

# Mesure de l'unité astronomique par la parallaxe de 433 Eros

Bruno Bodin  
Christophe Labarthe

Association Aphélie  
<http://www.astrosurf.com/aphelie/>

RCE le 2 novembre 2012

# L'Unité astronomique

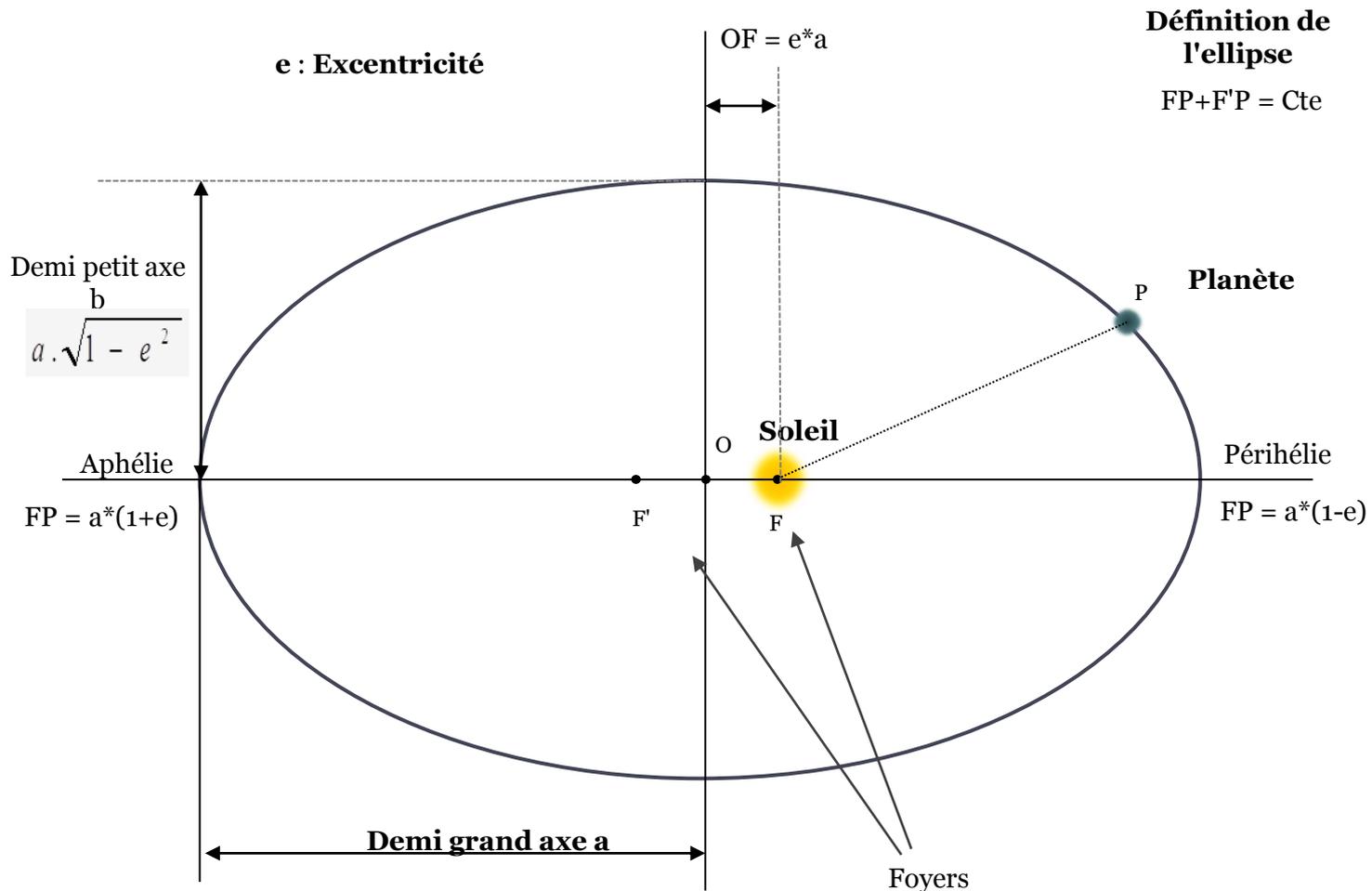
- Définition de l'unité astronomique (UA)
  - Historiquement, elle vaut le demi grand axe de l'orbite terrestre (1958)
  - Mais ce demi grand axe varie dans le temps à cause des perturbations gravitationnelles
  - Redéfinie en 1976 par distance qu'une particule dont l'orbite circulaire aurait une période 365,25 jours
  - Fixée en 2012 par l'UAI à **149 597 870 700 m**

# Le projet

- Mesurer par nous mêmes, avec des moyens amateurs, l'Unité Astronomique
- Redécouvrir des mesures historiques
  - Détermination des dimensions du système solaire en UA (Kepler, 1608 & 1618)
  - Mesure de la Parallaxe de Mars de Cassini & Richer (1672)
  - Campagnes de mesure de la parallaxe de 433 Eros au début du XX<sup>ème</sup> siècle

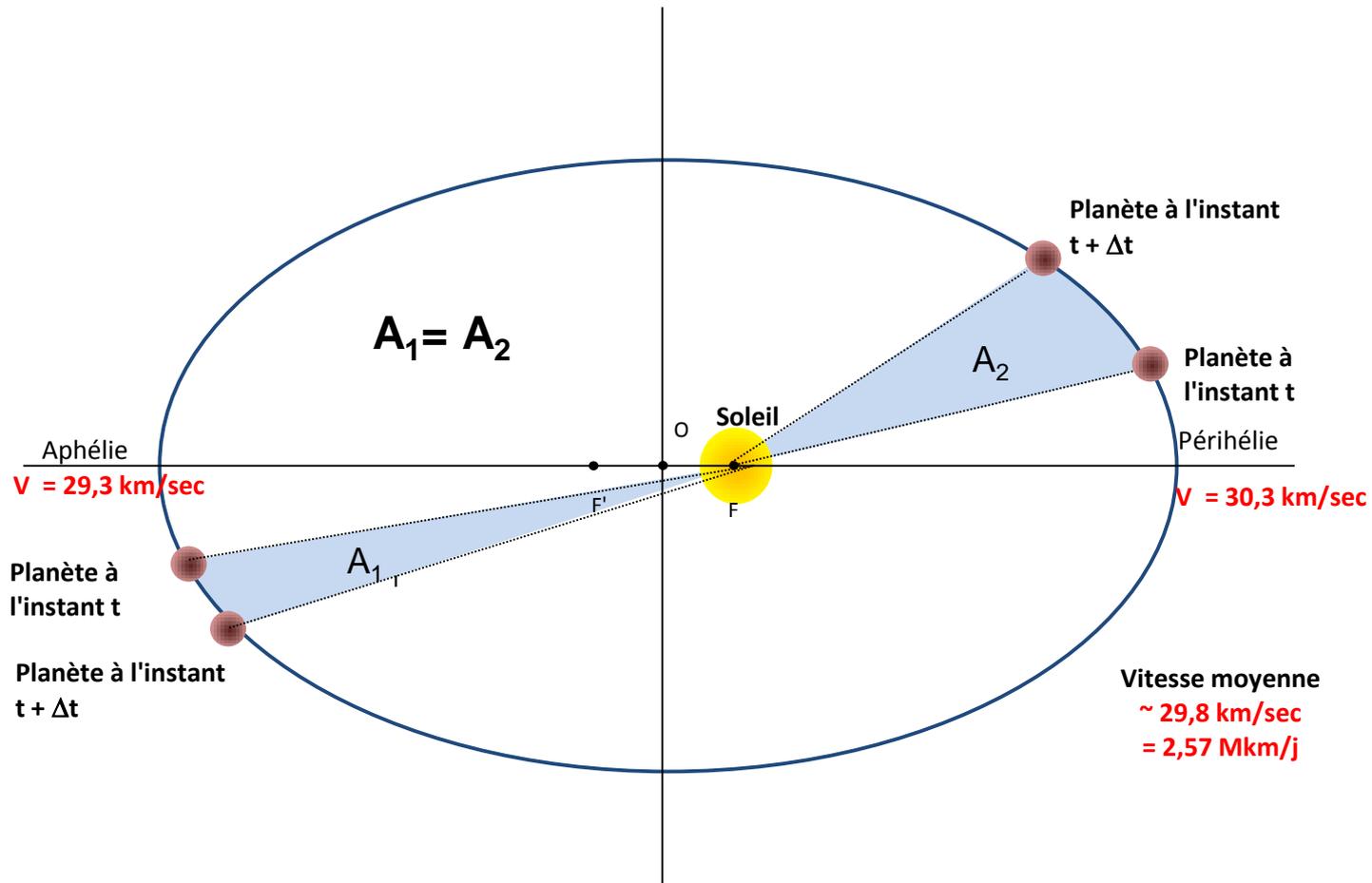
# 1<sup>ère</sup> loi de Kepler (1608)

- Les planètes du système solaire décrivent des trajectoires elliptiques dont le Soleil occupe l'un des foyers



# 2<sup>ème</sup> loi de Kepler (1609)

- L'aire balayée par le rayon vecteur est constante avec le temps -> La vitesse tangentielle varie avec le temps



# 3<sup>ème</sup> loi de Kepler (1618)

- Relation entre le demi grand axe  $a$  et la période de révolution  $T$  des objets orbitant autour d'un même corps :

$$\frac{a^3}{T^2} = cte$$

- La constante dépend de la masse du corps central :

$$\frac{GM_s}{4\pi^2}$$

- La 3<sup>ème</sup> loi de Kepler permet de déterminer les dimensions du système solaire en UA, **pas en kilomètres** (si on ne connaît pas la masse solaire) !
- **Le mesure de l'UA est donc primordiale pour connaître les dimensions de l'univers !!!**

# Le système solaire en UA

<b>Mercure</b>	<b>0,38 UA</b>
Vénus	0,72 UA
Terre	1 UA
Mars	1,52 UA
Jupiter	5,21 UA
Saturne	9,54 UA
Uranus	19,18 UA
Neptune	30,11 UA

Quelle est la dimension du système solaire en **kilomètres** ?

