GROUP

# Introduction aux techniques spatiales

laurene.beauvalet@csgroup.eu
maxime.journot@csgroup.eu

# SOMMAIRE

## Objectifs du cursus

- Apprendre **les bases** de la mécanique orbitale.
- Revue des différents éléments constituant un système spatial, depuis le lanceur jusqu'au segment sol.

# DÉFINITION

- La mécanique orbitale consiste en l'étude du **<u>mouvement d'un solide</u>** dans l'espace.

- On distingue :

  - Le mouvement **<u>du</u>** centre d'inertie

    (position et vitesse ➔ **trajectoire**)

  - Le mouvement **<u>autour</u>** du centre d'inertie

    (angles et vitesse angulaire ➔ **attitude**)

# DÉFINITION

› Les objectifs de la mécanique spatiale sont alors :

- Acquérir la connaissance de la position et de la vitesse à une date donnée à partir de mesures

  → **estimation d'orbite**

- Prévoir l'évolution de la position et de la vitesse à partir de cette date donnée et des équations du mouvement

  → **propagation d'orbite**

- Délivrer et utiliser ces informations

# LES MÉTIERS

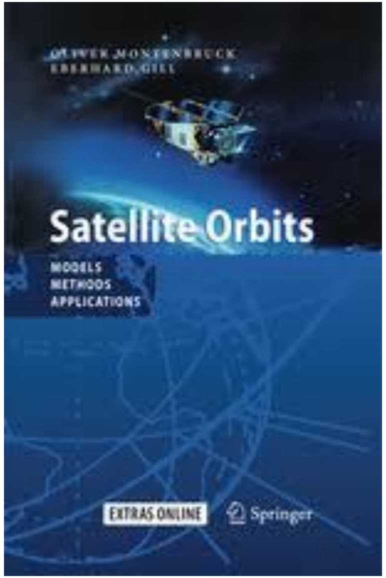
**Recherche fondamentale**

**Enseignement**

**Opérateur satellite**

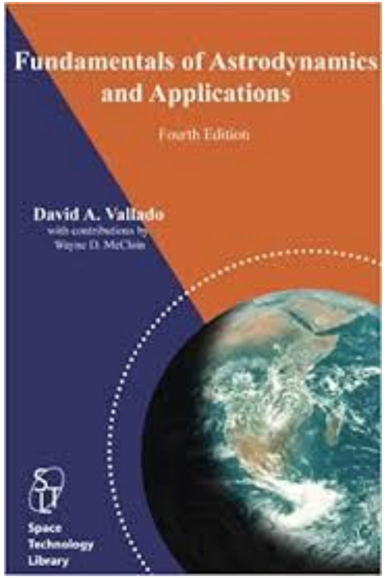
**Recherche et développement**

**Développement logiciel**




Montenbruck, Gill

*Satellite orbits models, methods and applications*, 2002.




Vallado David

*Fundamentals of Astrodynamics and applications,* 2001.

# INTRODUCTION

## Objectifs du cursus

› Apprendre **les bases** de la mécanique orbitale.

# UN PEU D'HISTOIRE …

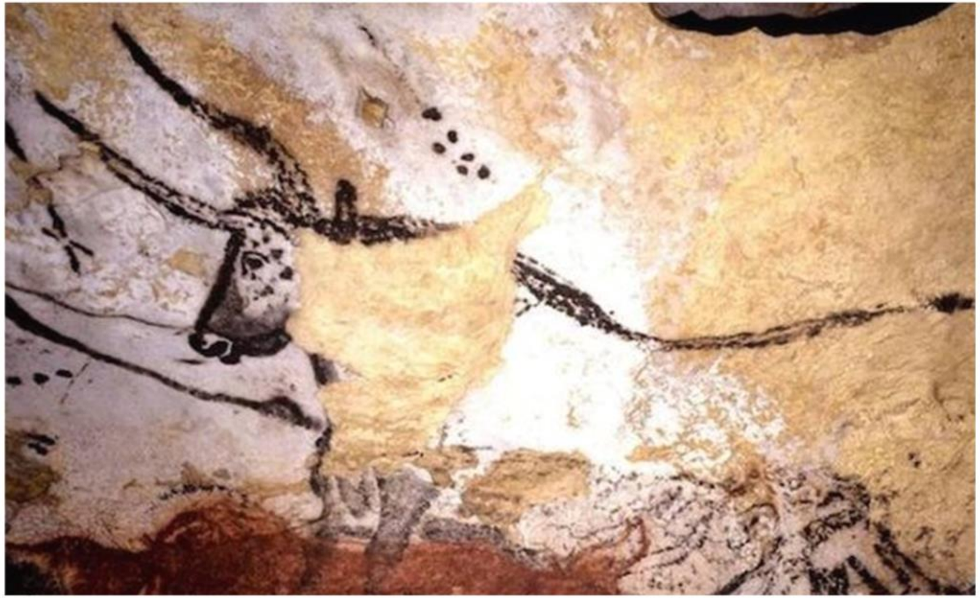
- Depuis la nuit des temps, l'Homme a été intrigué par les déplacements des corps lumineux naturels

- Il s'est mis en quête d'expliquer et de comprendre la nature de ces mouvements

- Astronomie = la plus vieille des sciences ?


