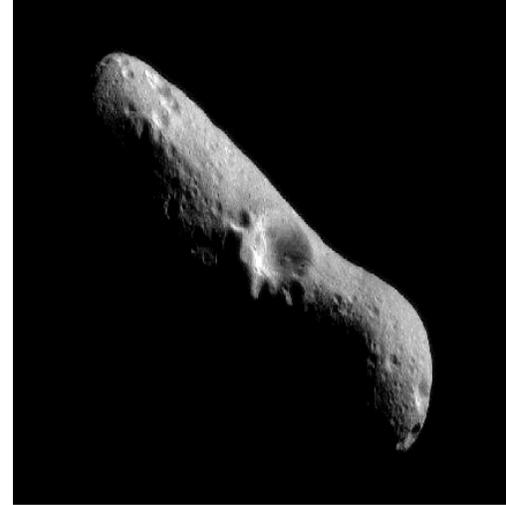


# Protection planétaire



**L'homme pourrait-il éviter que le ciel lui tombe sur la tête ?**

**Fondation Arts & Métiers  
Liancourt, le 28 mars 2015**

**Christophe Bonnal - Michel Mignot  
Jean-Yves Prado - Thierry Martin  
CNES**

**[christophe.bonnal@cnes.fr](mailto:christophe.bonnal@cnes.fr)**



*Identification de la problématique*

*Risques et conséquences*

*Typologie des Géocroiseurs*

*Actions potentielles*

*Quelques exemples de solutions*

*Exemple d'Apophis*

*Mission de démonstration*

*Questions éthiques – International*

# 1. Identification de la problématique

*Systeme solaire, petit rappel...*



*Distance Soleil – Terre = 1 UA = 1 Unité Astronomique = 150 Millions de km*

<i>Loi de Titius-Bode (1766) :</i>	0	3	(x2)	6	12	24	48	96
+4	4	7		10	16	28	52	100
/10	0,4	0,7		1,0	1,6	2,8	5,2	10,0
Distances en UA	Mercure	Venus		Terre	Mars	?	Jupiter	Saturne

*🔍 Recherche de la planète manquante : Découverte de Ceres (1801), puis Pallas, Junon, Vesta et progressivement de la ceinture d'astéroïdes*

# 1. Identification de la problématique

## Systeme solaire, petits rappels...

- **Comète** : petit corps en orbite autour du Soleil, sur des orbites très excentriques, dont le noyau contenant de la glace s'active quand la comète se rapproche du Soleil
- **Astéroïdes** : petit corps en orbite autour du soleil constitué de roches ou de métaux, de forme et taille très variable
- **Météoroïde** : se dit d'un fragment d'astéroïde ou de noyau cométaire avant sa rentrée dans l'atmosphère terrestre
- **Météore** : phénomène lumineux accompagnant la rentrée dans l'atmosphère d'un météoroïde, dû à l'échauffement lié au freinage atmosphérique
- **Bolide** : gros météoroïde traversant l'atmosphère terrestre
- **Etoile filante** : météore dû à un petit météoroïde
- **Météorite** : météoroïde qui survit à sa rentrée dans l'atmosphère et dont tout ou partie impacte la surface du globe



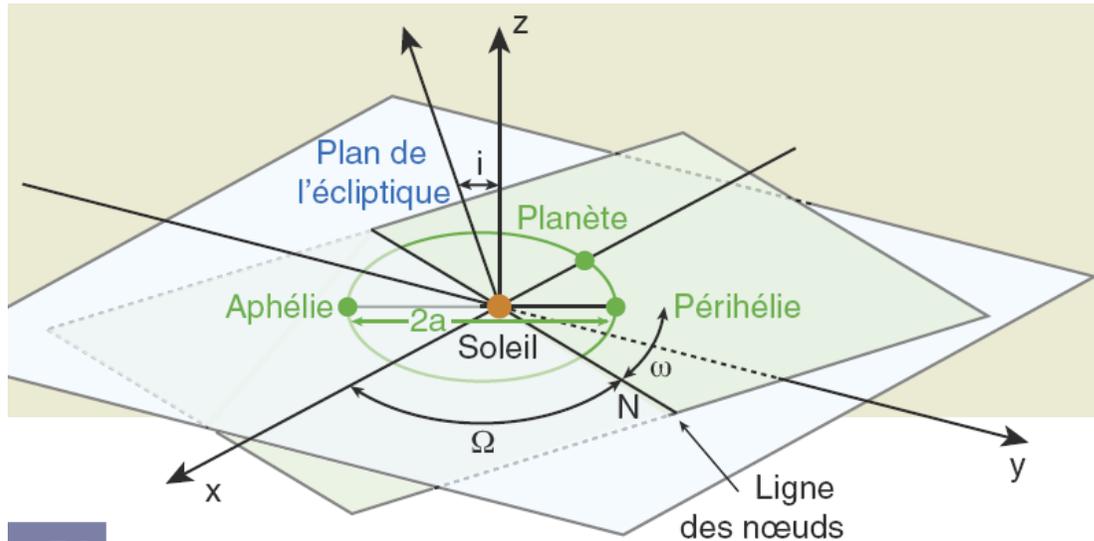
↳ **Attention** : confusion fréquente entre l'objet et le phénomène lumineux associé

Les phénomènes lumineux

Nom	Masse	Altitude	Durée
Étoile filante	ordre du g	110-80 km	1-2 s
Météore	ordre du kg	80-50 km	2-5 s
Bolide	de 0,5 à 10 T	80-13 km	5-40 s

# 1. Identification de la problématique

## Orbite d'une planète, petit rappel...



Kepler (1605) :

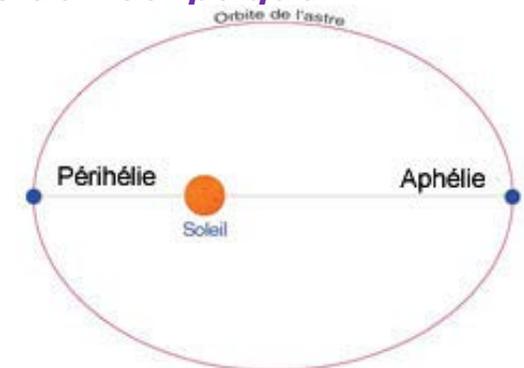
« ...alors vous voyez, l'orbite d'une planète est elliptique »

« Qu'est ce qu'une orbite ? »

« Qu'est ce qu'une planète ? »

« Que veut dire elliptique ? »

- Le plan de l'écliptique est le plan d'évolution de la Terre autour du Soleil
- Les planètes et astéroïdes se déplacent dans des plans proches de l'écliptique
- L'angle formé par ces deux plans est appelé l'inclinaison  $i$
- Les planètes et astéroïdes suivent des orbites elliptiques
- Le point le plus loin du Soleil s'appelle l'Aphélie
- Le point le plus près du Soleil s'appelle le Périhélie
- La distance Aphélie-Périhélie s'appelle le grand axe

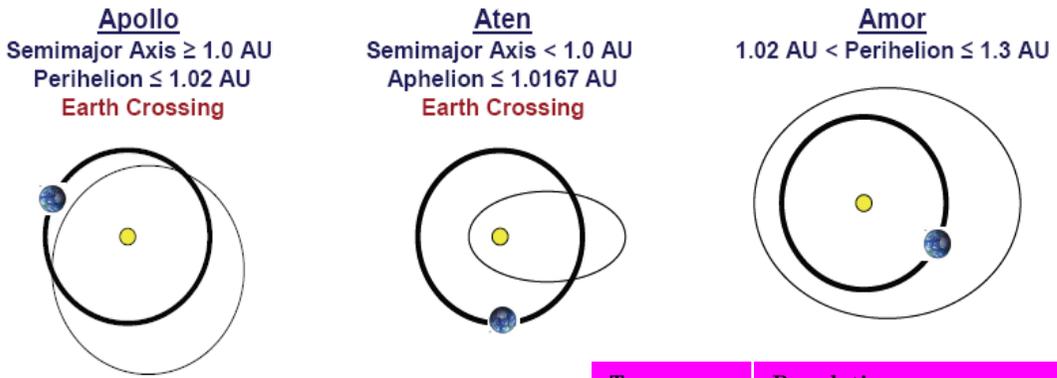


# 1. Identification de la problématique

De nombreux objets célestes, astéroïdes ou comètes, viennent fréquemment à proximité de la Terre