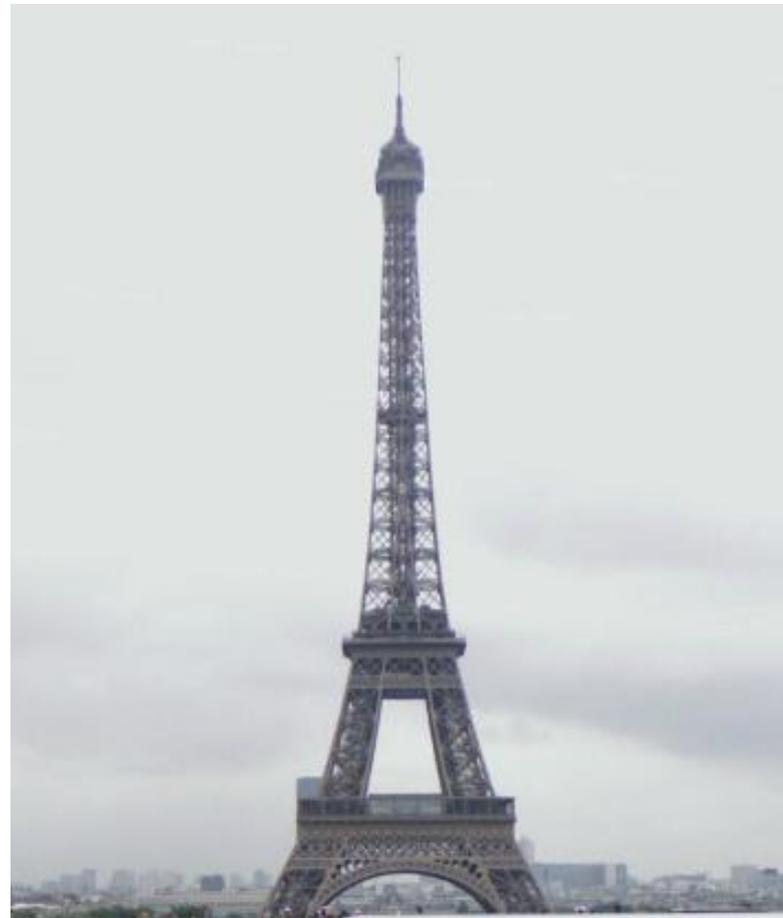


# Un peu d'histoire

- **Aristarque** évalua la distance Terre – Soleil à 6,7 millions de kilomètres (-300 JC)
- **Ptomélée** évalua la distance Terre – Soleil à 7,7 millions de kilomètres (II siècle)
- **Kepler** évalua la distance à 21,9 millions de km (1600)
- Essai avec les éphémérides : la valeur n'est pas répétable -> entre 7 et -47 millions de km !
  - -> **Cette méthode ne fonctionne pas car l'orbite lunaire est elliptique.**
  - -> **Sa vitesse est variable le long de son orbite**
  - -> **Les intervalles de temps entre les quatre phases est variable**

# Notion de Parallaxe

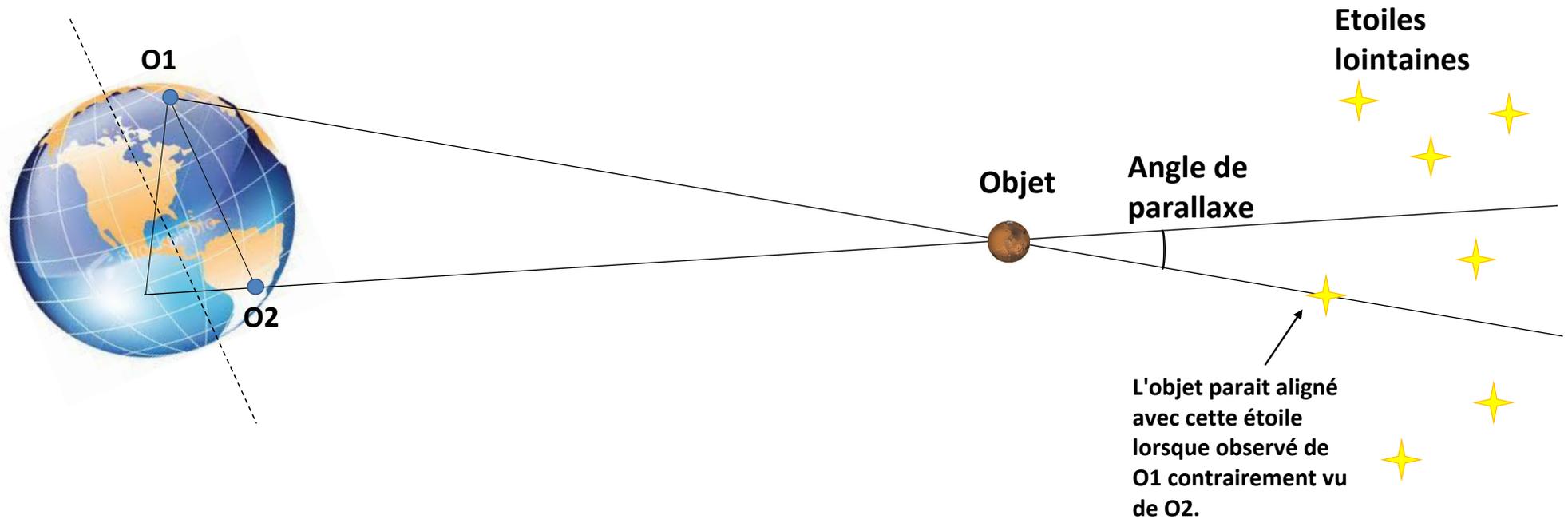
- « La **parallaxe** est l'incidence du changement de position de l'observateur sur l'observation d'un objet. En d'autres termes, la parallaxe est l'effet du changement de position de l'observateur sur ce qu'il perçoit. » (wikipedia)



# La parallaxe en astronomie

- **Parallaxe diurne** : l'angle sous lequel on verrait le rayon terrestre depuis le soleil.
- **Parallaxe annuelle d'une étoile** : l'angle sous lequel on verrait le demi axe de l'orbite terrestre depuis cette étoile
- Les mesures de distance dans le système solaire *se basent* sur la parallaxe diurne.
- Les mesures de distance des étoiles avoisinantes utilisent la parallaxe annuelle.
- Le parsec (parallaxe-seconde) : distance à laquelle la parallaxe annuelle vaut 1''

# Principe de la mesure de Parallaxe



# Calculer la distance à partir de la parallaxe

- Deux points d'observation quelconques
- $R_T$  le rayon terrestre.
- $\vec{V}_1$  la coordonnée du lieu d'observation 1 dans le repère **céleste**
- $\vec{V}_2$  la coordonnée du lieu d'observation 2 dans le repère **céleste**
- $\vec{V}_m$  les coordonnées célestes de l'objet au moment de l'observation.
- **P** : la parallaxe mesurée.

$$D = \frac{R_T}{\sin p} \left\| \vec{V}_m \wedge (\vec{V}_1 - \vec{V}_2) \right\|$$

# • Mesures de parallaxe de Mars par Cassini et Richer

- Mesure directe de la parallaxe
- 24 septembre 1672
- Mars est à 0,42 UA, une très bonne opposition.
- Cassini & Roemer sont à l'observatoire de Paris
- Richer est à Cayenne en Guyanne

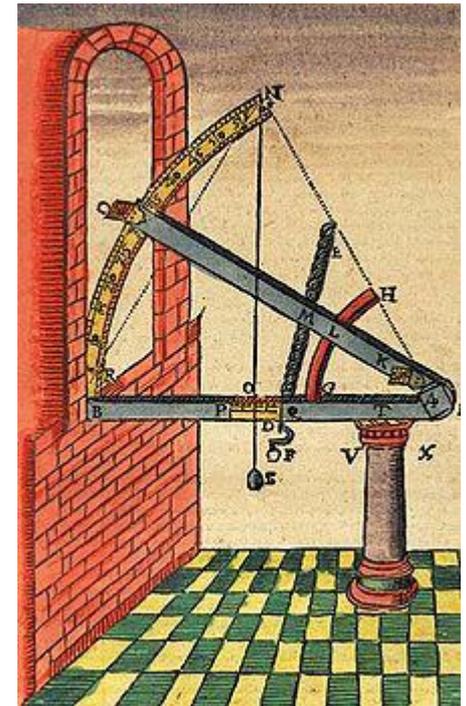


*On travaillait de concert aux observations de Mars, qui était alors beaucoup plus proche de la Terre, que puisse être aucune autre planète au dessus de la Lune, à la réserve de Vénus. Et s'on jugeait, qu'il était dans cette situation, à laquelle il ne devait retourner qu'après le cours de 15 années, s'on pouvait déterminer avec le moins d'erreur la distance de la Terre. »*

