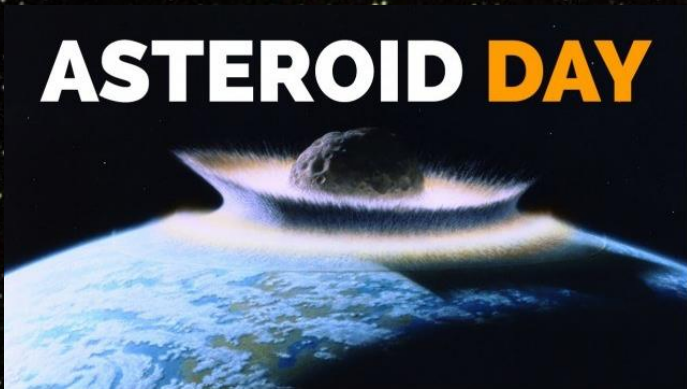




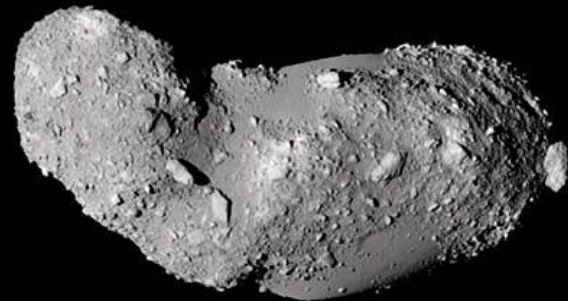
Dr. Patrick Michel
Directeur de Recherche au CNRS



ASTEROID DAY



**La Terre sous la menace
de pierres célestes:
prédire et prévenir**



Centre d'Alembert, 13 Décembre 2017.

Scénario de formation planétaire

Planètes géantes en 5 Millions d'années loin du Soleil (> la ligne des glaces)

Planètes terrestres en 30-50 Millions d'années plus près du Soleil



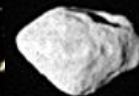
Notre Système Solaire actuel



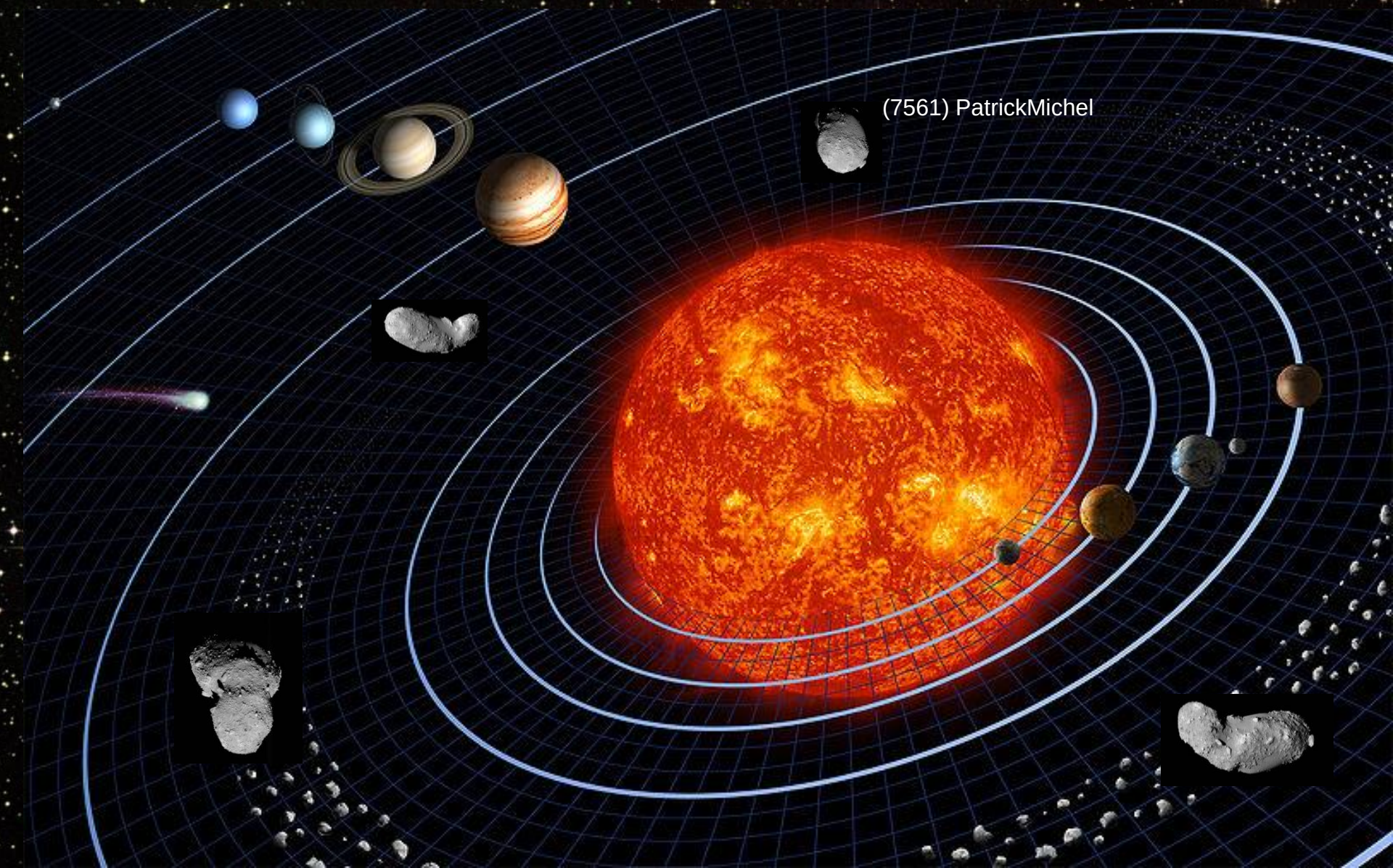
Petites planètes solides près du Soleil, planètes géantes au-delà de la ligne des neiges
et des tas de petits corps