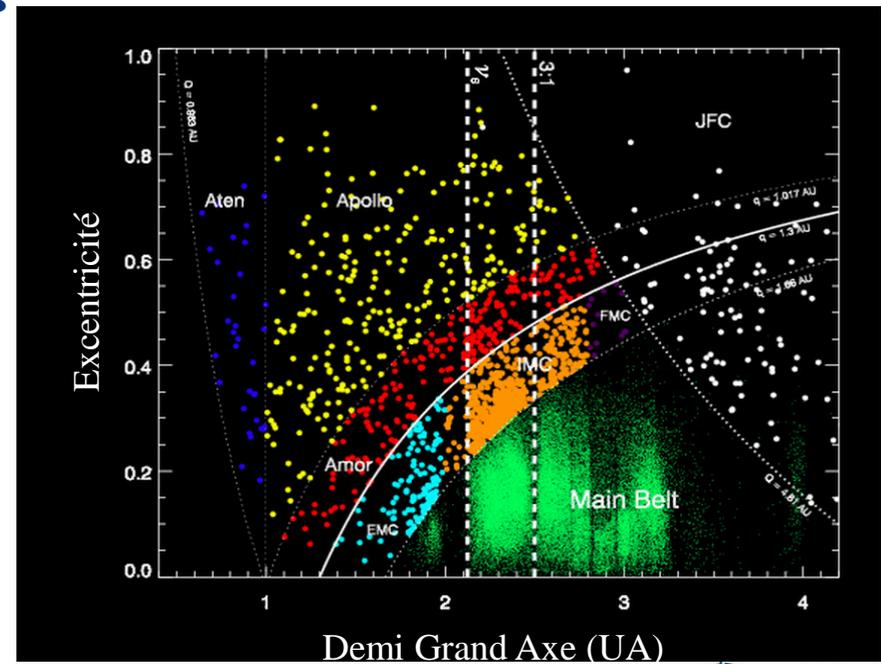
- Géocroiseurs : demi grand axe < 1,3 UA ( $\equiv$  Rayon < 1,3 Distance Soleil-Terre soit 195 Mkm)
- Astéroïde potentiellement dangereux : risque de collision
  - ↳ Combinaison demi grand axe – excentricité menant à une collision possible

↳ 80 % Astéroïdes, 20 % Comètes  
 → Classification des astéroïdes en 4 catégories



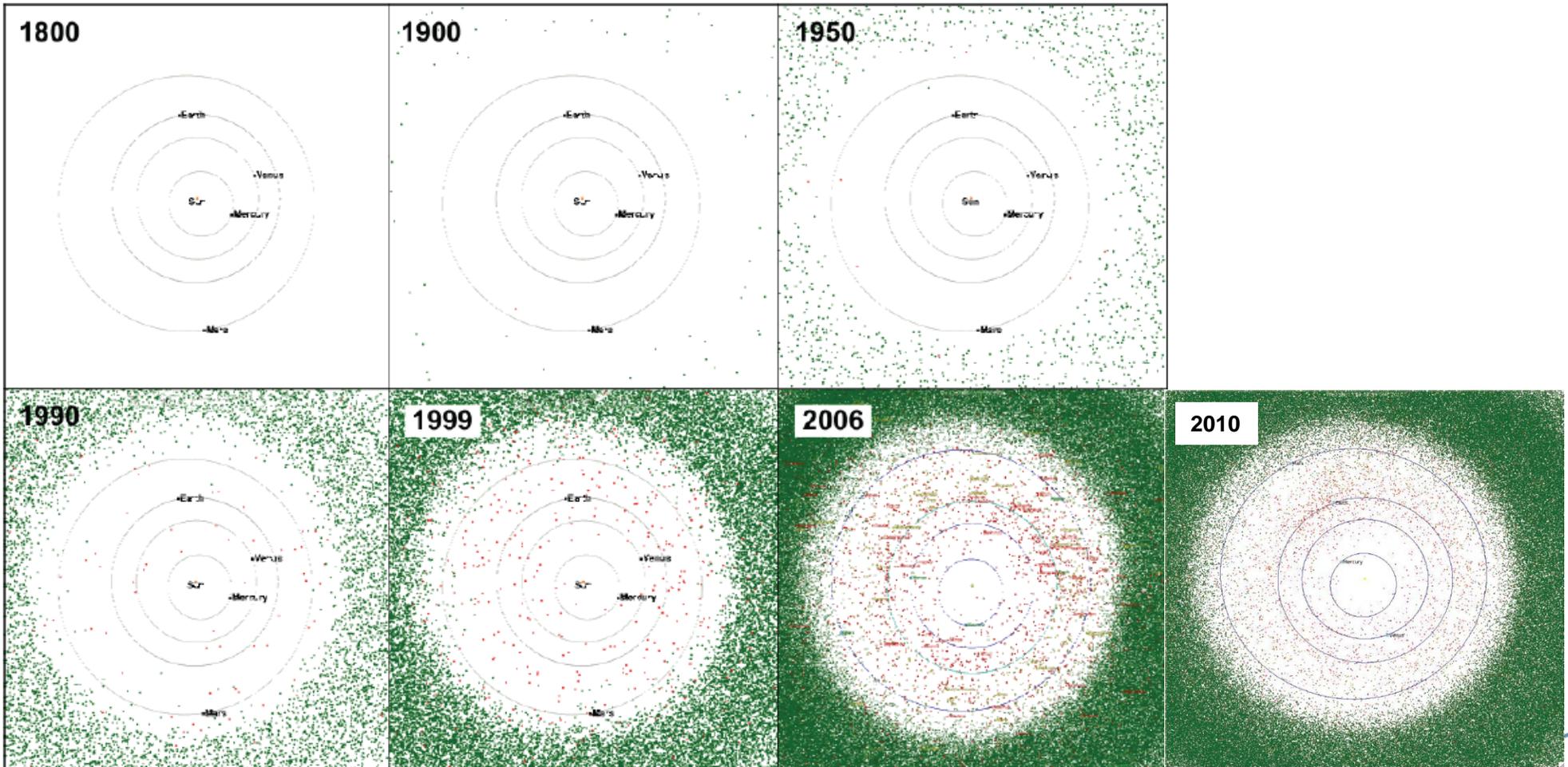
**Inner Earth Objects (IEOs)**  
 Aphelion < 0.983 AU  
 Always inside Earth's orbit  
 (aka Apohele)

Type	Population
Apollo	62% des géocroiseurs connus
Aten	6% des géocroiseurs connus
Amor	32% des géocroiseurs connus
Atira	6 astéroïdes connus



# 1. Identification de la problématique

Notre connaissance de ces objets évolue rapidement



# 1. Identification de la problématique

## Connaissance accrue avec les programmes récents d'observation

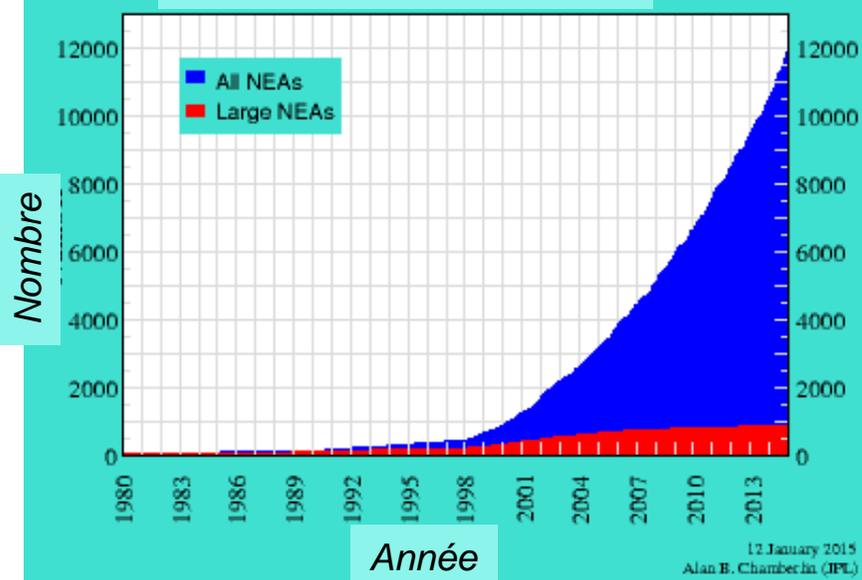
↪ Quelques programmes dédiés :

- Linear (USA) : 2 télescopes de 1 m
- Neat, LONEOS, Catalina, PAN-Starrs...

