustiolem latiori: vt fi-
at figura Pyramidis. Et-
si igitur per hanc impo-
sitionem singuli supe-
rioris sederūt inter tri-
nos inferiores: tamen
iam versa figura, vt non
apex sed integrum lat⁹
pyramidis sit loco supe-
riori, quoties vnū glo-
bulū de gluberis è sum-
mis, infra stabunt qua-
tuor ordine quadrato.
Et rursus tangetur v-
nus globus vt prius, à
duodecim aliis, à sex

- ▶ 1611 : *Strena seu de Nive sexangula*. Conjecture sur l'empilement des sphères.

- ▶ 1613 : mariage avec Suzanna Reutinger, choisie parmi... 11 candidates ! (numéro 11)

- ▶ 1613 : mariage avec Suzanna Reutinger, choisie parmi... 11 candidates ! (numéro 11)

Mais [les] traits [de la dixième] étaient forts repoussants, et sa taille laide même pour un homme de goûts simples. Le contraste entre nous sautait aux yeux : moi élancé, sec, maigre ; elle, courte et grasse, et d'une famille connue pour son obésité.

- ▶ 1613 : mariage avec Suzanna Reutinger, choisie parmi... 11 candidates ! (numéro 11)

Mais [les] traits [de la dixième] étaient forts repoussants, et sa taille laide même pour un homme de goûts simples. Le contraste entre nous sautait aux yeux : moi élancé, sec, maigre ; elle, courte et grasse, et d'une famille connue pour son obésité. Elle était tout à fait indigne de comparaison avec la cinquième, mais cela ne ranima point mon amour pour cette dernière.



- ▶ 1615 : Procès pour sorcellerie de la mère de Kepler (38 sorcières brûlées à Weil entre 1615 et 1629) :



- ▶ 1615 : Procès pour sorcellerie de la mère de Kepler (38 sorcières brûlées à Weil entre 1615 et 1629) : *L'accusée a paru au tribunal accompagnée, hélas, par son fils, Johann Kepler, mathématicien.*
- ▶ 1617-18 : deux de ses filles et sa belle-fille meurent

HARMONICIS LIB. V. 207

omnia (infinita in potentiâ) permeantes actu : id quod aliter à me non potuit exprimi, quam per continuam seriem Notarum intermedia-



- ▶ 1618 : *Harmonices Mundi* et la troisième Loi (et proposition de tempérament musical !)
- ▶ 1618 Début de la Guerre de Trente ans (tuera un tiers de la population)
- ▶ 1620 : Les Bavarois envahissent Linz. Kepler doit partir pour le Württemberg.



- ▶ 1621 : Retourne à Linz, où son excommunication le favorise !
- ▶ 1624 : *Chilias logarithmorum*



- ▶ 1627 : *Les tables rudolphines*

JOANNIS KEPLERI
Somnium, sive Astronomia
Lunaris.

Um anno 1608. ferrentur dissidia inter fratres Imp: Rudolphum et Matthiam Archiducem; eorumque actiones vulgo ad exempla referrentur, ex historia Bohemica petita; ego publica vulgi curiositate excitus, ad Bohemica legenda animum appuli. Cumque incidissem in historiam Libuffæ Viraginis, arte Magica celebratissimæ: factum quadam nocte, ut post contemplationem siderum et Lunæ, lecto compositus, altius obdormiscerem: atque mihi per somnum visus sum librum ex Nundinis allatum perlegere, cuius hic erat tenor:

Mihi Duracoto nomen est, patria Islandia, quam veteres Thulen dixerunt: mater erat. Fiolschildis, que nuper mortua, scribendi mihi peperit licentiam, cuius rei cupiditate pridem arsi. Dum viveret, hoc diligenter egit, ne scriberem. Dicebat enim, multos esse perniciosos osoros artium, qui quod præ hebetudine mentis non capiunt, id calumniantur; legesque faciunt injurias humano generi, quibus sanè legibus non pauci damnati, hec te voraginis fuerint absorpti. Quod nomen esse patri meo, ipsa nonquam dixit, piscatorem fuisse, & centum quinquaginta annorum senem.

A
deceps.

- ▶ 1630 : *Somnium*, premier livre de science-fiction.



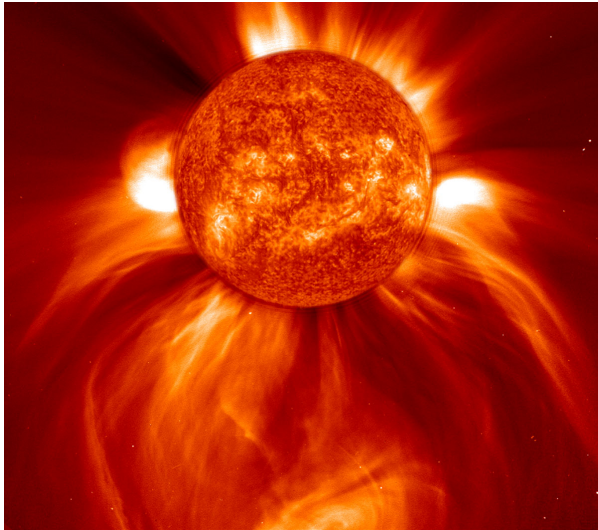
Je mesurais les cieux.

