

Fondement des Conventions IERS

Éphémérides ?

Florent Deleflie et al. – IMCCE / OP - GRGS



Une définition...

« Tables astronomiques pour la description du mouvement des planètes dans le Système solaire, et la réduction d'observations »

N. Capitaine, sept 2018



À l'échelle de notre environnement



(NASA/OSIRIS-REX TEAM AND THE UNIVERSITY OF ARIZONA)

Coup d'œil sur... les astéroïdes...

(5535) Annefrank
Mission : Stardust (2002)
Taille (km) : 6,6 × 5,0 × 3,4



(2667) Steins
Mission : Rosetta (2008)
Taille (km) : 6,67 × 5,81 × 4,47
Densité : 1,8



(25143) Itokawa
Mission : Hayabusa (2005)
Taille (km) : 0,5 × 0,3 × 0,2
Densité : 1,91 ± 0,21



(21) Lutetia
Mission : Rosetta (2010)
Taille (km) : 132 × 101 × 76
Densité : 3,44 ± 0,52



(4179) Toutatis
Mission : Chong'e-2 (2012)
Taille (km) : 4,5 × 2,4 × 1,9
Densité : 2,5



(4) Vesta
Mission : Dawn (2011)
Taille (km) : 572,6 × 557,2 × 446,4
Densité : 3,58 ± 0,15



(1) Cérés
Mission : Dawn (2011)
Taille (km) : 965,2 × 961,2 × 891,2
Densité : 2,13 ± 0,15



(109619) 1999 JV6
Mission : Galileo (1991)
Taille (km) : 18,2 × 10,5 × 8,9
Densité : 2,7



1993 (243) Ida I Dactyl
Mission : Galileo (1991)
Taille (km) : 1,6 × 1,4 × 1,2
Densité : 2,35 ± 0,29



(243) Ida
Mission : Galileo (1991)
Taille (km) : 58,8 × 25,4 × 18,6
Densité : 2,35 ± 0,29

(433) Eros
Mission : NEAR (2000)
Taille (km) : 33 × 13 × 13
Densité : 2,67 ± 0,03



(253) Mathilde
Mission : NEAR (1997)
Taille (km) : 65 × 40 × 44
Densité : 2,35 ± 0,29

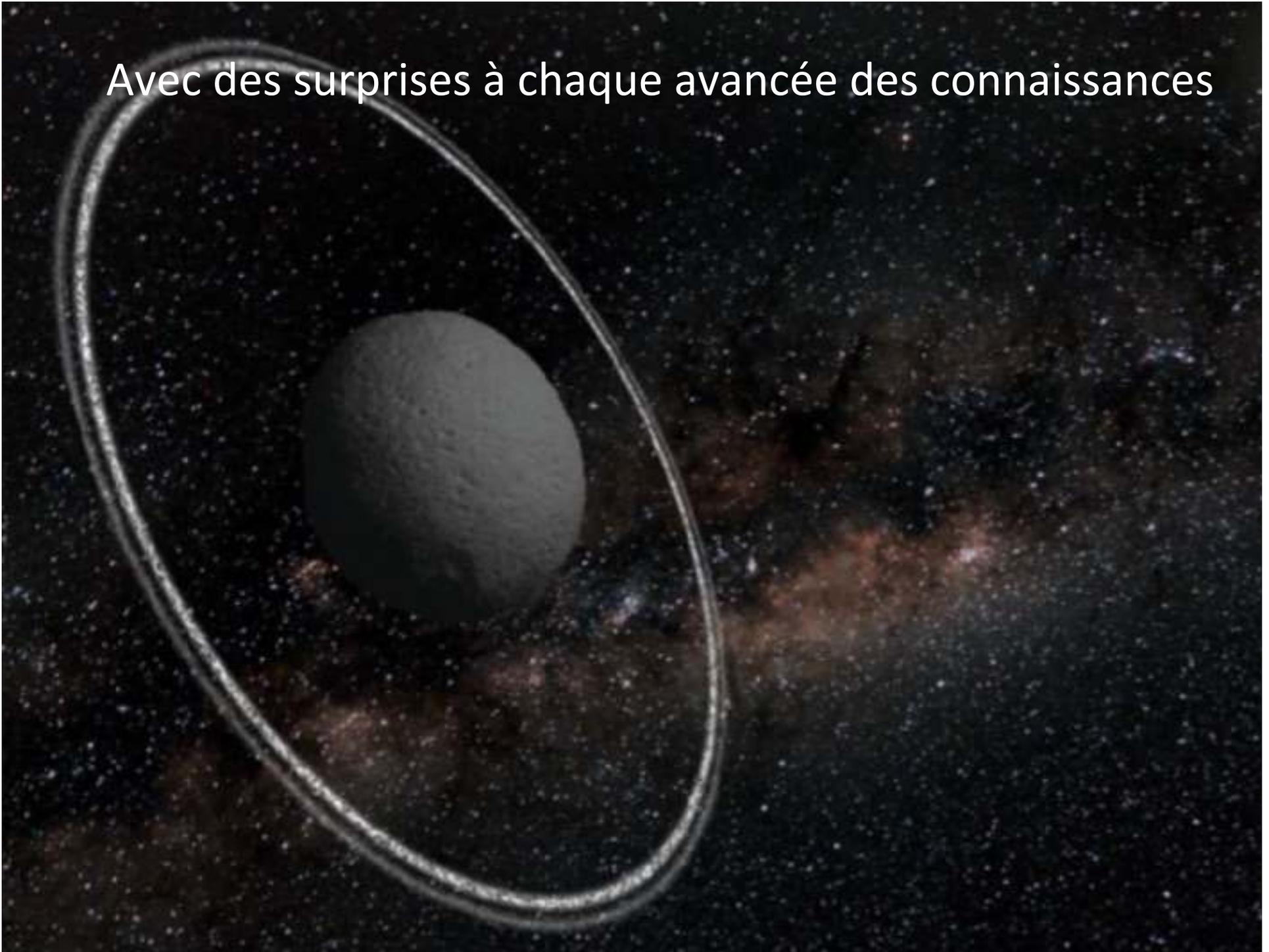


(9969) Braille
Mission : Deep Space 1 (1999)
Taille (km) : 2,1 × 1 × 1
Densité : 3,9