***Orion et les Pléiades***
*EarthSky.org*

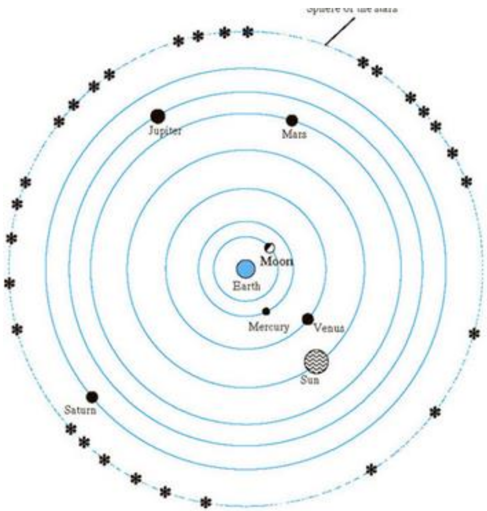
# UN PEU D'HISTOIRE …



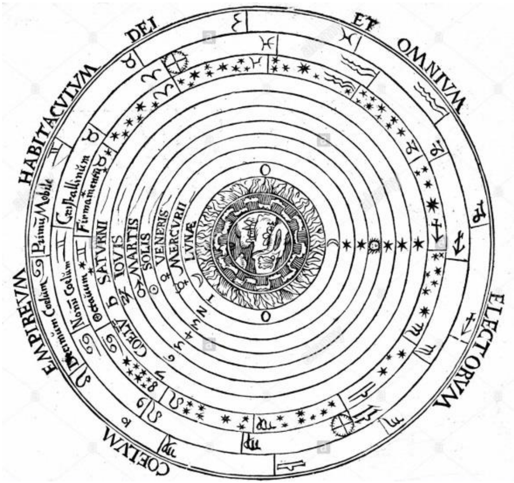
***Lascaux (15 000 av JC), France - Aurochs et Pléiades***
*Ministère de la Culture/Centre National de la Préhistoire/Norbert Aujoulat*

***Nabta Playa (4 500 av JC), Egypte***
***Alignement solstice été -6000 ans***
*Raymbetz / Groupe Études Égypte*

- Des premières représentations **motivées par les religions**




Modèle Pythagoricien (VIème av JC)




Modèle Ptolémaïque (IIème ap JC)

→ **L’Homme, donc la Terre, occupe une place centrale**.

# UN PEU D’HISTOIRE …

› Il fallut attendre **1543** et les travaux de Copernic pour se rendre à l’évidence: **<u>la Terre n’est pas au centre du système solaire, ni de l’Univers</u>**.

***Nicolas Copernic (XV - XVIᵉ)***

*Portrait exposé au musée de Toruń*

***Système héliocentrique***

*Extrait de « De revolutionibus Orbium Coelestium »*


***Copernic vs Ptolémée***

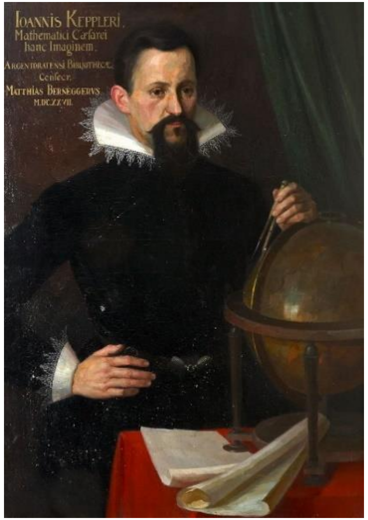
*ASM/Benoît Mosser*

# UN PEU D'HISTOIRE …

- Une fois la connaissance du mouvement des planètes acquise, les travaux se portèrent alors sur la description de ces mouvements.