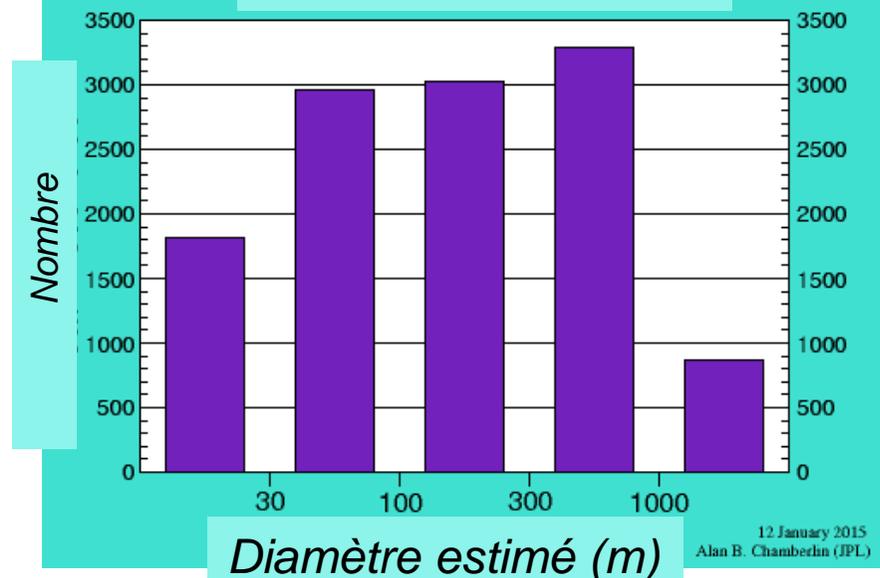
⇒ Limite actuelle de détection systématique  $\cong$  1 km



### Géocroiseurs connus



### Géocroiseurs connus



# 1. Identification de la problématique

## Connaissance accrue avec les programmes récents d'observation

↪ Environ 100.000 astéroïdes ont un nom !

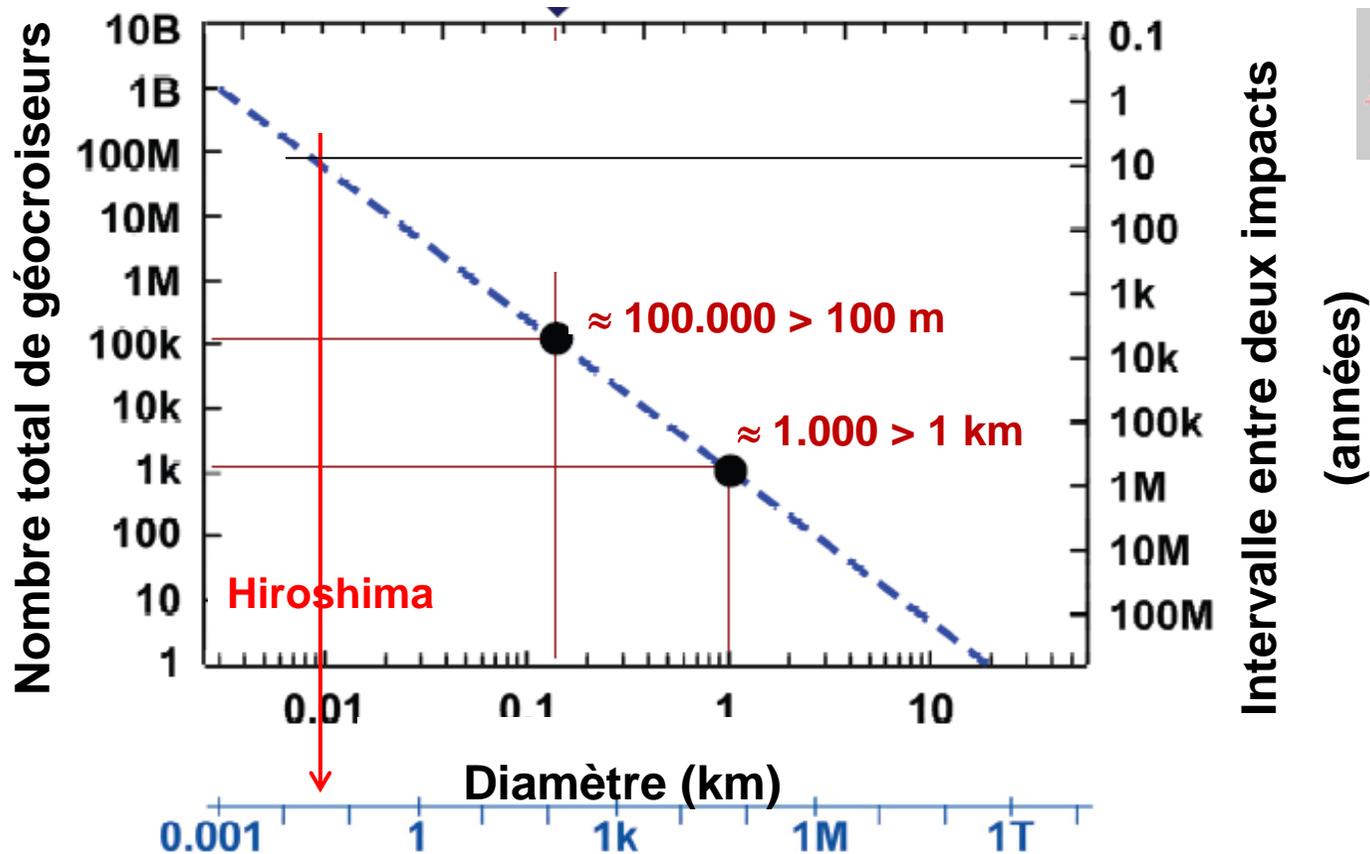
⇒ 12.435 Géocroiseurs connus, dont 1.564 potentiellement dangereux !

Taille	Connus	Estimés
< 30 m	1.500	> 8 Millions
30 – 100 m	2.500	1 Million
100 – 300 m	2.700	100.000
300 – 1000 m	3.100	15.000
> 1000 m	911 ± 17	981 ± 19

## 2. Risques et Conséquences

Nombre, donc probabilité d'impact, décroissant avec la taille  
Conséquence, énergie d'impact, croissante avec la taille

*Energie cinétique, petit rappel...  $E = \frac{1}{2}.M.V^2$*

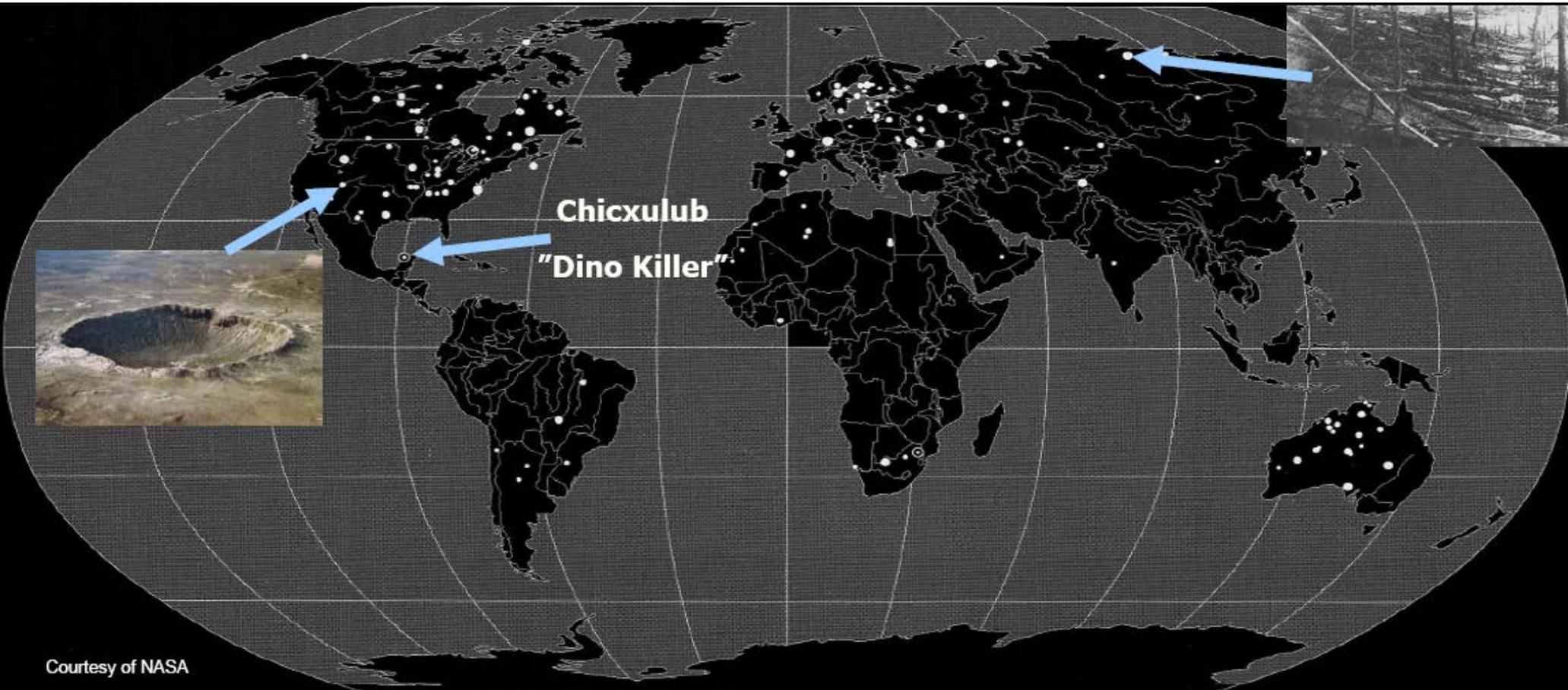


**Energie d'impact (Méga Tonne TNT)**

## 2. Risques et Conséquences

Quelques exemples :

- Traces visibles : Plus de 140 impacts identifiés sur Terre



Courtesy of NASA

## 2. Risques et Conséquences

### Quelques exemples :

- Très petit : Nombreux exemples → Pas de victimes
- ↳ Taille < 10 m, Fréquence 1 par an à 1 par semaine

#### Record meteorite hit Norway

As Wednesday morning dawned, northern Norway was hit with an impact comparable to the atomic bomb used on Hiroshima. At around 2:05 a.m. on Wednesday,

residents of the northern part of Troms and the western areas of Finnmark could clearly see a ball of fire taking several seconds to travel across the sky.