# Mesures de parallaxe de Mars par Cassini et Richer

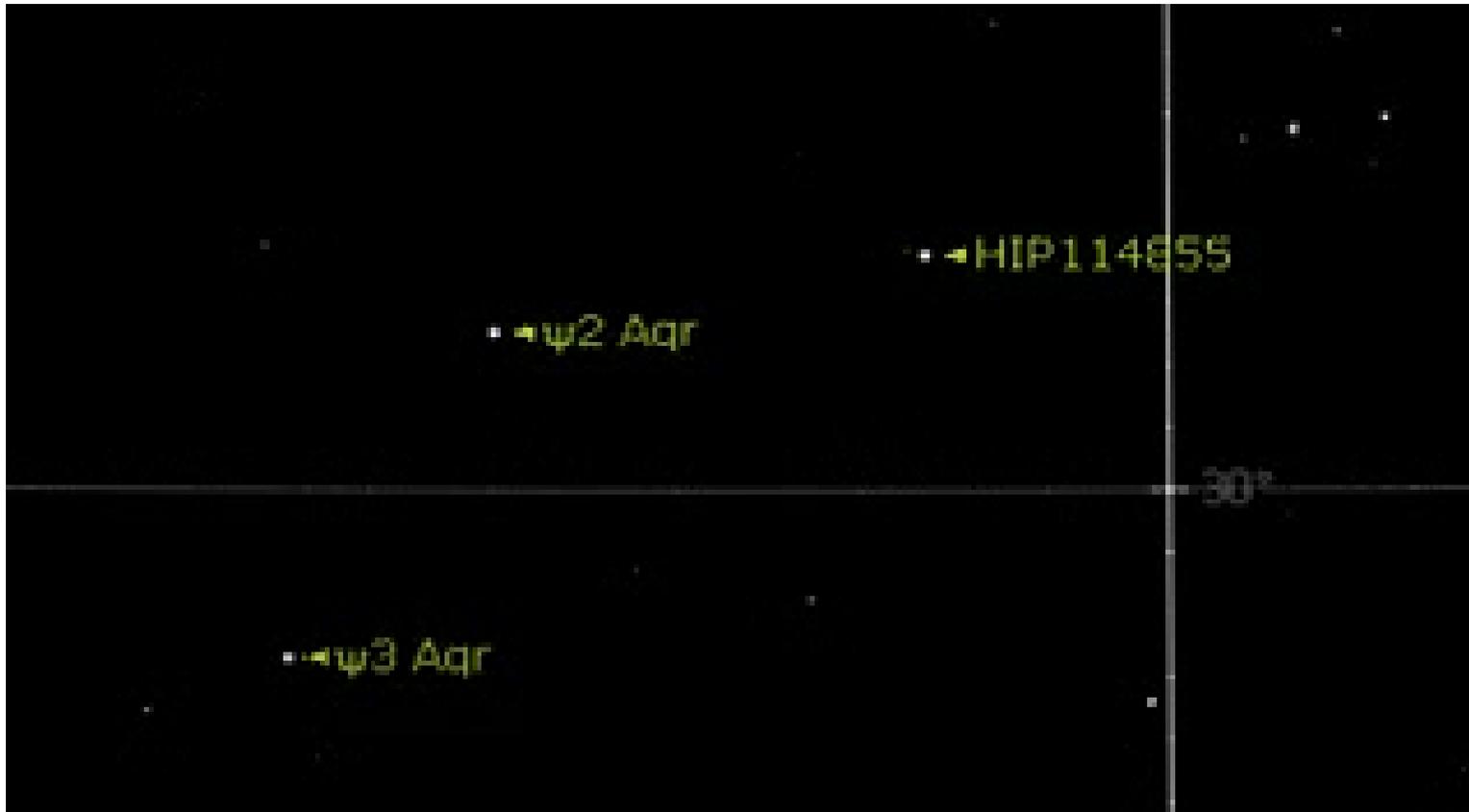
- Les mesures sont réalisées au sextant de 1,80 m de rayon !
- On mesure le passage de Mars au méridien et celui des trois étoiles du Verseau qui sont à proximité.
- On relève les temps de passage et sa hauteur au méridien.
- Les écarts de temps et les hauteurs sont comparées pour déterminer la parallaxe.

-> mais les mesures doivent être réalisées à la seconde d'arc près !! Et Mars culmine à  $74^\circ$  à Cayenne !!



# Mesures de parallaxe de Mars par Cassini et Richer

- Simulation sous Starry Night à Paris le 24 septembre 1672



# • Mesures de parallaxe de Mars par Cassini et Richer

- Cassini détermine une parallaxe de 17'' d'arc.
- L'UA mesurée vaut : 140 Mkms.
- Mais les doutes sont sérieux à cause d'irrégularités dans les données de Roemer les jours suivants.

*« Ce qu'on voyait par les angles de parallaxes faits de Mars [...] se réduisent à peu de secondes, et quelquefois à rien, et pour ainsi dire à moins que rien, puisqu'à leur place on trouvait assez souvent des distances contraires qui ne pouvaient naître que de petites erreurs causées en partie par les instruments, en partie par la constitution de l'air... »*

# Notre premier essai : opposition de Mars en 2010

- Inspirée par la manipe de Cassini et Richer
- Mais on réalise directement une comparaison par addition des deux clichés.
- Mais
  - Difficulté de gestion de l'exposition (Mars est très brillante par rapport aux étoiles environnantes !)
  - Pas de prise en compte de l'excentricité de l'orbite

# Notre premier essai : opposition de Mars en 2010

- La manip :
  - Photos simultanées prises au C8 + EOS40D
  - En Ile de France + aux Makes (Ile de la Réunion)
  - Synchronisation avec le GPS
  - Alignement des images en se basant sur les étoiles environnantes
  - Mesure de la parallaxe en pixels
  - Conversion en secondes d'arc par le taux d'échantillonnage spatial
- On en déduit la distance Terre-Mars (en km)
  - Utilisant la 3eme loi de Kepler on connait la proportion entre la distance Terre-Soleil et Terre- Mars (1,523)
- On peut en déduire la distance Terre-Soleil en km

# Premier essai : opposition de Mars en 2010

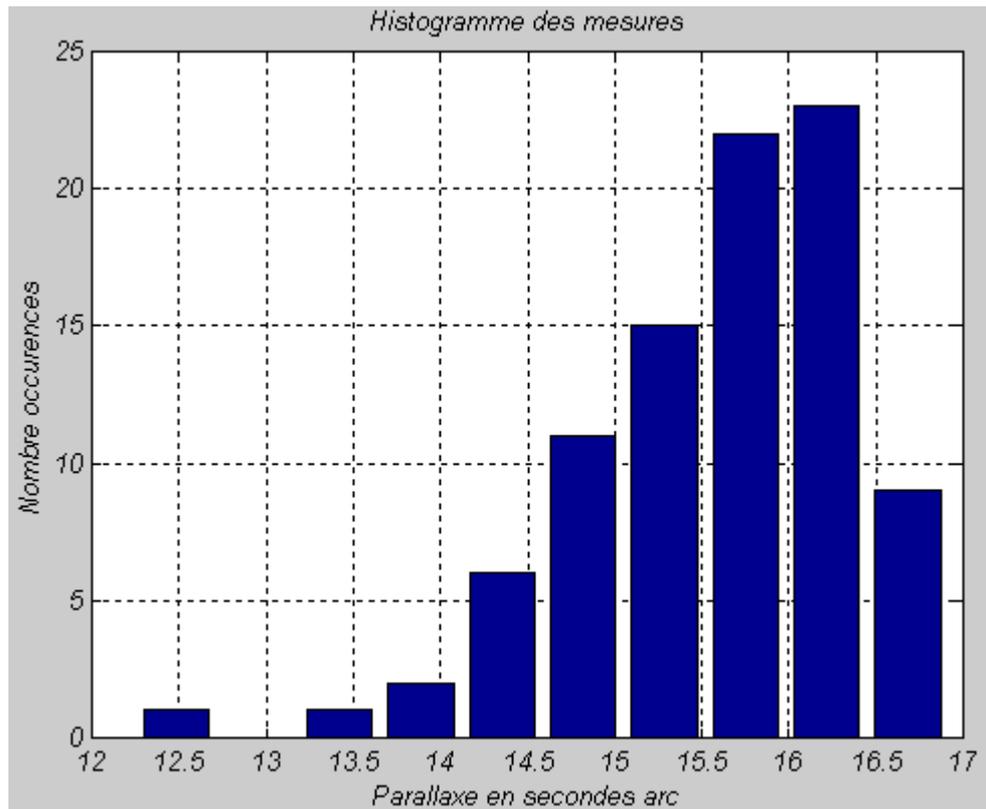
- Les résultats

Ile de la  
France

Ile de la  
Réunion



# Premier essai : Résultats



Médiane : 15.75 sec  
Moyenne : 15.6 sec  
Ecart moyen : 0.6 sec

Parallaxe de Mars entre Paris et Les Makes  
- 15,75 secondes d'arc

Distance Terre-Mars  
- 109 millions de km

Selon les éphémérides  
- Parallaxe de 17,4"  
- Distance : 99 millions de km

- **UA mesurée à 166 millions de km**

# Une meilleure cible : (433) Eros

Danjon (Astronomie générale) :

"On préfère aujourd'hui mesurer la parallaxe des petites planètes les plus proches, et notamment celle de la planète 433 Eros. Les pointés sont effectués beaucoup plus précis sur ces astres d'aspect stellaire. (...)