Courtesy éditions Belin, 2017

Avec des surprises à chaque avancée des connaissances



Avec des surprises à chaque avancée des connaissances





Promenade dans le Système solaire

Une surveillance au jour le jour

Running Tallies

Near-Earth Objects Discovered

THIS MONTH: 111
 THIS YEAR: 441
 ALL TIME: 17995

Minor Planets Discovered

THIS MONTH: 361
 THIS YEAR: 1687
 ALL TIME: 755394

Comets Discovered

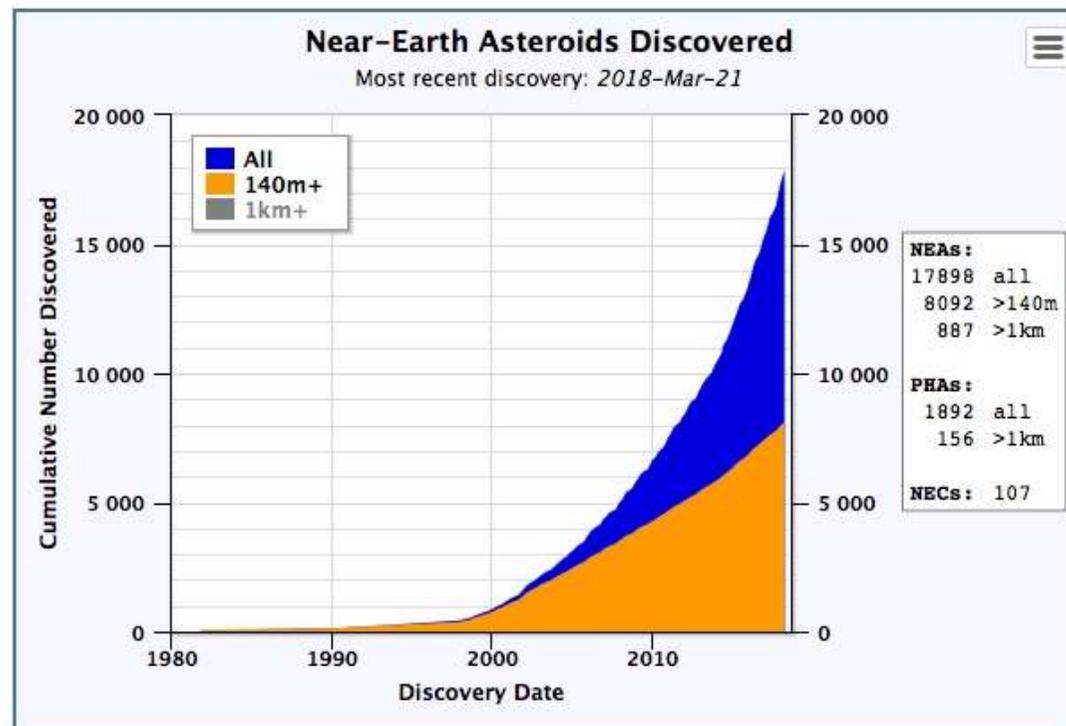
THIS MONTH: 4
 THIS YEAR: 12
 ALL TIME: 4014

Observations

THIS MONTH: 1.2 million
 THIS YEAR: 4.7 million
 ALL TIME: 185.6 million

Au 06/09/18 :

- 1115 NEO découverts en 2018, et 18667 au total
- 793 petits corps découverts en 2018 et 779736 en tout



Close Approaches

Object	Date	Dist (LD)	Size (m)
2018 EW3	Mar. 16 00:32	49.51	34-110
2018 EB4	Mar. 16 05:59	1.45	16-49
	Mar. 16 15:44	44.66	25-78
	Mar. 16 17:16	20.18	22-68
	Mar. 17 06:37	2.36	8-26
	Mar. 17 23:07	7.39	14-43
	Mar. 18 06:31	4.36	9-31
	Mar. 18 06:55	0.38	6-22
	Mar. 18 08:11	12.59	11-34
	Mar. 18 13:49	3.95	4-14
	Mar. 18 22:19	12.58	11-34
	Mar. 19 05:58	0.73	3-11
	Mar. 19 15:02	7.29	5-19
	Mar. 20 04:55	21.17	12-39
	Mar. 21 04:45	4.45	6-21
	Mar. 21 06:31	28.87	31-99
2018 FX3	Mar. 21 07:47	36.59	23-71
2018 ED9	Mar. 21 23:17	1.60	7-23
2018 ED3	Mar. 22 2:17	2.17	6-21

Source : <http://www.minorplanetcenter.net>



Où sont les petits corps

Ceinture de Kuiper
(de 30 à 55 UA)

Nuage d'Oort
(de 20 000 UA à 100 000 UA)

Ceinture principale
(de 2 à 4 UA)

0,38 0,72 1,00 1,52

Planètes telluriques

Interne

Système solaire

5,21

9,54

19,2

30,1 UA

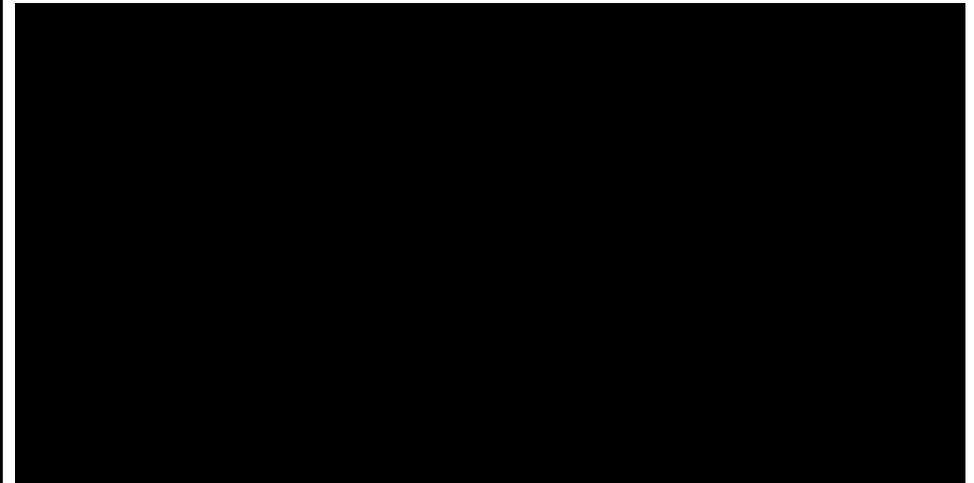
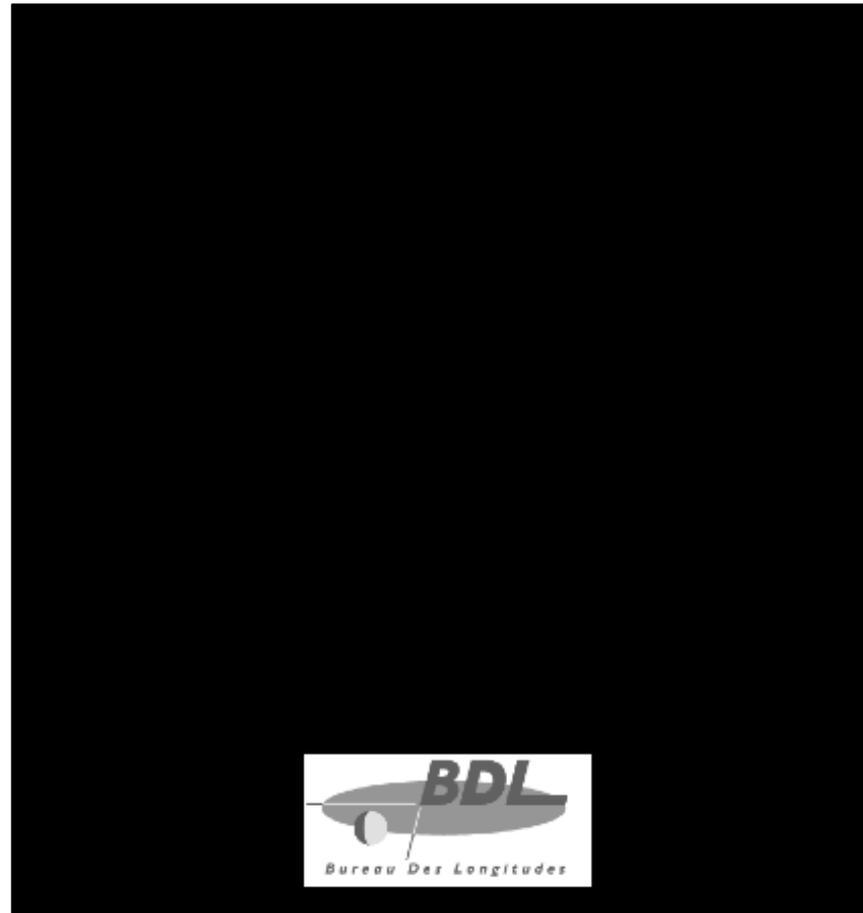
Planètes géantes