Je mesure maintenant les ombres de la Terre.

L'esprit était céleste.

Ici gît l'ombre du corps

Partie IV
Les dessous de l'ellipse



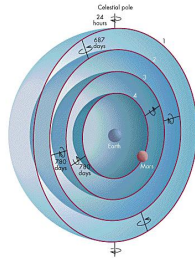


Ma première erreur fut de croire que le chemin de la planète était un cercle parfait, erreur d'autant plus nuisible, qu'elle est appuyée du consentement de tous les philosophes, et qu'elle paraissait plus conforme à la Métaphysique.

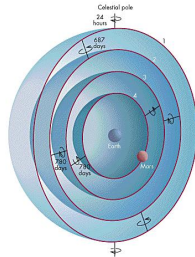


- ▶ Le cercle comme forme parfaite et historiquement validée

Ma première erreur fut de croire que le chemin de la planète était un cercle parfait, erreur d'autant plus nuisible, qu'elle est appuyée du consentement de tous les philosophes, et qu'elle paraissait plus conforme à la Métaphysique.



Parce que Tycho Brahe détruisit par des arguments certains la solidité des orbes qui jusque-là avaient pu servir de bâton à ces âmes motrices (de plus aveugles) pour trouver la forme requise, en conséquence les Planètes accomplissent leur course dans le pur éther comme des oiseaux dans l'air : par conséquent nous devons philosopher autrement au sujet de ces schémas.



- ▶ La non matérialité des orbes jette le doute sur leur réalité... mathématique.

Parce que Tycho Brahe détruisit par des arguments certains la solidité des orbes qui jusque-là avaient pu servir de bâton à ces âmes motrices (de plus aveugles) pour trouver la forme requise, en conséquence les Planètes accomplissent leur course dans le pur éther comme des oiseaux dans l'air : par conséquent nous devons philosopher autrement au sujet de ces schémas.

Tu ne dirais rien pour moi [si tu affirmais] que la vertu motrice même, fille d'une âme brute, naissait attachée au mouvement circulaire, comme la nature de la pierre est de descendre franchement selon une ligne droite. Je nie, en effet, qu'aucun mouvement éternel non rectiligne, créé par Dieu, soit privé d'une assistance mentale.

- ▶ C'est la physique qui fait la géométrie

Tu ne dirais rien pour moi [si tu affirmais] que la vertu motrice même, fille d'une âme brute, naissait attachée au mouvement circulaire, comme la nature de la pierre est de descendre franchement selon une ligne droite. Je nie, en effet, qu'aucun mouvement éternel non rectiligne, créé par Dieu, soit privé d'une assistance mentale.

il est très absurde que la Planète (que tu la pourvoies en pensée comme tu veux) se représente le centre et de la distance, dans lequel centre ne se trouve aucun corps particulier pour marque.

- ▶ Abandon des épicycles pour des raisons physiques

il est très absurde que la Planète (que tu la pourvoies en pensée comme tu veux) se représente le centre et de la distance, dans lequel centre ne se trouve aucun corps particulier pour marque.



La force qui meut la Planète sur un cercle est diminuée avec l'éloignement de la source



- ▶ Il existe un **moteur physique** qui meut les planètes

La force qui meut la Planète sur un cercle est diminuée avec l'éloignement de la source

Que si donc l'éloignement du centre du monde à partir du corps de la Planète garantit la lenteur de la Planète, l'approche la rapidité, il est donc nécessaire que la source de vertu motrice se trouve dans le centre choisi du monde.

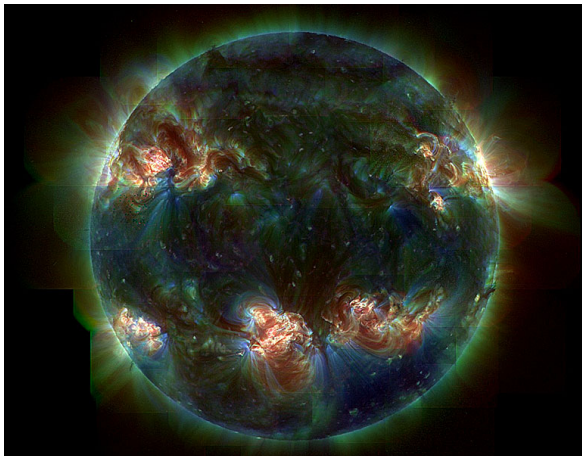
- ▶ Le centre du Monde doit être la source de ce moteur physique

Que si donc l'éloignement du centre du monde à partir du corps de la Planète garantit la lenteur de la Planète, l'approche la rapidité, il est donc nécessaire que la source de vertu motrice se trouve dans le centre choisi du monde.