DONT

LES ASTEROÏDES et les Comètes



La Ceinture des astéroïdes



Premier astéroïde interstellaire: A/2017 U1

Jupiter

Earth

Venus

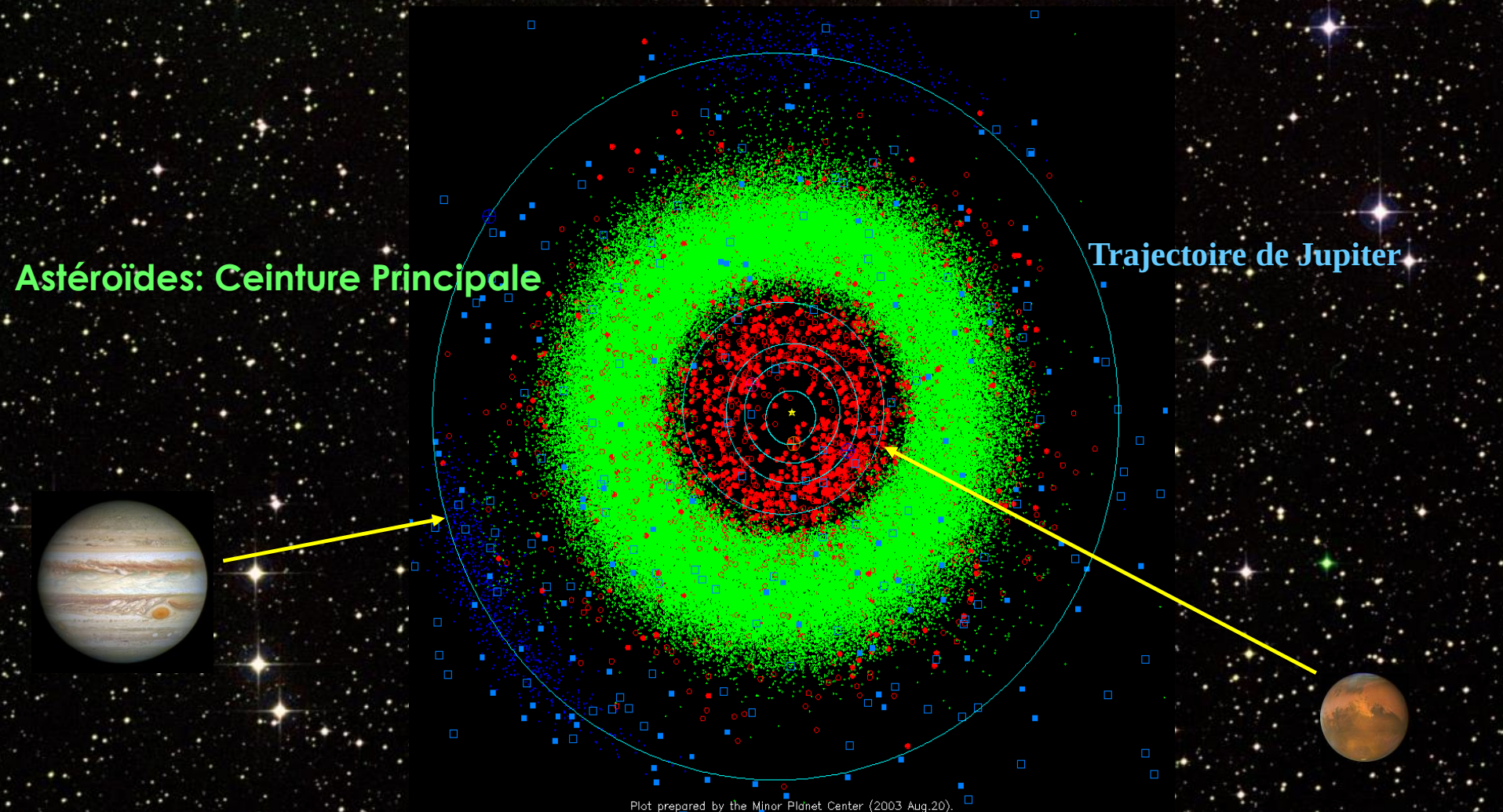
Mercury

Sun

Mars

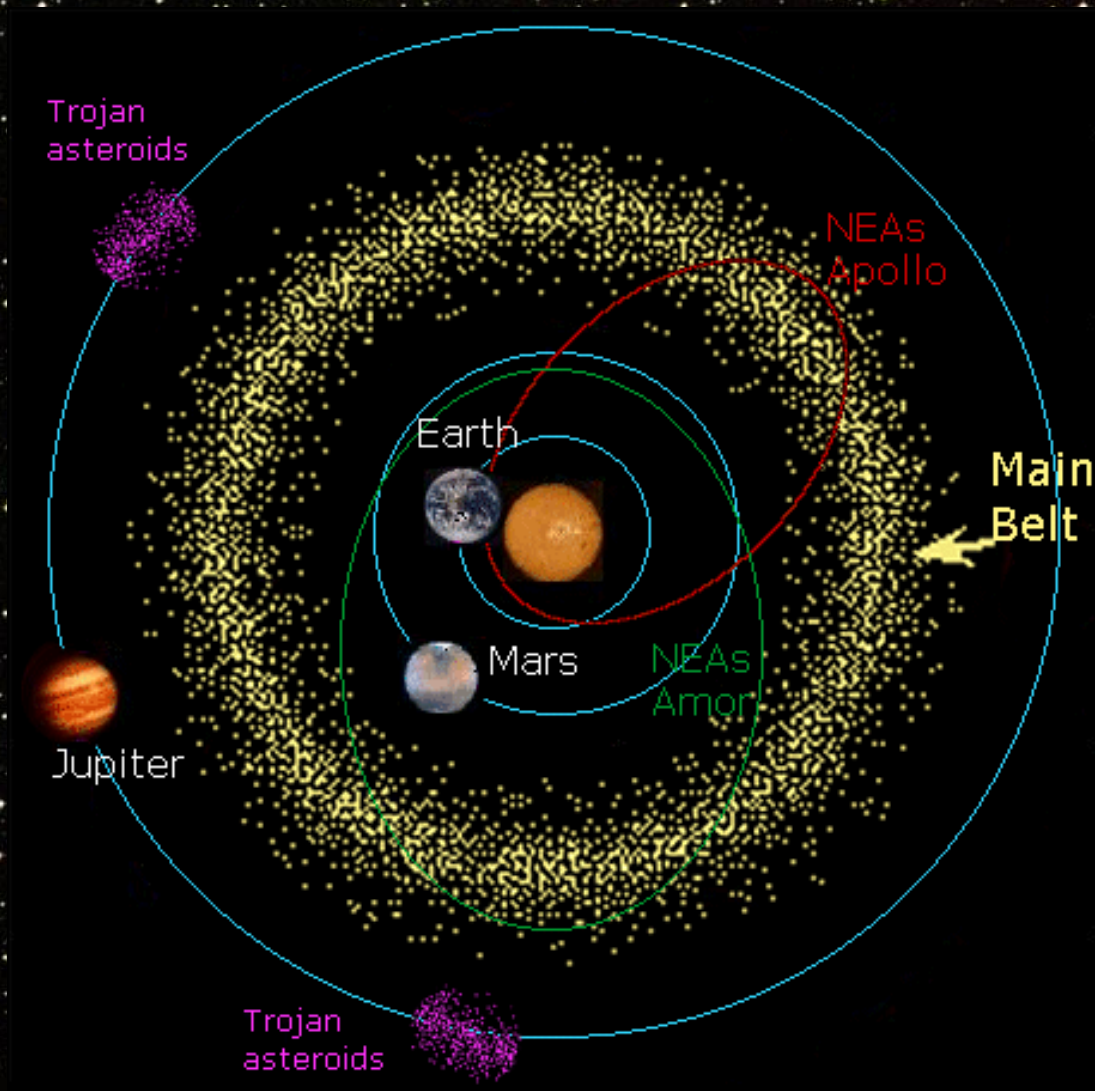


La ceinture des astéroïdes: anneau « étroit », mais riche en compositions



1 millions de corps de diamètre supérieur à 1km,

La population des astéroïdes: ceinture principale et croiseurs des planètes

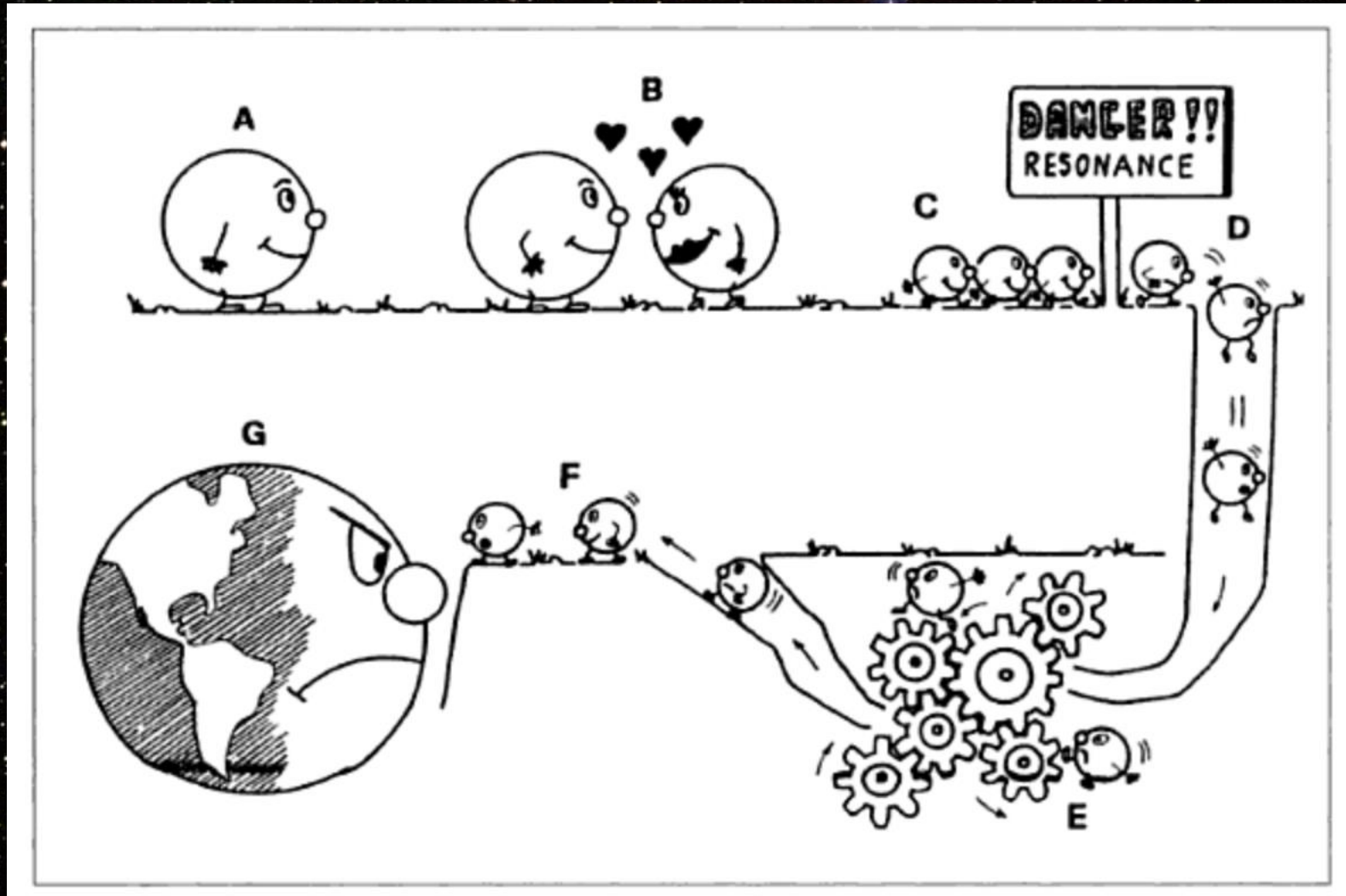


La majorité vient de
la Ceinture
des astéroïdes

6-8% viennent des
comètes de
la famille de Jupiter

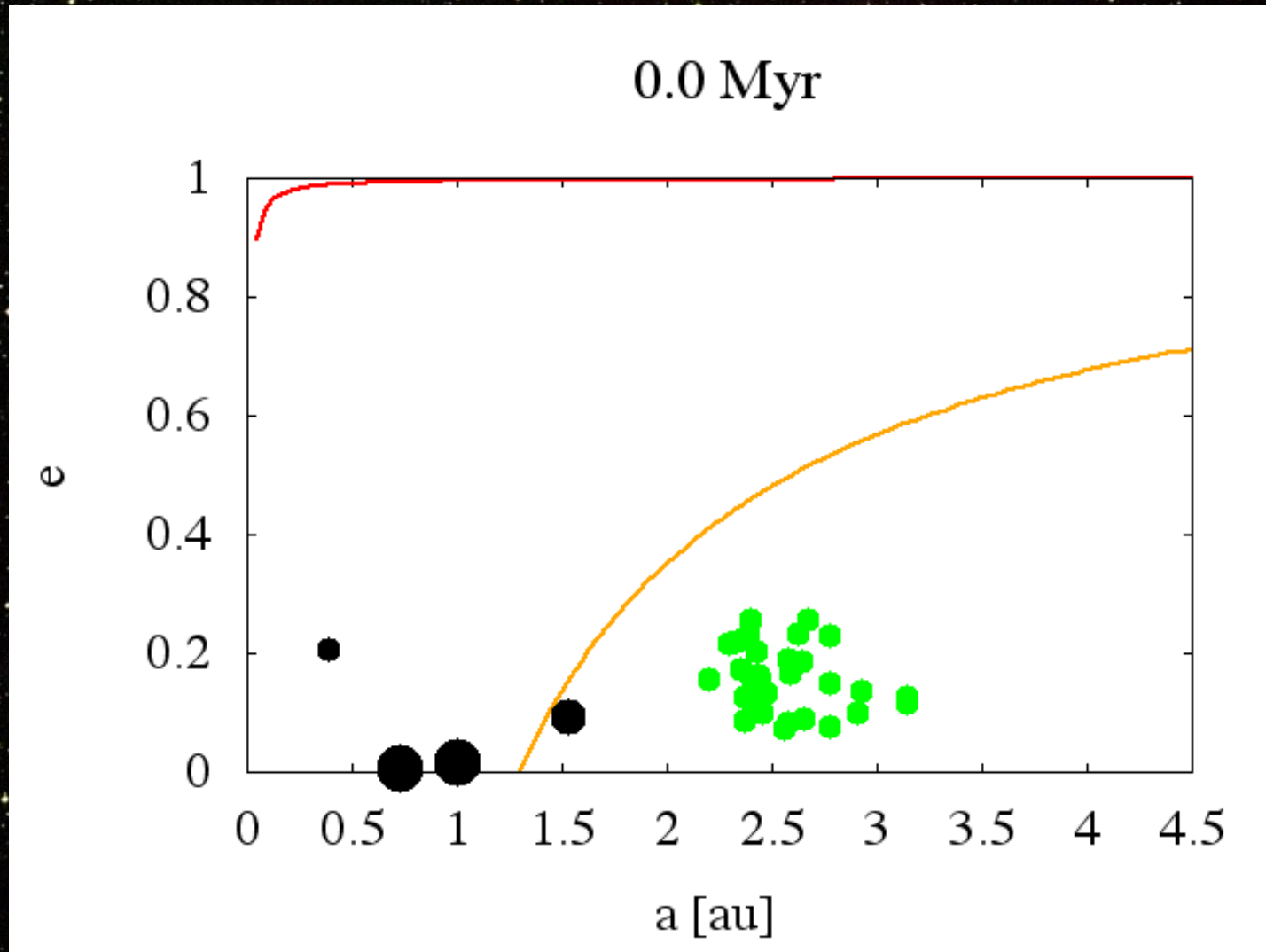
1000 corps de diamètre
supérieur à 1km, **90% connus**

D'où viennent les géocroiseurs?



Dessin: V. Zappalà

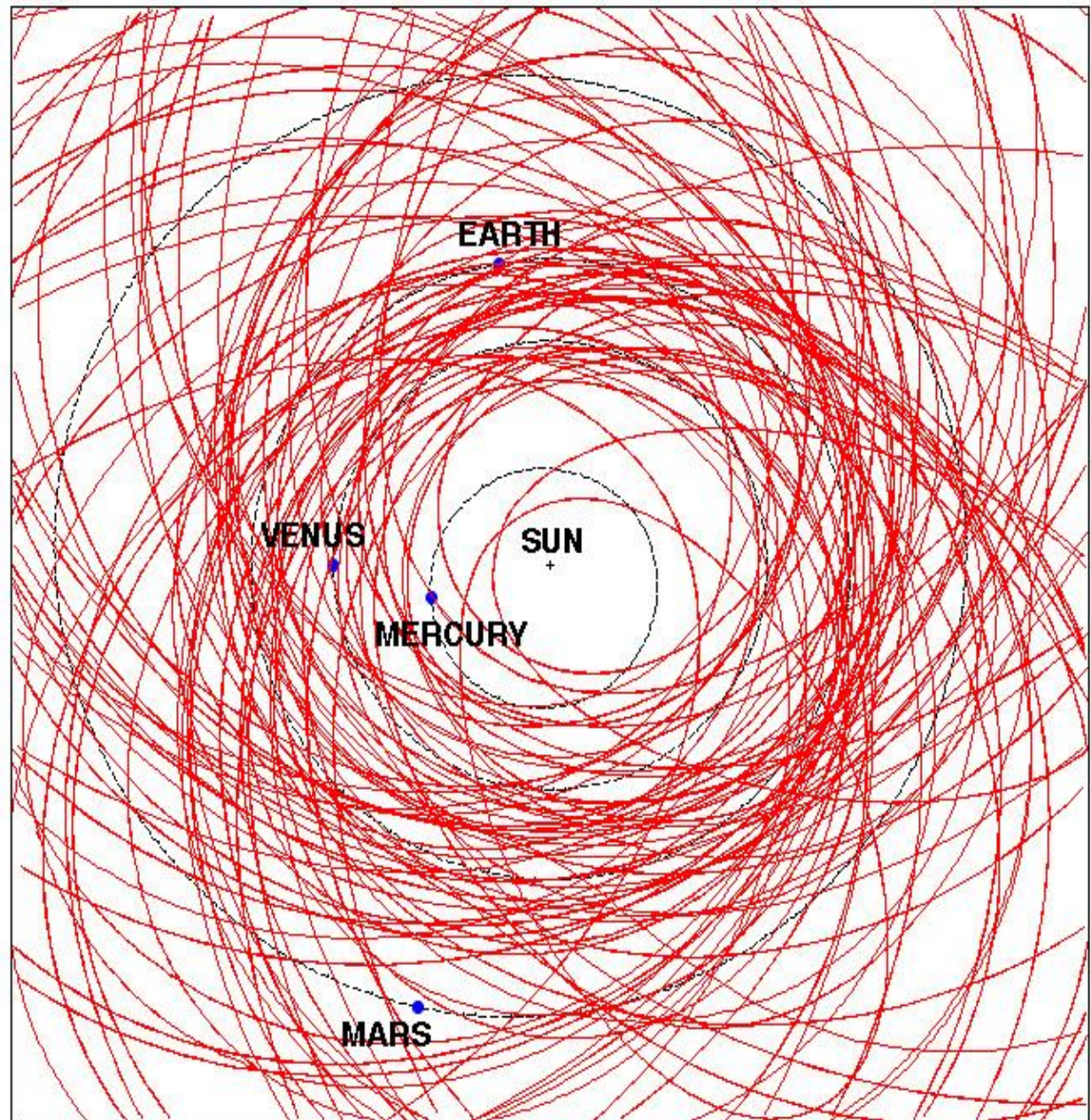
Transport de la Ceinture vers la Terre

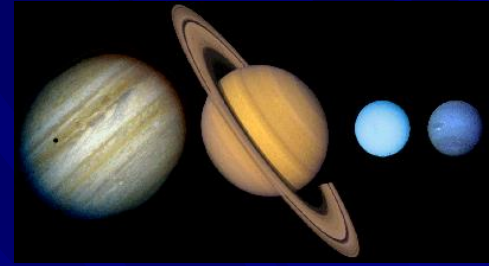
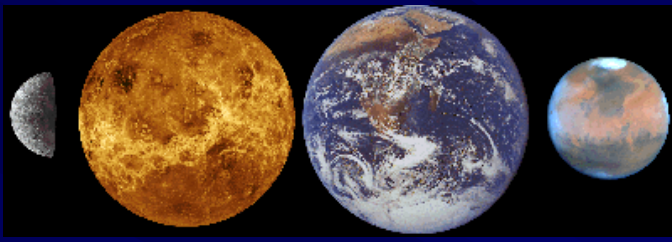


Trajectoires des Géocroiseurs

Toutes différentes!

Impossibles à
prédire
par le calcul
au-delà de
20-50 ans





Astéroïdes: l'ADN du Système Solaire

Les briques restantes de la formation planétaire

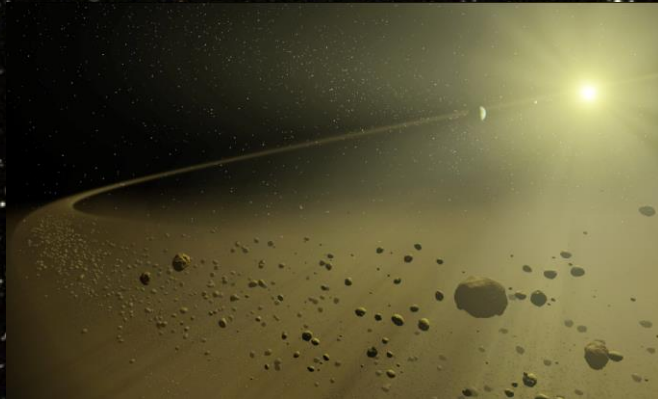
Sources uniques d'informations :

- Composition initiale et évolution du Système Solaire
 - Formation des planètes
- Apport des éléments nécessaires à la Vie sur Terre
 - **Collisions / risques d'impact**

Astéroïde Itokawa,
Hayabusa (Novembre 2005)

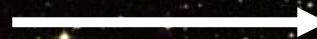


Rôle des collisions dans l'histoire du Système Solaire



Formation des planétésimaux

Accrétion
collisionnelle

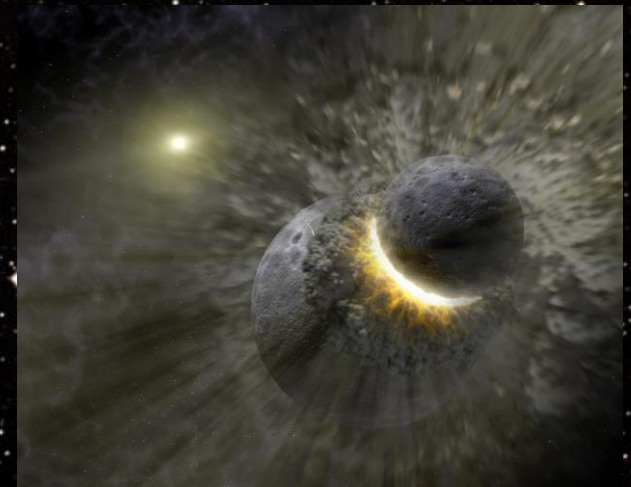
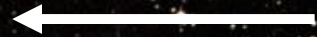


Formation planétaire



Destruction d'astéroïdes

Destruction
collisionnelle

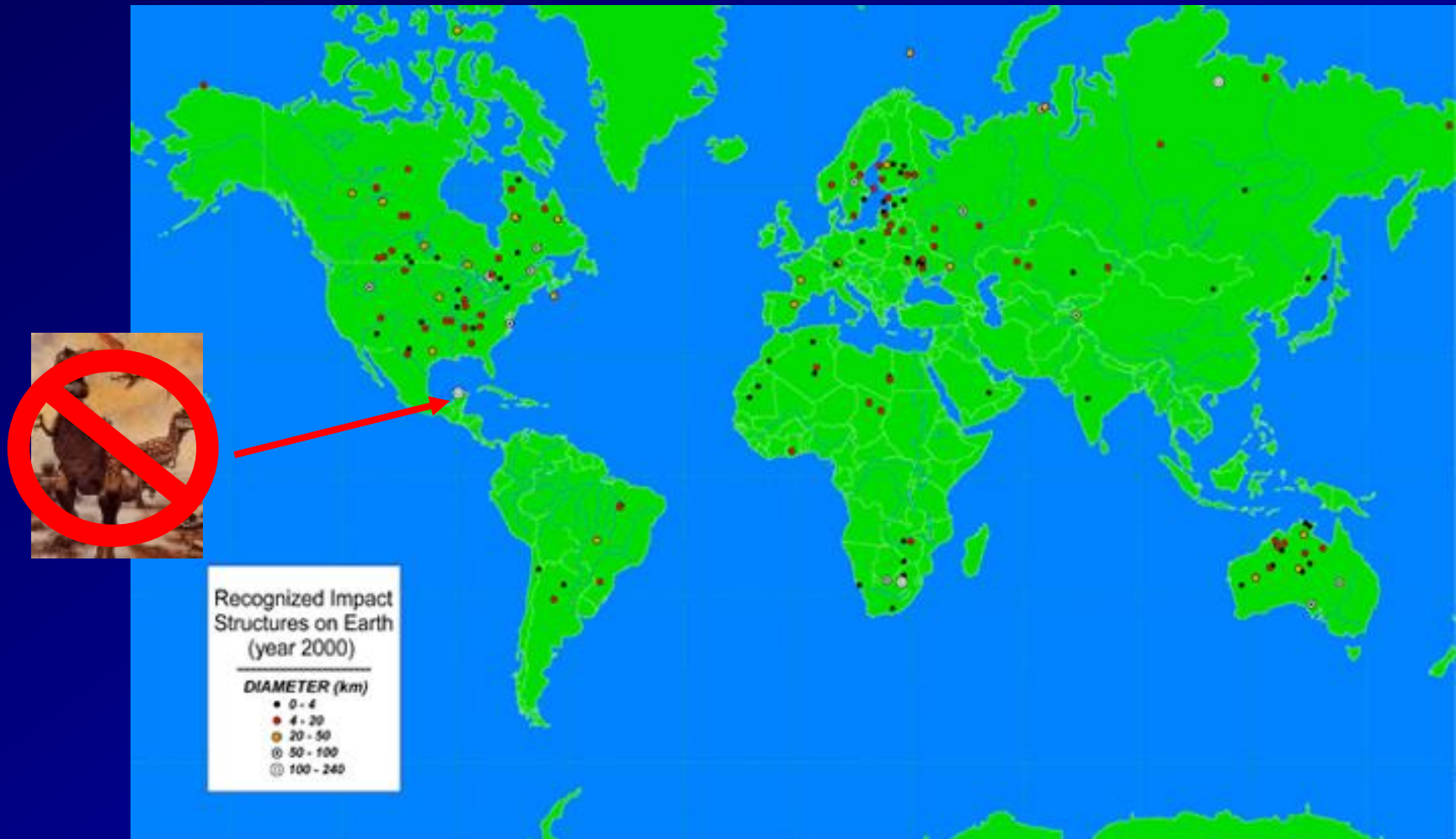


Impacts géants

La Lune: notre meilleur témoin des impacts durant les 4 derniers milliards d'années



Nous en avons quelques traces!



2/3 d'eau recouvrent la Terre ainsi qu'une grande fraction de désert
Probabilité qu'un impact d'un tout petit objet (< 50 m) cause des dégâts humain reste très faible

Meteor Crater (Arizona)

133 Bombes Hiroshima!



Explosion au-dessus de la Tunguska en 1908

2000 km² de forêt détruite



Taille de l'objet estimée: 50 mètres

Fréquence d'impact: 100-1000 ans

Couverture Du journal
A & A Vol. 377 2001

De temps en temps, ça nous tombe dessus (météorites)!