Externe

Courtesy éditions Belin, 2017

Introduction aux éphémérides

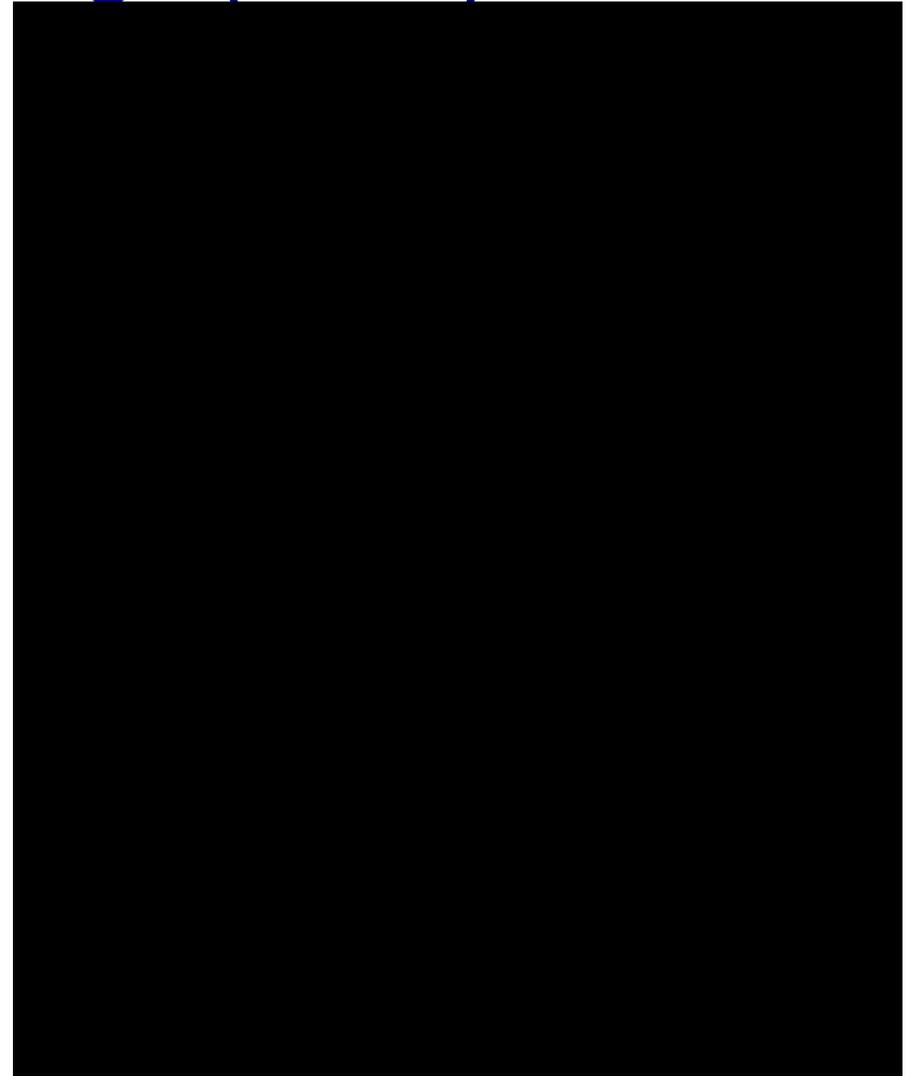
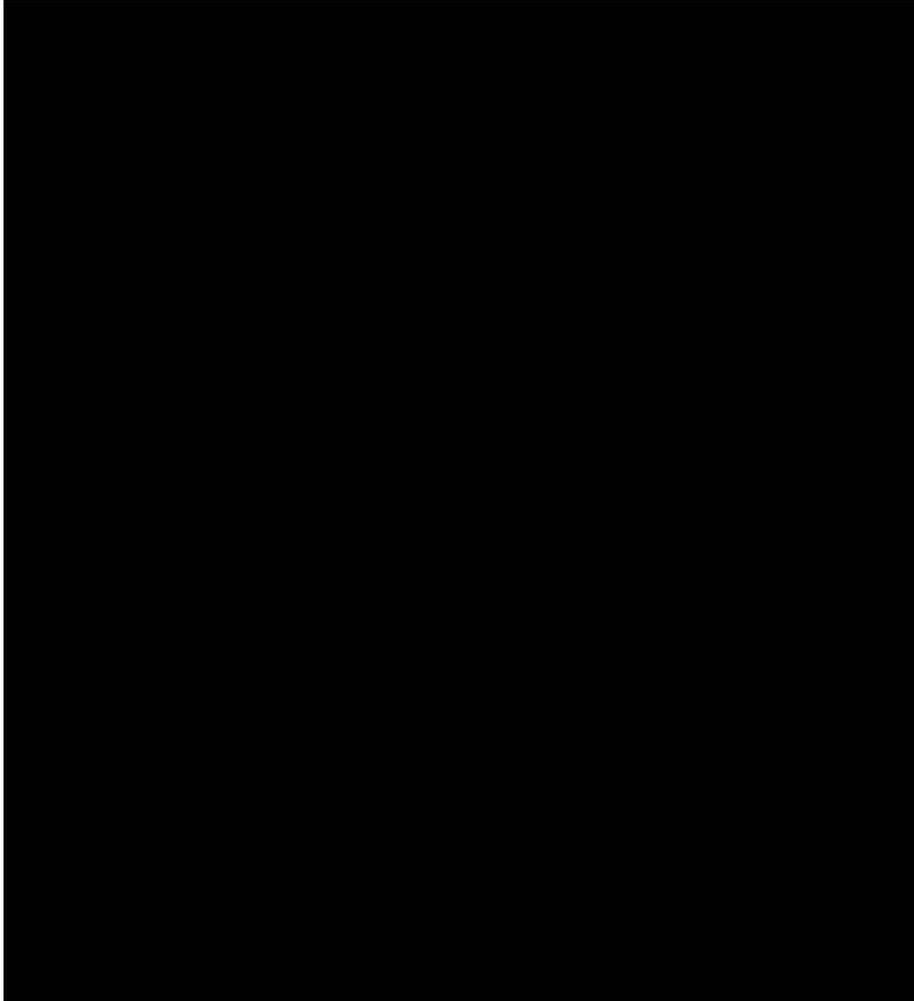
Introduction aux Éphémérides astronomiques (1998)



Courtesy P. Descamps



Plan de l'ouvrage (1998)



Motivations pour une nouvelle édition (2018-2019)

- Nouvelle équipe à l'IMCCE, et forte demande des utilisateurs
- AG de l'UAI depuis 1998 : nouveaux concepts, résolutions, définitions
- Nouveaux champs de recherche :
 - Détermination précise de masses d'astéroïdes, et éphémérides associées
 - Astéroïdes binaires
 - Progrès dans les éphémérides des essaims météoritiques et des comètes
 - Découverte des planètes extrasolaires (1995)
 - Découverte d'une nouvelle famille d'objets : plutinos, ou TNO (à partir de 1995)
 - Découverte de corps plus gros que Pluton : Eris en 2005 (reconnue en 2006 comme planète naine), Haumea en 2003 (reconnue en 2008), Makemake en 2005 (reconnue en 2008), et redéfinition de la notion de planète
- Éphémérides IMCCE :
 - Les intégrations numériques INPOP ont remplacé en 2007 dans la Connaissance des Temps celles issues des théories VSOP82, VSOP87 et VSOP2000.
 - 2013 : les nouvelles théories analytiques VSOP2013 et TOP2013 ont vu le jour.