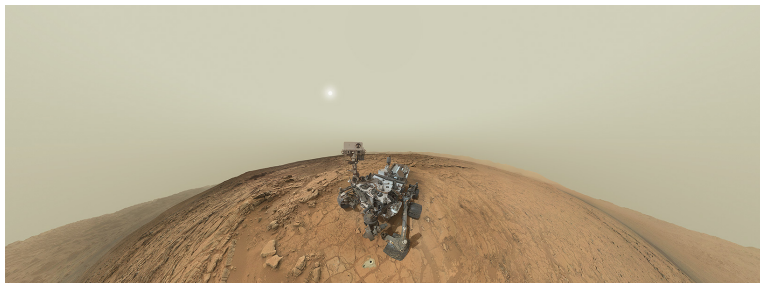
À partir de ce principe, j'ai prouvé d'une manière probable que le Soleil est plutôt en ce point et le centre du monde, [...] que quelque autre point vide de substance.

- ▶ Un point mathématique ne peut pas créer de force

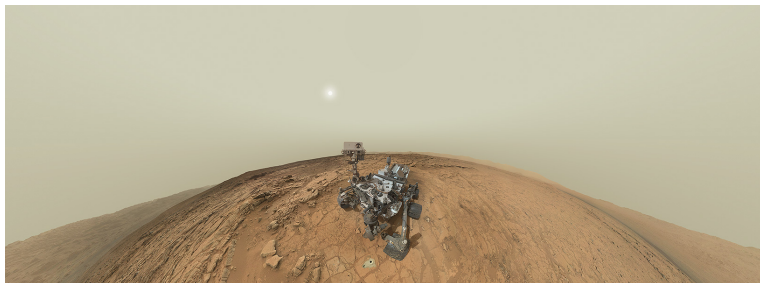
À partir de ce principe, j'ai prouvé d'une manière probable que le Soleil est plutôt en ce point et le centre du monde, [...] que quelque autre point vide de substance.



*le Soleil coïncidant avec le centre du monde,
la source de la vertu motrice
coïncide avec le Soleil*

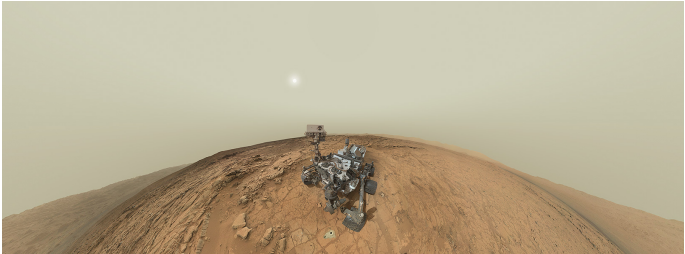


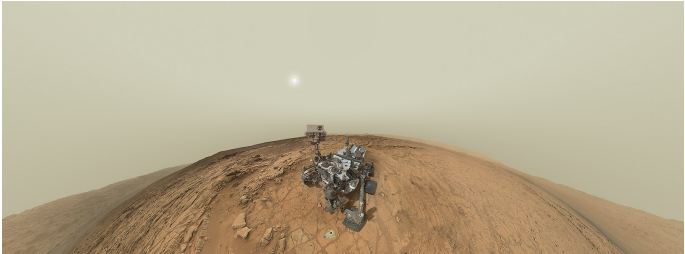
Enfin, puisqu'il y a autant de vertu dans le cercle plus étendu et plus éloigné que dans le plus resserré et le plus proche, donc rien au sujet de cette vertu n'a disparu dans son parcours depuis la source, rien n'a été dispersé entre la source et le mobile. Donc l'écoulement est immatériel de même que la lumière.



► Analogie avec un phénomène connu

Enfin, puisqu'il y a autant de vertu dans le cercle plus étendu et plus éloigné que dans le plus resserré et le plus proche, donc rien au sujet de cette vertu n'a disparu dans son parcours depuis la source, rien n'a été dispersé entre la source et le mobile. Donc l'écoulement est immatériel de même que la lumière.





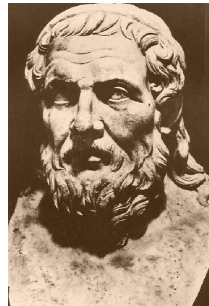
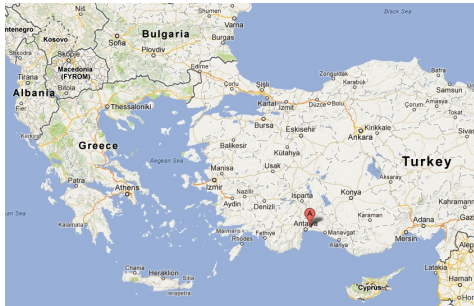


Et quoique je sache que les points de l'excentrique sont en nombre infini, et leurs distances en nombre infini, il s'est présenté l'imagination que toutes ces distances de l'excentriques sont contenues dans une surface plane. Car je me souvenais qu'Archimède découpa jadis ainsi le cercle en une infinité de triangles quand il chercha le rapport de la circonférence au diamètre



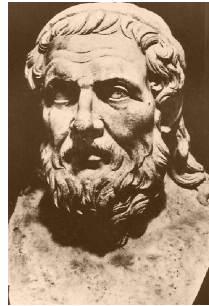
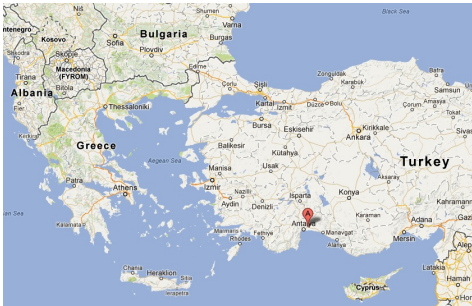
- ▶ Utilise un outil d'un prédécesseur