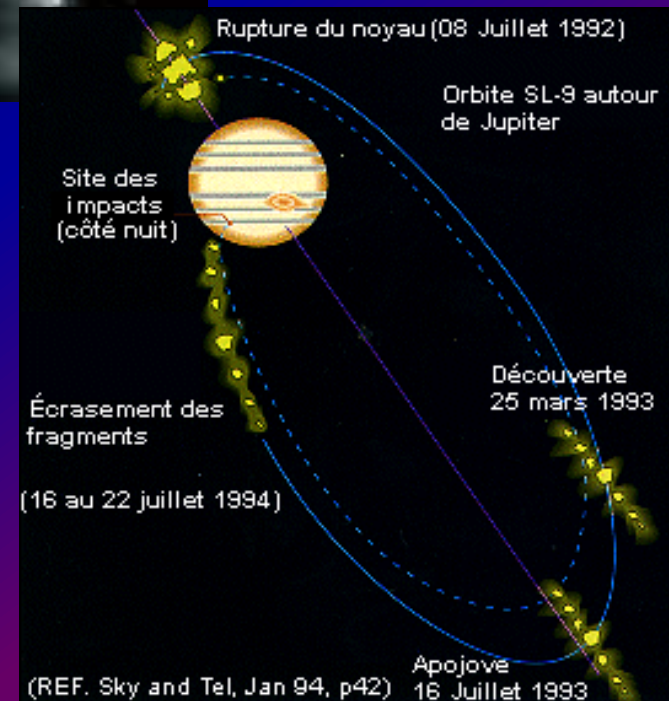


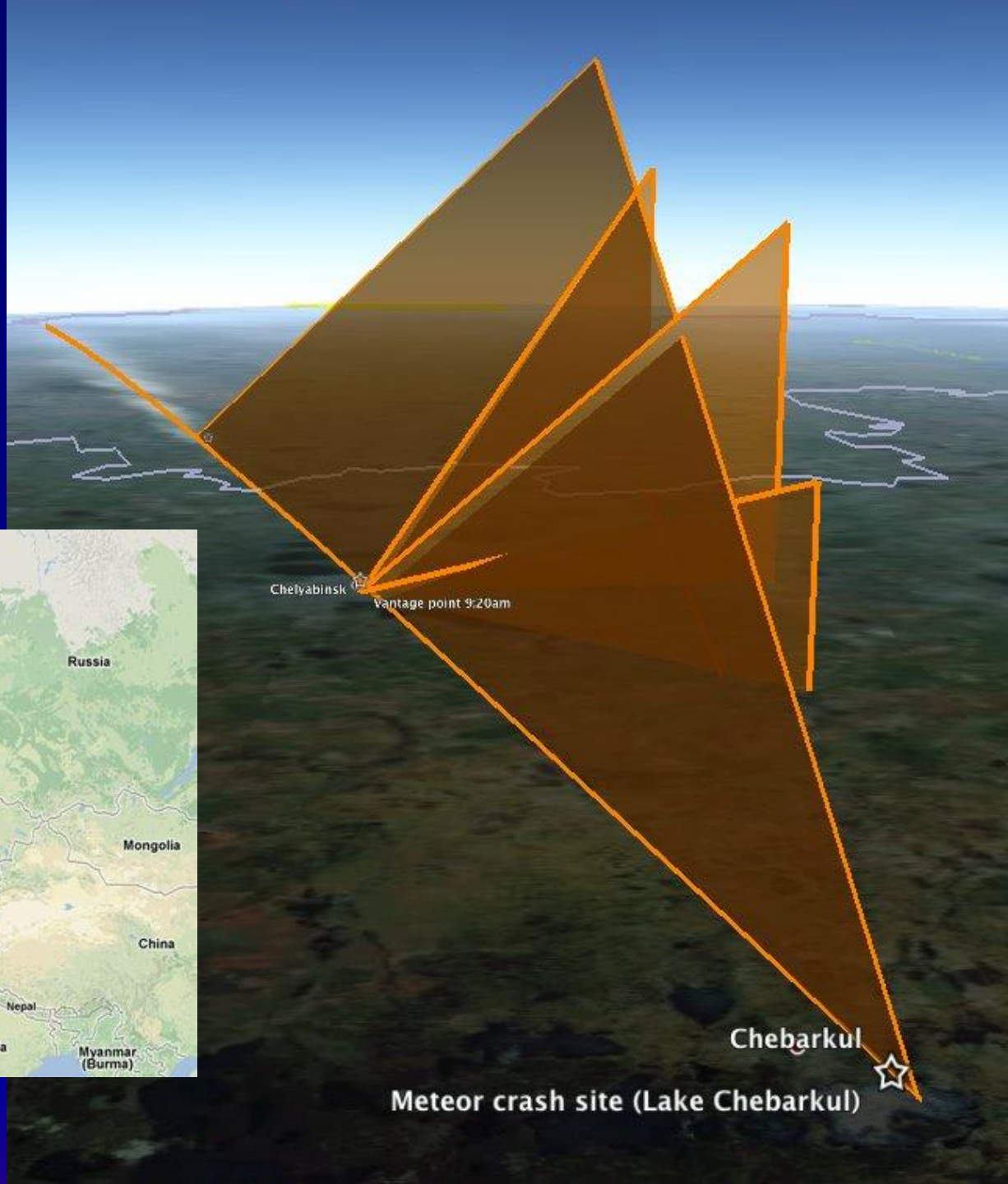
Impact de Shoemaker-Levy 9 avec Jupiter (Juillet 1994)



Première collision observée en temps réel!!!

Plusieurs résolutions (European Commission, NASA) suivirent pour étudier le risque d'impact





Météore de Chelyabinsk

15 Février 2013

Taille: 15-20 mètres (35 Bombes d'Hiroshima)

2013/02/15 09:26:15

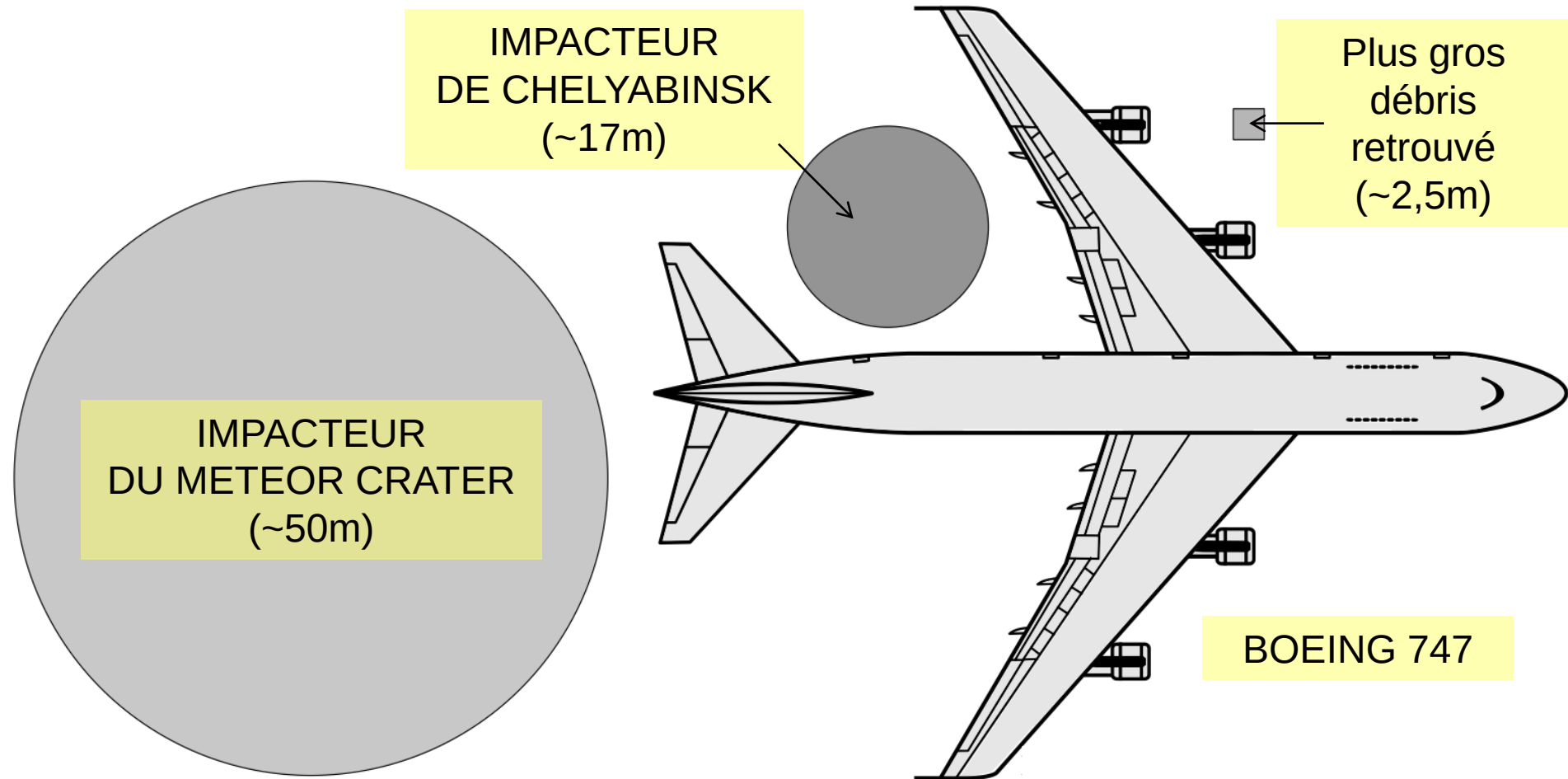


Камера 2

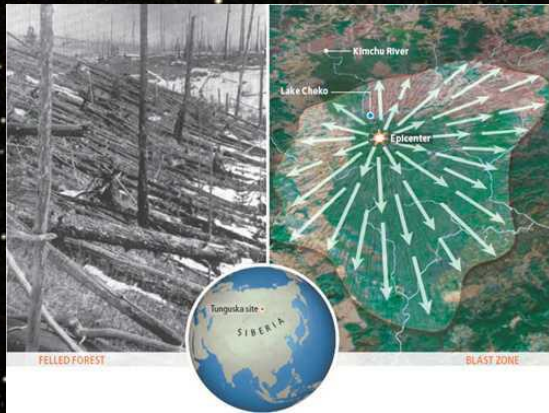
8:45:15 15.02.2013



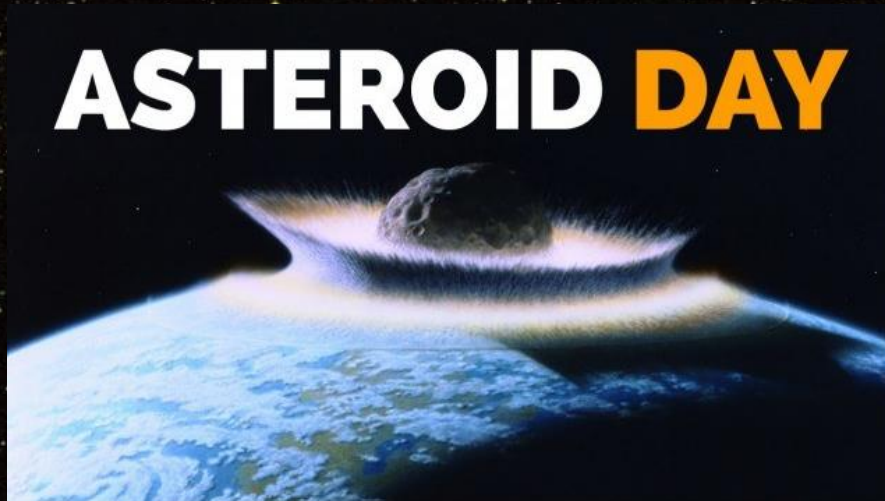
Taille du météore de Chelyabinsk



<http://asteroidday.org>



30 Juin: anniversaire de
l'explosion d'un astéroïde
au-dessus de la Tunguska
en 1908



30 Juin =
International
Asteroid Day
décrété par l'ONU
en Décembre 2016

Initié par
Grig Richter
(réalisateur de films)
Et

Brian May (guitariste de Queen)

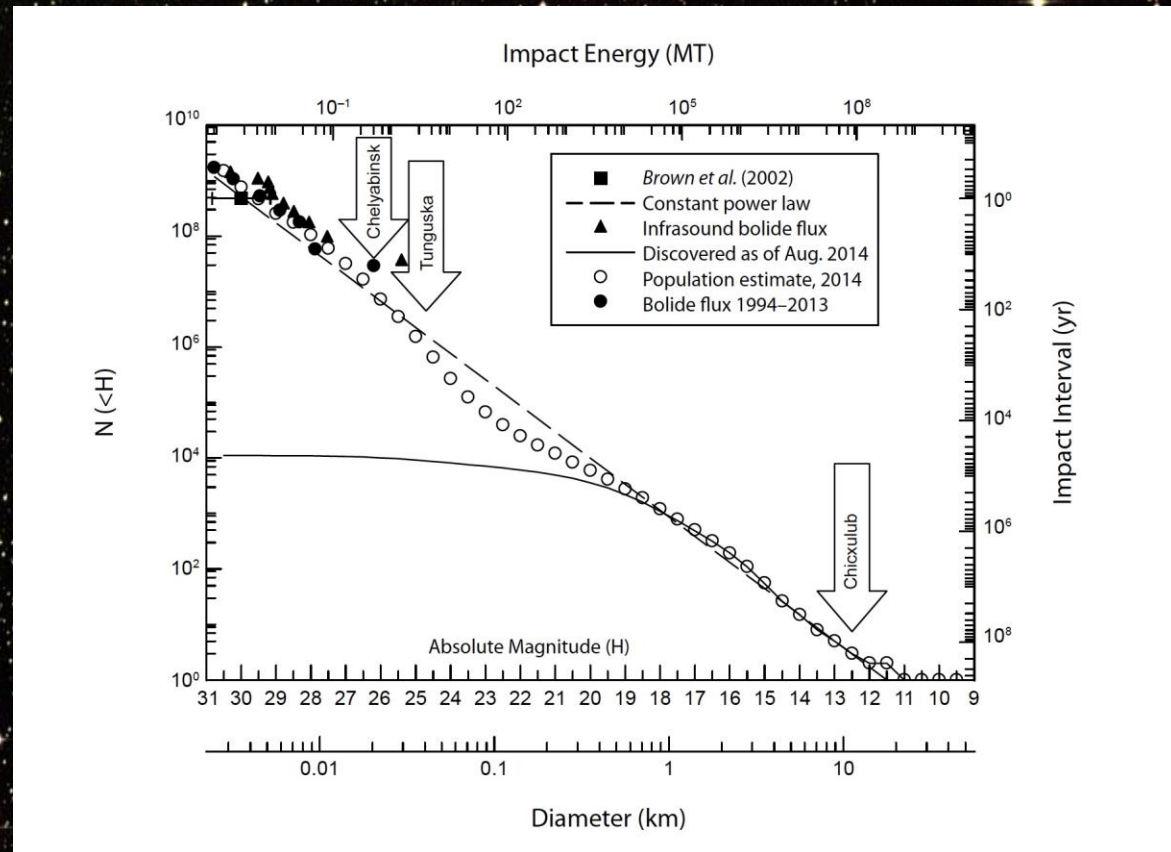


Asteroid Day Experts



La distribution des tailles des géocroiseurs

From Harris et al. 2015, Asteroids IV, Michel, P. et al. eds



- ~950 géocroiseurs de diamètre > 1 km (>90% découverts)
- ~20,000 – 25,000 géocroiseurs de diamètre > 140 m
- fréquence d'impact: 10,000 ans
- Des dizaines de millions de géocroiseurs de tailles jusqu'à quelques mètres

Etat des découvertes des géocroiseurs

A Near-Earth Asteroid Census

Each image represents 100 objects

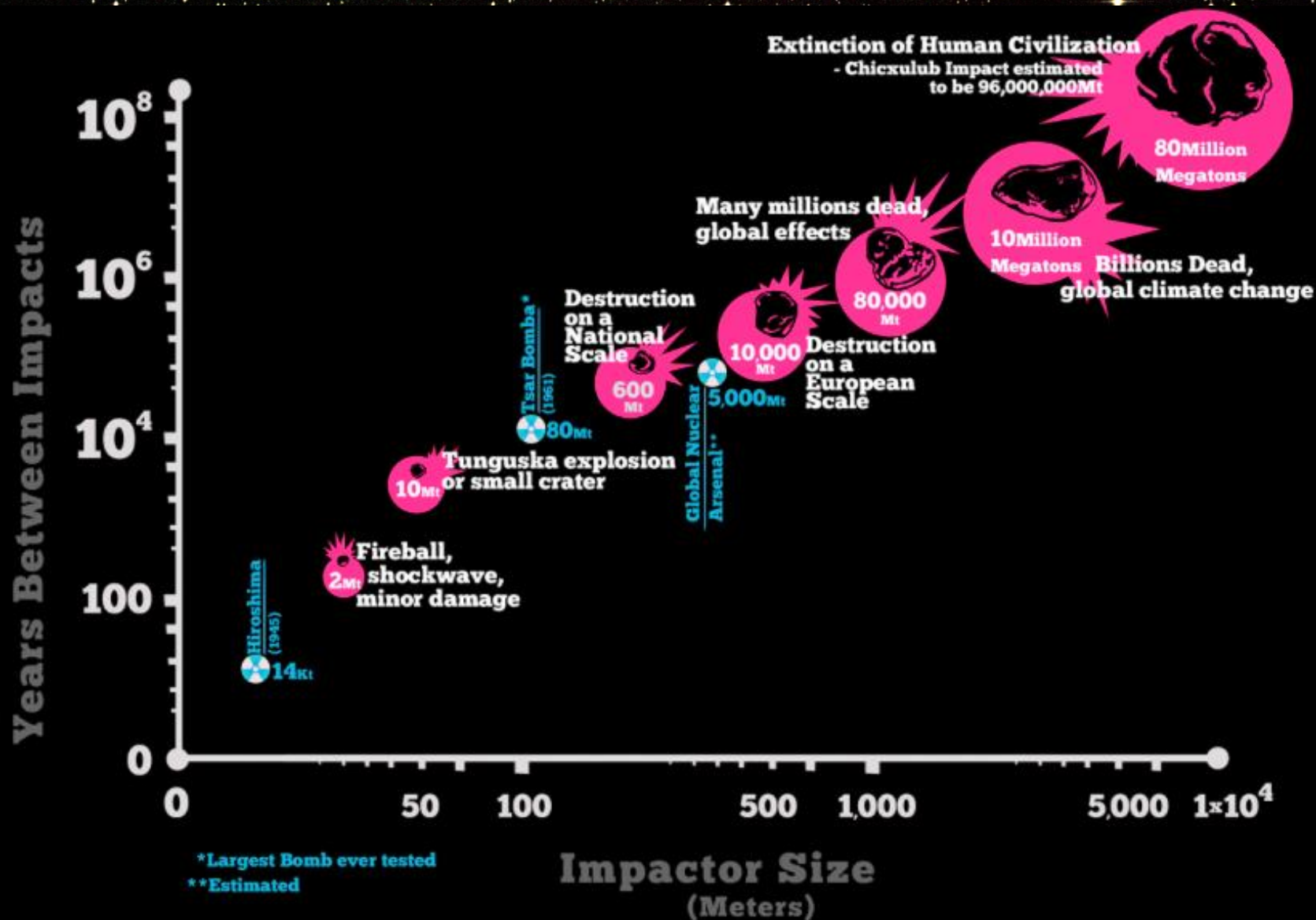
Known Asteroids ●
Predicted Total (WISE) ○