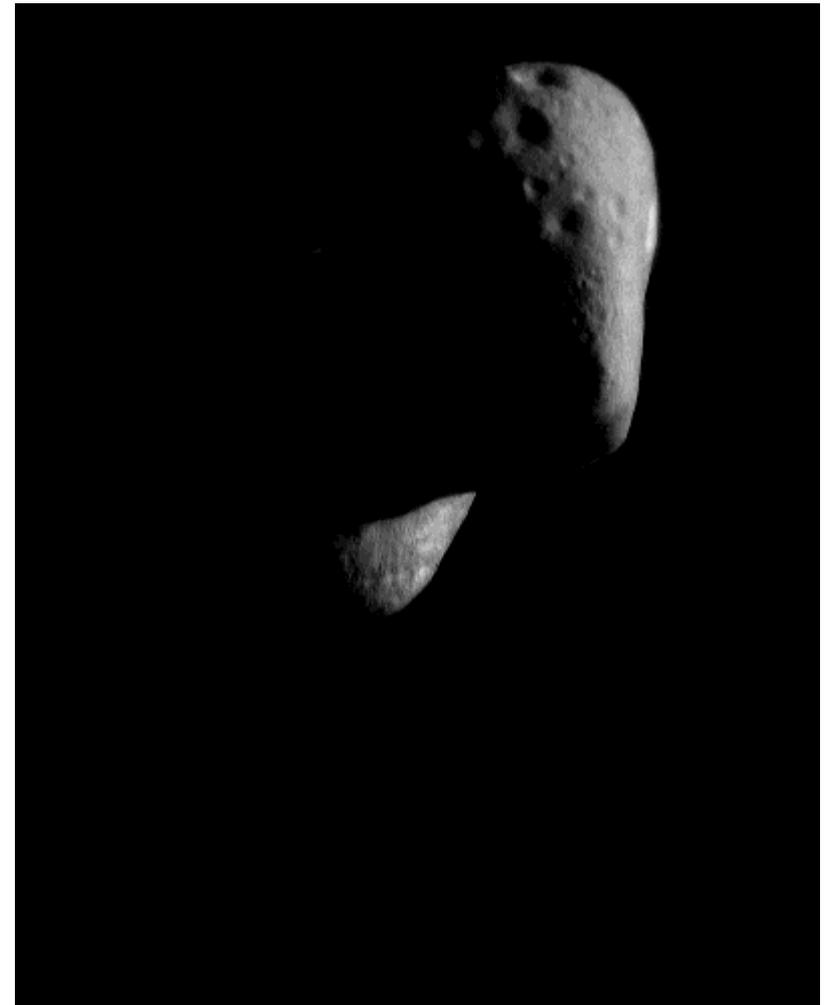
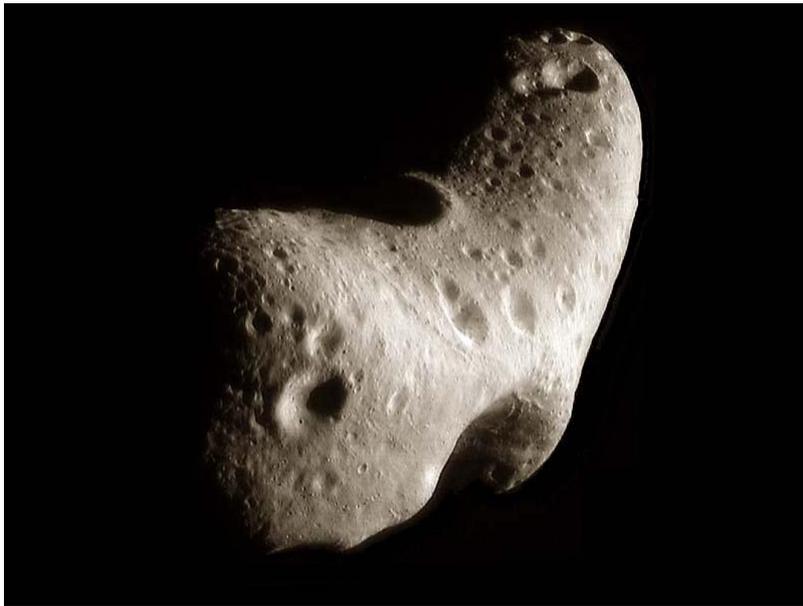
La première campagne d'observation d'Eros, en 1900/1901, avait donné, après une dizaine d'années de mesures et de calculs (Hinks), le résultat suivant :  $\omega_0 = 8.806''$ ,  $\pm 0.004''$

Une nouvelle campagne a été organisée en 1930-1931. Les observations, préparées de longue main, ont été faites avec un soin particulier et leur précision est bien supérieure à celle des observations de 1900-1901, la distance d'Eros s'étant

abaissée à 0.17 au lieu de 0.32. La valeur qu'en a déduite Spencer Jones est  $8.790 \pm 0.001 \dots$ "

# 433 Eros : caractéristiques physiques

- Photos & vidéos de la sonde Near (1994)



<b>Taille</b>	<b>33 * 33 * 13 km</b>
Masse	7,2. 10 <sup>12</sup> tonnes
Gravité à sa surface	0,0059 m/sec c
Vitesse de libération	10 m/sec
Taille apparente	0,26'' à 0,17 UA !

# Opposition de (433) Eros : février 2012

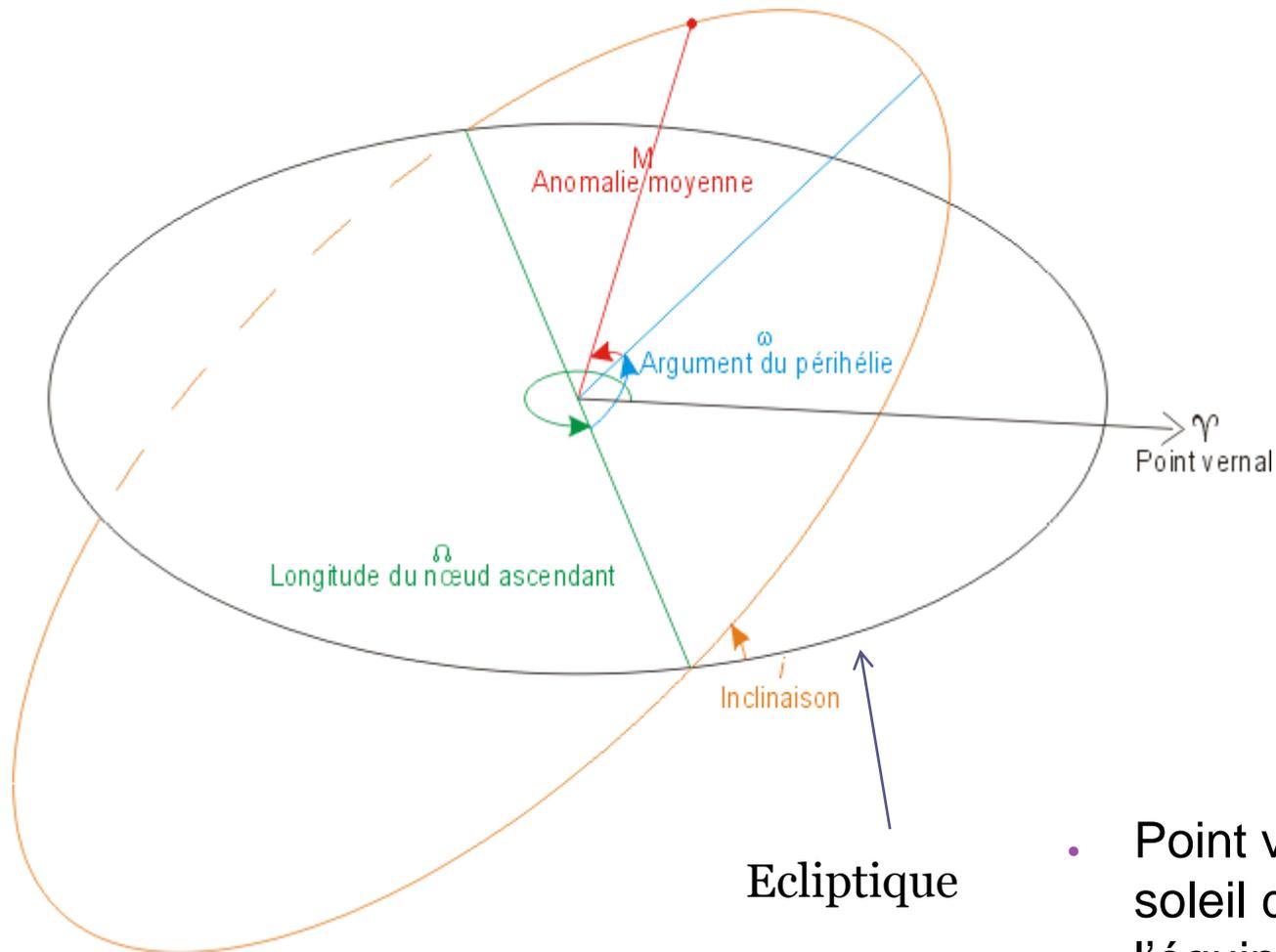
- Bien plus précis que Mars
  - Moins lumineux, facile en photo, ponctuel
    - Meilleure astrométrie
  - On espère obtenir une valeur bien plus précise de l'UA
    - Grande parallaxe (Opposition prévue à 0.17 UA !)
    - Meilleure estimation de la distance en UA par reconstruction d'orbite (pas fait pour Mars)

# Notre programme d'observation

- Observation les plus régulières possibles des octobre 2011
    - => reconstruction de l'orbite
    - => distance Terre-Eros en UA
  - Observation simultanée de 2 points éloignés en janvier/février 2012
    - Appel à partenaires pour observer avec nous
      - Les Makes (Ile de la Réunion)
      - A Klotz nous propose d'utiliser les TAROT (Calern - Alpes haute Provence & La Silla – Chili)
- + Nous, en région parisienne !!
- => Distance Terre-Eros en km