Et quoique je sache que les points de l'excentrique sont en nombre infini, et leurs distances en nombre infini, il s'est présenté l'imagination que toutes ces distances de l'excentriques sont contenues dans une surface plane. Car je me souvenais qu'Archimède découpa jadis ainsi le cercle en une infinité de triangles quand il chercha le rapport de la circonférence au diamètre



Apollonius (-262 -190)

Si seulement la forme était une ellipse parfaite, on trouverait toutes les réponses dans Archimède et dans Apollonius

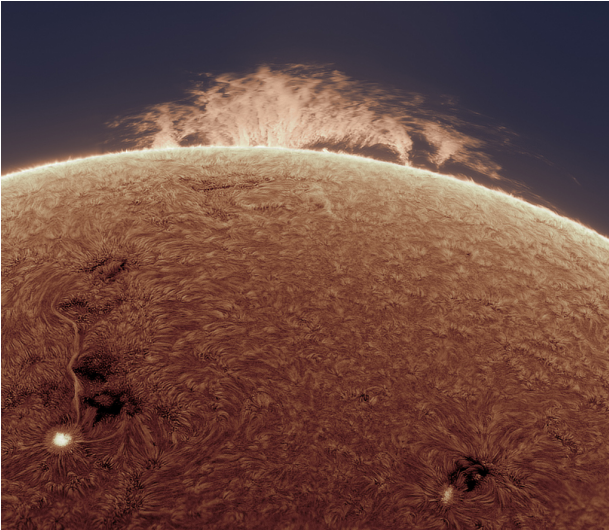


Apollonius (-262 -190)

- ▶ Aimerait utiliser un outil d'un prédécesseur

Si seulement la forme était une ellipse parfaite, on trouverait toutes les réponses dans Archimède et dans Apollonius

Partie V
Questions !



Comment se fait-il que trois théories puissent

- ▶ se baser sur des modèles différents
- ▶ être équivalentes empiriquement en 1500

Comment se fait-il que trois théories puissent

- ▶ se baser sur des modèles différents
- ▶ être équivalentes empiriquement en 1500

Réponse empiriste : il n'y a qu'à oublier les modèles !

Les influences de Kepler

Représentations du Monde

- ▶ Perfection
- ▶ Absence de sphères matérielles
- ▶ La géométrie a besoin de physique
- ▶ Un centre du monde substantiel
- ▶ Force produite par le Soleil

Formes mathématiques

- ▶ Cercle (Pythagore)
- ▶ Calcul des aires (Archimède)
- ▶ Ellipses (Apollonius)

Les influences de Kepler

Représentations du Monde

- ▶ Perfection
- ▶ Absence de sphères matérielles
- ▶ La géométrie a besoin de physique
- ▶ Un centre du monde substantiel
- ▶ Force produite par le Soleil

Formes mathématiques

- ▶ Cercle (Pythagore)
- ▶ Calcul des aires (Archimède)
- ▶ Ellipses (Apollonius)

**Peut-on vraiment se passer
d'imaginer ce qui se passe dans le monde ?**

Monde réel



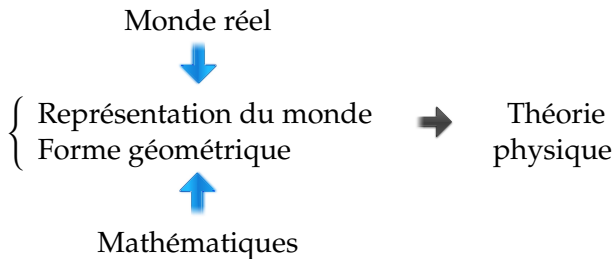
{ Représentation du monde
Forme géométrique



Mathématiques



Théorie
physique



Comment se fait-il que ces représentations soient à la fois nécessaires et éphémères ?



Ian Hacking

Supposons que nous ayons eu quelque chose comme de gros ordinateurs Cray très rapides en 1850. Dès lors, les mathématiques analytiques dans lesquelles les équations de Maxwell furent formulées n'auraient pas été nécessaires. Nous aurions pu nous passer des équations de Maxwell !

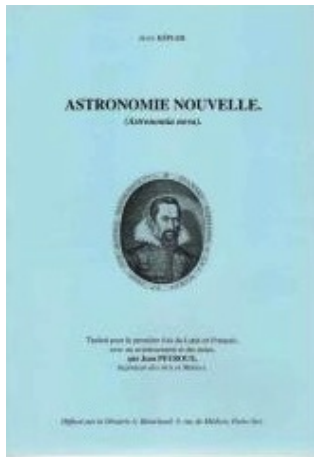
Entre Science et réalité

**Les représentations scientifiquement nécessaires et obsolètes
seraient-elles en plus non historiquement indispensables ?**

Le bon côté des choses

- ▶ Certes les formes et les modèles ont un relent d'arbitraire...
- ▶ ... mais elles semblent s'adapter d'autant mieux à des problèmes qui leur sont étrangers.