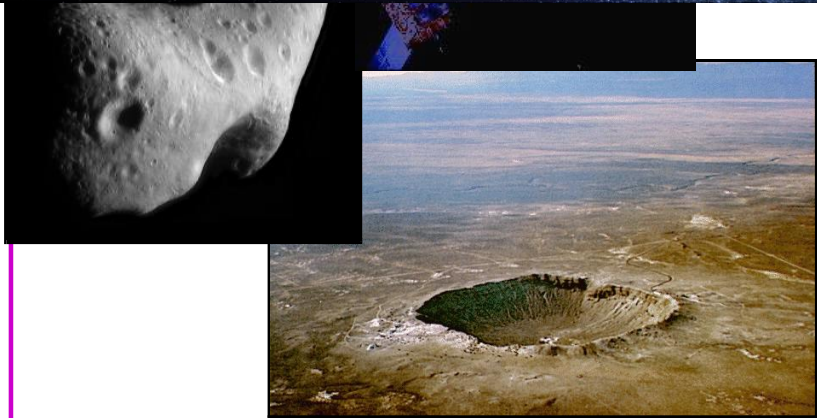


Image credit:
NASA/JPL-Caltech



Les fréquences d'impact





**En 2004, ESA créa le
Near-Earth Object Advisory
Panel (*NEOMAP*):**

**Pr. Willy Benz (Suisse)
Dr. Alan Fitzsimmons (GB)
Pr. Simone Green (GB)
Dr. Alan Harris (Allemagne)
Dr. Patrick Michel (France)
Dr. Giovanni Valsecchi (Italie)**

**Lancement de la Phase A
de la mission AIDA**

En 2015

Présentation Finale: 12/2016

Défense planétaire: 3 étapes cruciales



- **Prédiction:** nécessite un programme d'observation pour faire l'inventaire jusqu'à une taille donnée (objectif actuel: 140 mètres)
- **Caractérisation:** pour mieux le combattre, il faut connaître son ennemi
- **Prévention:** nécessite une technique vérifiée de déviation

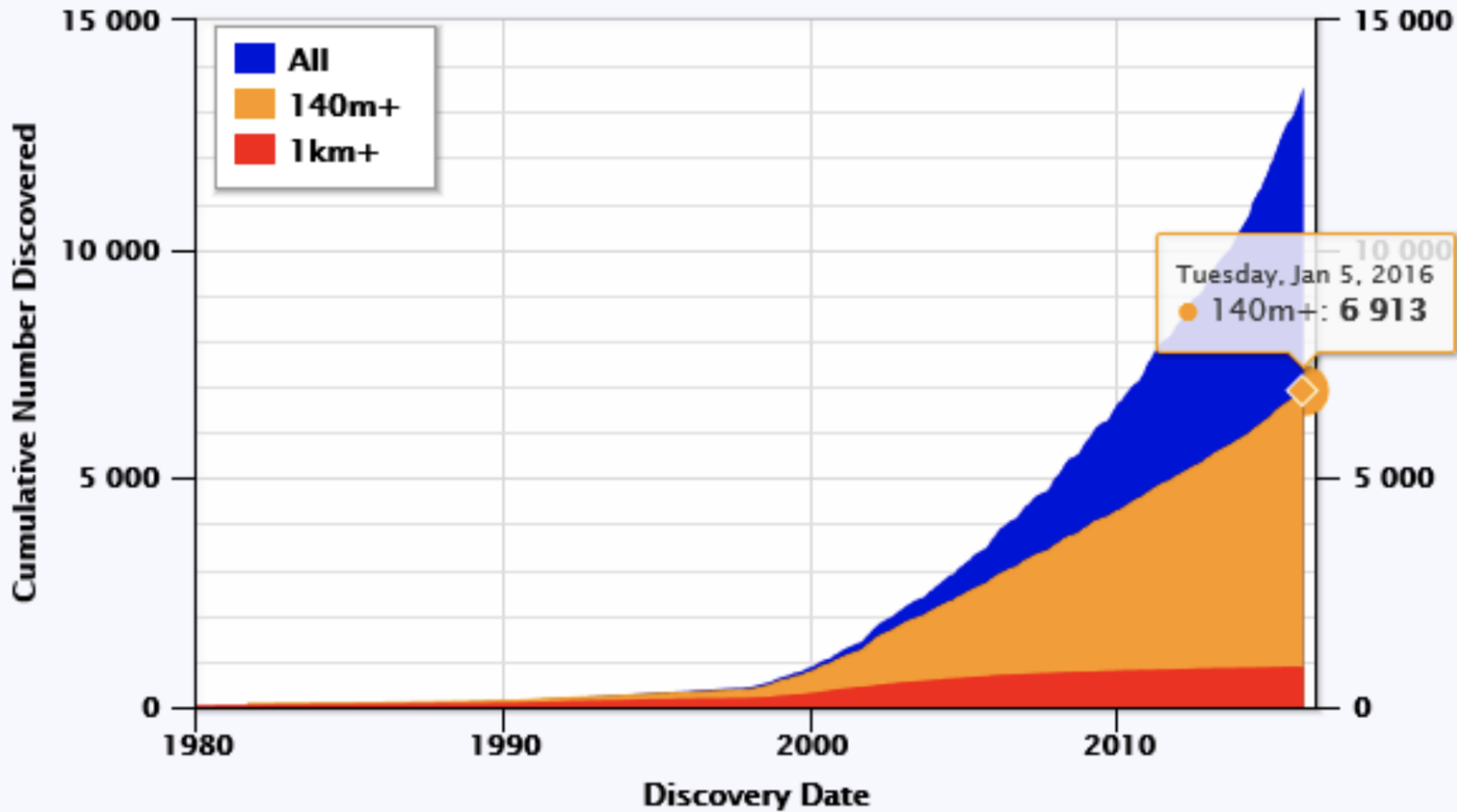
I. Prédiction: objectifs

- **Mandat de la NASA par le congrès:** Découvrir 90% des géocroiseurs plus grands que 140 m d'ici 2020
- Etre capable d'alerter (avant quelques heures à quelques jours) de l'impact imminent d'un petit objet
- **NASA Asteroid Initiative:** "Find all threats to human populations, and know what to do about them"



I. Détection: état des lieux

Near-Earth Asteroids Discovered



As of
12/31/15
13,514

Also 104
comets

1650
Potentially
Hazardous
Asteroids
Come within
5 million miles
of Earth orbit

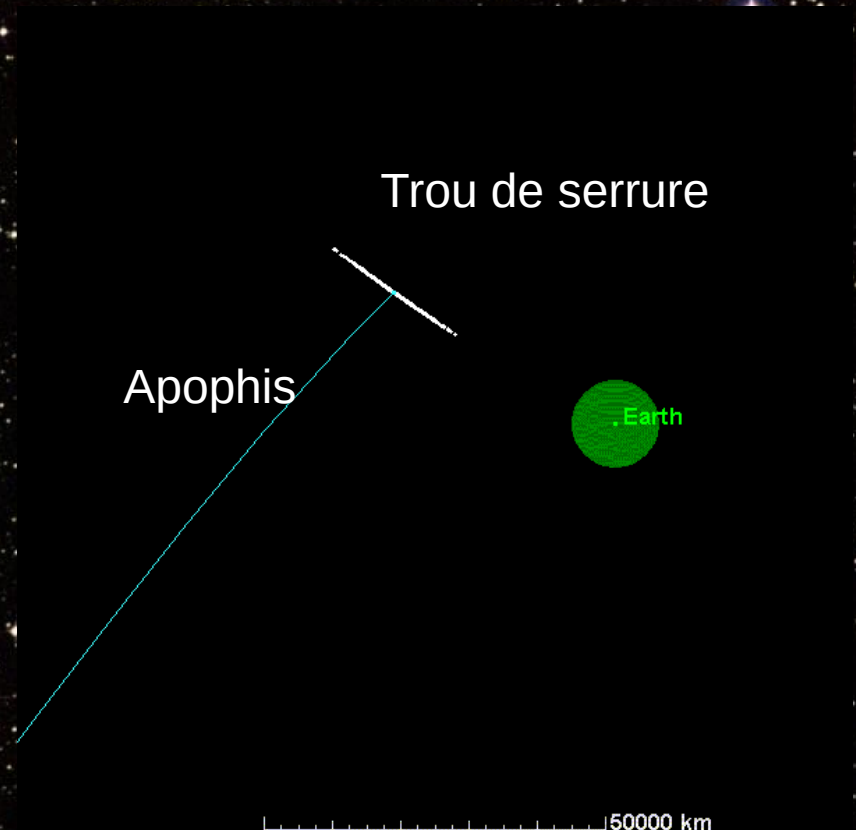
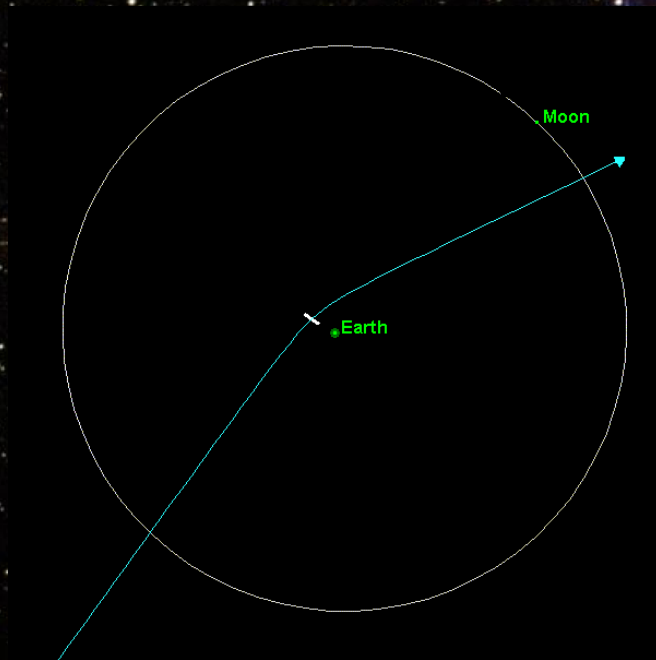
878
153 PHAs

- 2016 – Le taux de découverte est de ~1,500 objets par an

Apophis (taille: 300 m): un risque de collision écarté

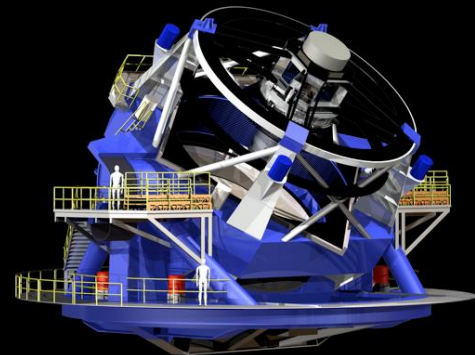
Incertitude sur la trajectoire: 600 m
A l'intérieur, une solution qui conduit
à une collision en 2036

En 2029: passage à moins de 32,000 km!!



I. Détection: prochains programmes

- Les programmes actuels *n'atteindront pas* l'objectif de la NASA en 2020
- Les programmes actuels ont découverts seulement ~25% des géocroiseurs plus grands que 140 mètres
- Le taux de découverte ajoute seulement ~2% par an – il y a encore un long chemin pour atteindre 90%
- **Espoirs avec LSST et projets spatiaux (NEOCAM?)**



II. Caractérisation

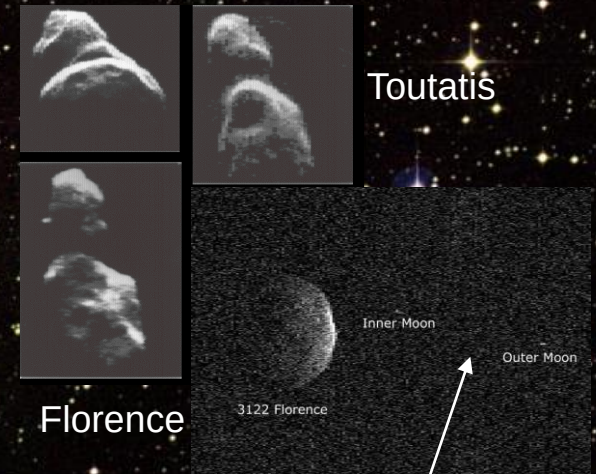
A quoi ressemble un astéroïde
depuis le sol?



Quelles sont nos connaissances depuis le sol?

Propriétés physiques

- ✓ Taille, Forme, activité
 - ✓ Rotation
 - ✓ Composition
 - ✓ Températures, rugosité de surface
 - ✓ Présence d'un compagnon
- Observations optiques
Courbes de lumière
Spectroscopie
Observations IR thermique
Radar et/ou courbe lumières

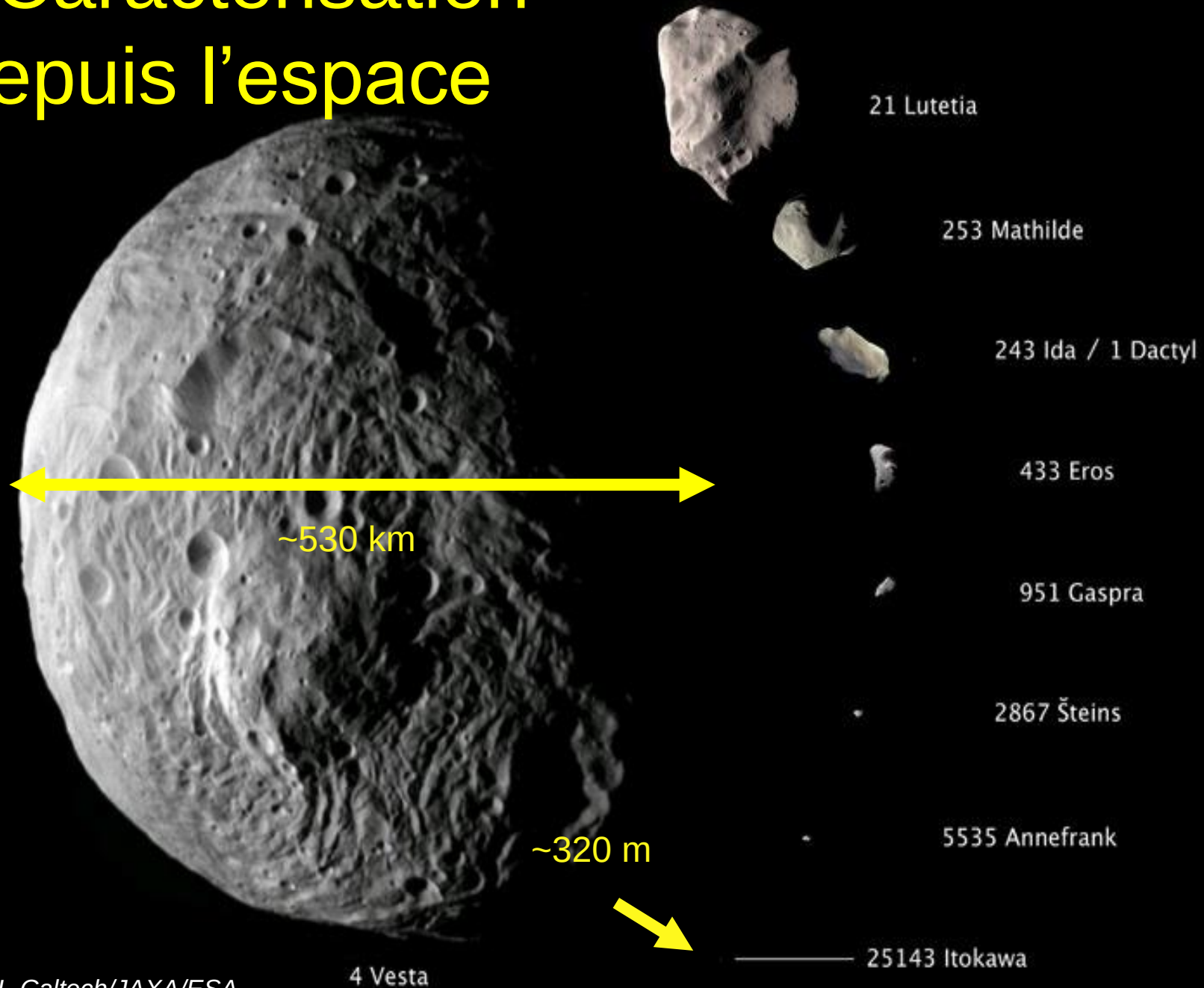


Mais quasi-rien sur:

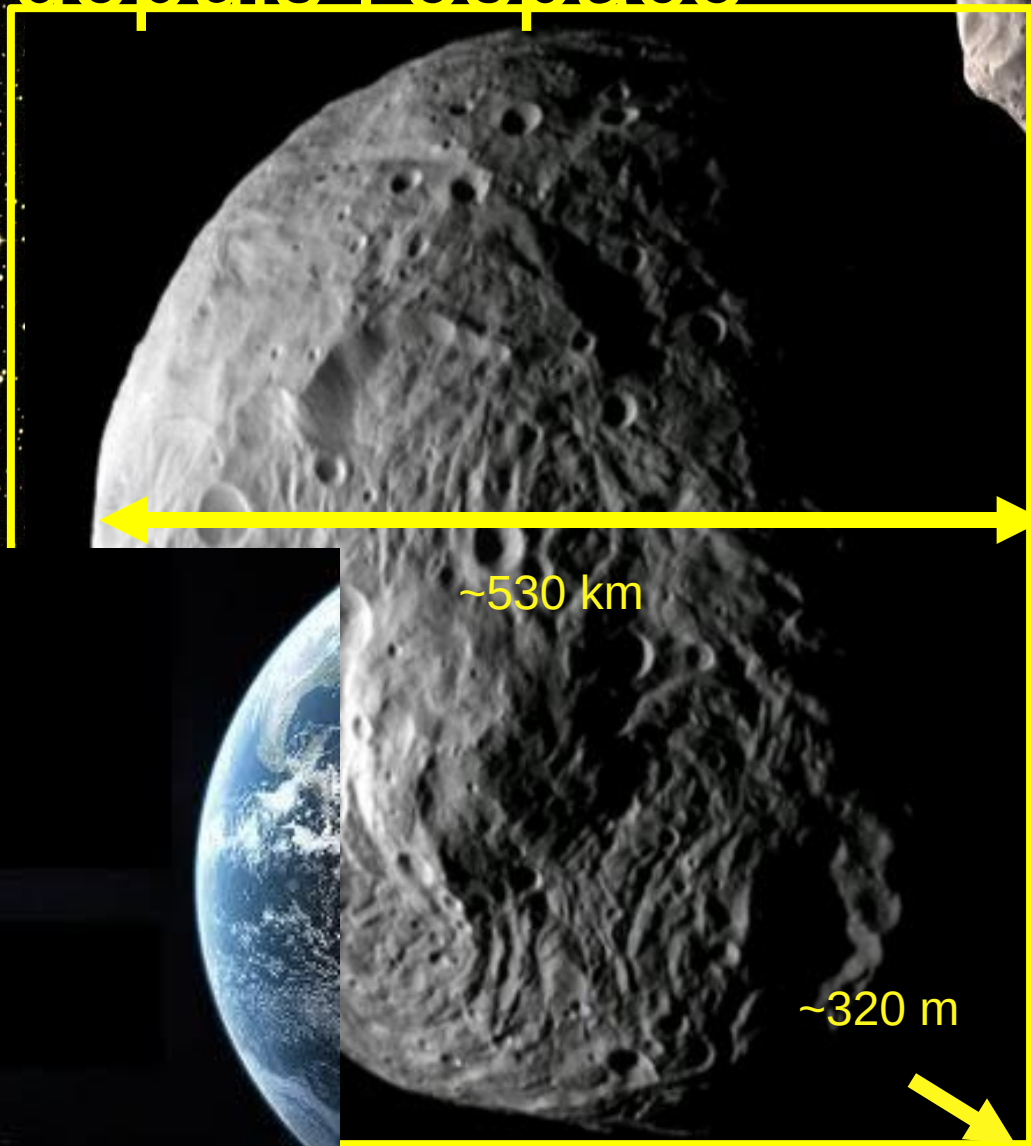
- (i) Les propriétés de surface et sa réponse à des processus variés
- (ii) La structure interne
- et (iii) la composition détaillée