***Tycho Brahe (XVI$^{e}$)***

*Portrait par Eduard Ender*

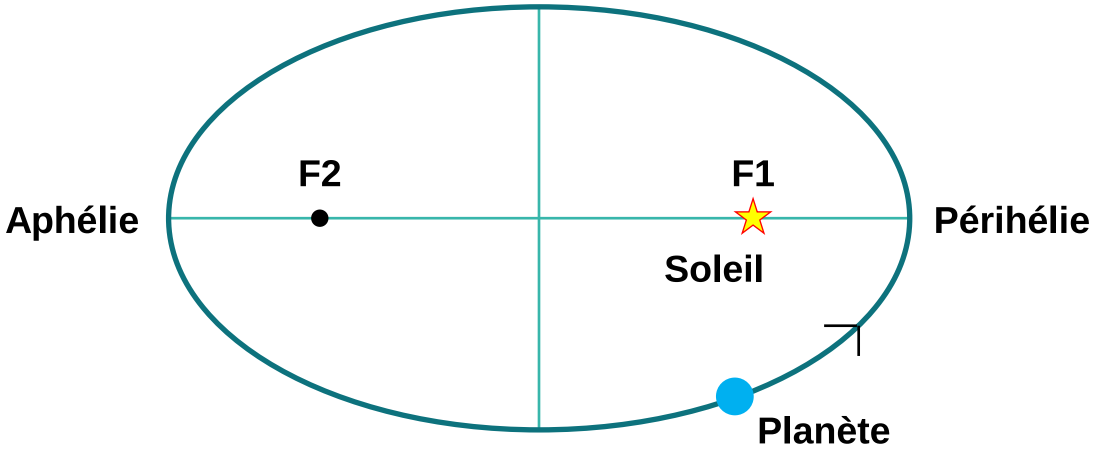



***Johannes Kepler (XVIIe)***

*Portrait par August Köhler*

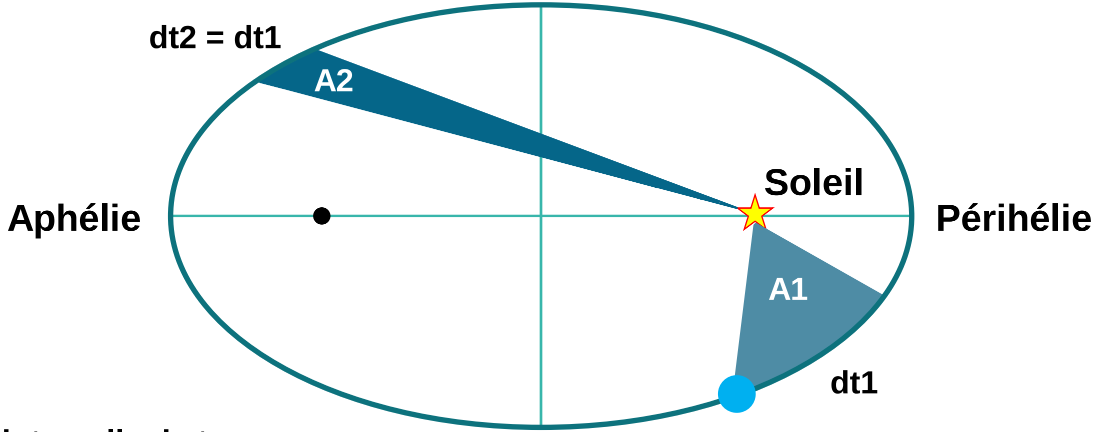
› **1609** : La première loi de Kepler

Les orbites des planètes sont des ellipses planes dont le Soleil occupe l'un des foyers.



› **1609** : La deuxième loi de Kepler (loi des aires)

Les aires balayées par le rayon vecteur joignant le centre du Soleil au centre d'une planète sont proportionnelles aux temps employés à les décrire.

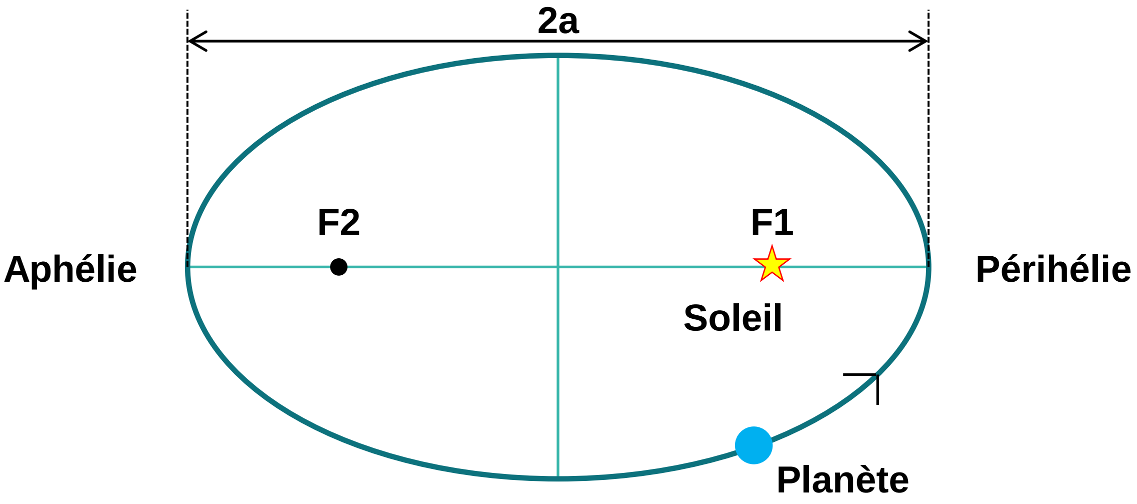



**A1 = A2 pour un même intervalle de temps**

› **1619** : La troisième loi de Kepler

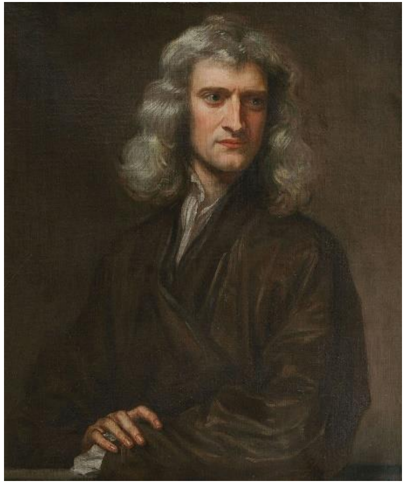
Les carrés des périodes de révolutions des planètes sont proportionnels aux cubes des demi-grands axes de leurs orbites

$$\boxed{\frac{T^2}{a^3} = cste}$$



# UN PEU D’HISTOIRE …

- **1687**: Les mouvements des planètes ainsi décrits, il restait à en trouver la cause. Il revint à revint à Isaac Newton (et sa pomme) d’énoncer la loi de la gravitation universelle et d’en déduire mathématiquement les lois empiriques de Kepler.