Bibliographie



JOHANNES KEPLER
NEW ASTRONOMY

Translated by
WILLIAM H. DONAHUE

 CAMBRIDGE
UNIVERSITY PRESS

- ▶ *Quasi periodic motions from Hipparchus to Kolmogorov*, Giovanni Gallavotti, 2000
- ▶ *Kepler's battle with the Mars orbit*, Wouter Koot, 2014
- ▶ *L'astronomie nouvelle de Kepler et la logique de la découverte*, Céline Riverin, 2014.
- ▶ *Résonances et petits diviseurs*, Étienne, 2002

le goût des idées
de jean-claude zylberstein

ARTHUR
KOESTLER

LES SOMNAMBULES

Essai sur l'histoire
des conceptions de l'Univers

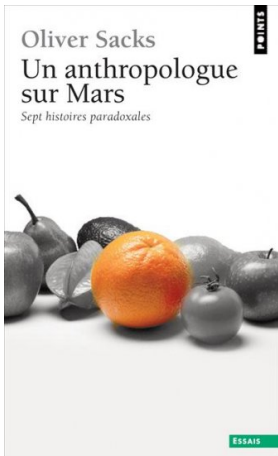
LES
BELLES
LETTRES 

Bruce Stephenson

Kepler's Physical Astronomy



Springer-Verlag
New York Berlin Heidelberg
London Paris Tokyo



Boni

JACK
NICHOLSON

GLENN
CLOSE

ANNETTE
BENING

PIERCE
BROSNAN

DANNY
DEVITO

STAMPA TA PLANÈTE... CON LA PISCHIA



MARS ATTACKS!

UN FILM DE TIM BURTON



WARNER BROS. PRESENTS

WITH TIM BURTON JACK NICHOLSON GLENN CLOSE ANNETTE BENING PIERCE BROSNAN DANNY DEVITO "MARS ATTACKS!" MARTIN SHOFIT
SARAH JESSICA PARKER MICHAEL JEFFERSON ROD SEIGER TINA TURNER LINUS SAUNDERS MARLENE PORTMAN JIM GELMAN LISA MARIE SHELBY SOROKIN
and DANNY DEVITO and CHRIS LEBRON BOB WYMAN THOMAS HEDGECOCK PETER SUGGATELLY and BOB TOPPS JAMES KANTROW GERS

THE BURTON/LARRY FRANCO / THE TIM BURTON

Conférence

DÉFIS À L'IMPOSSIBLE EN MATHÉMATIQUES

Le Pôle de Mathématiques de l'INSA de Lyon, la Bibliothèque Marie Curie, ainsi que l'Université Duverte organisent en 2013-2014 un cycle de conférences, soutenues par la Fondation de l'INSA de Lyon.

MARS

ATTACKS !

Par Vincent Borrelli,
Maître de conférences, UCB Lyon I

7 AVRIL 2014
19H00 - 20H00

INSA de Lyon

Amphithéâtre Emilie du Châtelet
Bibliothèque Marie Curie
31 avenue Jean Capelle
69621 Villeurbanne



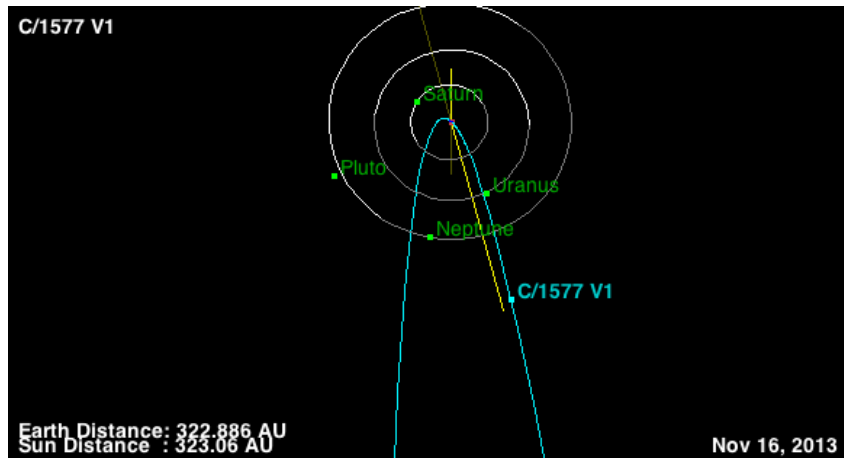
Se pourrait-il que,
suite à une conjonction défavorable,
la planète Mars quitte sa trajectoire
pour venir percuter la planète Terre ?
La réponse est oui...