A few minutes later an impact could be heard and geophysics and seismology research foundation NORGAR registered a powerful sound and seismic disturbances at 02:13.25 a.m. at their station in Karasjok.

Farmer Peter Bruvold was out on his farm in Lyngseldet with a camera because his mare Virika was about to foal for the first time.

"I saw a brilliant flash of light in the sky, and this became a light with a tail of smoke," Bruvold told *Aftenposten.no*. He photographed the object and then continued to tend to his animals when he heard an enormous crash.

"I heard the bang seven minutes later. It sounded like when you set off a solid charge of dynamite a kilometer (0.62 miles) away," Bruvold said.

Astronomers were excited by the news.

"There were ground tremors, a house shook and a curtain was blown into the house," Norway's best known astronomer Knut Jørgen Røed Ødegaard told *Aftenposten.no*.

Røed Ødegaard said the meteorite was visible to an area of several hundred kilometers despite the brightness of the midnight sunlit summer sky. The meteorite hit a mountainside in Reisdalen in North Troms.

"This is simply exceptional. I cannot imagine that we have had such a powerful meteorite impact in Norway in modern



Peter Bruvold witnessed the meteorite streaking across the night sky.

PHOTO: PETER BRUVOLD



The map shows the meteorite's direction of fall (the arrow) and the possible impact area over Troms and Finnmark counties.

RELATED STORIES:

[Astronomer seeks clues for meteorite fall](#) - 15.08.2008

**Energie d'impact comparable à Hiroshima**

- "From 1975 to 1992, nuclear detonation detecting satellites recorded 136 atmospheric blasts in the megatons-of-TNT range." *Airpower Journal, Summer 1997*

#### Météorite de Sikhote-Aline (12 février 1947)

- Sidérite de 6 à 7 m de diamètre à 14 km/s
- Energie 10 à 20 kt TNT ≡ Hiroshima
- Plus de 20 tonnes récupérés au sol

#### Météorite des Sulawesi (8 octobre 2009)

- Environ 5 à 10 m de diamètre à 20 km/s
- Energie 50 kt TNT ≡ 3 Hiroshima
- 1 victime (à confirmer)

Etc...

## 2. Risques et Conséquences

### Quelques exemples :

- Petit : Quelques exemples → Rares victimes

↳ Taille 10 à 50 m, Fréquence 1 par siècle

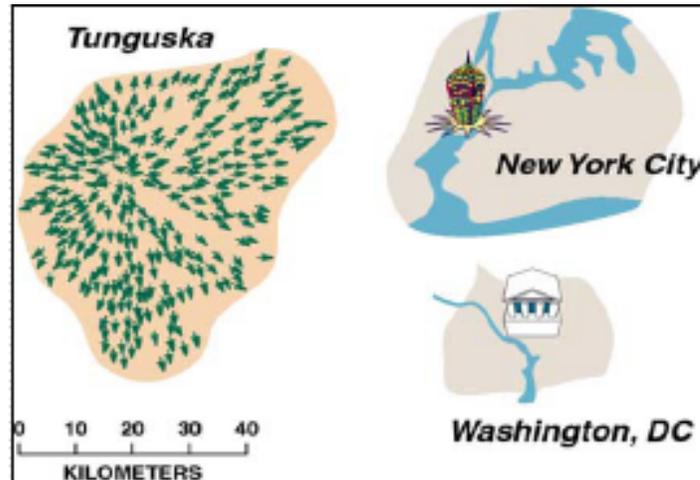
. Meteor Crater (USA)

→ 45 m de diamètre ⇒ Cratère de 1,2 km de diamètre

. Tunguska (Sibérie 1908)

→ Explosion d'un objet de 25 m à 60 km d'altitude

⇒ 10 à 15 Mt TNT, 2000 km<sup>2</sup> détruits, 2 morts



## 2. Risques et Conséquences

### Quelques exemples :

- Petit : Quelques exemples → Rares victimes
- . Météorite du Nicaragua le 8 septembre 2014
  - Associée à 2014RC : taille 12 à 22 m – Cratère de 12 m de diamètre
- . Météorite de Tcheliabinsk (Russie) le 15 février 2013
  - Environ 17 m de diamètre  $\equiv$  7.000 tonnes à 18 km/s  $\equiv$  65.000 km/h
  - ↳ Energie cinétique  $10^{15}$  J  $\equiv$  300.000 tonnes TNT  $\equiv$  20 fois Hiroshima
  - ⇒ 1.600 blessés, 100.000 m<sup>2</sup> de vitres brisées
  - En même temps que le frôlement de 2012-DA14



Tcheliabinsk



Simulation Boslough

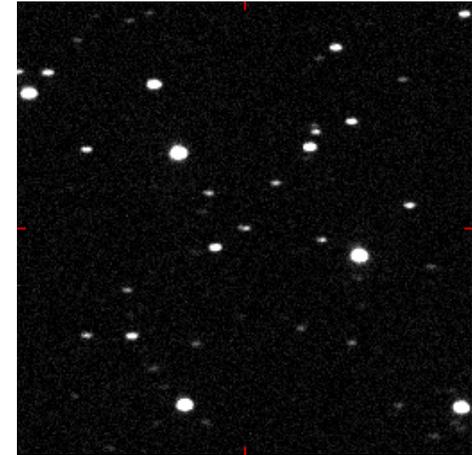
## 2. Risques et Conséquences

### Quelques exemples :

#### - Moyen : Quelques exemples

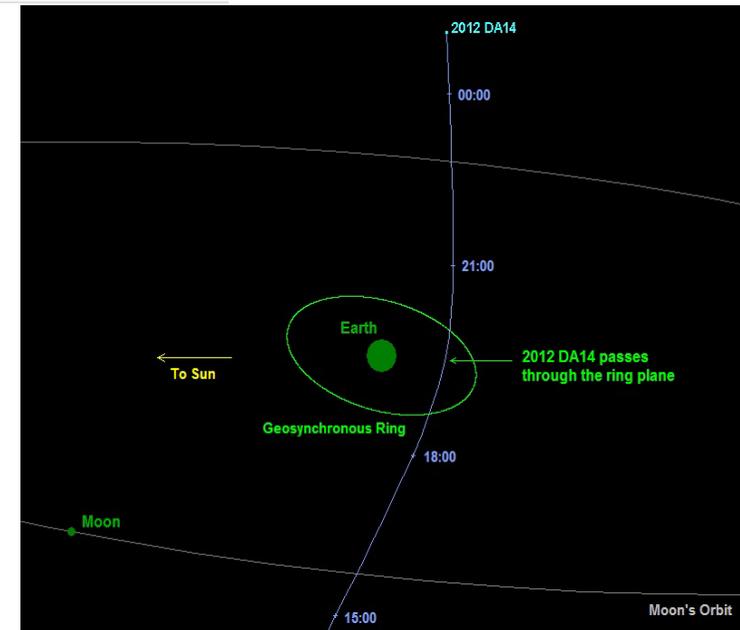
- ↪ Taille > 50 m : pas d'impact récent enregistré
- ↪ Nombreux « frôlements »

- **March 1992:** 170-300 m comet passed within 20,000 km (~1 Earth diameter) of Earth. KE content estimated at **15000 MT** of TNT
- **July 24, 2002:** "An asteroid discovered just weeks ago has become the most threatening object yet detected in space. A preliminary orbit suggests that 2002 NT7 is on an impact course with Earth and could strike the planet on 1 February, 2019 - although the uncertainties are large." *BBC News*



#### Astéroïde 2012-DA14 (15 février 2013)

- Géocroiseur de 45 m de diamètre à 7,8 km/s
  - ↪ 135.000 tonnes à 28.000 km/h
- Passage à 28.160 km de la Terre, au dessus de l'Indonésie
- Découvert en février 2012 seulement !
- Modification de l'orbite par l'influence de l'attraction terrestre
  - ↪ Période : 368 j → 317 j