# Les coordonnées orbitales

- 6 coordonnées

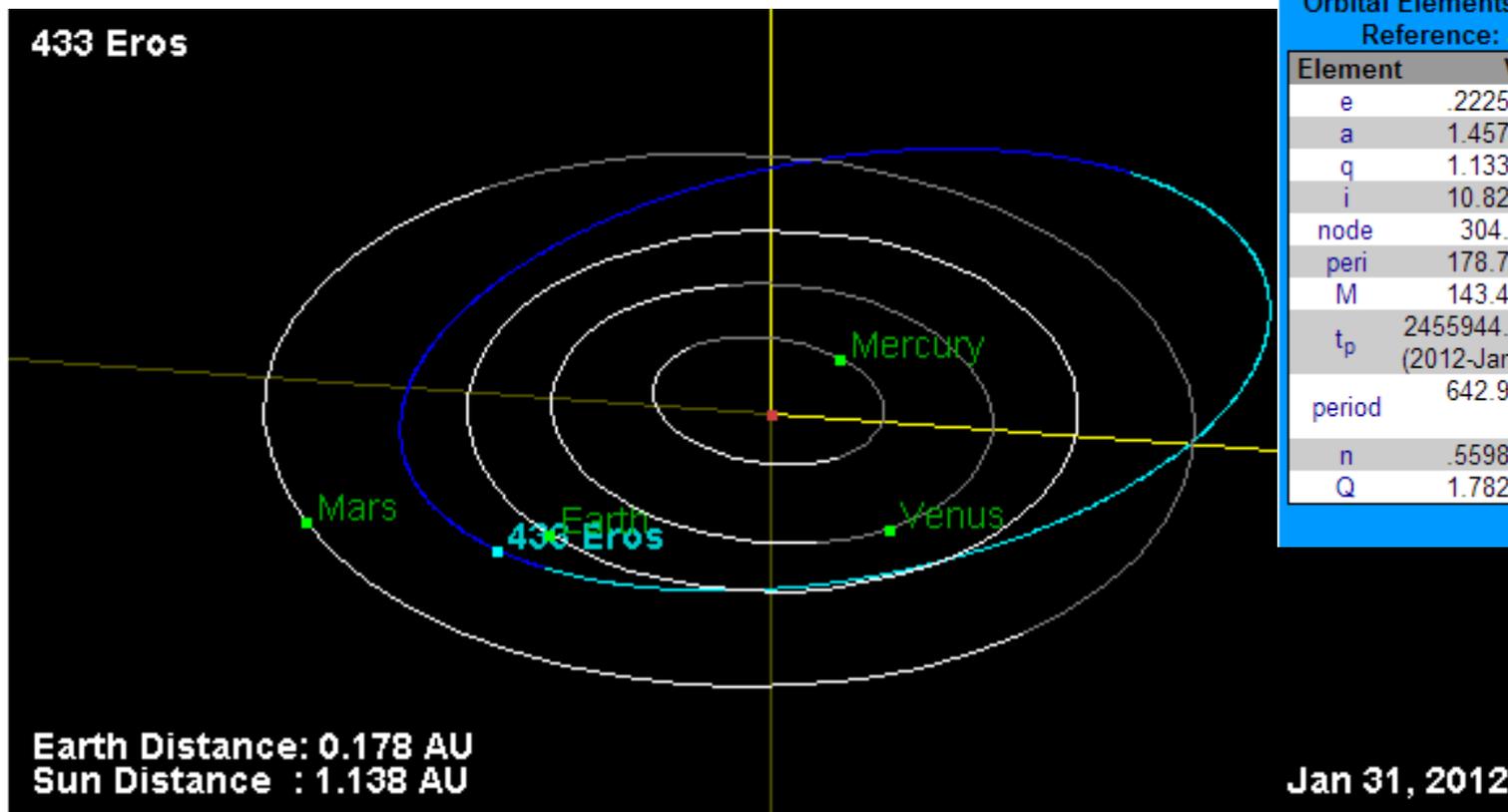


- Demi grand axe
- Excentricité
- Inclinaison
- Longitude du nœud ascendant
- Argument du périhélie
- Anomalie moyenne

- Point vernal : position du soleil dans le ciel à l'équinoxe de printemps

# 433 Eros : coordonnées orbitales

- C'est un astéroïde de la famille des Amor : il frole l'extérieur de l'orbite terrestre.



Orbital Elements at Epoch 2456200.5 (2012-Sep-30.0) TDB  
Reference: **JPL 416** (heliocentric ecliptic J2000)

Element	Value	Uncertainty (1-sigma)	Units
e	.2225739958362374	1.0755e-08	
a	1.457934058049667	3.1302e-10	AU
q	1.133435849083811	1.5745e-08	AU
i	10.82815888926628	2.6814e-06	deg
node	304.338084451675	8.7969e-06	deg
peri	178.7890824930792	1.0213e-05	deg
M	143.4928652770706	4.8916e-06	deg
t <sub>p</sub>	2455944.209176863955 (2012-Jan-17.70917686)	8.7116e-06	JED
period	642.9915254031763	2.0708e-07	d
	1.76	5.67e-10	yr
n	.5598829623365074	1.8031e-10	deg/d
Q	1.782432267015522	3.8269e-10	AU

<http://neo.jpl.nasa.gov/orbits/>

# Déterminer les éphémérides d'un astéroïde

- <http://www.minorplanetcenter.net/iau/MPEph/MPEph.html>

Return ephemerides
  Return summary
  Return HTML page

ed by designation or by name. Enter a list of designations or names below (one entry per line, excess entries will be ignored)

433 eros

**Ephemeris Options (applicable only if selecting ephemeris return):**

By default, ephemerides are geocentric, begin now and are for 20 days at 1 day intervals.

Ephemeris start date:  Number of dates to output

Ephemeris interval:  Ephemeris units:  days  hours  minutes  seconds

For daily ephemerides, enter desired offset from 0h UT:  hours

You may enter an observatory code or your observing site's coordinates:

Observatory code:

Longitude  ° E, latitude  °, altitude  m.

Longitudes and latitudes should be entered in decimal degrees.

Display R.A./Decl. positions in:  truncated sexagesimal or  full sexagesimal or  decimal units

heliocentric position vector  heliocentric position/velocity vector  geocentric position vector

Total motion and direction  
 Separate R.A. and Decl. coordinate motions  
 Separate R.A. and Decl. sky motions

Display motions as:  "/sec  "/min  "/hr  °/day

Suppress output if sun above local horizon  
 Suppress output if object below local horizon

Output data for photometric reductions

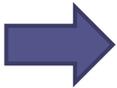
Generate perturbed ephemerides for unperturbed orbits

Measure azimuths:

westwards from the south meridian  
 eastwards from the north meridian

Also display elements for epoch

MPC 8-line



(433) Eros

[Display all designations for this object](#) / [Show naming citation](#) / # of variant orbits available = 3

Object is a **Goldstone radar target** during 2012/01/01-2012/02/31: No astrometry or physical studies requested.

Perturbed ephemeris below is based on 46-opp elements from MPO 236391. Last observed on 2012 Aug. 27.

Discovery date : 1898 08 13  
 Discovery site : Berlin  
 Discoverer(s) : Witt, G.

[Further observations?](#) NEO : None needed at this time.

00433	UT	[H=11.16]	R.A. (J2000)	Decl.	Delta	r	El.	Ph.	V	Sky Motion	Object	Sun	Moon
Date	h m s									"/min P.A.	Azi. Alt.	Alt.	Phase Dist.
2012 01 30	000000	10 34 21.0	-03 44 14	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.3	326 +33	-60	0.39 135 -01
2012 01 30	000100	10 34 20.9	-03 44 17	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.3	327 +33	-60	0.39 135 -01
2012 01 30	000200	10 34 20.9	-03 44 19	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.3	327 +33	-60	0.39 135 -02
2012 01 30	000300	10 34 20.8	-03 44 22	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.3	327 +33	-60	0.39 135 -02
2012 01 30	000400	10 34 20.8	-03 44 25	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.3	327 +33	-60	0.39 135 -02
2012 01 30	000500	10 34 20.7	-03 44 28	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.3	328 +33	-60	0.39 135 -02
2012 01 30	000600	10 34 20.7	-03 44 30	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.3	328 +33	-60	0.39 135 -02
2012 01 30	000700	10 34 20.6	-03 44 33	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.3	328 +33	-60	0.39 135 -02
2012 01 30	000800	10 34 20.6	-03 44 36	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.3	328 +33	-60	0.39 135 -02
2012 01 30	000900	10 34 20.5	-03 44 38	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.3	329 +34	-60	0.39 135 -03
2012 01 30	001000	10 34 20.5	-03 44 41	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.3	329 +34	-60	0.39 135 -03
2012 01 30	001100	10 34 20.4	-03 44 44	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.3	329 +34	-60	0.39 135 -03
2012 01 30	001200	10 34 20.4	-03 44 47	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.3	330 +34	-60	0.39 135 -03
2012 01 30	001300	10 34 20.3	-03 44 49	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.3	330 +34	-60	0.39 135 -03
2012 01 30	001400	10 34 20.3	-03 44 52	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.3	330 +34	-60	0.39 135 -03
2012 01 30	001500	10 34 20.2	-03 44 55	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.4	330 +34	-60	0.39 135 -03
2012 01 30	001600	10 34 20.2	-03 44 57	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.4	331 +34	-60	0.39 135 -04
2012 01 30	001700	10 34 20.1	-03 45 00	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.4	331 +34	-60	0.39 135 -04
2012 01 30	001800	10 34 20.1	-03 45 03	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.4	331 +34	-60	0.39 135 -04
2012 01 30	001900	10 34 20.0	-03 45 06	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.4	332 +34	-60	0.39 135 -04
2012 01 30	002000	10 34 20.0	-03 45 08	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.4	332 +34	-60	0.39 135 -04
2012 01 30	002100	10 34 19.9	-03 45 11	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.4	332 +35	-60	0.39 135 -04
2012 01 30	002200	10 34 19.9	-03 45 14	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.4	332 +35	-60	0.39 135 -04
2012 01 30	002300	10 34 19.8	-03 45 16	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.4	333 +35	-60	0.39 135 -05
2012 01 30	002400	10 34 19.8	-03 45 19	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.4	333 +35	-60	0.39 135 -05
2012 01 30	002500	10 34 19.7	-03 45 22	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.4	333 +35	-60	0.39 135 -05
2012 01 30	002600	10 34 19.7	-03 45 25	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.4	334 +35	-60	0.39 135 -05
2012 01 30	002700	10 34 19.6	-03 45 27	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.4	334 +35	-60	0.39 135 -05
2012 01 30	002800	10 34 19.6	-03 45 30	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.4	334 +35	-60	0.39 135 -05
2012 01 30	002900	10 34 19.5	-03 45 33	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.4	334 +35	-60	0.39 135 -05
2012 01 30	003000	10 34 19.5	-03 45 35	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.4	335 +35	-59	0.39 134 -06
2012 01 30	003100	10 34 19.4	-03 45 38	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.4	335 +35	-59	0.39 134 -06
2012 01 30	003200	10 34 19.4	-03 45 41	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.4	335 +35	-59	0.39 134 -06
2012 01 30	003300	10 34 19.3	-03 45 44	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.5	336 +36	-59	0.39 134 -06
2012 01 30	003400	10 34 19.3	-03 45 46	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.5	336 +36	-59	0.39 134 -06
2012 01 30	003500	10 34 19.2	-03 45 49	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.5	336 +36	-59	0.39 134 -06
2012 01 30	003600	10 34 19.2	-03 45 52	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.5	337 +36	-59	0.39 134 -06
2012 01 30	003700	10 34 19.1	-03 45 54	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.5	337 +36	-59	0.39 134 -07
2012 01 30	003800	10 34 19.1	-03 45 57	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.5	337 +36	-59	0.39 134 -07
2012 01 30	003900	10 34 19.0	-03 46 00	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.5	337 +36	-59	0.39 134 -07
2012 01 30	004000	10 34 19.0	-03 46 03	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.5	338 +36	-59	0.39 134 -07
2012 01 30	004100	10 34 18.9	-03 46 05	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.5	338 +36	-59	0.39 134 -07
2012 01 30	004200	10 34 18.9	-03 46 08	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.5	338 +36	-59	0.39 134 -07
2012 01 30	004300	10 34 18.8	-03 46 11	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.5	339 +36	-59	0.39 134 -07
2012 01 30	004400	10 34 18.8	-03 46 13	0.179	1.137	145.8	29.1	8.6	2.82	195.5	339 +36	-59	0.39 134 -08