Nous essayons seulement de PREDIRE en développant des modèles basés sur notre compréhension de la physique mise en jeu

II. Caractérisation depuis l'espace



II. Caractérisation depuis l'espace



~530 km

~320 m

4 Vesta

21 Lutetia

253 Mathilde

243 Ida / 1 Dactyl

433 Eros

951 Gaspra

2867 Šteins

5535 Annefrank

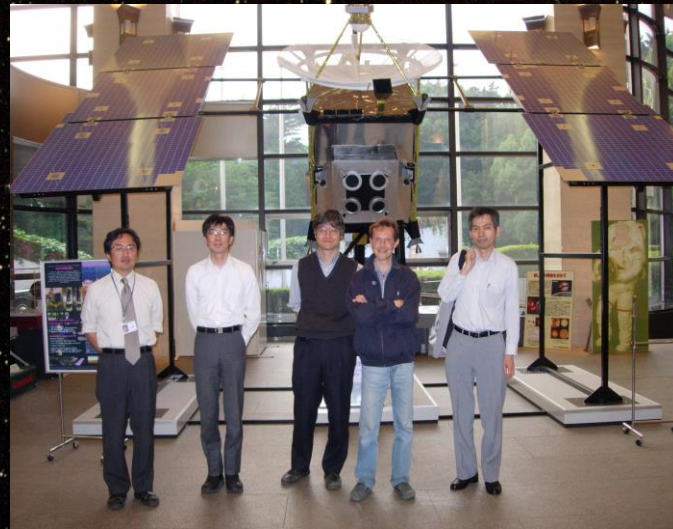
25143 Itokawa

Vesta

ESA

sec.com

Mission Hayabusa: récolte d'échantillons en Novembre 2005!



Cible: l'astéroïde croiseur
de la Terre Itokawa

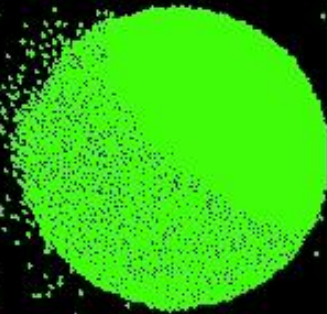
Mission Hayabusa (JAXA, Japon)

Visite de l'astéroïde Itokawa
Et
Récolte d'échantillons
(Novembre 2005)



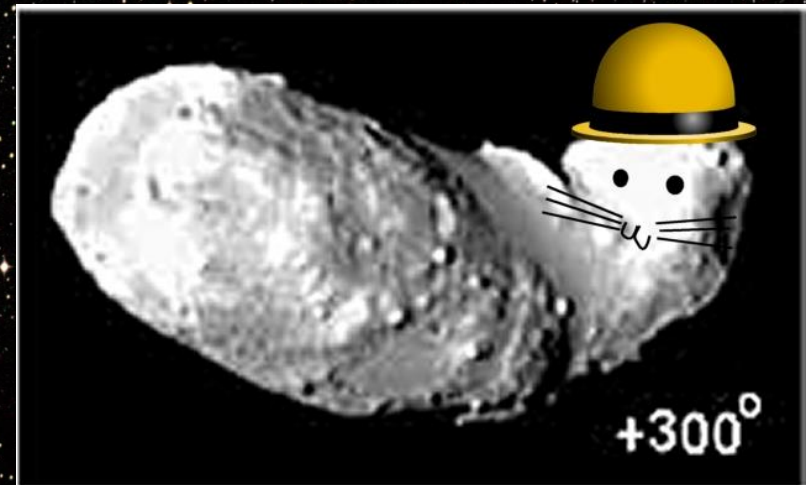
Scénario de formation d'Itokawa: destruction d'un corps parent et fragments formés par réaccumulation

Phase gravitationnelle post-fragmentation



Destruction d'un gros astéroïde par impact

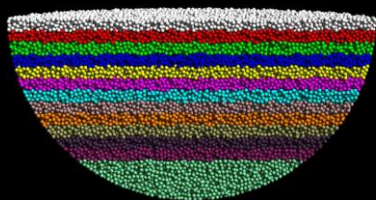
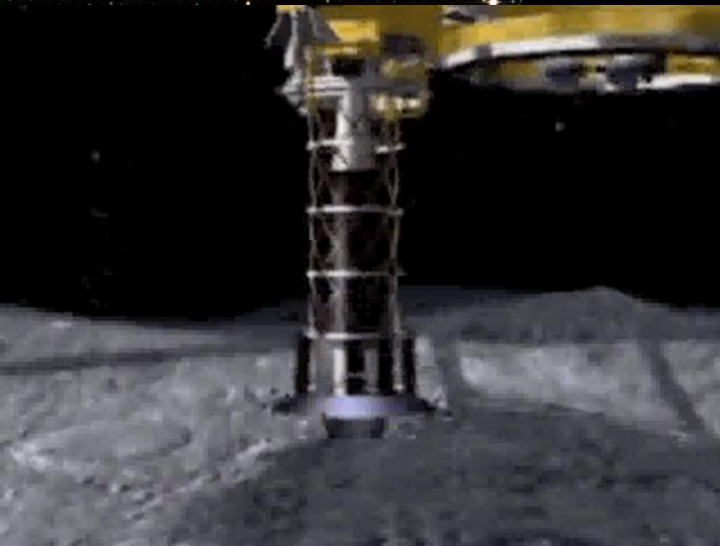
Les points **verts** représentent des fragments de 10 mètres de diamètre



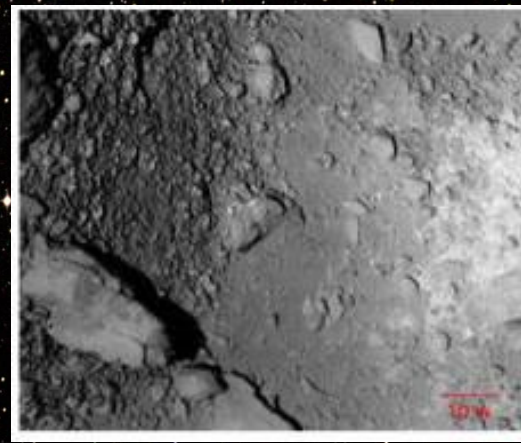
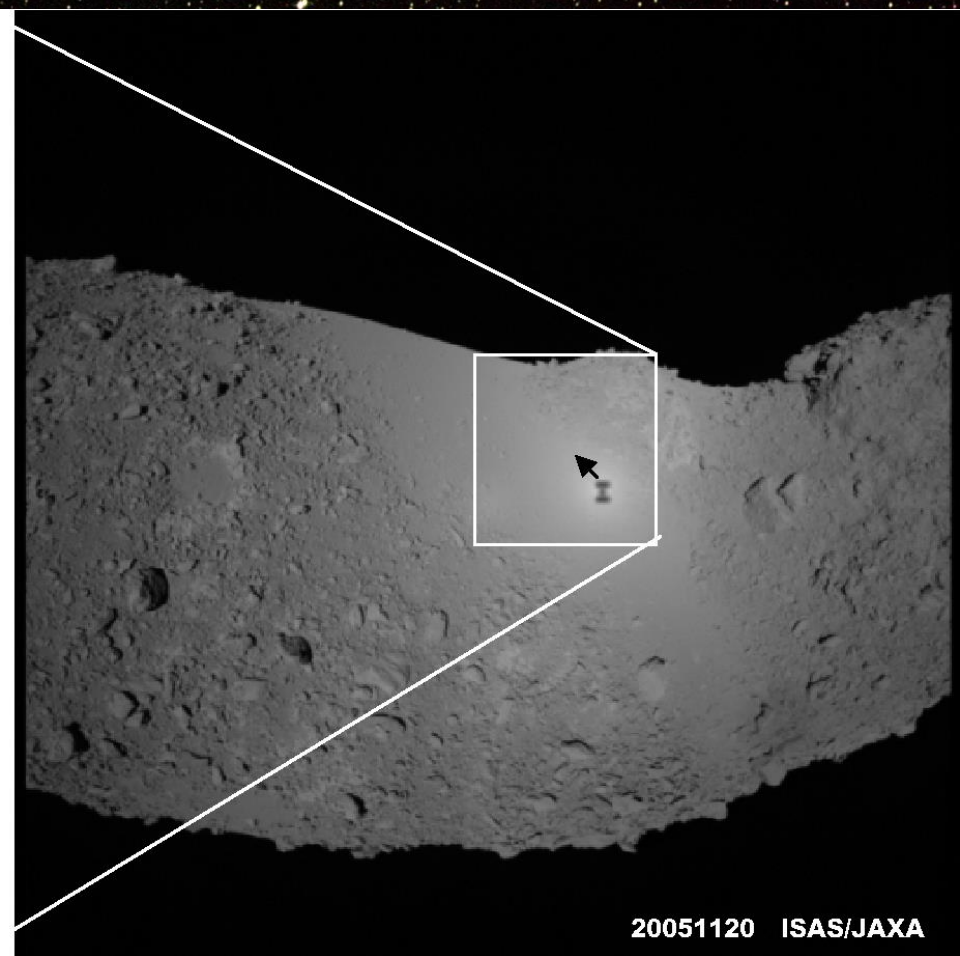
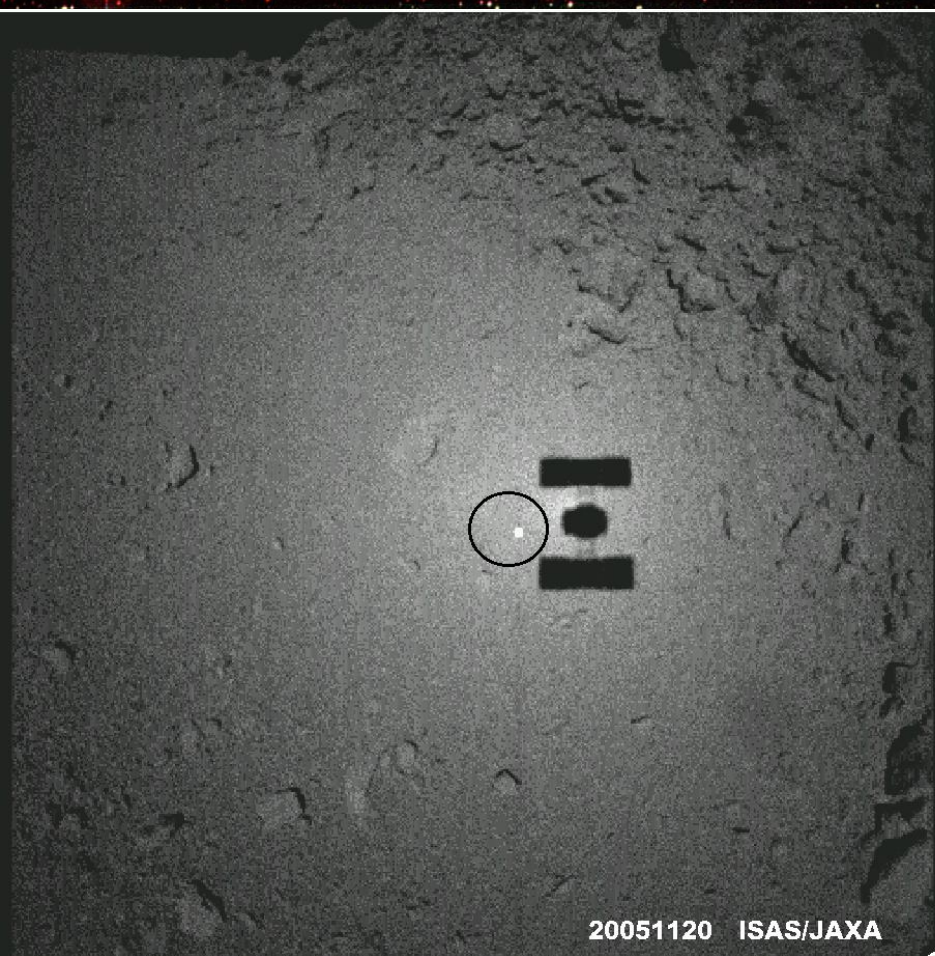
Michel P., Benz W., Tanga, P., Richardson D.C. Science 294, 2001
Michel, P., Benz, W., Richardson, Nature 421, 2003
Michel P. & Richardson, D.C. A&A, 2013

2005-11-11

10:47:54



Simulation par P. Michel & S.R. Schwartz



おつかいできた

Retour
Sur Terre
Le 13
Juin 2010



Succès médiatique!!



大ヒット
公開中!

はやぶさ
遅かなる帰還



おかえりはやぶさ
3D

2012.3.10 大迫力の3Dで贈る、機械と人の冒険の旅

秋の「」

II. Caractérisation: à venir

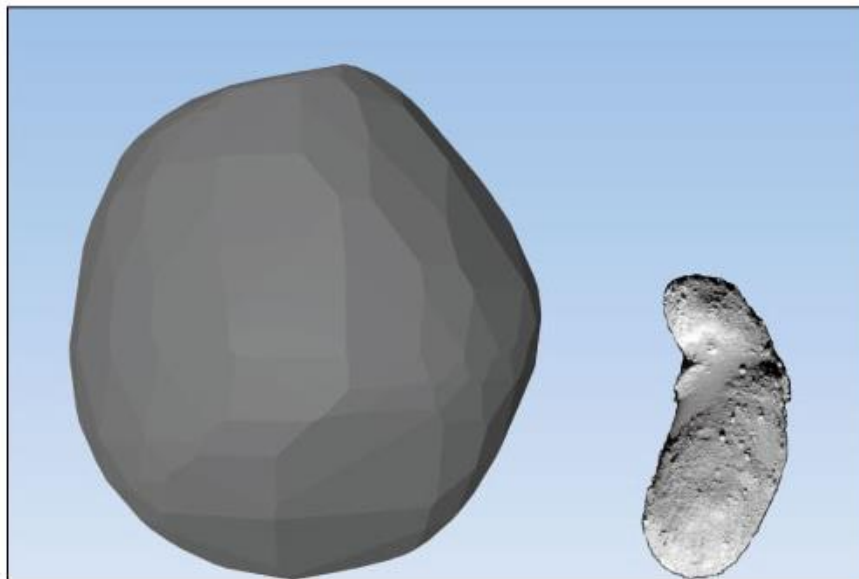
Deux missions de retour d'échantillon de géocroiseurs

Visite: 2018-2019

Retour des échantillons: 2020 et 2023

Type B (carboné)

Type S (silicate)



Ryugu(1999 JU₃)
about 900m

Itokawa
535m

(Visualized from T. Mueller et al. 2014)

Type C (carboné)