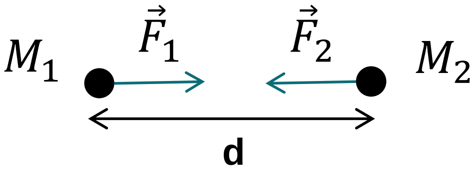


***Isaac Newton (XVIIe)***

*Portrait par Godfrey Kneller*

*Deux corps ponctuels de masse $M_1$et $M_2$ exercent l’un sur l’autre une attraction mutuelle dont le module est proportionnel à leurs masses et inversement proportionnel au carré de leur distance*

$$\boxed{|F_1| = |F_2| = \frac{G.M_1.M_2}{d^2}}$$




$$G = 6{,}67430 \times 10^{-11}\ USI\ (\frac{N.m^2}{kg^2})$$

# EXERCICE

- La Terre est une planète du système solaire dont la période de révolution autour du Soleil est de **365,25 jours**. Le demi-grand axe de l'orbite de la Terre est d'environ **$149{,}6 \times 10^6$ kilomètres**. Calculer les demi-grand axes des orbites des planètes suivantes :
  - Mercure (T = 87,969 jours)
  - Mars (T = 686,885 jours)
  - Saturne (T = 10754 jours)

# CORRECTION

› A l'aide de la troisième loi de Kepler, nous avons :

$$\frac{T_{Terre}^2}{a_{Terre}^3} = \frac{T_{Planete}^2}{a_{Planete}^3} \Rightarrow a_{planete} = \sqrt[3]{\frac{T_{Planete}^2 \times a_{Terre}^3}{T_{Terre}^2}}$$

| Planète | T (jours) | a (km) | a (UA) |
|---|---|---|---|
| Terre | 365,25 | $149{,}6 \times 10^6$ | 1 |
| Mercure | 87,969 | $57{,}9 \times 10^6$ | 0,387 |
| Mars | 686,885 | $227{,}9 \times 10^6$ | 1,524 |
| Saturne | 10754 | $1\,426{,}4 \times 10^6$ | 9,535 |

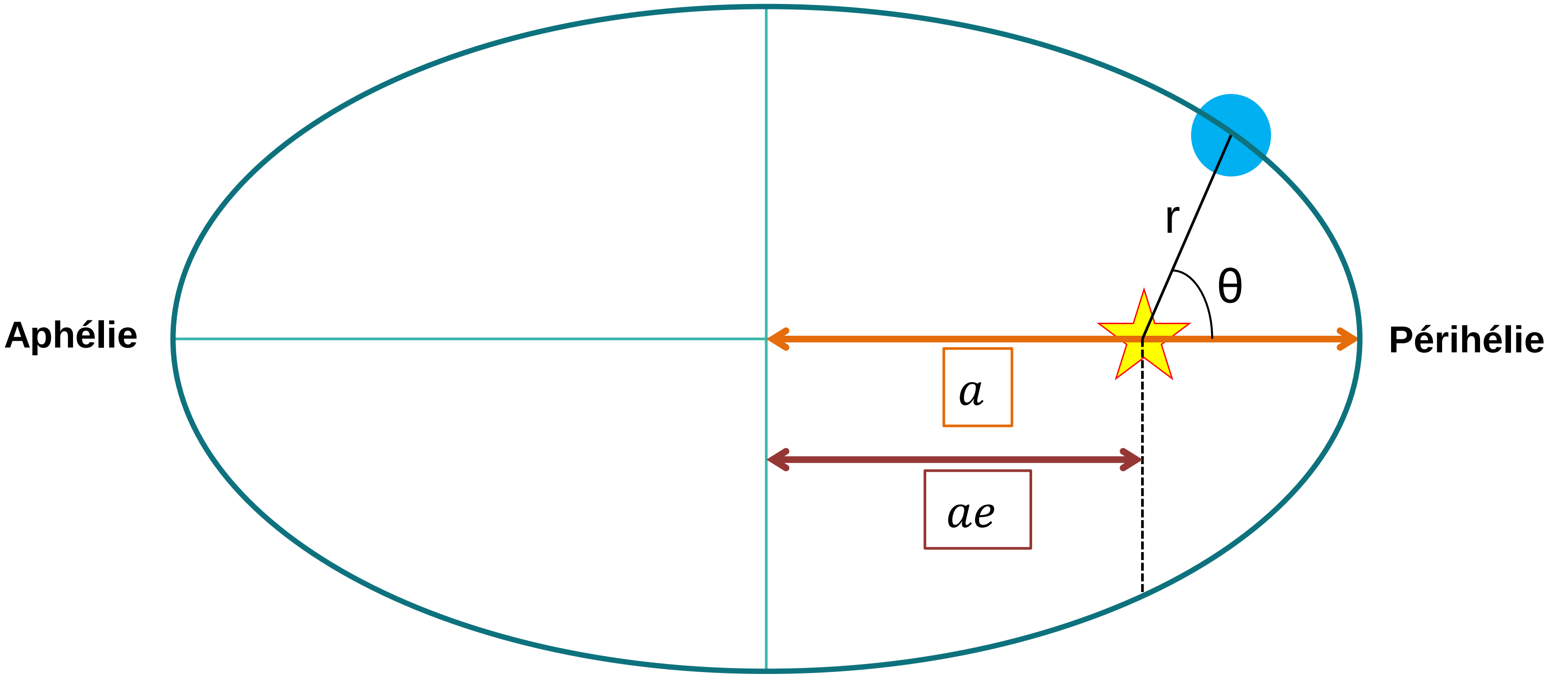
› **UA** = Unité Astronomique : 149 597 870 700 m