# Notre observatoire



- Les champs à 20 km de Paris
- Pollution lumineuse omni-présente
- Vent glacial
- Température ressentie de  $-17^{\circ}\text{C}$ !

## Matériel utilisé :

- Lunette de 110 mm + ST8XME
- C8 + EOS 40D

# Observatoire des Makes



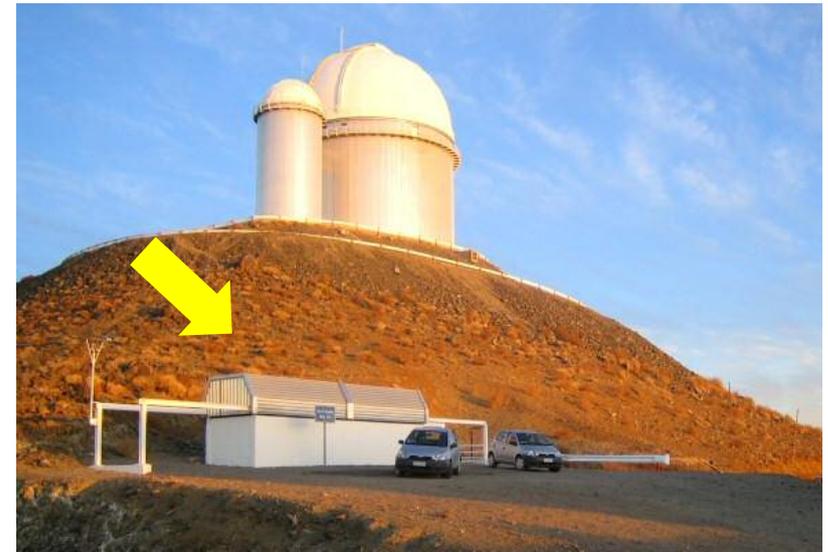
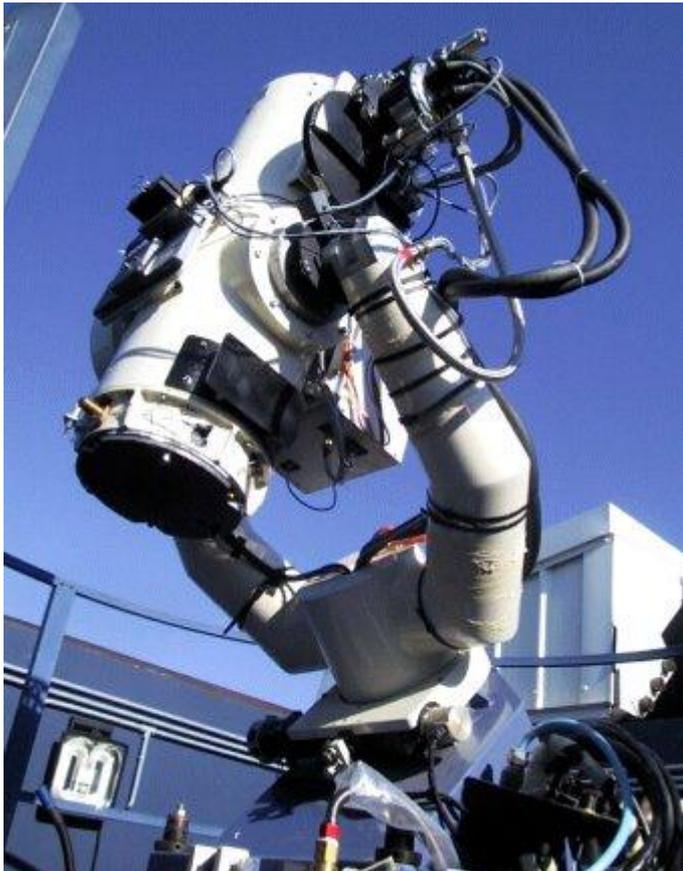
Matériel utilisé : C14 +  
ST7XME

Ciel de très bonne qualité

Climat tropical !

# Les TAROT

- Télescope à Action Rapide pour l'Observation des phénomènes Transitoires Calern & La Silla



Diamètre	250 mm
Ouverture	f / 3,5
Largeur de champ corrigé	2° x 2°
Résolution optique	20 $\mu$ m
Monture	équatoriale
Vitesse de rotation max	80° / s
Vitesse de poursuite	ajustable jusqu'à 40° / s
Taille du CDD	2072 x 2080 pixels
Magnitude limite (10 s)	V < 17
Magnitude limite (100 s)	V < 19

# Exploitation des images de TAROT

- Les images TAROT sont automatiquement calibrée astrométriquement
- Le logiciel Audela sait directement exploiter cette information
- Il suffit d'un clic droit « ajuster une gaussienne » sur un objet pour avoir sa position !



```
7% Console
# Flux intégré : 5211.9695167 +/- 56.11326794
# Magnitude instrumentale -2.5*log10(flux) : -9.292 +/- 0.012

# AD Déc. : 158.990423 -1.856830
# AD Déc. : 10h35m57s70 -01d51m24s58

# OLD Format MPC :
      C2012 01 28.13196 10 35 57.70 -01 51 24.5      13.3
586

# Attention :
# Le site UAI 586 doit être celui où l'image a été acquise.

# Use http://cfa-www.harvard.edu/iau/info/Astrometry.html for
informations.
# Use ::astrometry::mpc_provisional2packed to convert designation
to MPC packed form.

# === Visu1 === Ajuster une gaussienne ===
# Coordonnées de la fenêtre : 1055 896 1074 924
# Centre : 1066.52 / 910.27
# Fwhm : 2.097 / 1.701
# Intensité : 1273.795464 / 1301.521926
# Fond : 1000.184287 / 999.889881
# Flux intégré : 5211.9695167 +/- 56.11326794
# Magnitude instrumentale -2.5*log10(flux) : -9.292 +/- 0.012

# AD Déc. : 158.990423 -1.856830
# AD Déc. : 10h35m57s70 -01d51m24s58

# OLD Format MPC :
      C2012 01 28.13196 10 35 57.70 -01 51 24.5      13.3
586

# Attention :
# Le site UAI 586 doit être celui où l'image a été acquise.

# Use http://cfa-www.harvard.edu/iau/info/Astrometry.html for
informations.
```

# Mesurer la position Astrométrique d'un astre avec le logiciel Iris

The screenshot displays the Iris software interface (Version 5.59) with a dark astronomical image containing several stars. Two dialog boxes are open over the image:

**Sortie**

```
Fichier  Edition
Réduction astrométrique
RA0=10h31m - DEC0=-6d51'
L1=34 étoiles - L2=32 étoiles - COM=19 étoiles
Pas de réjection
+8.41390e-001 -7.02677e-001 +6.10370e+002
-7.02025e-001 -8.39361e-001 +1.65154e+003
Erreur AD=0.47" - Erreur DEC=0.35"
Constante des magnitudes=20.821
```

**Astrométrie (standard)**

AD :  (ex: 12h23m51s)  
DEC :  (ex: -5d33'20")

Sigma détection :  Taille X pixel :   
Sigma réjection :  Taille Y pixel :   
Magnitude limite :  Distance focale :