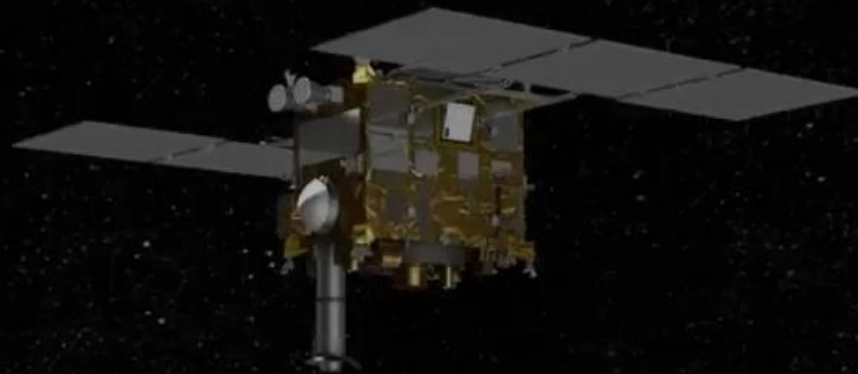


Bennu
535 m



Atterrisseur MASCOT sur Ryugu (800 m)
Collaboration CNES-DLR

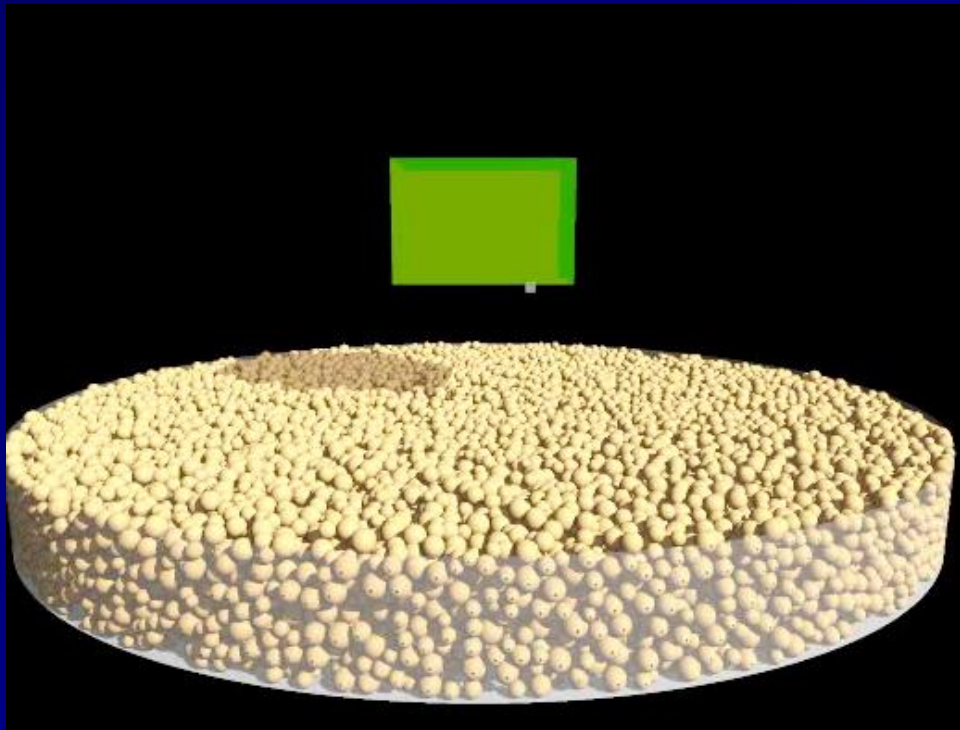
Atterrissage prévu pour Octobre 2018



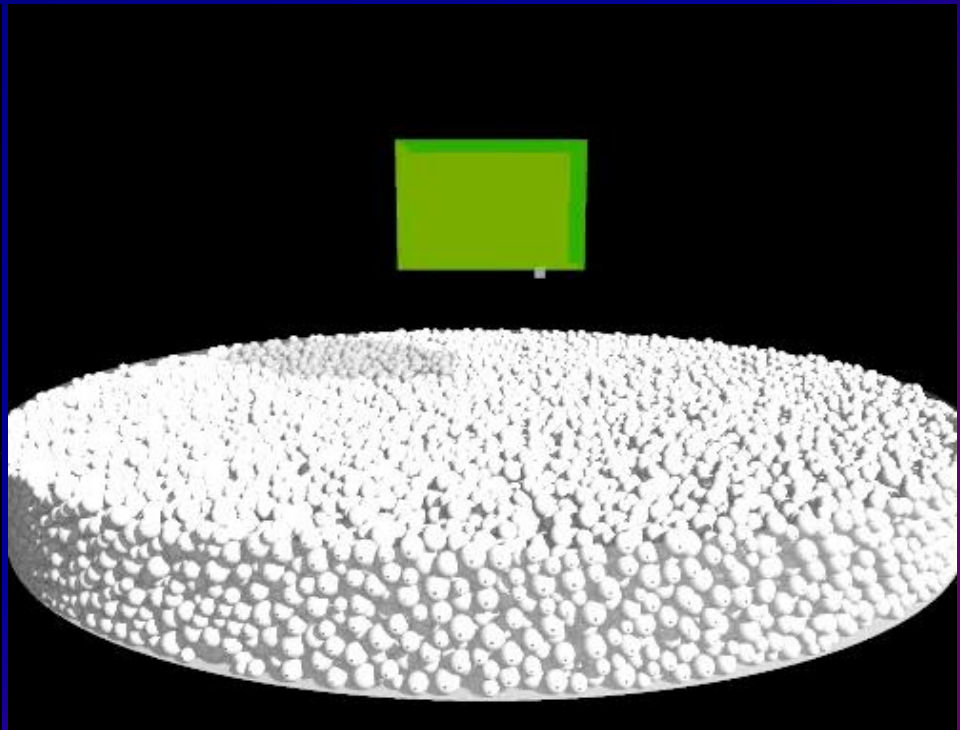
Simulations numériques du rebond de MASCOT (Prédire et interpréter l'atterrissage)

Master C. Maura (Supaéro, OCA; dir. P. Michel; 2016)

Thèse de F. Thuillet (OCA, ingénieur Supaéro; dir. P. Michel; 2016-2019)



Friction: gravel-like
(0° - 15 cm - flat - no spin)



Friction: moderate
(0° - 15 cm - flat - no spin)

Small Carry-on Impactor (SCI)

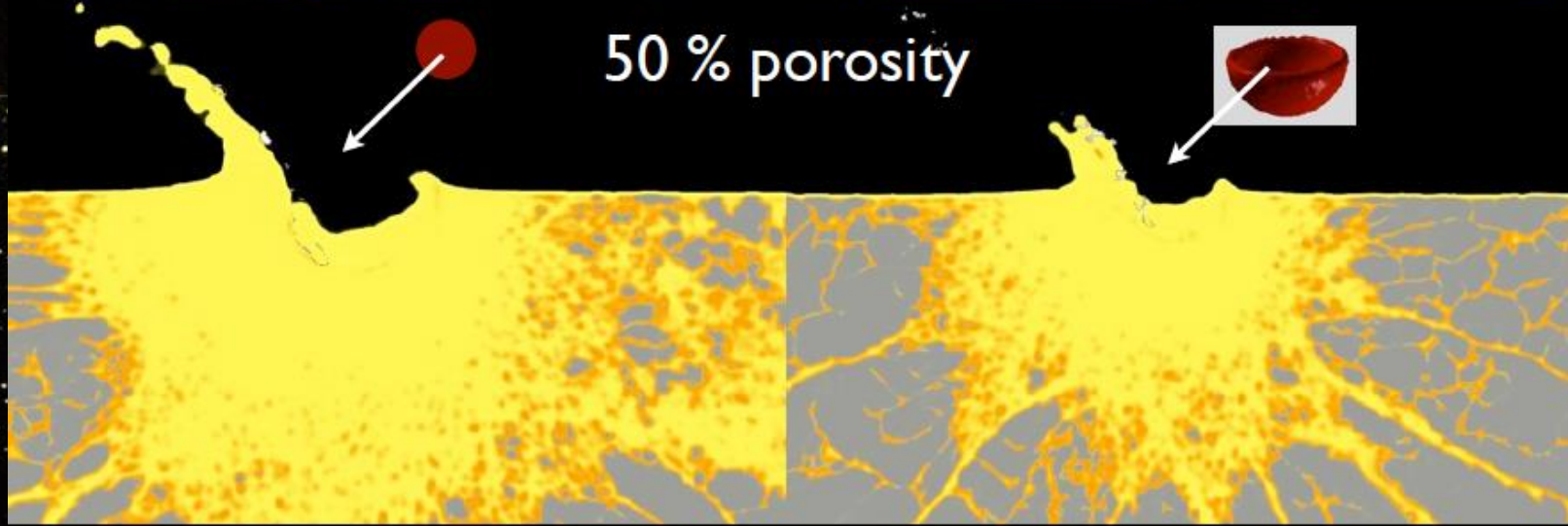
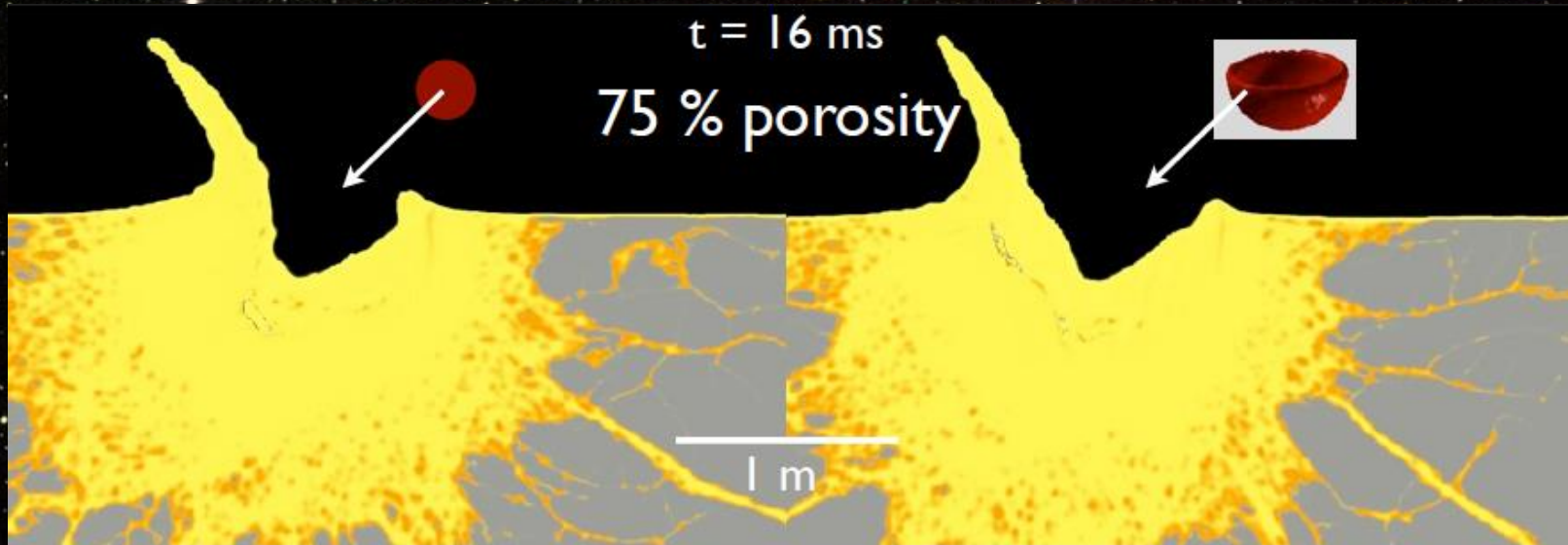
co-I CNES (P. Michel)

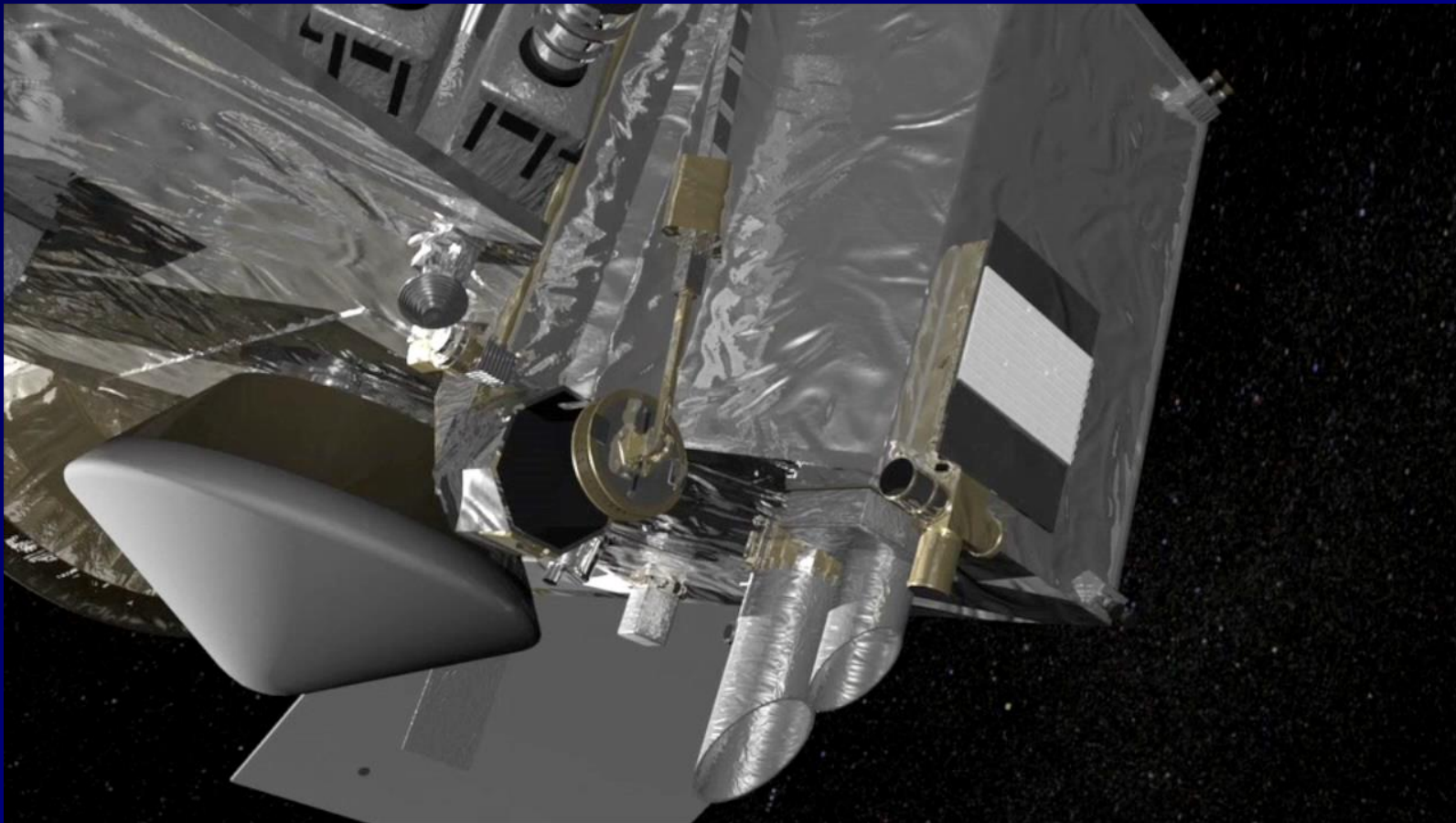
Juin 2019



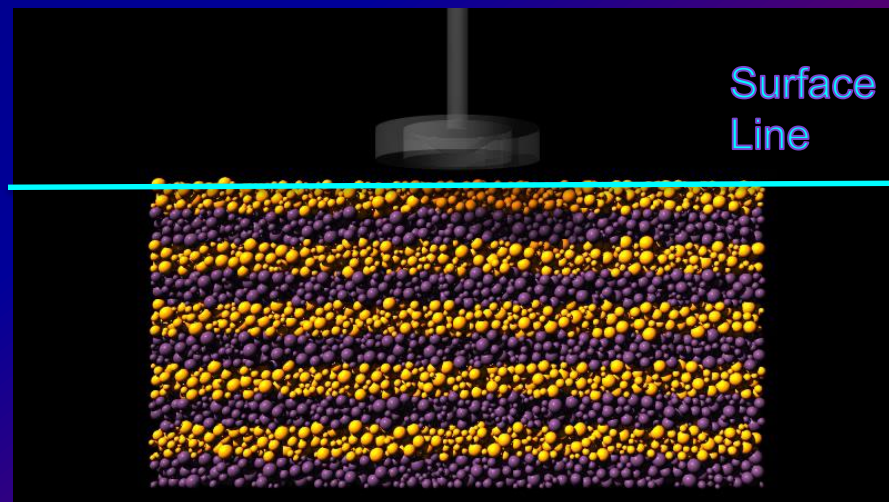
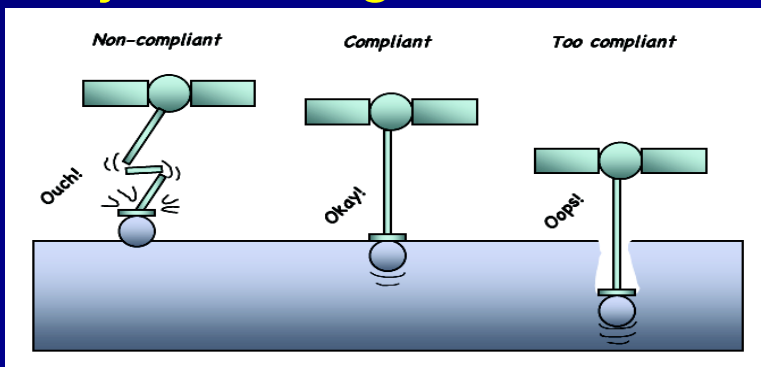
Simulations numériques de l'impact du SCI

M. Jutzi, P. Michel 2016





Récolte en moins de 5 s
Objectif: 60 g d'échantillon



Simulation:
R.L. Ballouz

OSIRIS-REx Earth Gravity assist

Image du 25 Septembre 2017 par la caméra de navigation d' OSIRIS-REx.
Distance: 1,300,000 km tandis que le satellite s'éloigne de la Terre