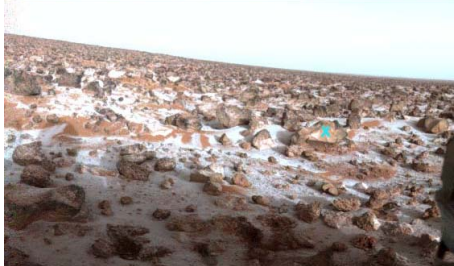
Le "faux" système de Ptolémée

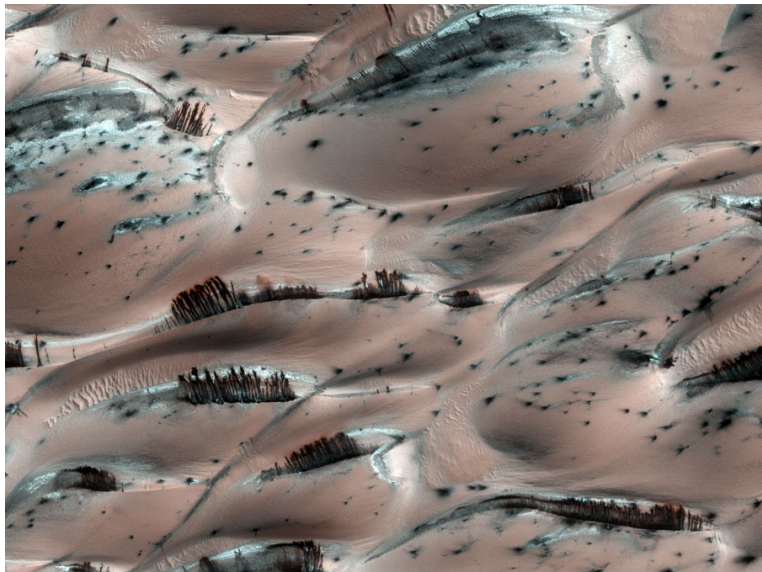
TABLE 1
ELEMENTS OF THE OUTER PLANETS

	Mars		Jupiter		Saturn	
	Ptolemy	True	Ptolemy	True	Ptolemy	True
Total eccentricity	0.200	0.186	0.092	0.096	0.114	0.112
Long. of apogee	115°5	121°	161°	164°	233°	239°
Radius of epicycle	0.658	0.656	0.192	0.192	0.108	0.105

La comète de 1577









Film *Pluton-Charon*



Andreas Osiander

il n'est pas nécessaire que ces hypothèses soient vraies ni même vraisemblables ; une seule chose suffit : qu'elles offrent des calculs conformes à l'observation.

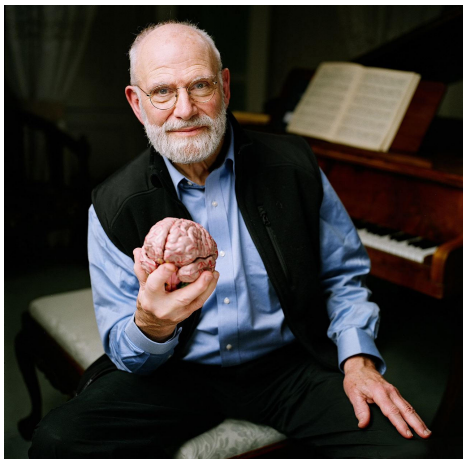
In De la Révolution des Orbites célestes, 1543

**Et si l'ellipse n'avait pas été inventée
par Apollonius ?**



William Molyneux (1656-1698)

*Supposez un homme aveugle de naissance et maintenant adulte, accoutumé à distinguer par le toucher un cube d'une sphère faits d'un même métal et à peu près de la même grosseur, au point de pouvoir dire, au contact de l'un ou de l'autre, lequel est le cube et lequel la sphère. Supposez maintenant que le cube et la sphère étant placés sur une table, la vue soit rendue à notre homme : **on demande s'il pourrait par la vue seule, sans l'aide du toucher, distinguer entre les deux et dire lequel est le cube, lequel est la sphère.***



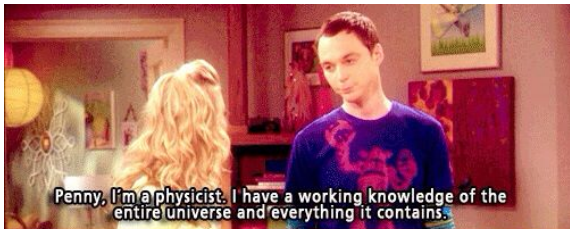
Oliver Sacks (1933-2015)

Tandis que nous étions assis, le chat et le chien de Virgil surgirent pour nous saluer - et Virgil, nous le remarquâmes, eut quelque difficulté à dire qui était qui. Cette situation comique et embarrassante avait persisté depuis qu'il était revenu à la maison après son opération : il s'avérait que chacun des deux animaux était noir et blanc, et il continuait à les confondre - ce qui les irritait - jusqu'à ce qu'il puisse les toucher. Amy disait que parfois, elle pouvait le voir examiner le chat précautionneusement, regardant sa tête, ses oreilles, ses pattes, sa queue, et toucher chaque partie doucement.