## 2. Risques et Conséquences

### Quelques exemples :

- Très gros : Chicxulub → Extinction des dinosaures, impact KT (Yucatan, 65 Million d'années)
- ↪ Taille > 10 km, Fréquence 100 Millions d'années

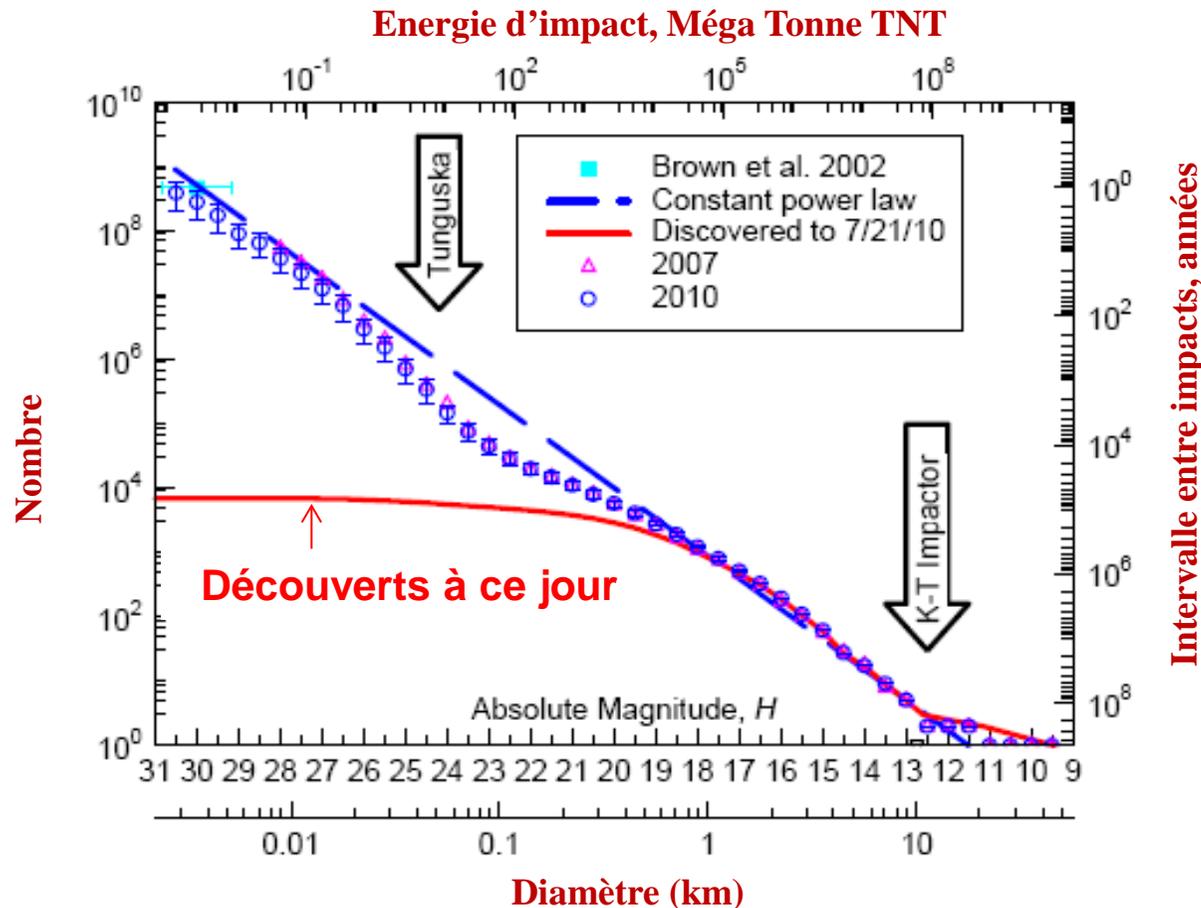


*Dieu au stand de lancement d'astéroïdes :  
« Je pense que je vais donner une nouvelle  
chance aux dinosaures... »*

## 2. Risques et Conséquences

### Problème de détectabilité :

- Difficultés actuelles pour détecter les géocroiseurs de moins de 300 m



Programme US actuel pour détecter tout objet > 140 m

⇒ Objectif > 90 % d'ici 2020

## 2. Risques et Conséquences

### Relation Taille – Nombre de victimes - Fréquence

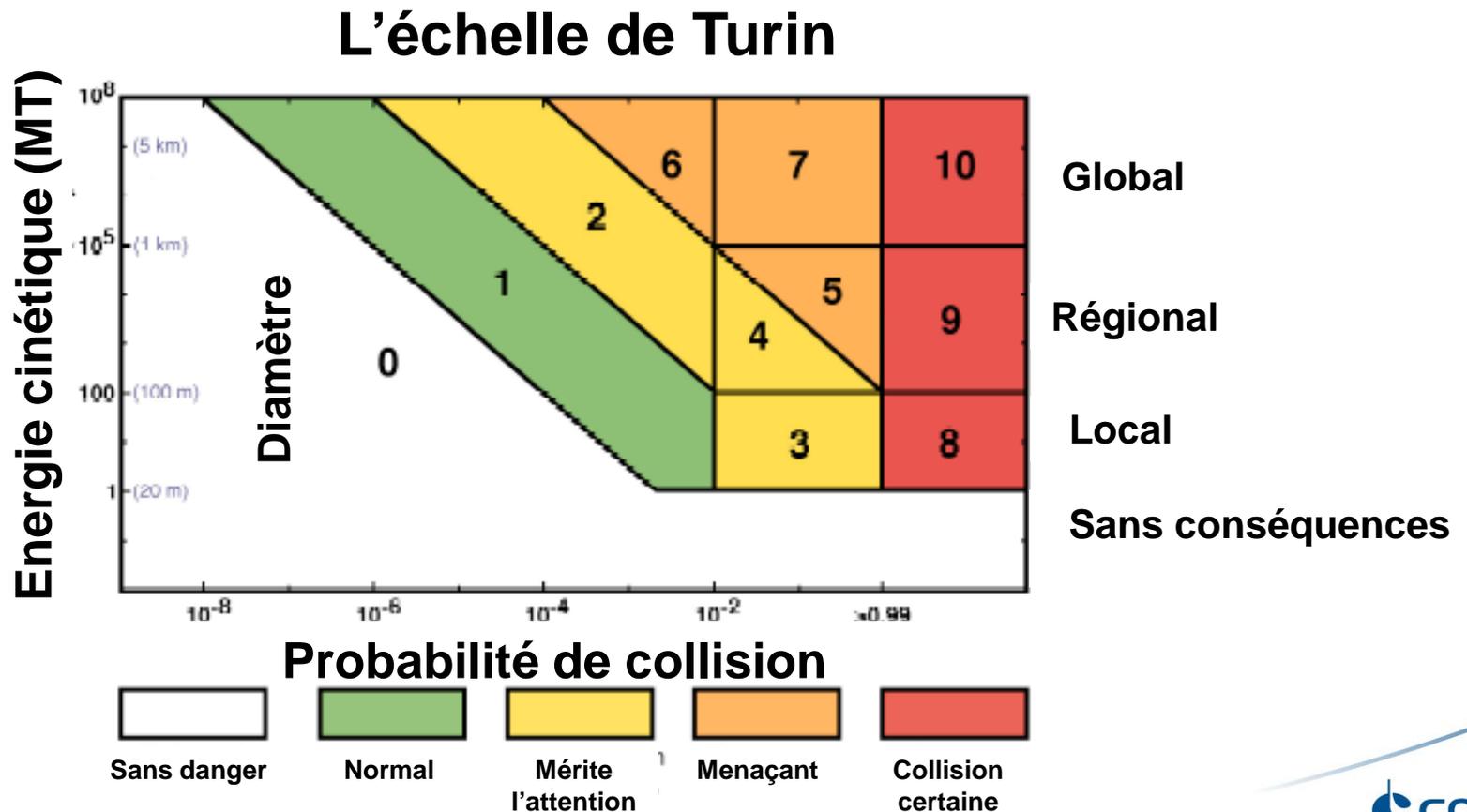
Type d'évènement	Diamètre	Nombre de victimes	Intervalle d'impact (années)
Fragmentation à haute altitude	< 50 m	≈ 0	Annuel
Type Tunguska	> 50 m	≈ 5.000	200-500
Régional	> 140 m	≈ 50.000	5.000
Supra-régional	> 300 m	≈ 500.000	25.000
Sub-global	> 600 m	> 5 Millions	70.000
Global	> 1 km	> 1 Milliard	1 million
Supra-global	> 5 km	> 2 Milliards	6 millions
Extinction globale	> 10 km	> 7 Milliards...	100 millions