# L’ELLIPSE

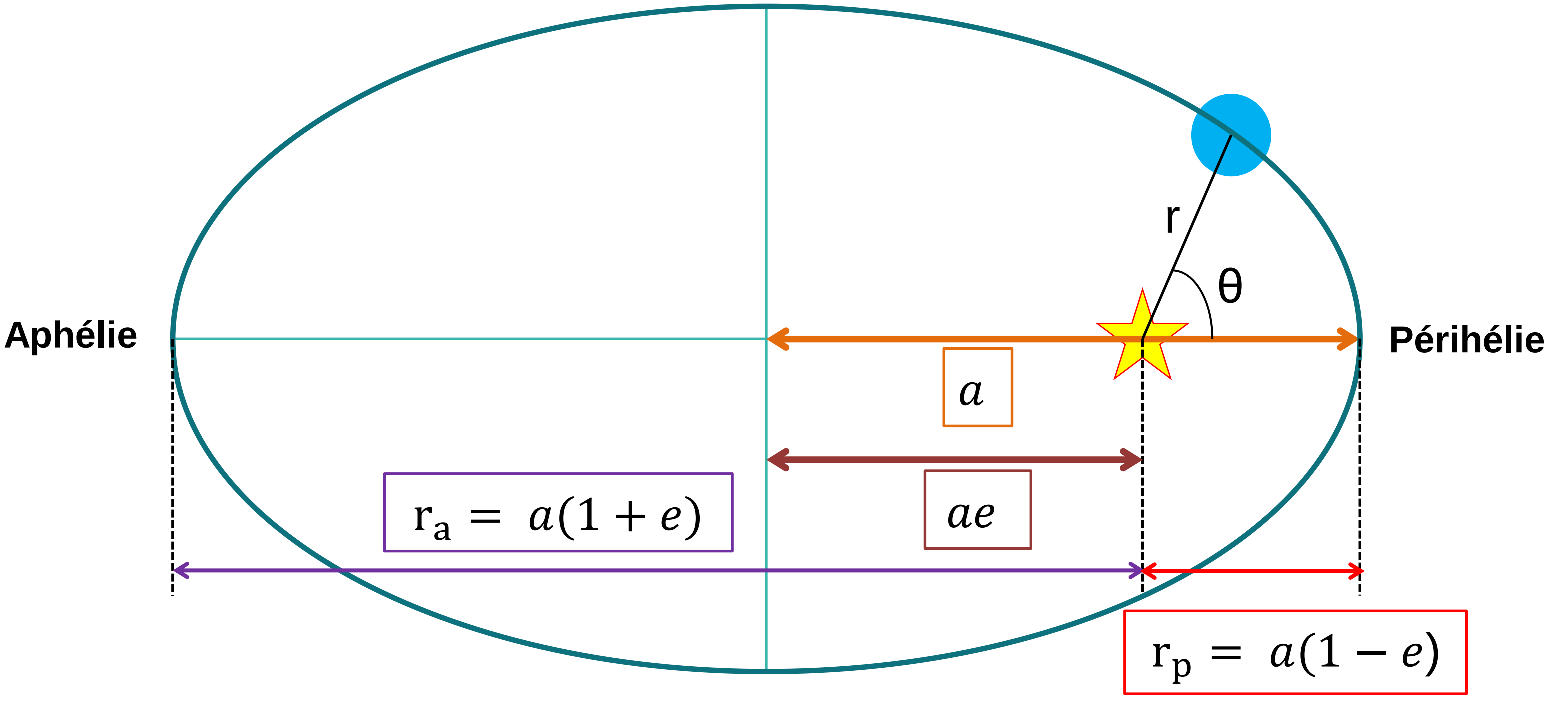
## Objectifs du cursus

› Apprendre **les bases** de la mécanique orbitale.