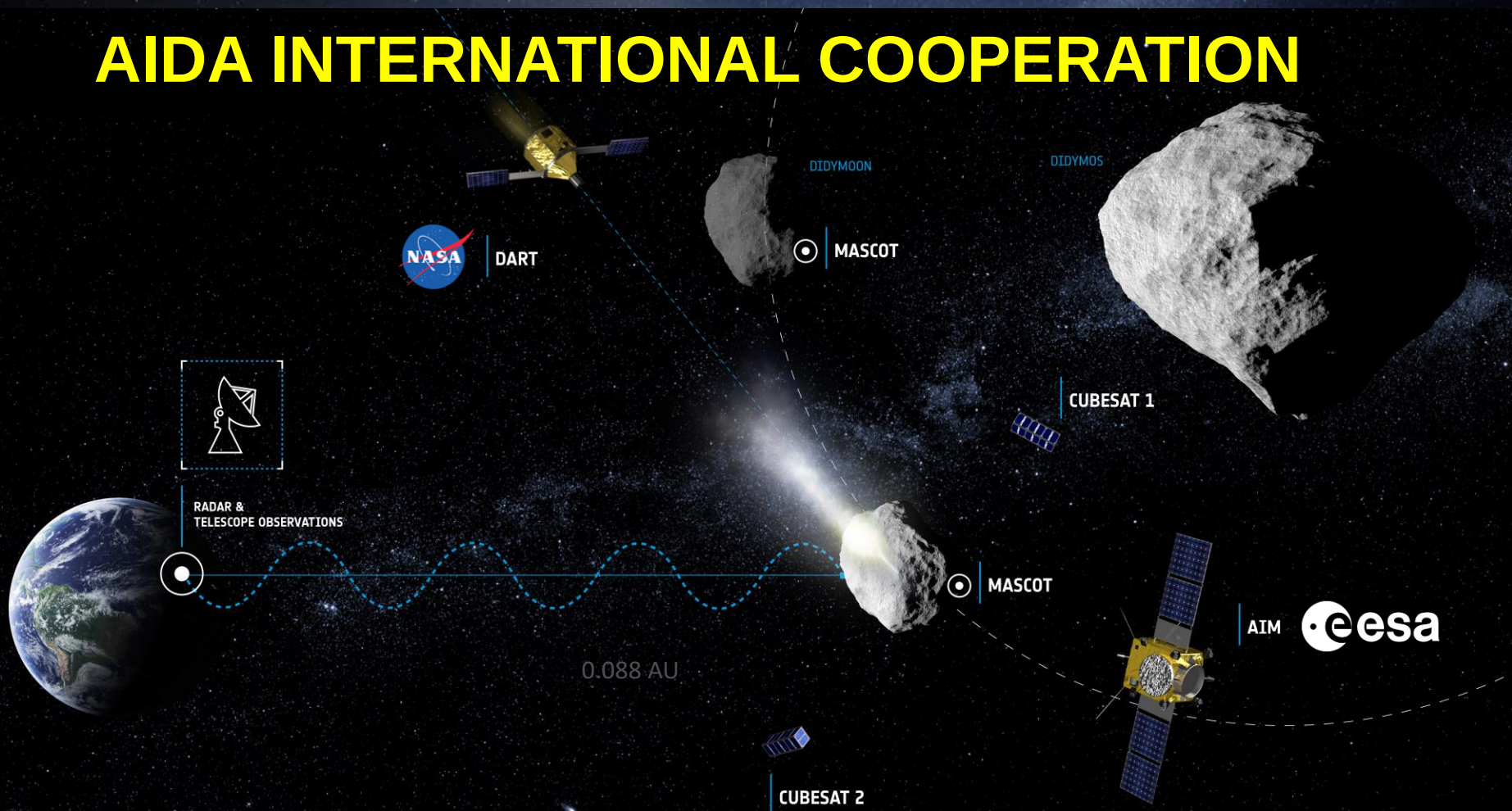


III. Prévention



- Plusieurs techniques de déviation existent sur le papier, aucune n'a été testée
- Sans un test réel, nous ne serons jamais sûrs que nous sommes prêt pour cette étape très importante
- Même si le risque est faible, il faut se préparer avant d'en avoir besoin
- Une méthode a été étudiée dans le cadre d'une coopération entre l'ESA et la NASA

AIDA INTERNATIONAL COOPERATION





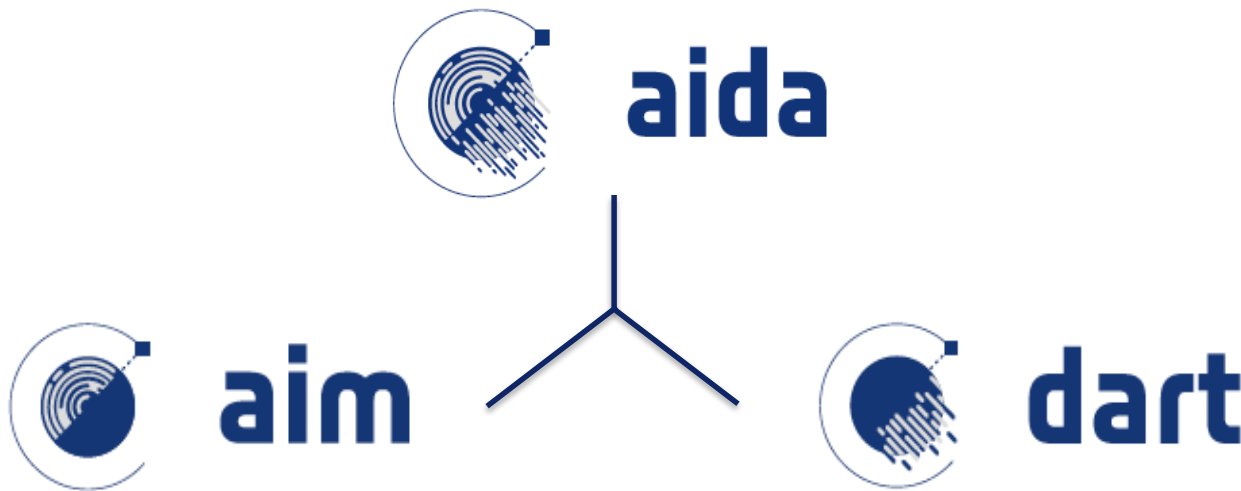
COOPERATION AIDA

Asteroid Impact & Deflection Assessment



Deux missions **simples, indépendantes** et **autonomes** effectuées en coordination pour:

- Démontrer notre aptitude à **modifier la trajectoire orbitale orbital d'un petit astéroïde** et mesurer la déviation en surveillant le changement de période orbitale
- Mesurer tous les paramètres scientifiques et techniques pour **interpréter la déviation** et extrapoler les résultats aux missions futures ou autres cibles



Cible binaire de AIM/AIDA: Didymos





AIM, dans sa définition d'origine n'a pas obtenu le budget total mais a suscité un intérêt significatif

→ Plusieurs Etats Membres ont demandé qu'une solution et qu'une "way forward" soient proposées

- Mission importante pour **démontrer la défense planétaire** dans le cadre d'une **coopération internationale (NASA)**
- Reconnaissance d'un **intérêt technique et scientifique élevé** pour AIDA
- Reconnaissance d'un **soutien fort du public** et de la **composante inspirationnelle** d'AIDA
- **Les challenges identifiés par les Etats Membres:**
 - Non prioritaire par rapport aux fonds disponibles (ISS, A6, EXM)
 - Programme trop tendu pour lancement en 2020
 - Sélection des instruments pas claire
 - Status de DART pas suffisamment claire

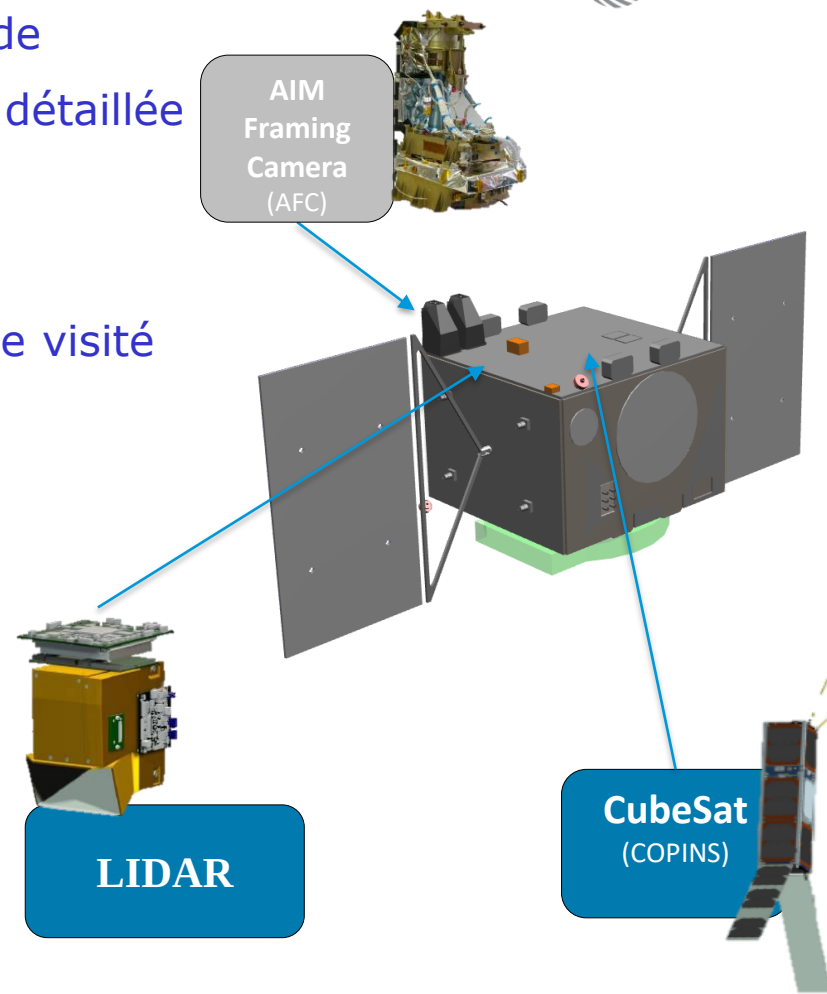


HERA



Premier test de déviation à l'échelle d'un astéroïde
Caractérisation d'un astéroïde double et analyse détaillée du cratère
Premier CubeSat déployé en interplanétaire
Première visite d'un binaire et plus petit astéroïde visité

- Instruments de base
 - Camera (déjà en stock)
 - Cubesat ASPECT (consolidation, Finlande)
 - LIDAR (Portugal)
- Optionel
 - Radar Haute Fréquence
 - Atterrisseur



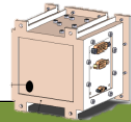
Lancement: 2023 (arrivée 3 ans après l'impact nominal de DART)

Instruments de base (minimum)



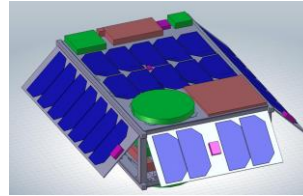
**AIM
Framing
Camera
(AFC)**

11.6 kg
17-34 W



**European
µLidar (PALT)**

1.4 kg
9 W

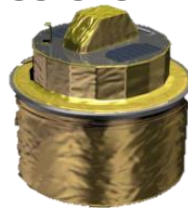


CubeSat

14.9 kg (6U)

Deux options parmi:

- Imagerie Hyperspectrale
- Volatiles
- Radioscience
- Seismométrie
- Minéralogie
- Environment poussière
- Gravimétrie



- **Option:** étudier l'emport et le déploiement du Small Carry-on Impactor (JAXA)
- Instruments et Cubesats additionnels à discuter avec les Etats Membres lors d'ateliers dédiés et de façon bilatérale

Première visite d'un astéroïde double



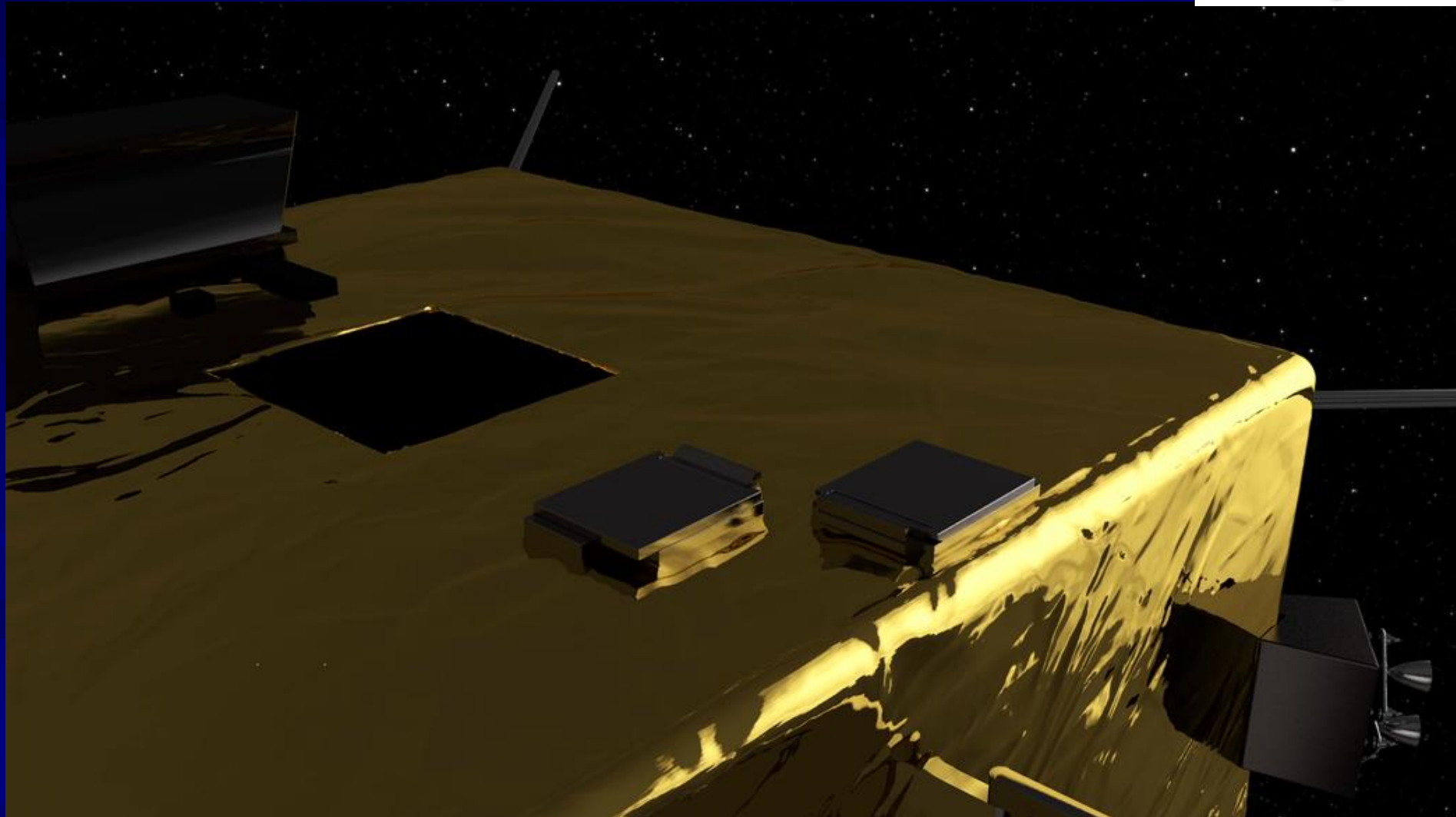
Caractérisation de la lune de l'astéroïde binaire Didymos (165 m)

Scénario:

- Departure date: Oct. 2023
- Earth swing-by: Oct. 26, 2024
- Arrival date: Feb. 9, 2026
- Delta-V: 1.405 km/s



Premier test de déploiement et liaison CubeSat

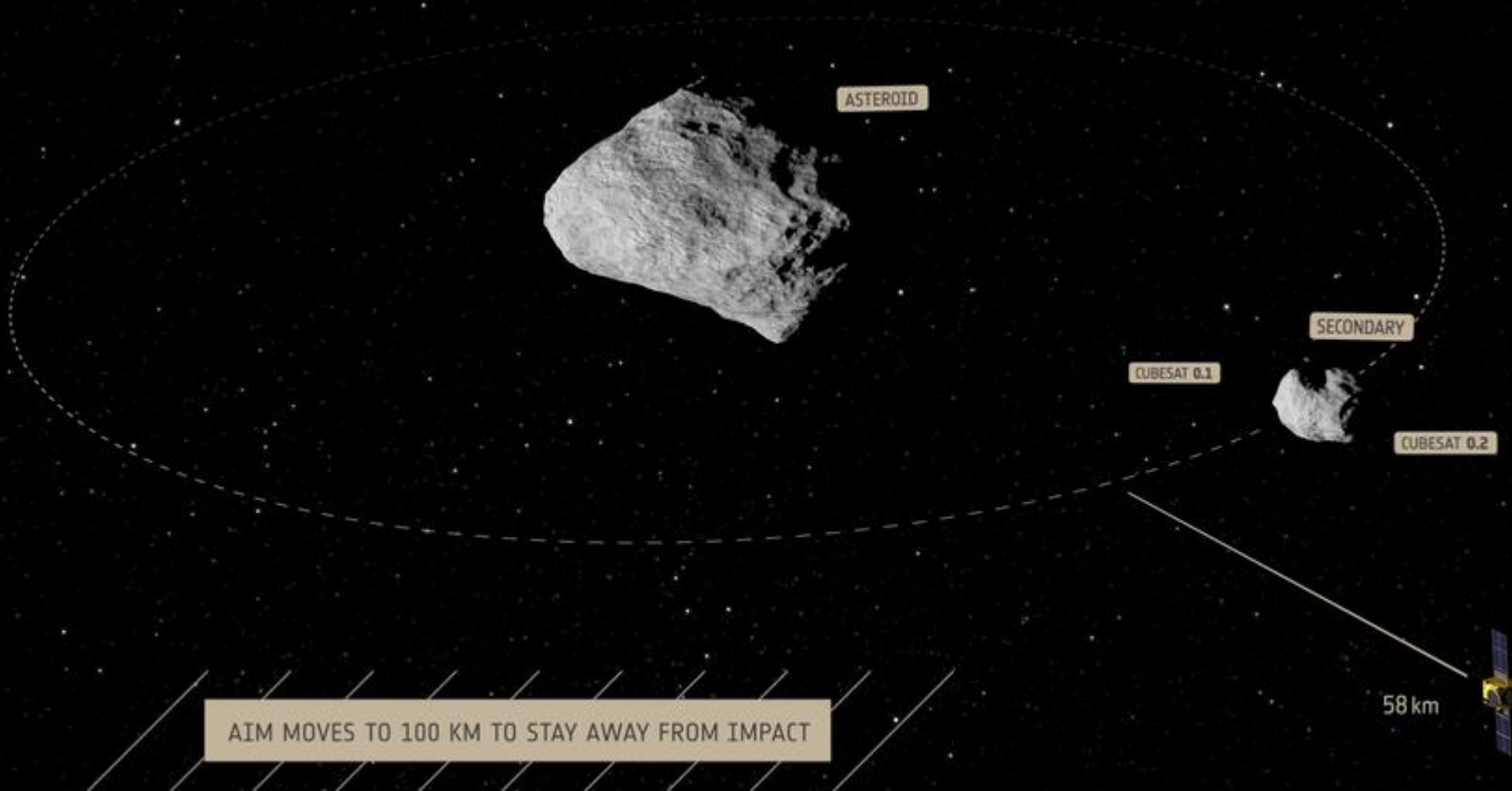


Premier test de déviation

<http://www.oca.eu/michel/AIDA/>



Expérience d'impact sur la lune de Didymos (165 m)