**Principale zone d'intérêt pour nous : 50 à 300 m**  
(détectable et pas trop peu fréquent)

## 2. Risques et Conséquences

### Échelle de Turin (NASA) :

- ↳ Approche « Analyse de Risques » classique
  - ⇒ Combinaison probabilité – conséquence
  - ⇒ Conséquence = Energie cinétique (masse, vitesse)



## 2. Risques et Conséquences

### Échelle de Turin (NASA) :

↳ **Aucun objet supérieur à Niveau 0 aujourd'hui, mais seuls 20% d'objets > 300 m identifiés à ce jour !**  
(extrait du catalogue NASA sur la toile)



Objets observés récemment

Object Designation	Year Range	Potential Impacts	Impact Prob. (cum.)	$V_{\infty}$ (km/s)	H (mag)	Est. Diam. (km)	Palermo Scale (cum.)	Palermo Scale (max.)	Torino Scale (max.)
2015 DA54	2107-2107	1	2.6e-07	23.13	20.8	0.240	-4.51	-4.51	0
2015 FE35	2096-2096	2	1.9e-08	25.21	19.3	0.470	-4.84	-5.13	0
2015 FN36	2100-2113	3	1.4e-06	22.14	23.7	0.061	-5.22	-5.57	0
2015 FF37	2038-2111	9	7.1e-09	9.21	19.1	0.510	-5.28	-5.43	0
2015 EO	2050-2077	8	6.7e-06	14.24	26.6	0.016	-5.91	-6.14	0
2015 BF511	2057-2103	6	6.4e-05	9.88	28.7	0.006	-6.09	-6.19	0

Objets non observés récemment

Object Designation	Year Range	Potential Impacts	Impact Prob. (cum.)	$V_{\infty}$ (km/s)	H (mag)	Est. Diam. (km)	Palermo Scale (cum.)	Palermo Scale (max.)	Torino Scale (max.)
410777 (2009 FD)	2185-2196	5	2.9e-03	15.87	22.1	0.470	-0.40	-0.44	(*)
101955 Bennu (1999 RQ36)	2175-2199	78	3.7e-04	5.99	20.2	0.490	-1.71	-2.32	(*)
29075 (1950 DA)	2880-2880	1	5.0e-05	14.10	17.6	1.300	-1.81	-1.81	(*)
2007 VE191	2015-2026	2	1.6e-05	16.91	23.7	0.063	-2.47	-2.47	0
2001 VB	2023-2037	3	1.4e-07	35.49	18.3	0.749	-2.69	-2.77	0
2001 QJ96	2044-2053	8	3.0e-05	24.99	22.2	0.121	-2.70	-2.74	0
1979 XB	2056-2113	4	9.7e-07	23.62	18.6	0.656	-2.76	-3.08	0
99942 Apophis (2004 MN4)	2060-2105	12	8.9e-06	5.85	19.1	0.370	-2.83	-2.93	0



« En raison d'un changement d'orbite, l'astéroïde géant qui devait nous impacter aujourd'hui n'est plus attendu avant Lundi. Les marchés ont réagi favorablement à cette nouvelle... »

# 2. Risques et Conséquences

## Approches et frôlements très fréquents :

↳ Passage quasi-quotidien d'un objet de plus de 20 m à une distance inférieure à 50 fois la distance Terre – Lune (LD)



### Observations récentes

#### RECENT CLOSE APPROACHES TO EARTH

1 AU = ~150 million kilometers

1 LD = Lunar Distance = ~384,000 kilometers

Object Name	Close Approach Date	CA Distance* (AU)	CA Distance* (LD)	Estimated Diameter**	H (mag)	Relative Velocity (km/s)
(2015 EF7)	2015-Mar-23	0.0402	15.6	37 m - 84 m	24.3	5.19
(2015 FJ35)	2015-Mar-24	0.1573	61.2	39 m - 86 m	24.2	12.40
(2015 FN34)	2015-Mar-25	0.0206	8.0	12 m - 27 m	26.7	11.49
(2015 FL35)	2015-Mar-25	0.0261	10.2	37 m - 83 m	24.3	13.75
(2015 FV117)	2015-Mar-25	0.0962	37.4	99 m - 220 m	22.1	19.91
(2015 FA117)	2015-Mar-25	0.1452	56.5	49 m - 110 m	23.7	15.98
(2015 FP33)	2015-Mar-26	0.0485	18.9	29 m - 65 m	24.8	27.63
(2015 FX33)	2015-Mar-26	0.0354	13.8	18 m - 40 m	25.9	5.53
(2015 FC)	2015-Mar-26	0.0074	2.9	12 m - 28 m	26.7	7.44
325102 (2008 EY5)	2015-Mar-26	0.0823	32.0	250 m - 570 m	20.1	13.81

\* Close Approach (CA) Distance is the distance between the Earth center and asteroid center.

\*\* Diameter estimates based on the object's absolute magnitude.

### Prévisions à court terme

#### UPCOMING CLOSE APPROACHES TO EARTH

1 AU = ~150 million kilometers

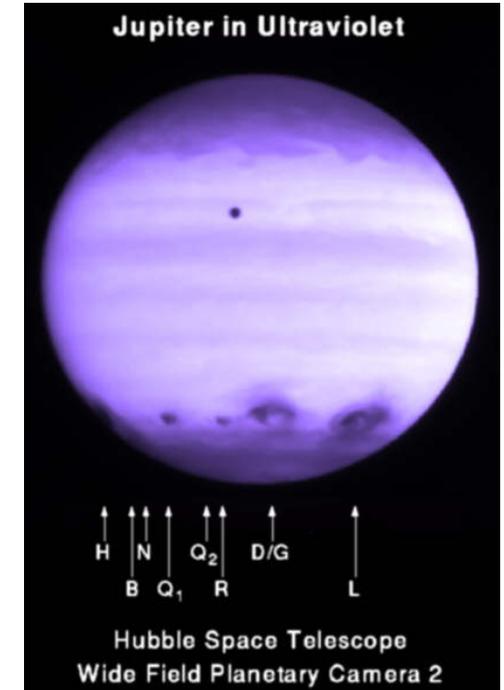
1 LD = Lunar Distance = ~384,000 kilometers

Object Name	Close Approach Date	CA Distance* (AU)	CA Distance* (LD)	Estimated Diameter**	H (mag)	Relative Velocity (km/s)
(2014 YB35)	2015-Mar-27	0.0299	11.6	440 m - 990 m	18.9	10.16
(2015 FH37)	2015-Mar-27	0.0229	8.9	28 m - 63 m	24.9	18.99
(2015 FM118)	2015-Mar-28	0.0024	0.9	5.0 m - 11 m	28.6	8.83
(2015 FP)	2015-Mar-28	0.0248	9.6	25 m - 55 m	25.1	7.49
(2015 FF36)	2015-Mar-28	0.0091	3.5	14 m - 31 m	26.4	8.81
(2002 EX8)	2015-Mar-28	0.1120	43.6	190 m - 430 m	20.7	17.57
429094 (2009 SG2)	2015-Mar-28	0.1141	44.4	250 m - 570 m	20.1	15.81
(2015 FT117)	2015-Mar-28	0.0072	2.8	5.4 m - 12 m	28.5	10.53
(2015 FP34)	2015-Mar-30	0.0847	33.0	31 m - 68 m	24.7	9.47
(2004 MO3)	2015-Mar-31	0.1840	71.6	97 m - 220 m	22.2	8.28
(2008 EP)	2015-Apr-01	0.1808	70.4	38 m - 86 m	24.2	9.57
(2014 QD364)	2015-Apr-01	0.0680	26.5	9.7 m - 22 m	27.2	2.33
(2015 FW117)	2015-Apr-01	0.0092	3.6	71 m - 160 m	22.9	18.76
162080 (1998 DG16)	2015-Apr-01	0.1901	74.0	280 m - 620 m	19.9	11.15
(2015 FC34)	2015-Apr-01	0.0649	25.3	66 m - 150 m	23.0	15.83
(2013 PY38)	2015-Apr-02	0.1605	62.5	31 m - 68 m	24.7	3.26
(2015 CW13)	2015-Apr-03	0.0348	13.5	67 m - 150 m	23.0	5.75
(2015 DG155)	2015-Apr-03	0.1123	43.6	190 m - 430 m	20.7	17.57

## 2. Risques et Conséquences

### Impact sur d'autres planètes :

- La Terre n'est bien sûr pas la seule planète menacée
- Impact de la comète Shoemaker-Lévy 9 sur Jupiter en Juillet 1994



- Impact récent sur Mars et frôlement il y a un mois...

Exemple en 2012

Cratère 30 m

Image NASA-JPL MRO



### 3. Typologie des Géocroiseurs

#### Bestiaire très varié !

La structure interne d'un astéroïde ou d'une comète a une forte influence sur sa cohésion et sa densité, donc sur sa masse.