Courtesy P. Descamps, 2017



Les résolutions de l'UAI

- Avant 1998 : les résolutions issues des AG de 1976, 1979 et 1982 ont fourni les références les plus importantes pour ce qui touche à notre domaine, celui des éphémérides et des systèmes de référence astronomiques.
- 1998 :
 - Nouveau système de référence ICRS en lieu et place du FK5
 - Premier satellite d'astéroïde
- Après 1998 : les AG de 1997, 2000, 2006, 2009 et 2012 ont été déterminantes tant elles ont transformé/bouleversé radicalement, et durablement sans doute, les concepts utilisés en astronomie fondamentale.

Courtesy P. Descamps, 2017 ; N. Capitaine, 2018



Assemblée Générale de l'UAI de 1997

- Le système de référence ICRS et le repère ICRF sont adoptés et entrent en fonction le 1er janvier 1998 (résolution B2 de l'UAI 1997).

Courtesy P. Descamps, 2017 ; N. Capitaine, 2018



Assemblée Générale de l'UAI de 2000

- Nouveau modèle de précession-nutation :
 - IAU2000A
 - Théorie entièrement nouvelle de la nutation basée sur une Terre non-rigide
- Résolutions sur la relativité (B1.3, B1.4, B1.5 et B1.9)
 - Introduction des systèmes de référence BCRS et GCRS
 - relations entre TCB et TCG.
 - Définition du le CIP et le CEO (résolutions B1.7 et B1.8)

Courtesy P. Descamps, 2017 ; N. Capitaine, 2018



Assemblée Générale de l'UAI de 2006

- Adoption d'un nouveau modèle de la précession : théorie P03 de (Capitaine et al. 2003), compatible avec la théorie de la nutation IAU2000A.
- On ne parle plus ni de précession luni-solaire ni de précession planétaire mais de ***précession de l'équateur*** et de ***précession de l'écliptique***.
- Chute de Pluton du cénacle des planètes

Courtesy P. Descamps, 2017 ; N. Capitaine, 2018



Assemblée Générale de l'UAI de 2009

- Nouveau système de constantes astronomiques (UAI 2009 B2) : http://maia.usno.navy.mil/NSFA/IAU2009_consts.html).
- Au 1^{er} janvier 2010 (résolution B3) : la version astrométrique fondamentale du Système de Référence Céleste International (ICRS) sera la deuxième version (ICRF2) du Repère Céleste International de Référence.

Courtesy P. Descamps, 2017 ; N. Capitaine, 2018



Assemblée Générale de 2012

- Nouvelle définition de l'unité astronomique :
1` 9 597 870 700 m exactement, en
(résolution B2 de l'UAI 2009).
- Ajoutons, ceci reste encore très souvent ignoré, que le seul symbole autorisé définissant l'unité astronomique doit désormais s'écrire au.

Courtesy P. Descamps, 2017 ; N. Capitaine, 2018



Vues sur l'historique des Éphémérides

Tribune pour l'analytique

Introduction : intérêts de l'analytique en 2016

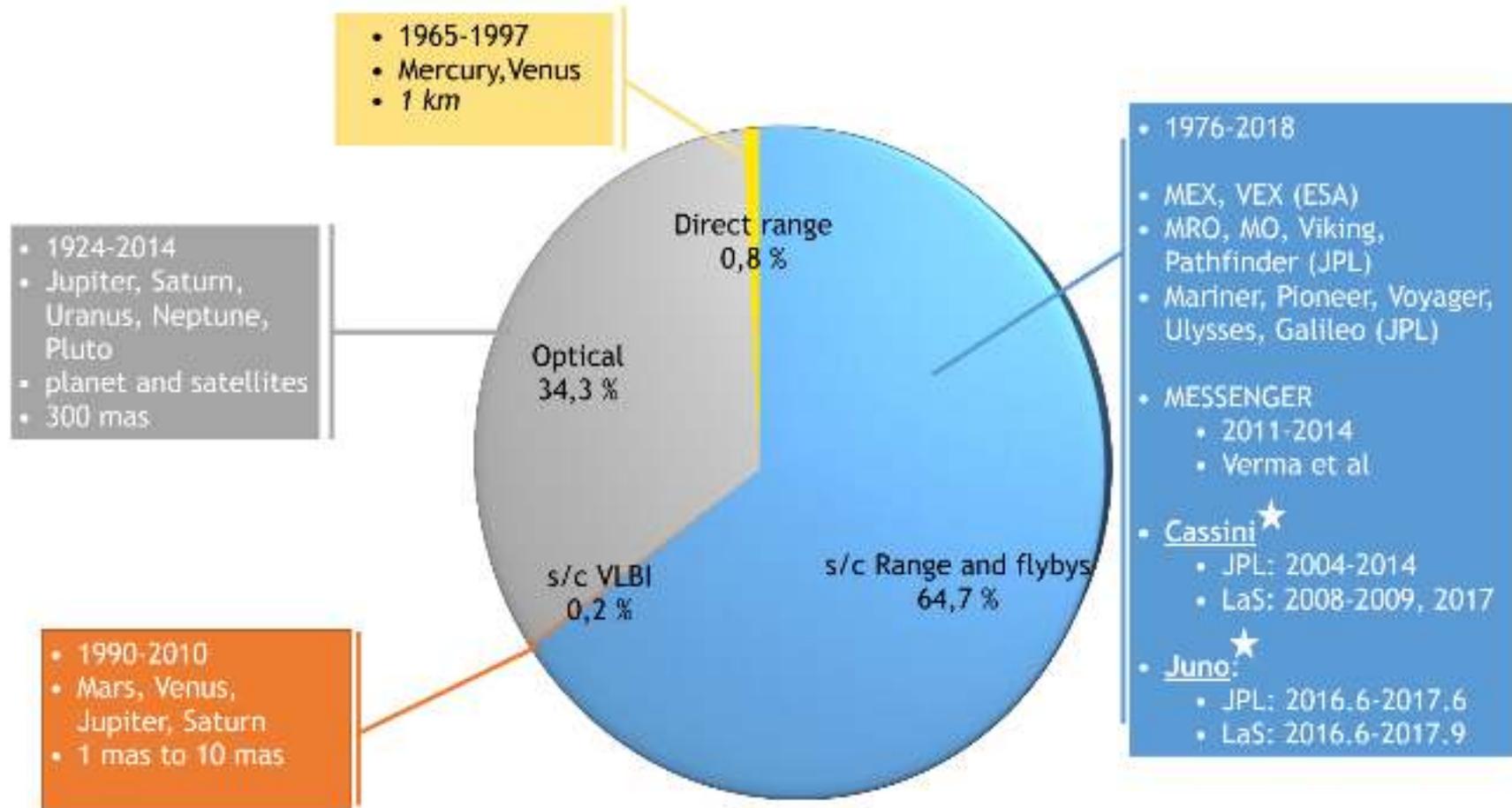


- ▶ Même si les théories analytiques ne peuvent concurrencer, en terme de précision, les intégrations numériques pour le calcul d'éphémérides dans le cas de programmes astronautiques, elles restent cependant suffisamment précises pour répondre à la plupart des besoins des astronomes;
- ▶ Leur précision décroît lentement avec le temps et elles peuvent rester précises sur des intervalles de temps de plusieurs milliers d'années;
- ▶ Elles permettent une analyse très fine des différentes perturbations;
- ▶ Leur forme analytique est très utile pour étudier des problèmes tels que la rotation de la Terre;
- ▶ On peut obtenir des solutions compactes de bonne précision.