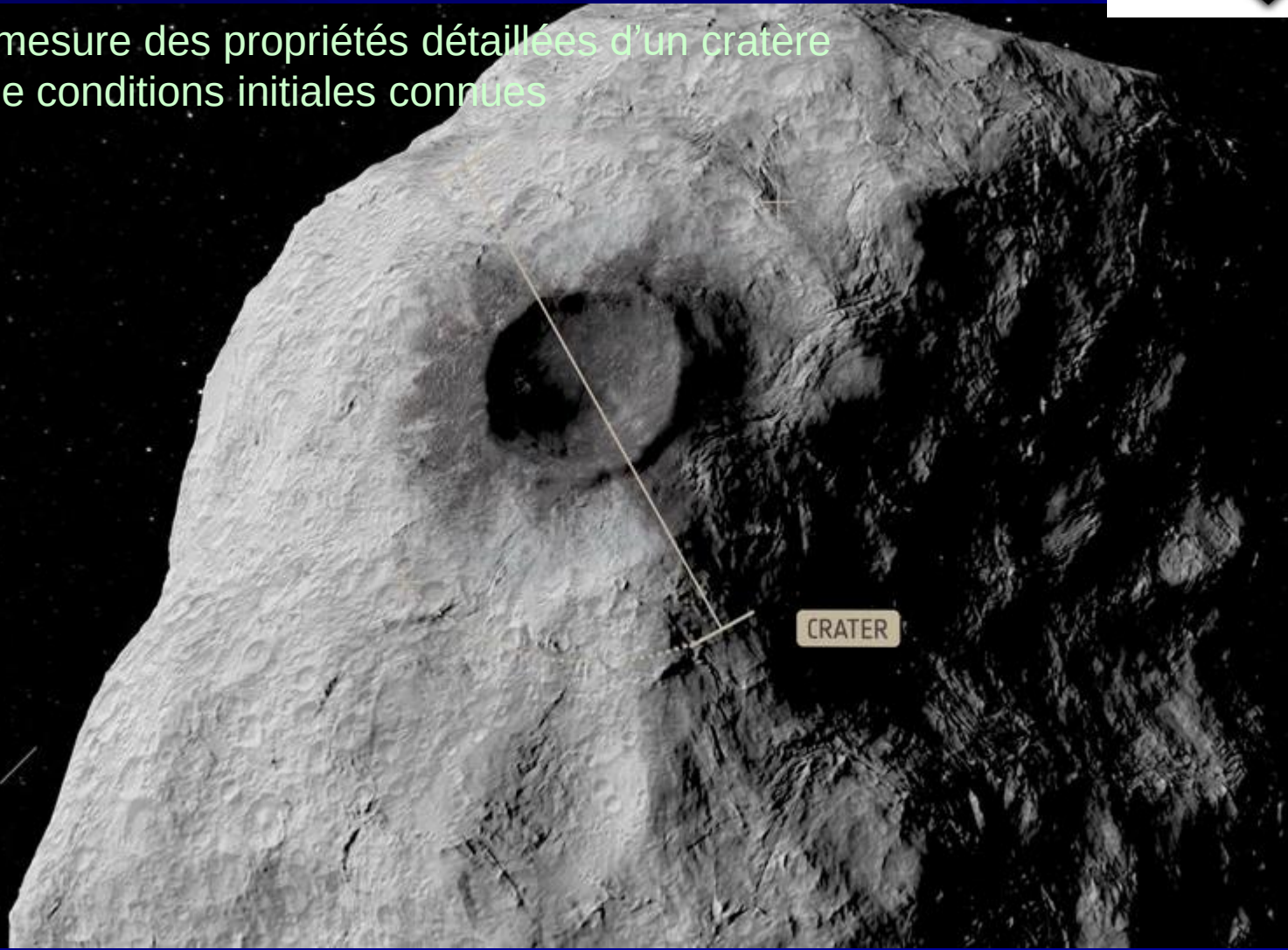


Premier test de déviation

<http://www.oca.eu/michel/AIDA/>

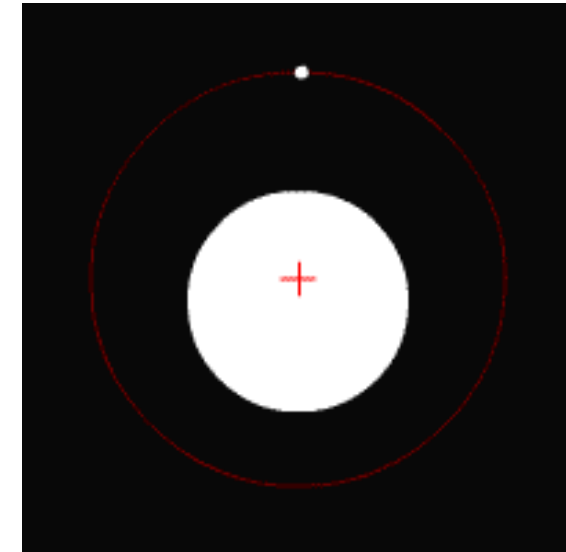
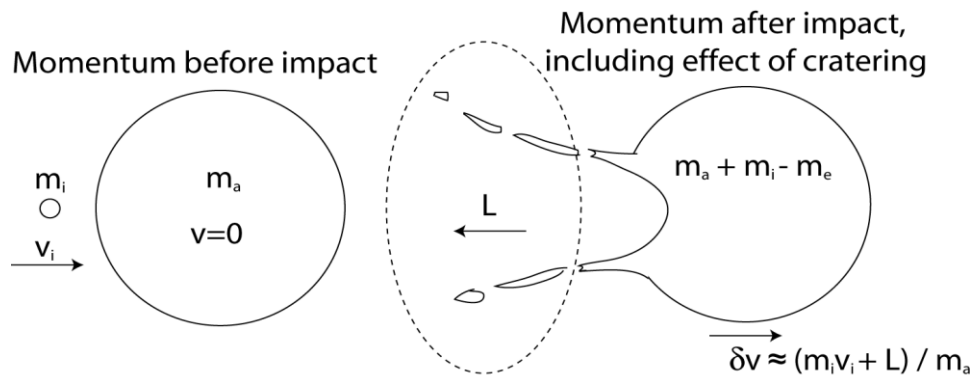


Première mesure des propriétés détaillées d'un cratère
d'impact de conditions initiales connues



1. Mesure du transfert de moment par un impacteur cinétique sur un astéroïde binaire

- Masse de l'astéroïde (*par wobble – précision d'1 m- et radioscience*)
- Propriétés dynamiques de l'astéroïdes





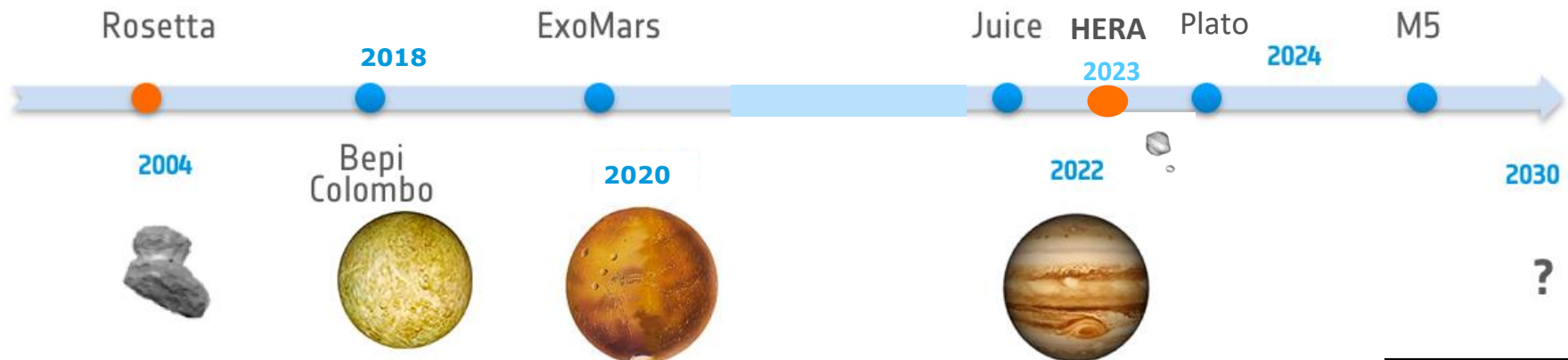
Yu&Michel 2016, 2017

Conclusion



- HERA offre un moyen robuste et pertinent du point de vu coût d'effectuer **un test de validation de défense planétaire avec un équilibre solide entre le risque et l'innovation.**
- HERA **porte l'industrie Européenne un pas en avant dans les opérations en relais de CubeSats** pour les architecture de missions futures missions (essaims en Orbite Terrestre Basse, exploration inter-planétaire).
- HERA maintient une **forte collaboration internationale** avec un programme robuste et des interfaces propres.
- HERA **avec le SCI de la JAXA validera de plus les lois d'échelles** utilisées pour les impacts à des énergies bien au-dessus de celles accessibles en laboratoire.
- HERA offre une **visibilité unique unique et un engagement du public** dans les activités spatiales.

HERA dans le contexte des missions ESA futures



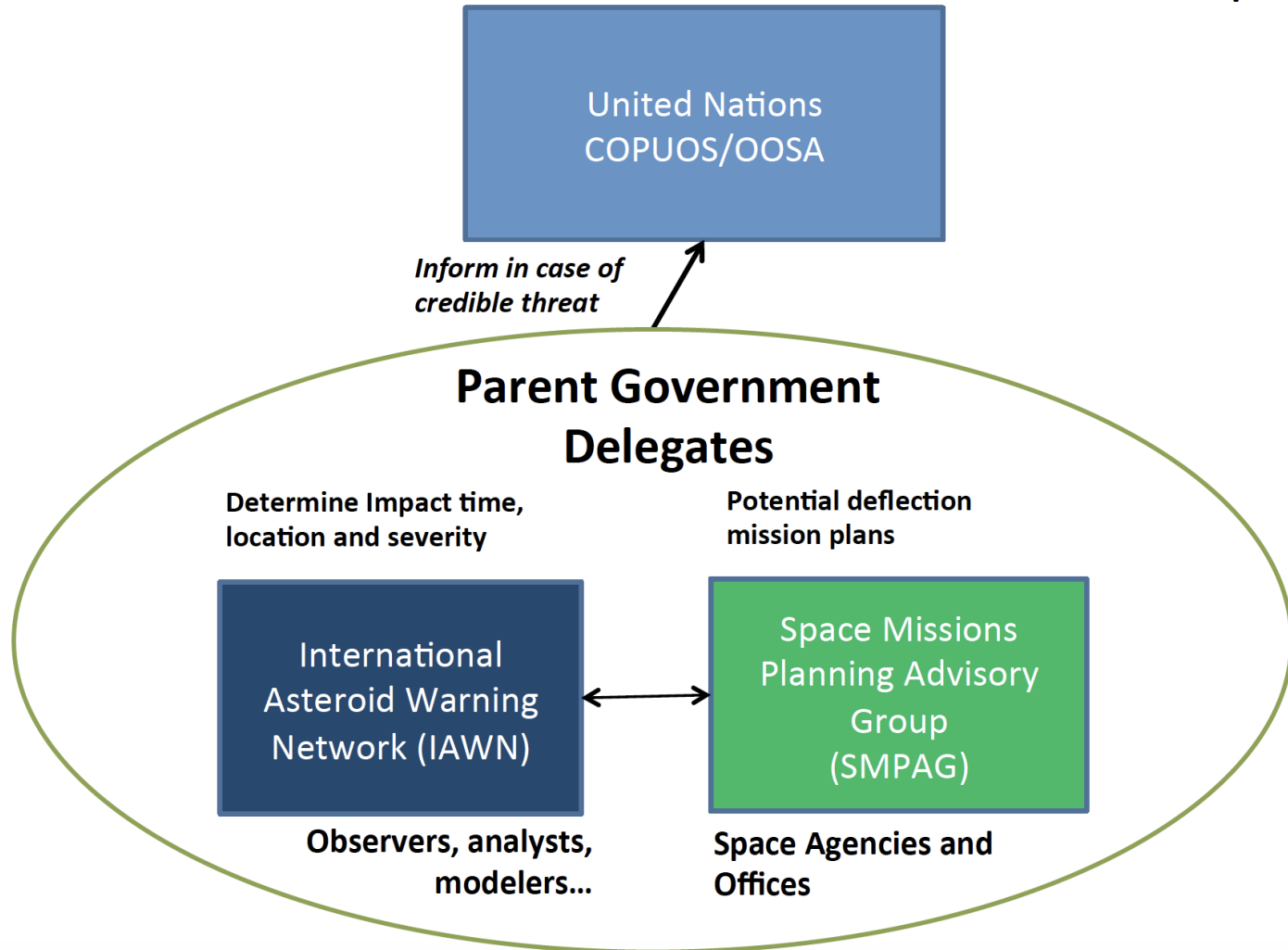
- ✦ HERA est la seule opportunité d'une mission ESA vers un petit corps et liée à la défense planétaire dans les prochains 20 ans et serait la première mission vers un petit corps après Rosetta (pour 215 M€)
- ✦ L'intérêt (média, public, communauté) est toujours au plus haut niveau
- ✦ Certains états membres de l'ESA sont toujours très motivés de la lancer, et des efforts sont en cours pour cela.
- ✦ Le DG de l'ESA la met sur la table pour le Conseil Ministériel de 2019



Coordination internationale

UN Office of Outer Space Affairs
Committee on Peaceful Uses of Outer Space

Overview for NEO
Threat Response



Pourquoi devons-nous explorer ces restes de planètes?

Les Astéroïdes et les Comètes sont NOS AMIS!

- Ils ont conservé la composition initiale du Système Solaire
 - Ils ont créé la Terre
 - Ils ont apporté l'eau et les minéraux
 - Ils ont apporté le matériel chimique
 - Ils ont tué les dinosaures !!
-



**PROBABLEMENT LE DESASTRE NATUREL LE MOINS PROBABLE
ET LE SEUL QUI PEUT ÊTRE PREDIT ET EVITE!**

SENSIBILISATION, INSPIRATION

(>500.000 results on Google for "asteroid impa



AIM sand art performance



Asteroid Day press conf



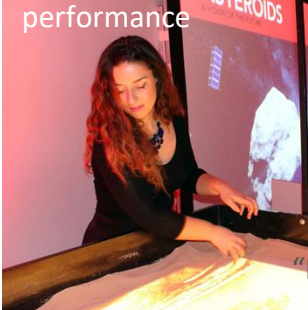
AIM @ planetarii



Astrofest (London, June 2016)



ILA (Berlin, June 2016)



"Men vs Asteroid" Discovery Channel documentary



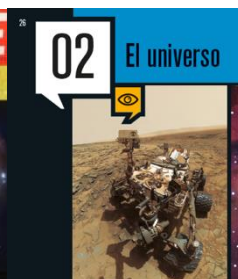
AD (Milan, 2016)



"51 Degrees North" movie



Le Bourget (Paris, June 2015)



Children's science school book (Spain)



Asteroid Day (Bucharest, 2015)

Etat de l'art concernant les astéroïdes



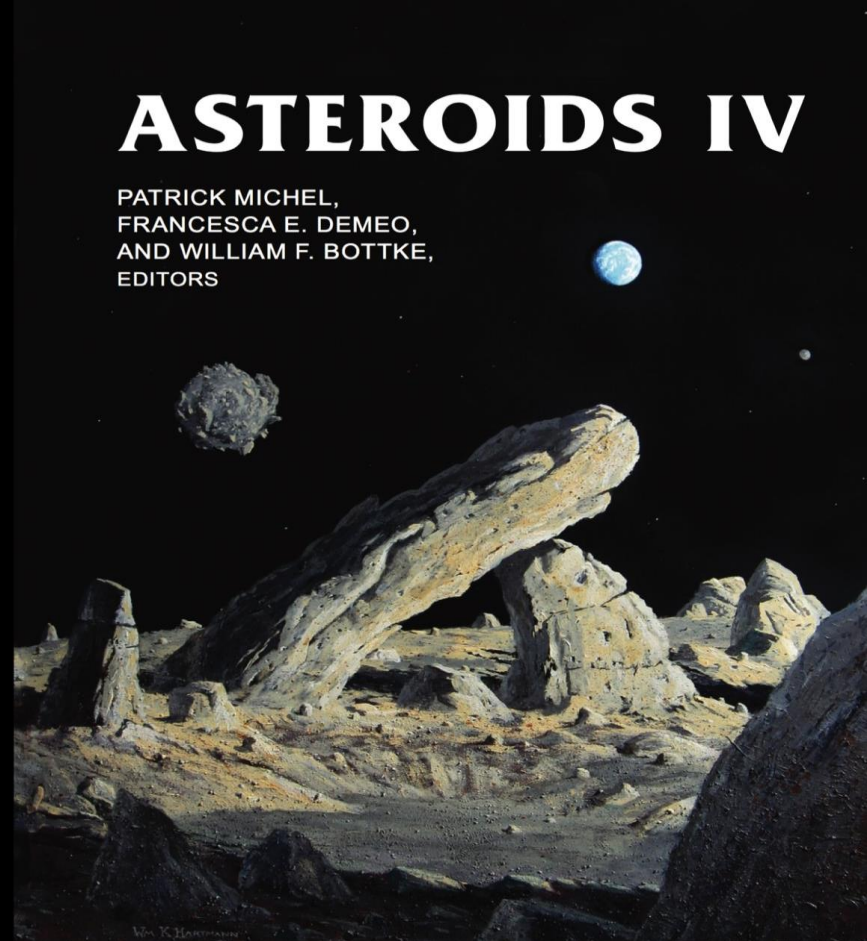
 THE UNIVERSITY OF
ARIZONA PRESS
Tucson, Arizona 85721
www.uapress.arizona.edu



MICHEL
DEMEO
BOTTKE

ASTEROIDS IV

ARIZONA
LPI



ASTEROIDS IV

PATRICK MICHEL,
FRANCESCA E. DEMEO,
AND WILLIAM F. BOTTKE,
EDITORS

Merci!

<http://www.oca.eu/michel>



Poreux versus non-poreux