*Albedo\* = Pouvoir réfléchissant*

Type S: semblables à des chondrites ordinaires ; albedo\* élevé,  
densité moyenne =  $2500 \text{ kg/m}^3$

Type C: semblables à des chondrites carbonées ; albedo élevé,  
densité moyenne =  $1200 \text{ kg/m}^3$

Comètes : densités potentiellement bien plus faibles – 67P  $\approx 400 \text{ kg/m}^3$



↳ Les solutions de protection dépendent fortement de la nature des objets

# 3. Typologie des Géocroiseurs

Quelques exemples (*pas géocroiseurs !*) :



Release 051101-2 ISAS/JAXA  
Figure 3-5: Asteroid Itokawa imaged by the Hayabusa spacecraft  
(Credit and Copyright: ISAS/JAXA)

**Itokawa = Assemblage**  
**Densité 2,6**



Figure 3-6: Close-up image of Itokawa prior to landing  
(Credit and Copyright: ISAS/JAXA)



**Mathilde = Poreux**  
**Densité 1,3**

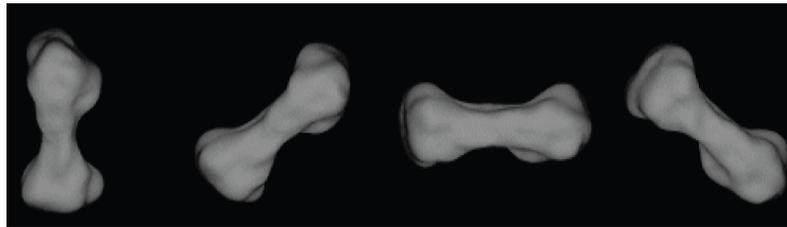


Figure 69. Radar Observations of Asteroid (216) Kleopatra

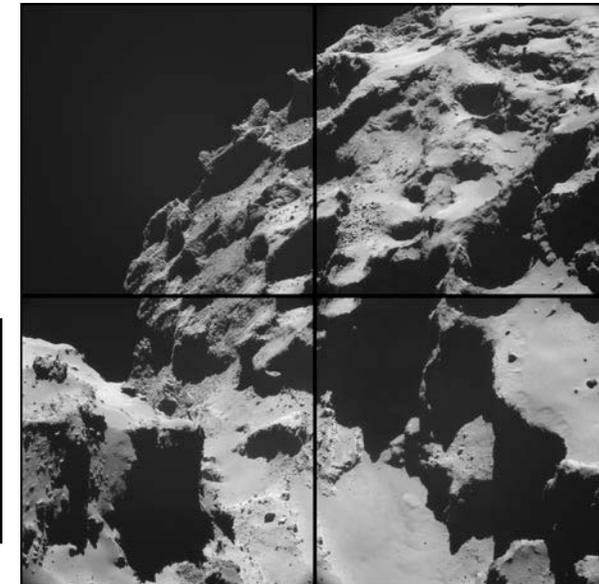
**Cléopâtre = Osseux**

*Crédit : Steve Ostro - JPL*



Figure 3-7: The asteroid Eros (Credit: NEAR Project, JHU APL, NASA)

**Eros = Fracturé**  
**Densité 2,5**



**67P = Assemblage ?**

*Crédit : ESA* **Densité 0,4**

# 4. Actions potentielles

## Déviations : approche simpliste pour ordres de grandeur

$\Delta V^*$  = *Incrément de vitesse*

- Un  $\Delta V$  appliqué à l'Aphélie augmente le Périhélie
- Et vice versa...

### Exemple :

$\Delta V^*$  appliqué :

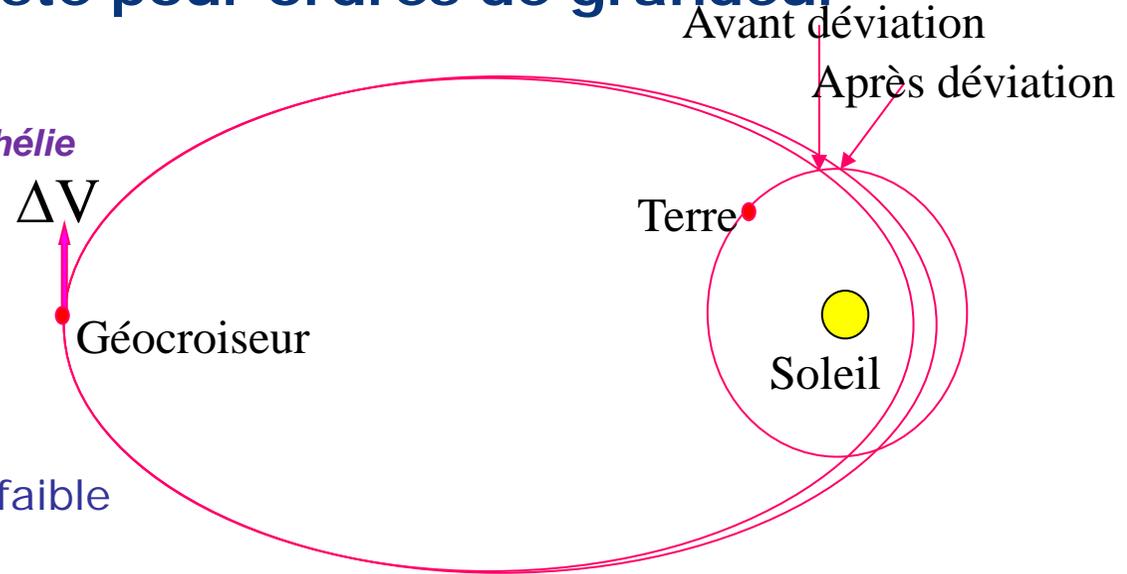
- . Impulsionnel à l'aphélie ou
- . Intégration longue d'une accélération faible

### Critère d'évitement de la Terre :

- . Par exemple, évitement de 10 diamètres Terrestres (127.000 km)  
(en réalité, plus complexe : probabilité de collision < seuil)

### Déviations = combinaison de :

- . Modification des paramètres orbitaux (distances)
- . Modification des dates de passage (temps) en tenant compte du déplacement de la Terre autour du Soleil (30 km/s)



## 4. Actions potentielles

### Déviations : approche simpliste pour ordres de grandeur

#### Exemple :

**Géocroiseur :** Aphélie = 10 UA  
Périhélie = 0,5 UA  $\Rightarrow$  Période 12 ans

**$\Delta V$  appliqué :** 1 m/s en impulsif à l'Aphélie

. Faible modification du Périhélie : + 54.000 km

. Retard de passage à 1 UA : + 9.760 s = 2,7 heures  $\cong$  +292.800 km

$\hookrightarrow$  Déviation résultante : 23 Diamètres Terrestres



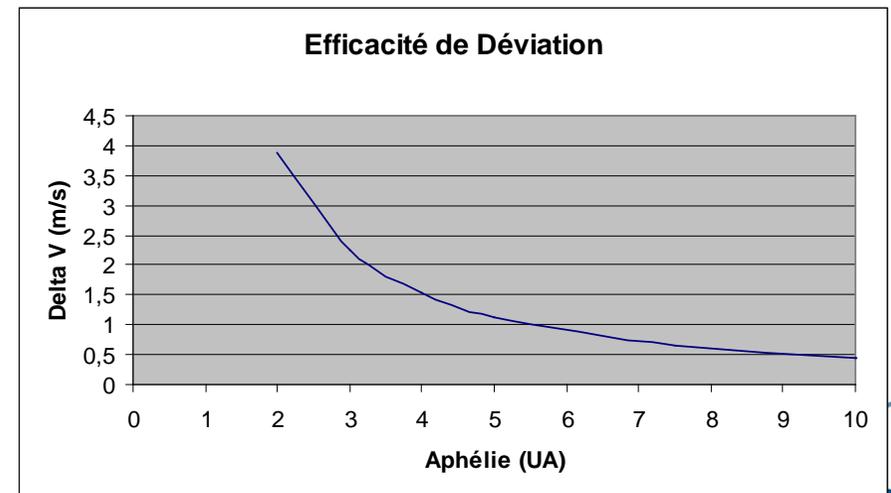
*Crédit : ESA*

#### Critère d'évitement :

10 Diamètres Terrestres

$\hookrightarrow \Delta V$  requis  $\cong$  0,5 m/s

**Nota :** le  $\Delta V$  croit très fortement quand l'Aphélie diminue !



## 4. Actions potentielles

**Déviations : approche simpliste pour ordres de grandeur**

**Exemples : Ordres de grandeurs correspondants, 3 cas de calcul :**

**1. Petit géocroiseur 50 m,  $\Delta V$  faible : 0,2 m/s**

⇒ Masse : 165.000 t

Technologie : Ergols stockables (Isp 330 s)

↳ Masse d'ergols 10 t (EPS)