École d'été du GRGS 2016, Aussois



Intégration numérique et INPOP



Coutesy A. Fienga, J. Laskar, IAU 2018

Intégration numérique et INPOP



Constant improvement of planetary ephemerides

www.imcce.fr/inpop

(Fianga et al. 2008)	(Fianga et al. 2010)	(Fianga et al. 2012)	(Fianga et al. 2013)	(Fianga et al. 2014)	(Fianga et al. 2015)	(Viswanathan et al. 2017a)	(Viswanathan et al. 2017b)
INPOP06	INPOP08	INPOP10a	INPOP10e	INPOP13c	INPOP15a	INPOP17a	INPOP18
2003-2007	2003-2007	2010-2011	2012	2014	2015-2016	2017	2018

- GAIA 1st release
 - 5 GMA, 3p, AU, J2 \odot
 - very close DE405
- 4-D planetary ephemerides : TT-TDB
 - New method for fit (a priori sigma)
 - 30 GMA, 3p, AU, EMRAT, J2 \odot
- 145 GMA, GMR, GM \odot , J2 \odot , EMRAT⁺
 - Moon parameters
- Direct fit with constraints
 - Fit of the mass of the sun
 - ICRF tie with pulsar timing
- New dynamical modeling for asteroids : 289
 - asteroids, no mean density, ring
- TDB and TCB versions
- GAIA official release
- PPN parameters estimations
- MESSENGER data analysis
- 2004-2014 Cassini JPL data
 - P9
 - PPN with Monte-Carlo
- Earth-Moon improvement
 - New modele of the Moon interior
 - Test of the Equivalence Principale
- JUNO
 - Cassini independant analysis
 - 347 GMA

Coutesy A. Fianga, J. Laskar, IAU 2018

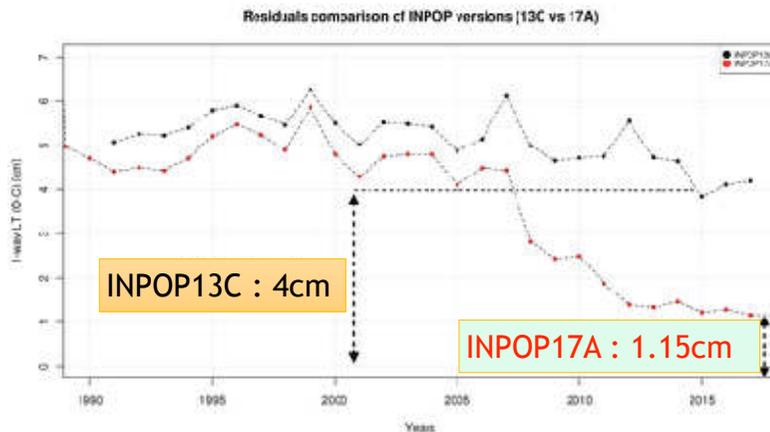


Intégration numérique et INPOP

Natural satellites

The Moon (INPOP)

- Orbital coupling
- Rotational coupling (Libration Euler angles)
- Surface deformation, figure-figure interactions
- Solid tides, atmospheric and ocean loadings
- Moon = mantle + fluid core in interaction
- GRAIL + 40 years of LLR + new IR LLR



(Viswanathan et al. 2018)

Other satellites (Miriade, Multisat)

<https://www.imcce.fr/services/ephemerides/>

planet	inner	main	irregular	total
Mars	0	2	0	2
Jupiter	4	4	61	69
Saturn	16	8	38	62
Uranus	13	5	9	27
Neptun	7	1	6	14
Pluto	0	1	4	5
grand total				179

- Inner satellites: ephemerides from JPL elements
- Main satellites: ephemerides from Lainey NOE
- Irregular satellites: ephemerides from Emelyanov
- RA & DEC; X, Y; s & p; $\Delta\alpha$ & $\Delta\delta$
- ephemerides for observers, configurations
- on line calculation of O-Cs available on Multisat server

Coutesy A. Fienga, J. Laskar, IAU 2018

Tout cela compte-t-il depuis Oléron ???

(film Stellarium)



L'analyse d'une APOD



L'analyse d'une APOD





Des sites de rencontre ?

Prise de conscience du risque géocroiseur

- La connaissance de notre environnement doit encore s'améliorer
 - La nécessité de connaître, et de faire savoir
 - Pour agir en conscience et mettre en place les procédures
- La prise de conscience du risque géocroiseur est encore récente
 - 90's : Galileo (Jupiter) survole **Gaspra** puis **Ida**
 - 1992-1998 : rapports NASA sur les risques d'impacts d'astéroïdes
 - 2001 : Action Team 1` au sein du COPUOS à l'initiative de la Grande Bretagne
 - 22 décembre 2005 : loi du Congrès exigeant que la NASA catalogue 90% des objets > 1` 0m avant 2020
 - 2013 : mise en place du **SMPAG** et **IAWN**
 - « Opportunité » Apophis de mettre en place les procédures
- Quel positionnement par rapport aux initiatives internationales en cours ??



Le futur de l'exploration spatiale des petits corps

- Objectifs

- Origine et formation du Système solaire et des planètes
- Formation et évolution des astéroïdes
- Influence sur la formation de la Terre et l'apparition de la vie
- Étude des milieux granulaires
- Protection de la Terre
- (Exploitation des ressources)
- (étape de l'exploration habitée)

- Une exploration en grande progression

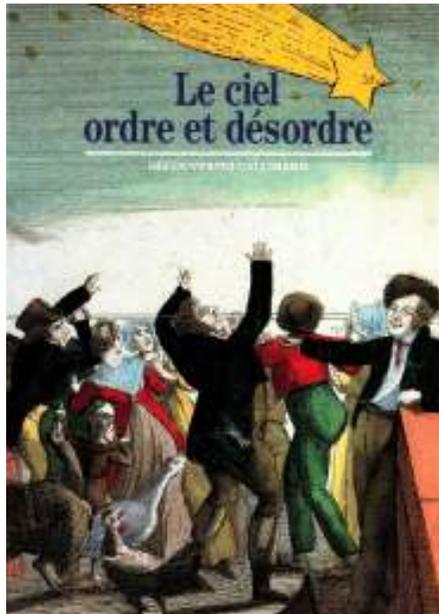
- Étude des météorites
- Observations depuis la Terre
- Observation par télescopes spatiaux

	Passé	Futur
Survols	21	7
Orbiteurs	5	9
Impacteurs	1	2
Atterrisseurs	3	6
Retour d'échantillons	1	6