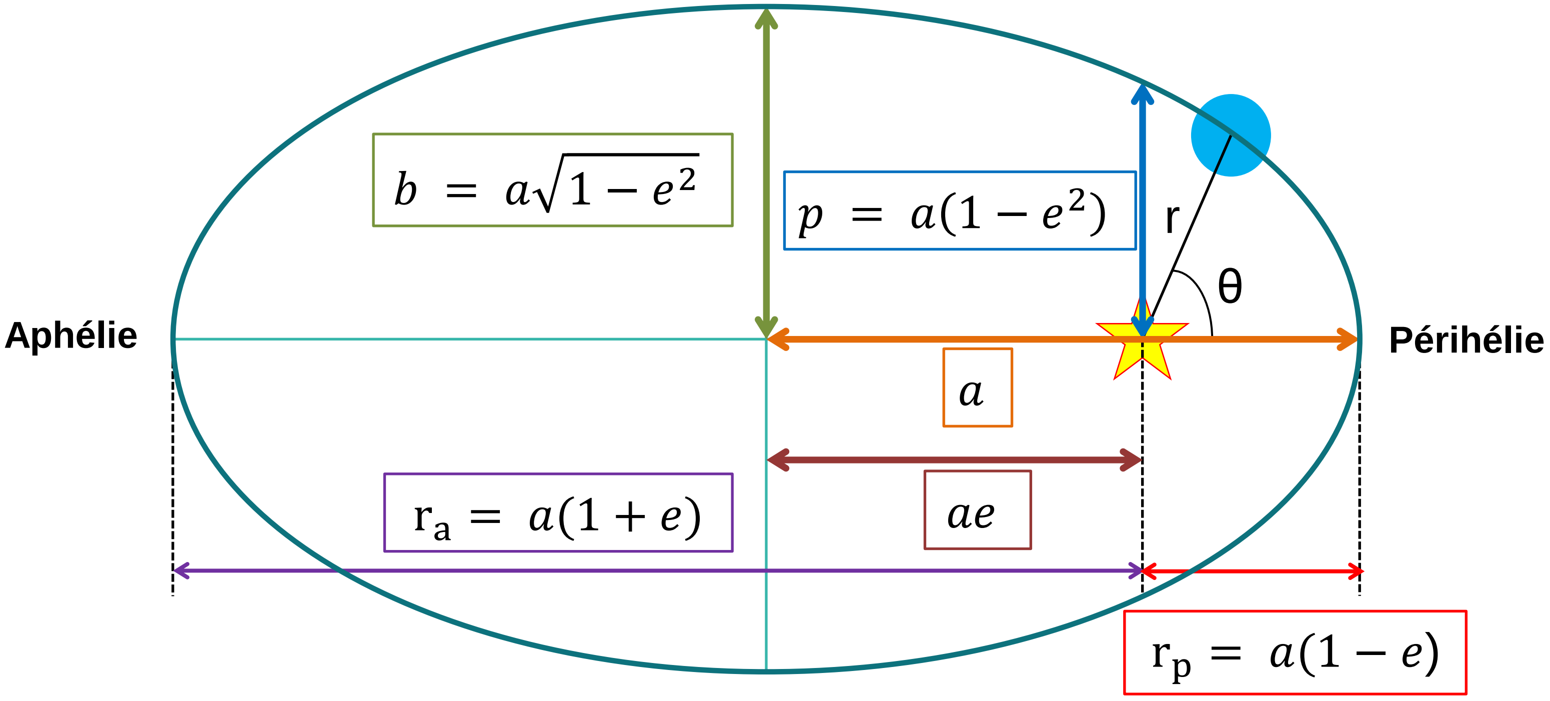
# L'ELLIPSE



# L'ELLIPSE



# L'ELLIPSE



**Formulaire**

| | |
|---|---|
| Rayon de l'apogée | $\mathrm{r_a} = a(1+e)$ |
| Altitude de l'apogée | $\mathrm{h_a} = \mathrm{r_a} - \mathrm{R_T}$ |
| Rayon du périgée | $\mathrm{r_p} = a(1-e)$ |
| Altitude du périgée | $\mathrm{h_p} = \mathrm{r_p} - \mathrm{R_T}$ |
| Demi-grand axe | $a = \frac{\mathrm{r_a}+\mathrm{r_p}}{2}$ |
| Demi-petit axe | $b = a\sqrt{1-e^2}$ |
| «Paramètre» de l'ellipse | $p = a(1-e^2) = {b^2}/{a}$ |
| Excentricité | $e^2 = \frac{a^2-b^2}{a^2} = 1 - {b^2}/{a^2}$ |

# EXERCICE

- Nous considérons un satellite d'Observation de la Terre dont l'altitude du périgée est de 620 km. L'excentricité de son orbite est de 0,04. On rappelle que le rayon de la Terre est de 6378 km.
  - 1- Calculer le demi-grand axe
  - 2- Calculer l'altitude de son apogée

# CORRECTION

› Nous considérons un satellite d'Observation de la Terre dont l'altitude du périgée est de 620 km. L'excentricité de son orbite est de 0,04. On rappelle que le rayon de la Terre est de 6378 km.

- 1- Calculer le demi-grand axe

$$\mathrm{r_p} = a(1-e) \quad \Rightarrow \quad a = \frac{\mathrm{r_p}}{(1-\mathrm{e})}$$

$$\mathrm{r_p} = 6378 + 620 = 6998 \text{ km} \quad \Rightarrow \quad a = \frac{6998}{(1-0{,}04)} = 7289{,}58 \text{ km}$$

# CORRECTION

› Nous considérons un satellite d'Observation de la Terre dont l'altitude du périgée est de 620 km. L'excentricité de son orbite est de 0,04. On rappelle que le rayon de la Terre est de 6378 km.

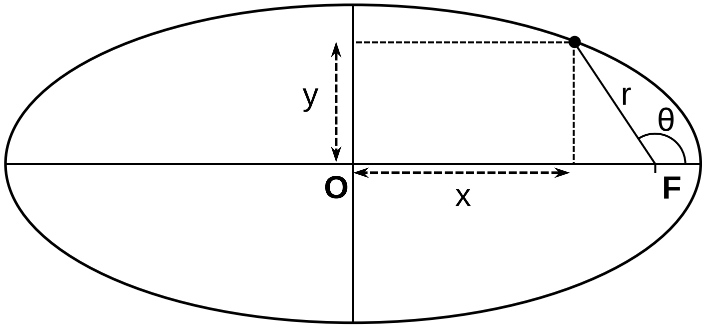
- 2- Calculer l'altitude de son apogée

$$\mathrm{r_a} = a(1+e) \quad \Rightarrow \quad \mathrm{r_a} = 7289{,}58(1+0{,}04) = 7581{,}17\ \mathrm{km}$$