Evaluation et correction de la distorsion

Evaluation et correction

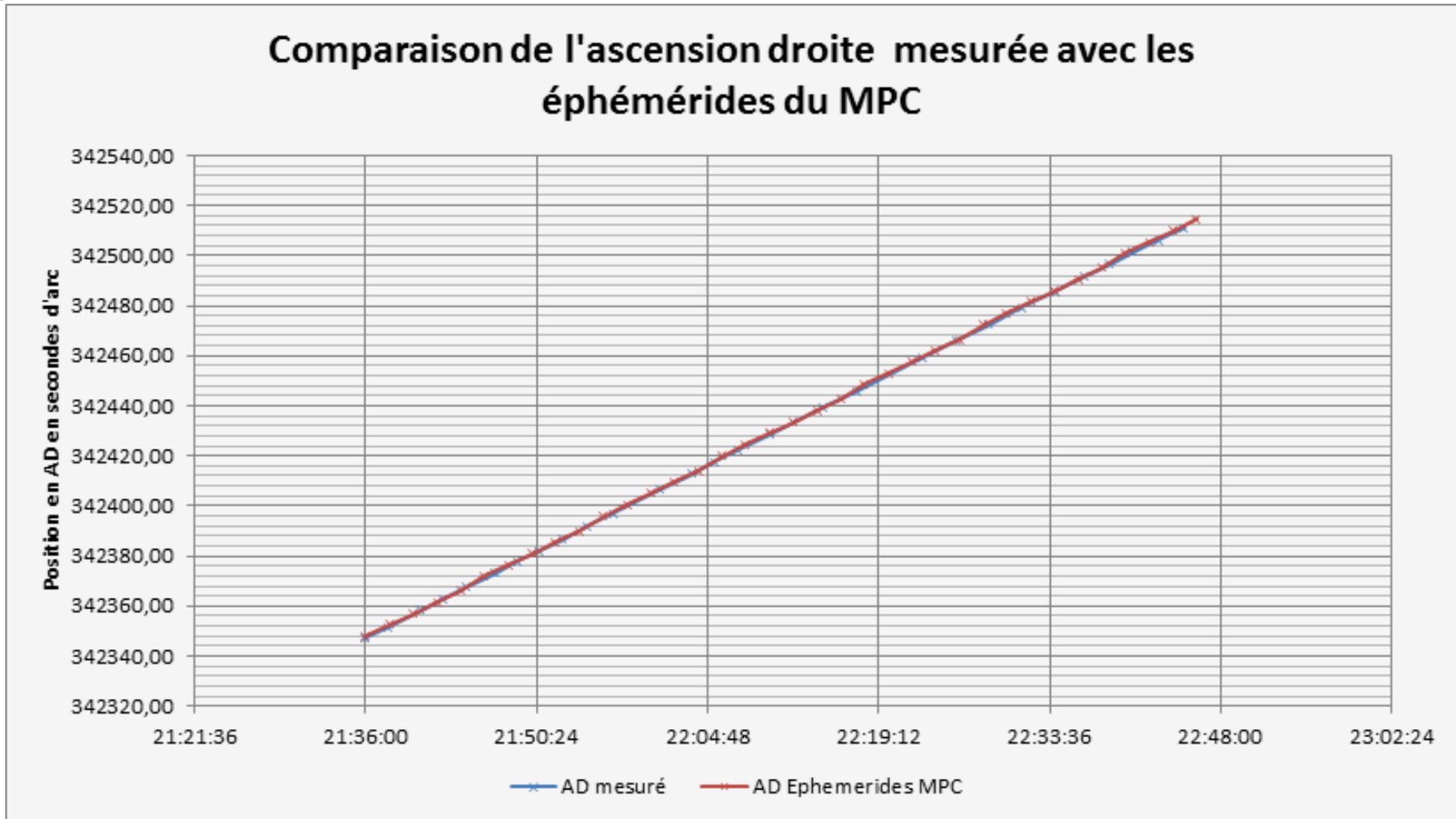
Bilinéaire  Bicubique  Spline

Catalogue

GSC  SKY2000  
 GSC-ACT  USNO-SA  
 TYCHO-2  USNO-A2.0

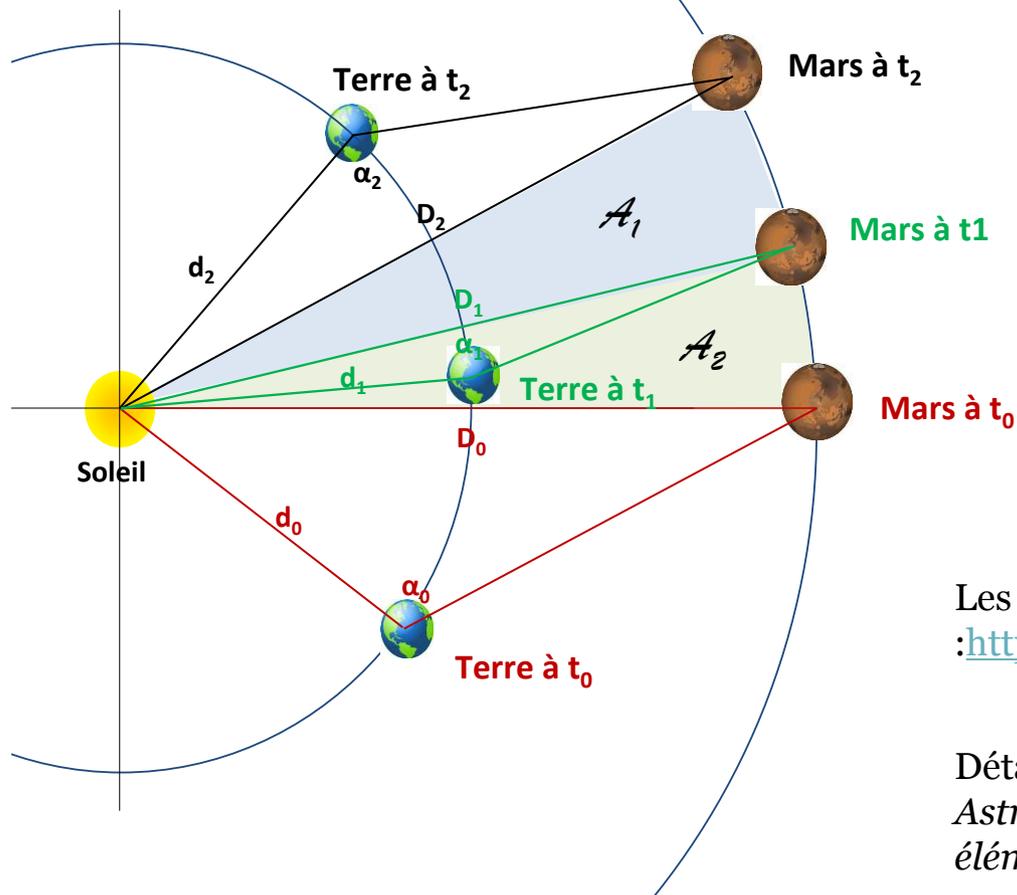
OK Annuler

# Comparaison des résultats avec les éphémérides du MPCC



**Les différences sont inférieures à la seconde d'arc !!!**

# Calculer des coordonnées orbitales par la méthode de Gauss



3 mesures effectuées à  $t = t_0, t_1, t_2$

On mesure  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$

On connaît  $d_0, d_1, d_2$  (orbite terrestre en UA)

Gauss recherche les rayons vecteurs  $D_0, D_1, D_2$  et les coordonnées orbitales correspondantes telles que les 3 lois de Kepler soient vérifiées.

Les équations sont récupérables sur  
: [http://astropedia.free.fr/meca\\_cel/meca\\_cel.html](http://astropedia.free.fr/meca_cel/meca_cel.html)

Détails des calculs dans le livre d'André Danjon  
*Astronomie générale. Astronomie sphérique et éléments de mécanique céleste*

# Reconstruction d'orbite

- Problème : la méthode de Gauss fait appel à la valeur de l'UA !
  - Terme de retard lié à la vitesse de la lumière finie
- Nous avons donc codé notre propre logiciel de calcul des éléments orbitaux pour pouvoir contrôler l'influence de ce terme
- En pratique, Eros est proche (env 1 minute –lumière) et donc ce terme est faible
- => Les éléments trouvés ne dépendent quasiment pas de la valeur de l'UA.

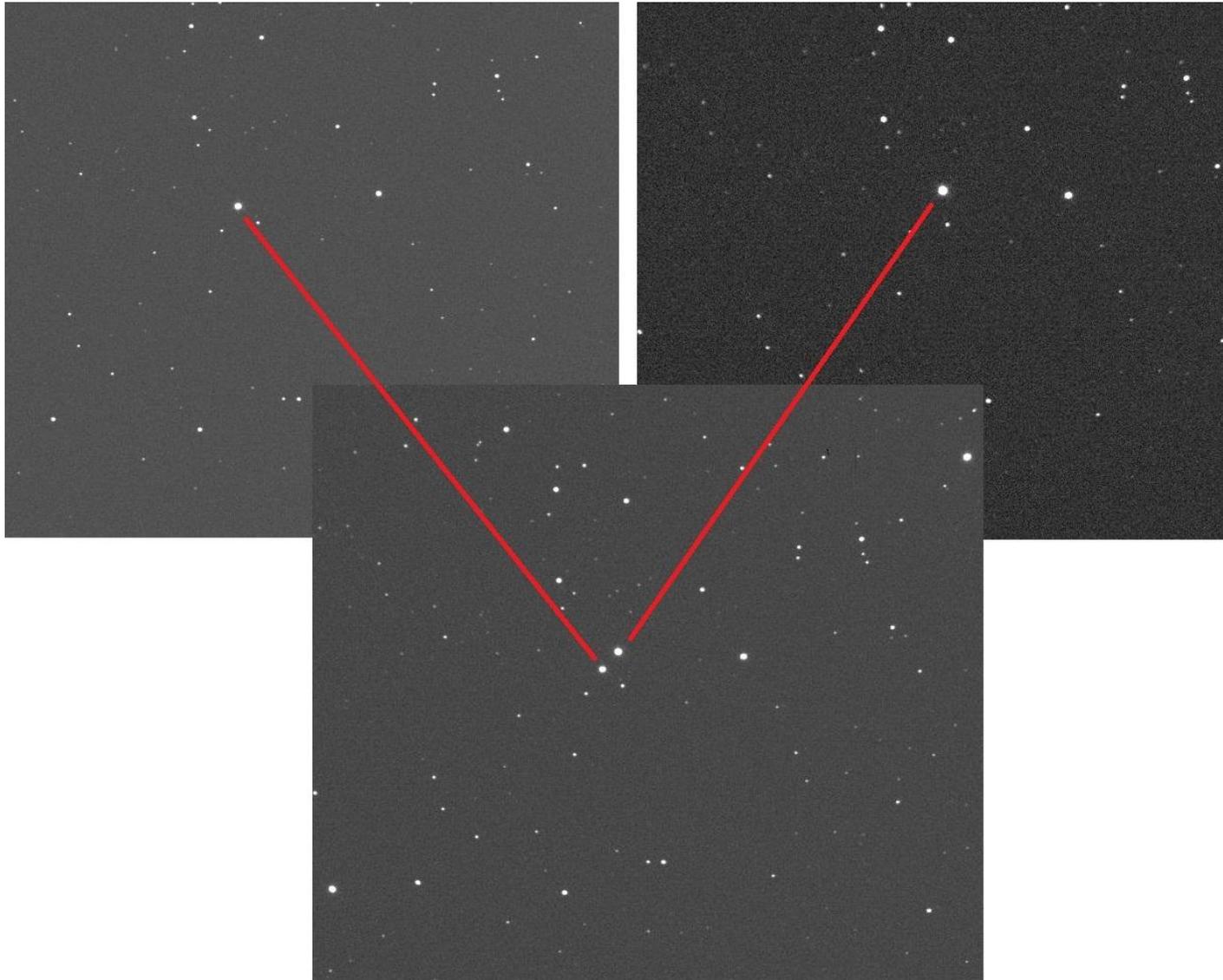
# Résultats de la reconstruction d'orbite