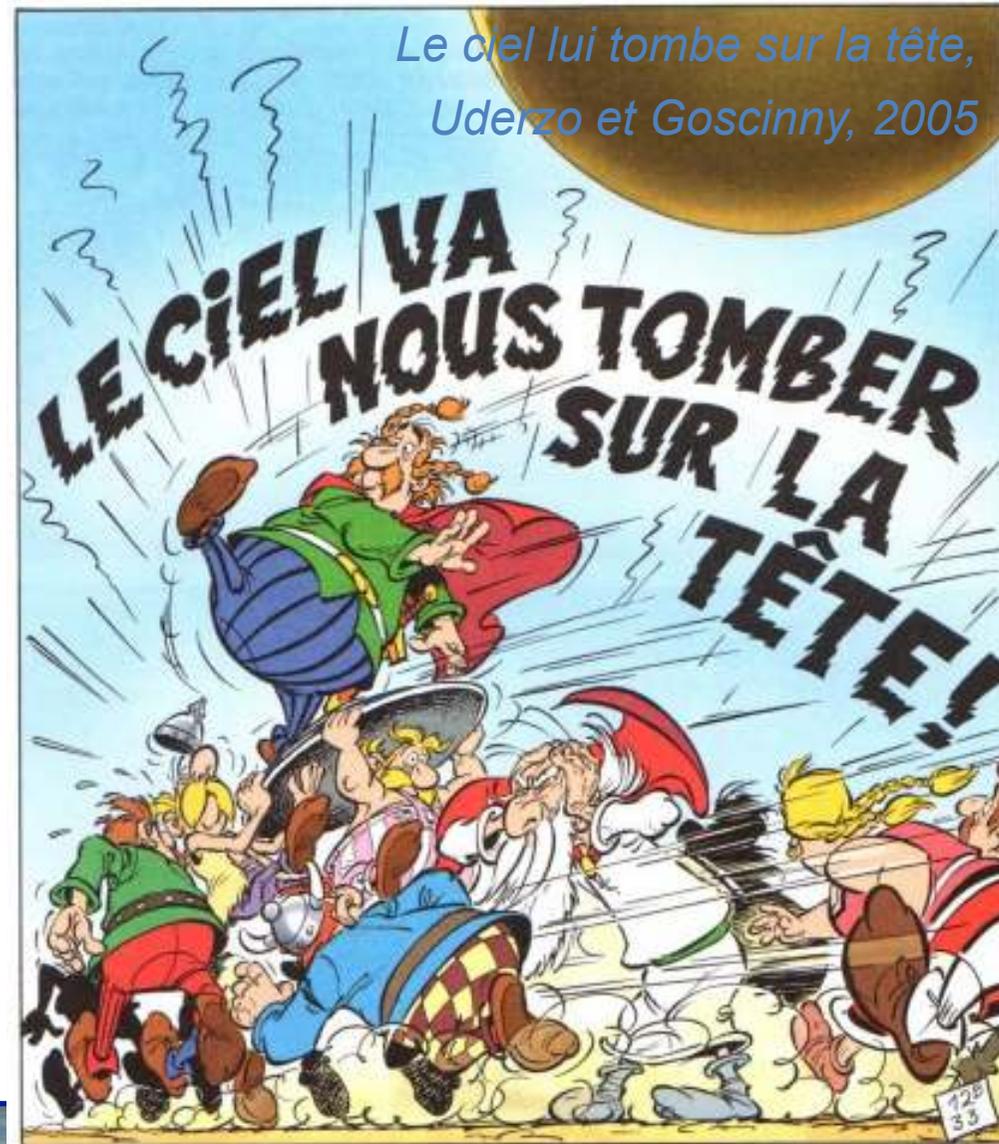
Vues d'artiste : MASCOT



Que faire en cas de collision annoncée ?



*Le ciel lui tombe sur la tête,
Uderzo et Goscinny, 2005*



Le temps joue « pour » ou « contre » nous ??

- La force des lois de la dynamique, par des modifications de vitesse
- Méthodes d'évitement

Qq. années	Décennie	Plusieurs décennies
<u>fragmentation</u>	<u>Impulsion</u>	<u>Poussée lente</u>
<u>Nucléaire subsurface</u>	<u>Nucléaire</u>	<u>Équipement de surface</u>
Conventionnel subsurface	→ <i>nucléaire en altitude</i>	→ <i>éjecteur de masse</i>
	→ <i>nucléaire en surface</i>	→ <i>remorqueur</i>
	<u>Conventionnel</u>	→ <i>Modification d'albédo</i>
	→ <i>explosifs</i>	<u>Positionnement à proximité</u>
	→ <i>Impacteur cinétique</i>	→ <i>Effet Yarkovsky</i>
	→ <i>Projection d'astéroïde</i>	→ <i>Miroir solaire</i>
		→ <i>Tracteur gravitationnel</i>

Réflexions générales sur les méthodes d'évitement

- Pas de méthode applicable en toute circonstance
 - Temps disponible
 - Composition, rotation et masse de l'objet impactant
- Prise de décision
 - Après évaluation dégâts collatéraux
 - Avec une connaissance au moins approximative de la composition
- Coordination et consensus international
 - Utilisation du nucléaire ?? *Pas possible en l'état actuel des conventions internationales*
 - Sous l'égide d'une instance internationale
- Une thématique prolifique



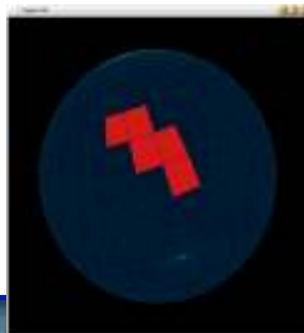
Mettons tout ça en musique

Approche VO

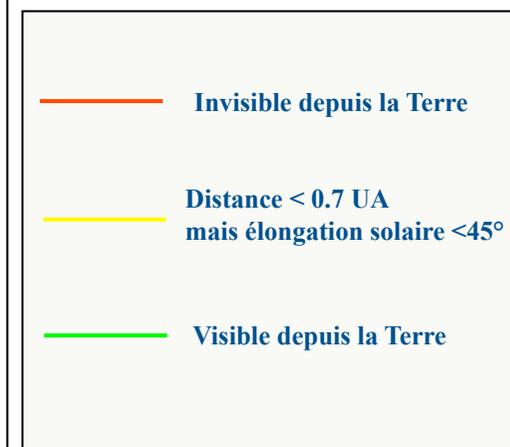
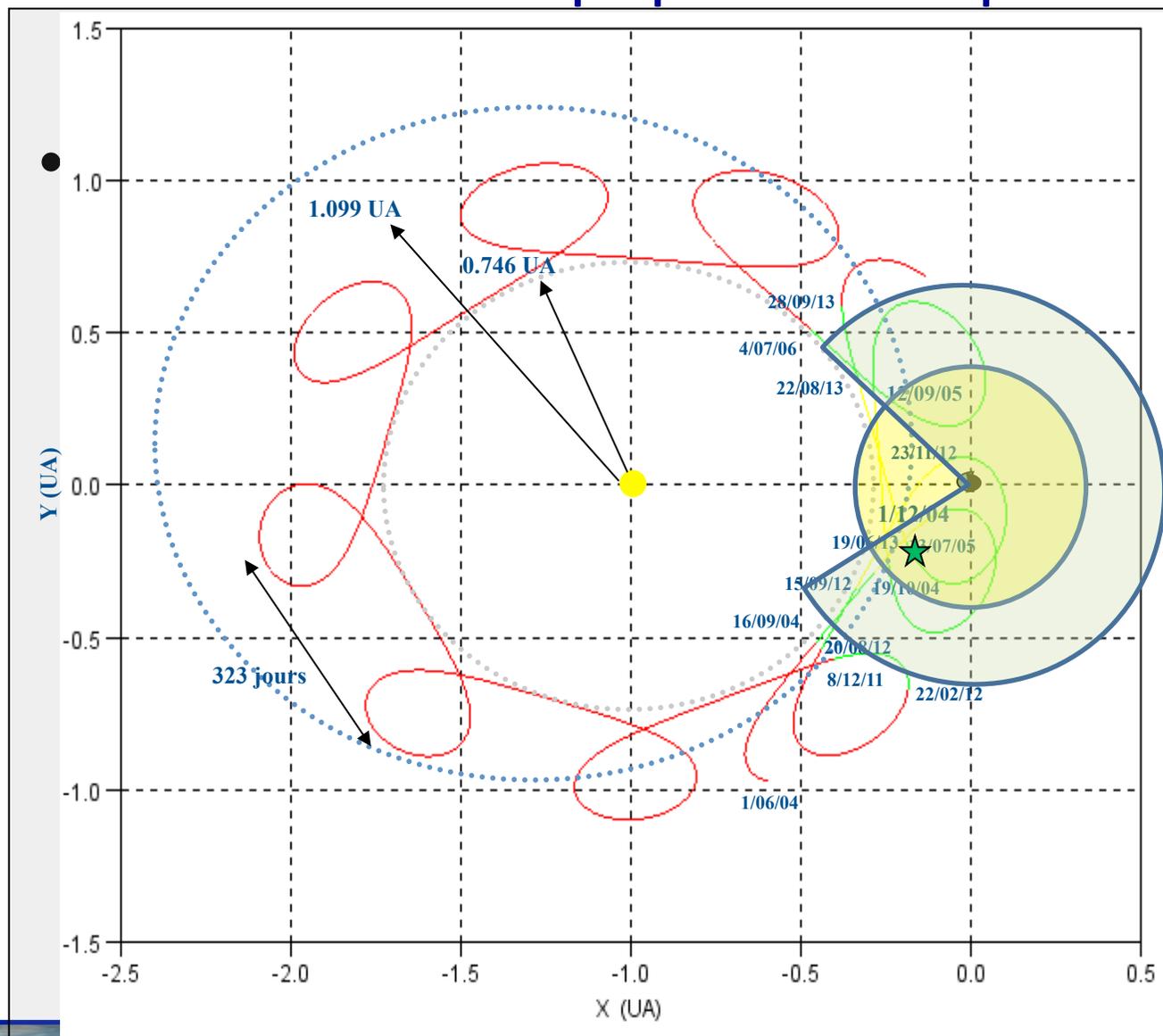
The screenshot displays the Aladin v7.5 software interface. On the left, a 'Server selector' window is open, showing search parameters for 'SkyBoT@Rosetta' with a target at RA 12 15 19.07 and DEC +00 24 24.7. The main window shows a 3D model of the asteroid Ceres. A 'Measurements frame' window is open at the bottom, displaying a table of search results for 'Solar system object'.