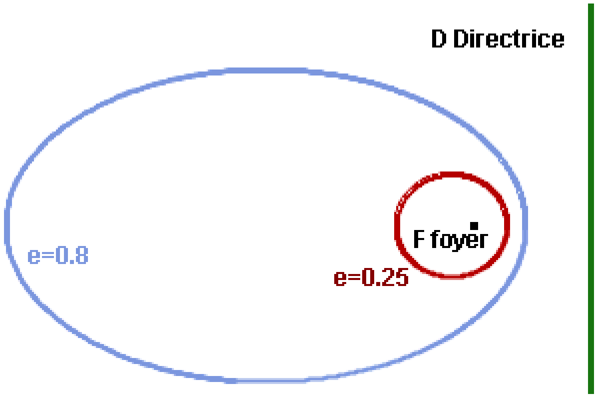
$$\mathrm{h_a} = \mathrm{r_a} - \mathrm{R_T} \quad \Rightarrow \quad \mathrm{h_a} = 7581{,}17 - 6378 = 1203{,}17\ \mathrm{km}$$

› Equations :

- Cartésienne : $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$
- Paramétrique :
  - $r = \frac{p}{1+e\cos(\theta)}$
  - En posant: $u = \frac{1}{r} \Rightarrow u = \frac{1}{p} + \frac{e}{p}\cos(\theta)$
  - $\frac{d^2u}{d\theta^2} + u = \frac{1}{p} \rightarrow$ Equation paramétrique de la trajectoire (cf. cours suivant)

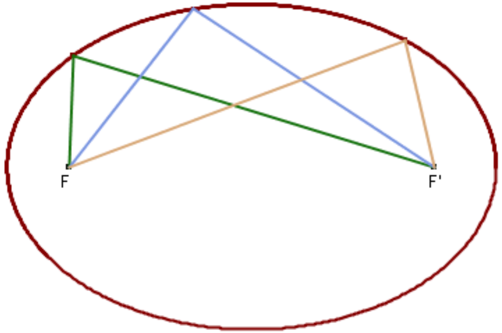


- Plusieurs définitions
  - A la grecque: intersection d’un cône et d’un plan
  - Du jardinier: Ensemble des points tels que $MF + MF' = 2a$
  - Moderne: Ensemble des points tels que $\frac{d(M,F)}{d(M,D)} = e$