Oliver Sacks, *Un Anthropologue sur Mars*, 1995

**L'expérience brute ne serait-elle rien sans des concepts pour
l'accueillir ?**

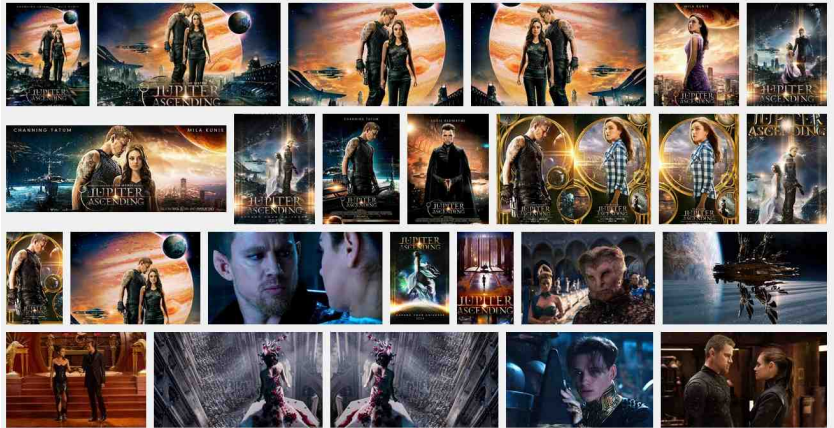
A l'occasion de la Lune, il demande pourquoi tant de taches sont rondes; il la compare à une pierre ponce toute pleine de pores, et il la croit de peu de densité, ce qui fait qu'elle se laisse entraîner par la Terre. Il reproduit son idée, que les parties les plus brillantes de la Lune pourraient bien être des mers, mais il cède aux raisons de Galilée; il croit que les habitans de la Lune, qui ont des jours quinze fois aussi longs que les nôtres, qui n'ont pas de pierres avec lesquelles ils puissent se construire des habitations pour se garantir des ardeurs du Soleil, ont pu creuser leur terre, s'y faire des habitations souterraines et des remparts contre le Soleil, sans trop s'éloigner des champs qu'ils cultivent et de leurs pâturages; il croit donc qu'une partie des cavités est de main d'homme: il ne conçoit pas comment ils peuvent résister à la chaleur, s'ils n'ont pas des nuages épais pour couvrir le Soleil, et des pluies qui rafraîchissent l'air. Il ne fait pas attention que ces nuages qui cacheraient le Soleil, devraient nous cacher les parties de la Lune, à moins que ces nuages ne soient eux-mêmes des parties brillantes que nous apercevons; mais en ce cas, comment seraient-elles constamment les mêmes?