RA	Name	RA	DEC	Class	Mv
21	Lutetia	12 15 21.9580	+00 23 50.854	MB I	4.4
007	Hesperia	12 15 3.8295	+00 43 31.967	Satellite	13.7
003	Itezia	12 14 47.9628	+00 43 33.870	Satellite	9.7
001	Musa	12 14 47.2383	+00 43 32.443	Satellite	12.4
002	Encelade	12 14 46.8484	+00 43 33.968	Satellite	11.2
004	Iduna	12 14 44.7710	+00 43 22.418	Satellite	10.8
-	Saturn	12 14 45.1635	+00 43 28.728	Planet	8.3
008	Isotia	12 14 31.6730	+00 42 11.634	Satellite	10.8
005	Rhea	12 14 38.3173	+00 43 20.258	Satellite	9.2
006	Titan	12 14 34.4423	+00 43 34.362	Satellite	7.8

- Spheres celeste divisée en cellules élémentaires ($^{\circ} 0' \times ^{\circ} 0'$)
- Éphémérides précalculées



Prévoir les collisions entre planètes et petits corps : observabilité d'Apophis sur la période 2004 - 2013



Il faudra patienter
jusqu'en 2020 pour le revoir

« Jolies » trajectoires

Orbit of toutatis over 10 yr, from 2020-01-01

Frame: Earth centered, pointed to the Sun

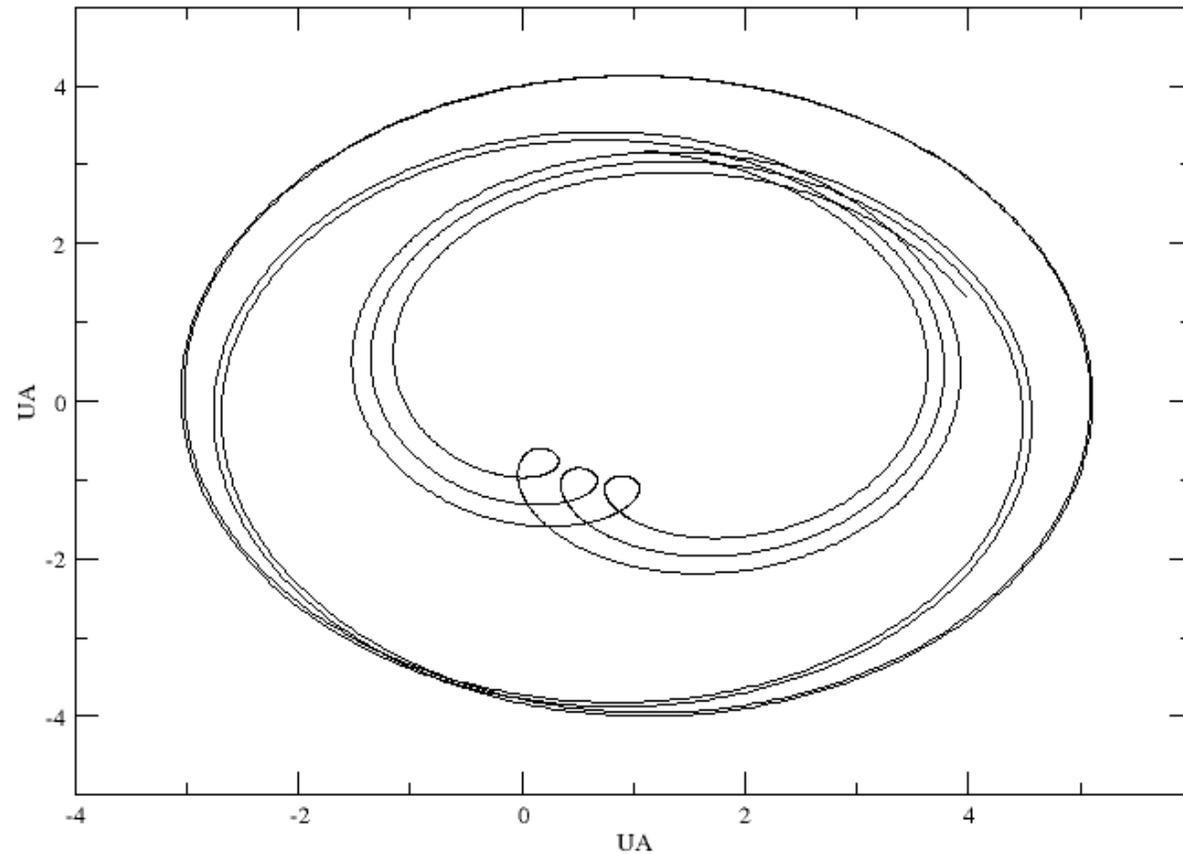


Figure generated by deleflie, on Fri May 16 16:21:48 with script asteroide_depuis_terre.sh (IMCCE)