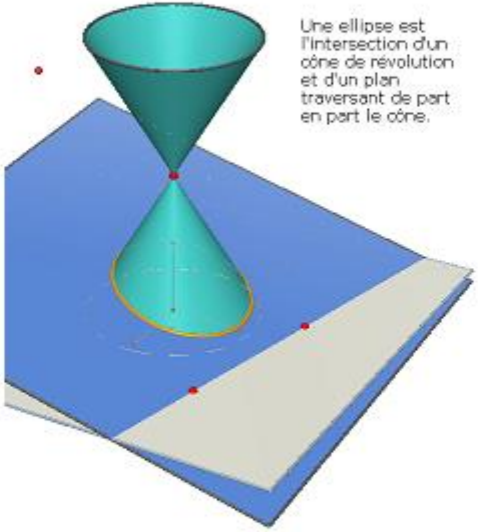

***Moderne***

*Source: Bibmath.net → ellipse*




***Du jardinier***

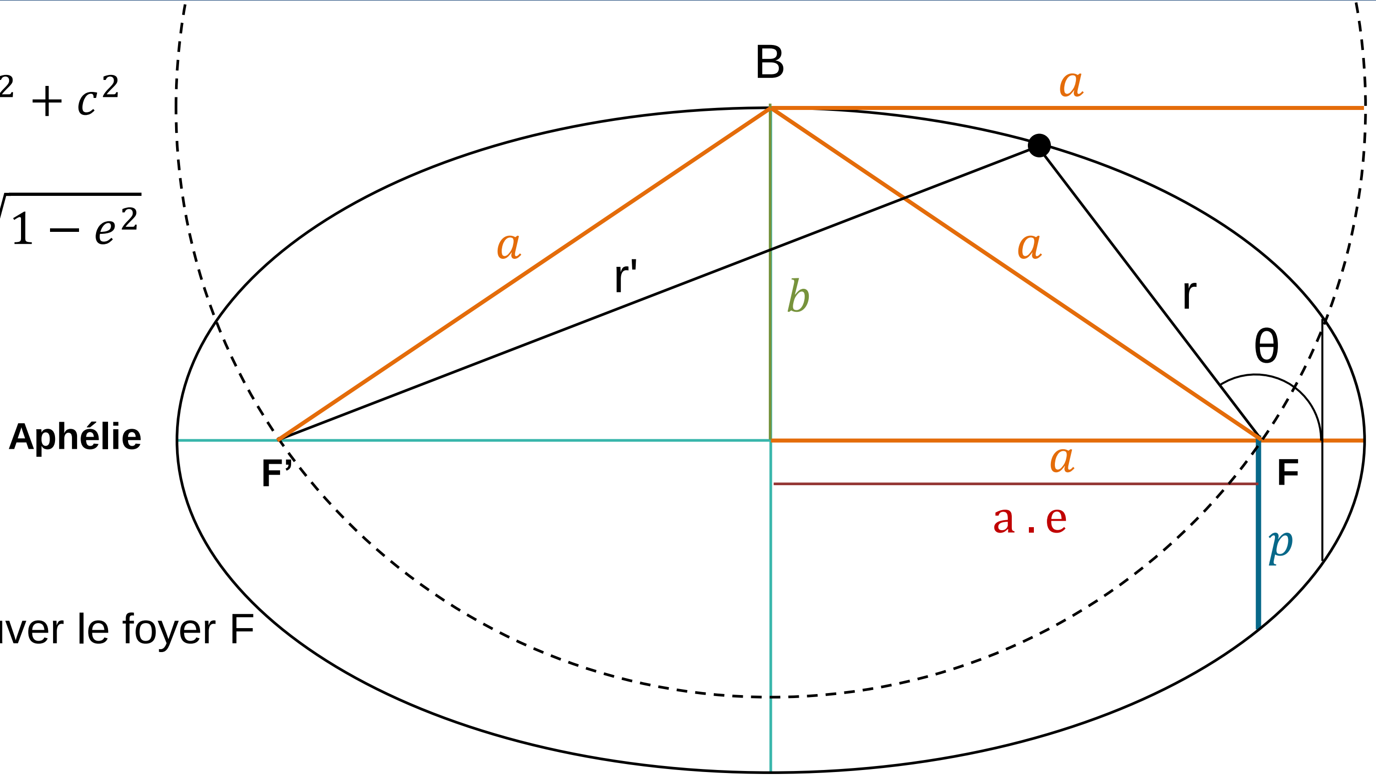
*Source: Bibmath.net → ellipse*




***A la grecque***

*Source: Bibmath.net → ellipse*

$$a^2 = b^2 + c^2$$
$$c = ae$$
$$b = a\sqrt{1 - e^2}$$



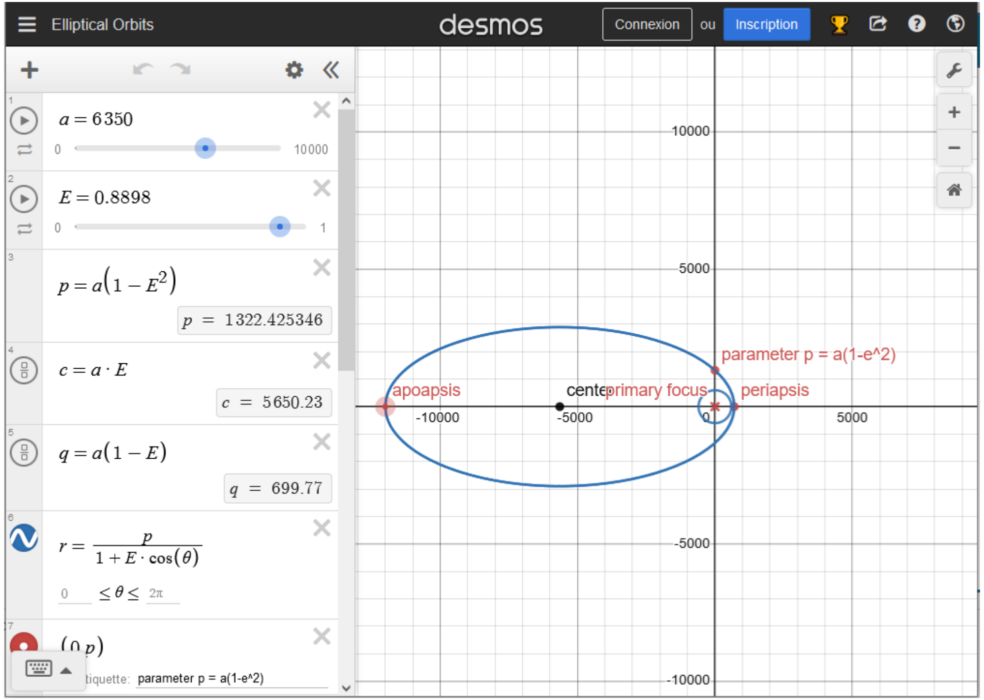

› Trouver le foyer F

Lorsque l'on ne connaît que a et b ? Tracer le cercle de centre B et de rayon a

Démonstration par la méthode du jardinier: F'BF = 2a et F'BF isocèle

# L'ELLIPSE (COMPLÉMENTS)

- [Visualiser une ellipse avec Desmos]
- Modifier a et e
- Observer les changements sur l'ellipse




*Source: The Kerbal Math & Physics Lab, Christopher S. Vaughen*

# BIBLIOGRAPHIE


- Qui étaient les tous premiers astronomes (Stelvision)
- Les lois de Kepler (JE Arlot, Observatoire de Paris)
- Biographies d'astronomes historiques (astrofiles.net)
- Ellipse et Coniques (Bibmath)
- Vizualizing an elliptical orbit: Christopher S. Vaughen


- La version originale de ce cours a été écrite par **Bryan Cazabonne**

  Ingénieur en mécanique spatiale: M1 SUTS 2017, passé par CS (2018-2022), chez Airbus DS depuis août 2022

**Maxime Journot**

Ingénieur Mécanique Spatiale

**maxime.journot@csgroup.eu**

**CS GROUP**
22, AVENUE GALILÉE
92350 – LE PLESSIS-ROBINSON

TÉL : 01.41.28.40.00

**[csgroup.eu]**

**BU ESPACE**
PARC DE LA GRANDE PLAINE
RUE BRINDEJONC DES MOULINAIS
BP 15872
31506 – TOULOUSE CEDEX 5

TÉL : 05.61.17.66.66

**[csgroup.eu]**

SYSTÈMES CRITIQUES INTELLIGENTS CYBERPROTÉGÉS