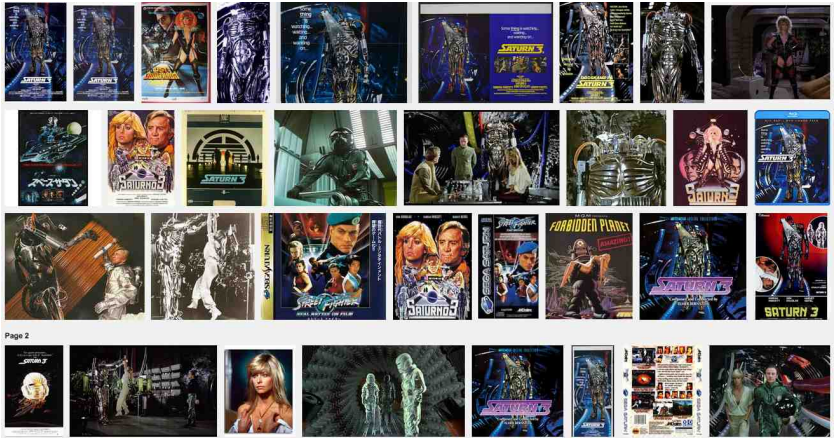
Mars



Jupiter



Saturne

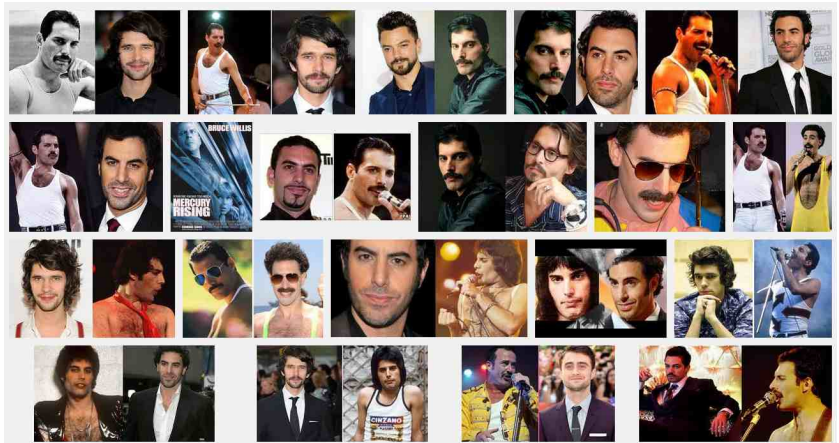


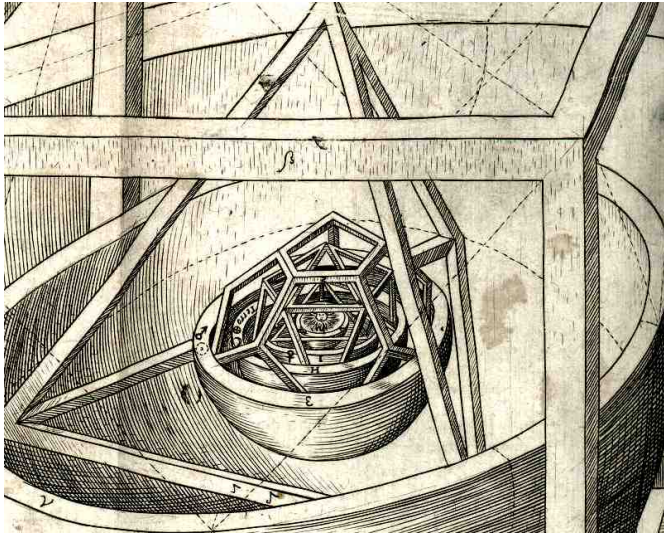
Page 2

Vénus



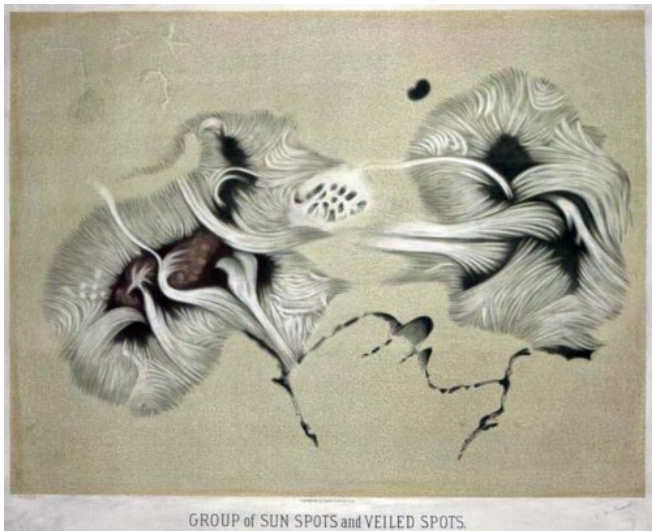
Mercurio



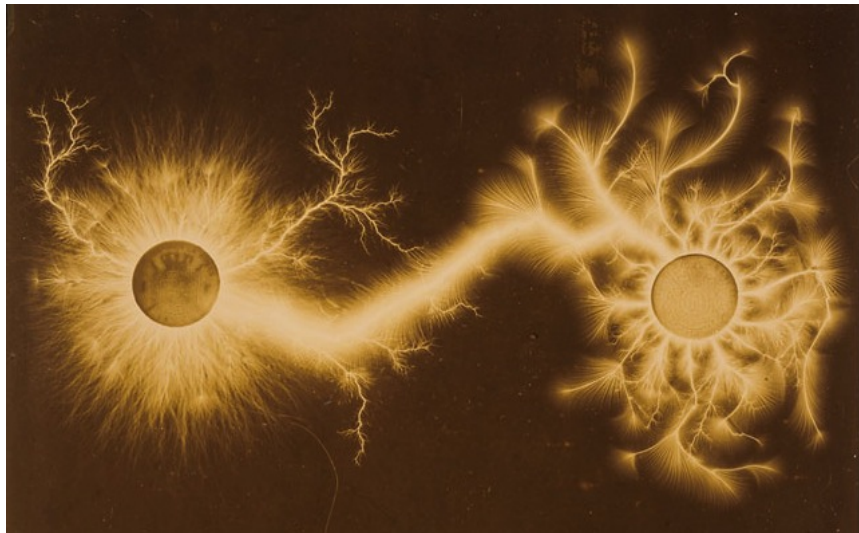


- ▶ 1596 : *Mysterium Cosmographicum* (Replerus)

La terre est le Cercle qui mesure tout : circonscris-lui le Dodécaèdre. Le Cercle comprenant ce dernier sera Mars : à Mars circonscris le Tétraèdre. Le Cercle comprenant ce dernier sera Jupiter : à Jupiter circonscris le Cube. Le cercle comprenant ce dernier sera Saturne : maintenant inscris l'Icosaèdre à la terre. Le Cercle inscrit dans celui-ci sera Vénus. À Vénus inscris l'Octaèdre. Le Cercle inscrit dans celui-ci sera Mercure. Tu tiens là la raison du nombre des planètes.



Taches du Soleil par Trouvelot



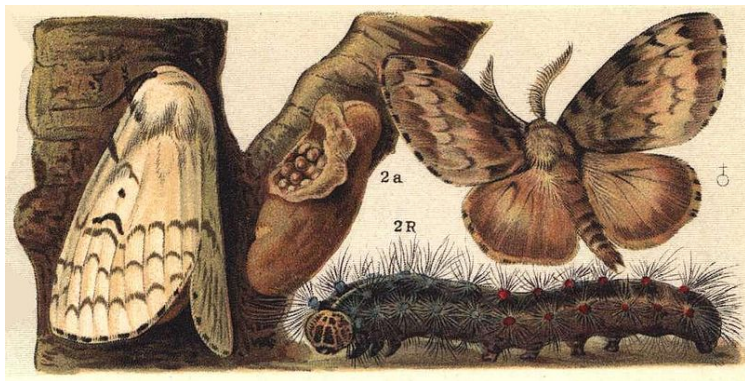
Effluves électriques à la surface
et au pourtour d'une pièce de monnaie, 1888

L'Homme qui devait un milliard



E. L. Trouvelot (1827-1895)

La gaffe



Le Bombyx disparate





Coût : 40 millions de dollars par an depuis 1980