Identification de SSO dans tout champ

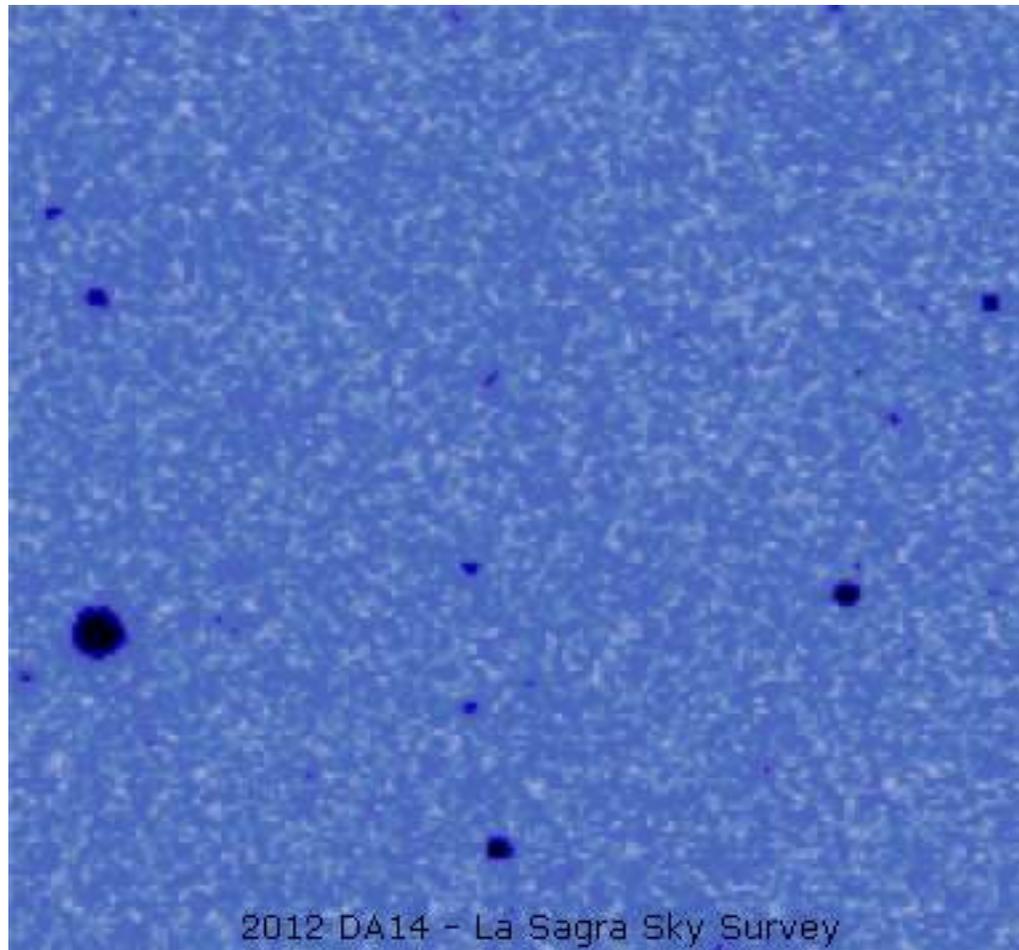
The screenshot shows the Aladin v5.0 software interface. The main window displays a star field with three stars highlighted by red lines and green boxes. The interface includes a menu bar (File, Edit, Image, Catalog, Overlay, Tool, Help), a toolbar with various icons, and a data table at the bottom. The data table lists the following information:

NUM	NAME	RA	DEC	Class	Mv	ErrPos	d	RAcosDec	HDIC
12797	1005.16.4	03 22 42.2033	+13 00 58.647	MB I	18.2	-1.060	134.356	-8.5140	-7.900
40441	1005.16.4	03 22 22.0361	+12 53 8.109	MB II	18.1	-0.206	222.958	-11.0145	-17.471
-	2001.0320	03 22 11.0907	+12 51 58.867	MB	20.3	5.315	415.682	-12.4742	-1.222

Analyse d'image : identification d'objets par techniques VO (film)



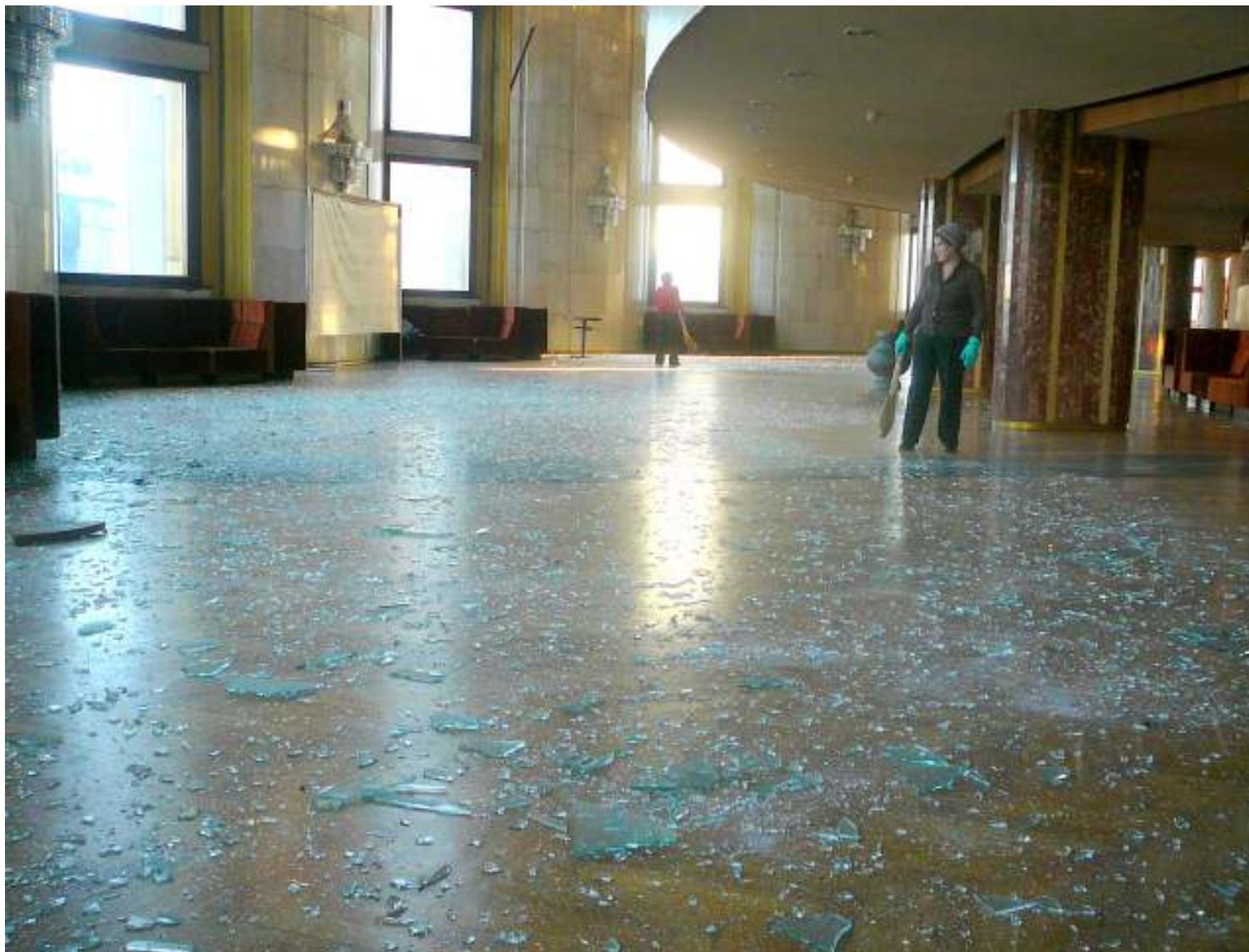
2012 DA14 : le film avec techniques VO (dont mise en évidence des effets de parallaxe)



Et du côté de l'Oural...



Et du côté de l'Oural...



Encore Stellarium ?? (film)



Épilogue

Pour terminer sur une note philosophique...

- **Travail d'équipe :**
 - Métiers interdépendants, et complémentaires
 - La redondance des calculs entre groupes est indispensable
 - Erreurs de calculs, détection des systématismes
 - Collaboration internationale
- Être confiant, mais pas trop, dans les **compatibilités** de l'ensemble des modèles