- 9 mesures de position effectuées avec TAROT

Résultats des calculs d'orbite

	Méthode de Gauss	Valeurs réelles	Erreur
Demi grand axe	1,45871 AU	1,4579 AU	0,06%
Excentricité	0,2231	0,2251	-0,89%
Longitude nœud ascendant	304,48°	304,338°	-0,05%
Argument du périhélie	178,775°	178,789°	-0,01%

# Parallaxe La Silla - Calern



**A gauche à La Silla (Chili), à droite à Calern (Sud de la France),  
en bas leur superposition**

# Eros à la Réunion au C14 + ST7XME

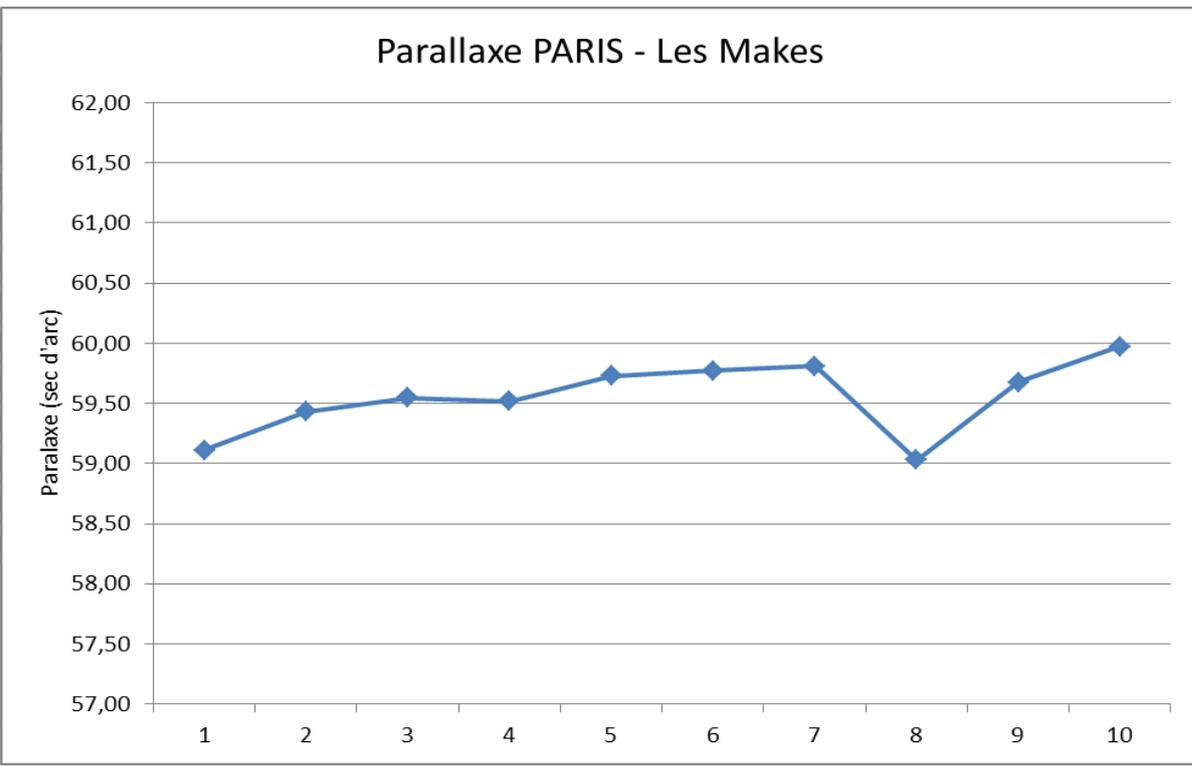


**Pose de 10 secondes toutes les minutes. Le déplacement rapide de l'astéroïde demande une bonne synchronisation**

# Résultats de la mesure de parallaxe

$$\cos p = \sin \delta_1 \sin \delta_2 + \cos \delta_1 \cos \delta_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2)$$

Mesures r
Heure Réunion
02/01/20
02/01/20
02/01/20
02/01/20
02/01/20
02/01/20
02/01/20
02/01/20
02/01/20
02/01/20
02/01/20
02/01/20



	DEC Vauhallan	Parallaxe (sec d'arc)
7,8024667	-6,873880556	59,11196326
7,8022583	-6,874658333	59,43277772
57,801525	-6,876852778	59,54908495
7,8011542	-6,878186111	59,5189072
7,8008125	-6,879083333	59,72829117
7,8003708	-6,880508333	59,77099832
7,7999542	-6,882466667	59,80784019
7,7988792	-6,885125	59,03114868
7,7985667	-6,886172222	59,67369288
7,7980583	-6,887666667	59,97512015
7,7969083	-6,887797222	54,64740062
55998245		
01465252		
61138892		

**Parallaxe de 59,6" d'arc, écart type de 0,3"**

# Résultats combinés de la parallaxe et de la reconstruction d'orbite - TAROT

Date (TU)	Parallaxe (arc sec)	Distance (Mkm)	UA (Mkm)
<b>7/1/2012 5:12:0</b>	<b>62.6156</b>	<b>31.37</b>	<b>148.363</b>
<b>3/2/2012 3:10:0</b>	<b>76.9122</b>	<b>26.4203</b>	<b>147.998</b>
<b>3/2/2012 3:40:0</b>	<b>75.956</b>	<b>26.4733</b>	<b>148.294</b>
<b>3/2/2012 4:10:0</b>	<b>74.0587</b>	<b>26.6659</b>	<b>149.373</b>

# Résultats combinés de la parallaxe et de la reconstruction d'orbite - Paris les Makes

Date (TU)	Parallaxe (arc sec)	Distance (Mkm)	UA (Mkm)
<b>1/2/2012 22:31:20</b>	<b>59.1117</b>	<b>26.7193</b>	<b>149.928</b>
<b>1/2/2012 22:32:21</b>	<b>59.4326</b>	<b>26.6035</b>	<b>149.278</b>
<b>1/2/2012 22:35:24</b>	<b>59.5489</b>	<b>26.6363</b>	<b>149.462</b>
<b>1/2/2012 22:37:23</b>	<b>59.5187</b>	<b>26.7047</b>	<b>149.846</b>
<b>1/2/2012 22:38:23</b>	<b>59.7281</b>	<b>26.6386</b>	<b>149.475</b>
<b>1/2/2012 22:40:24</b>	<b>59.7708</b>	<b>26.6748</b>	<b>149.678</b>
<b>1/2/2012 22:43:23</b>	<b>59.8076</b>	<b>26.7396</b>	<b>150.041</b>
<b>1/2/2012 22:47:24</b>	<b>59.0309</b>	<b>27.2012</b>	<b>152.632</b>
<b>1/2/2012 22:48:24</b>	<b>59.6735</b>	<b>26.9351</b>	<b>151.139</b>
<b>1/2/2012 22:50:24</b>	<b>59.9749</b>	<b>26.8529</b>	<b>150.677</b>

# Conclusion

- Moyenne des résultats TAROT: **148.5 Mkm**, écart type de **0,5 Mkm**.
- Moyenne des résultats de Paris – Les Makes : **1 50.2 Mkm**, écart type de **0,97Mkm** ,
- Ensemble de toutes les mesures, une moyenne de **149.7 Mkm**, avec un sigma de **1,1 Mkm**.
- **Toutes les observations sont à mieux de 1% de la valeur réelle !!**
- On constate donc une excellente précision globale, mais d'un autre côté les résultats TAROT et les résultats «Makes» pris séparément sont assez différents.

# Perspectives & remerciements

- **Jean Paul Teng et son équipe – Observatoire des Makes – La Réunion**
- **Alain Klotz, pour nous avoir laissé accéder aux télescopes TAROT et ses conseils.**
- Les membres du **club Aphélie et club d'Antony.**
- N'hésitez pas à nos contacter pour lancer de nouvelles expériences !!
- -> Mesure de Céphéides
- -> Détection d'exoplanètes
- ...