**2. Moyen géocroiseur 100 m,  $\Delta V$  moyen : 0,5 m/s**

⇒ Masse : 1.300.000 t

Technologie : Ergols Cryogéniques (Isp 470 s)

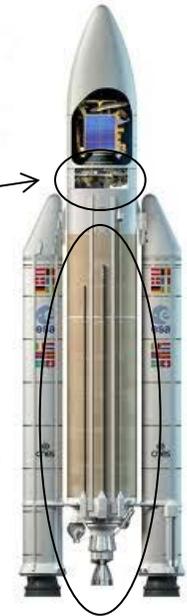
↳ Masse d'ergols 140 t (EPC)

**3. Gros géocroiseur 200 m,  $\Delta V$  notable : 1 m/s**

⇒ Masse : 10.500.000 t

Technologie : Propulsion Nucléo-électrique (Isp 3.000 s)

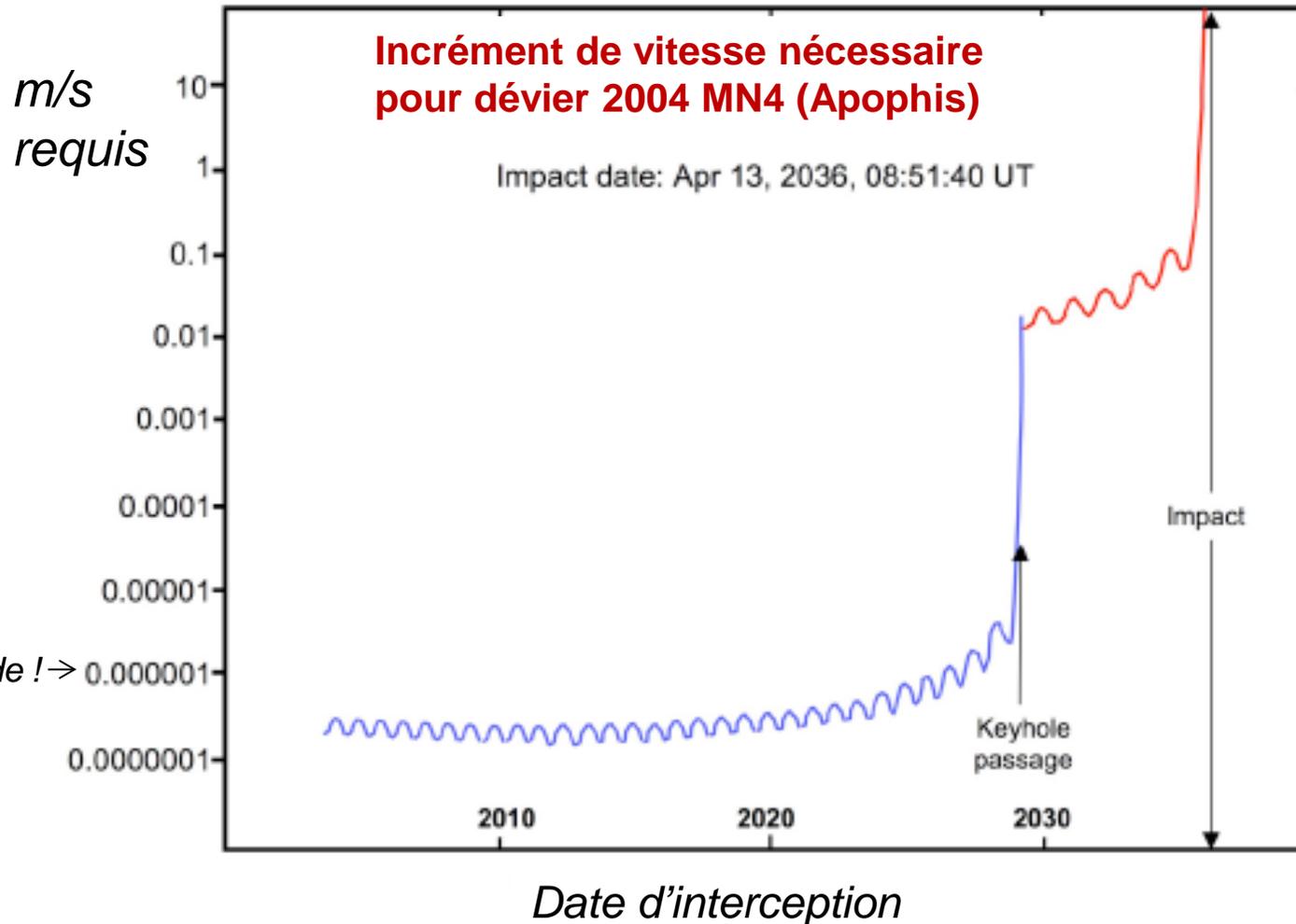
↳ Masse d'ergols 350 t



## 4. Actions potentielles

### Déviations : approche plus réaliste

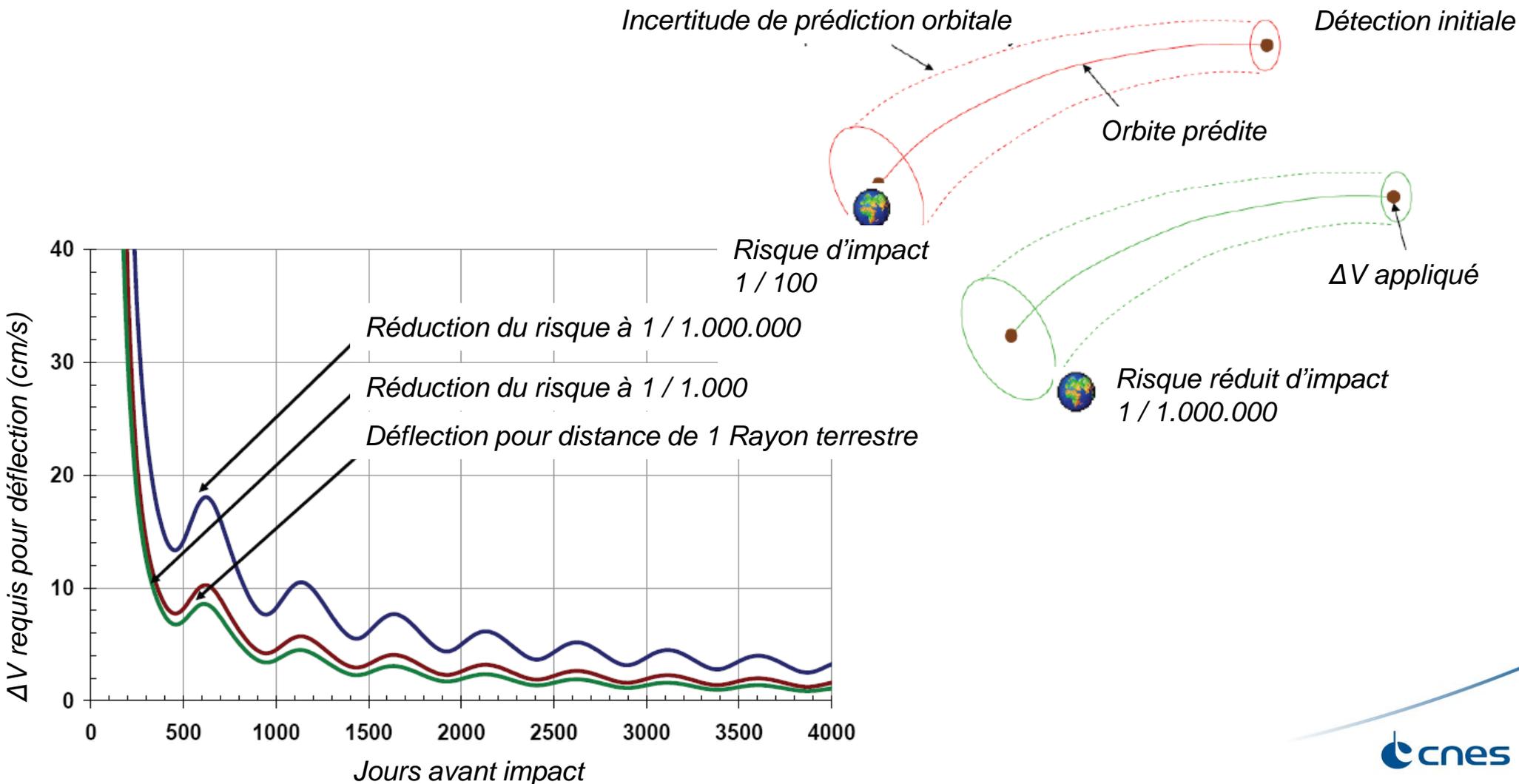
- ↳ impulsions faibles fournies très en amont
- ⇒ typiquement 1 micron / seconde si préavis supérieur à 10 ans !



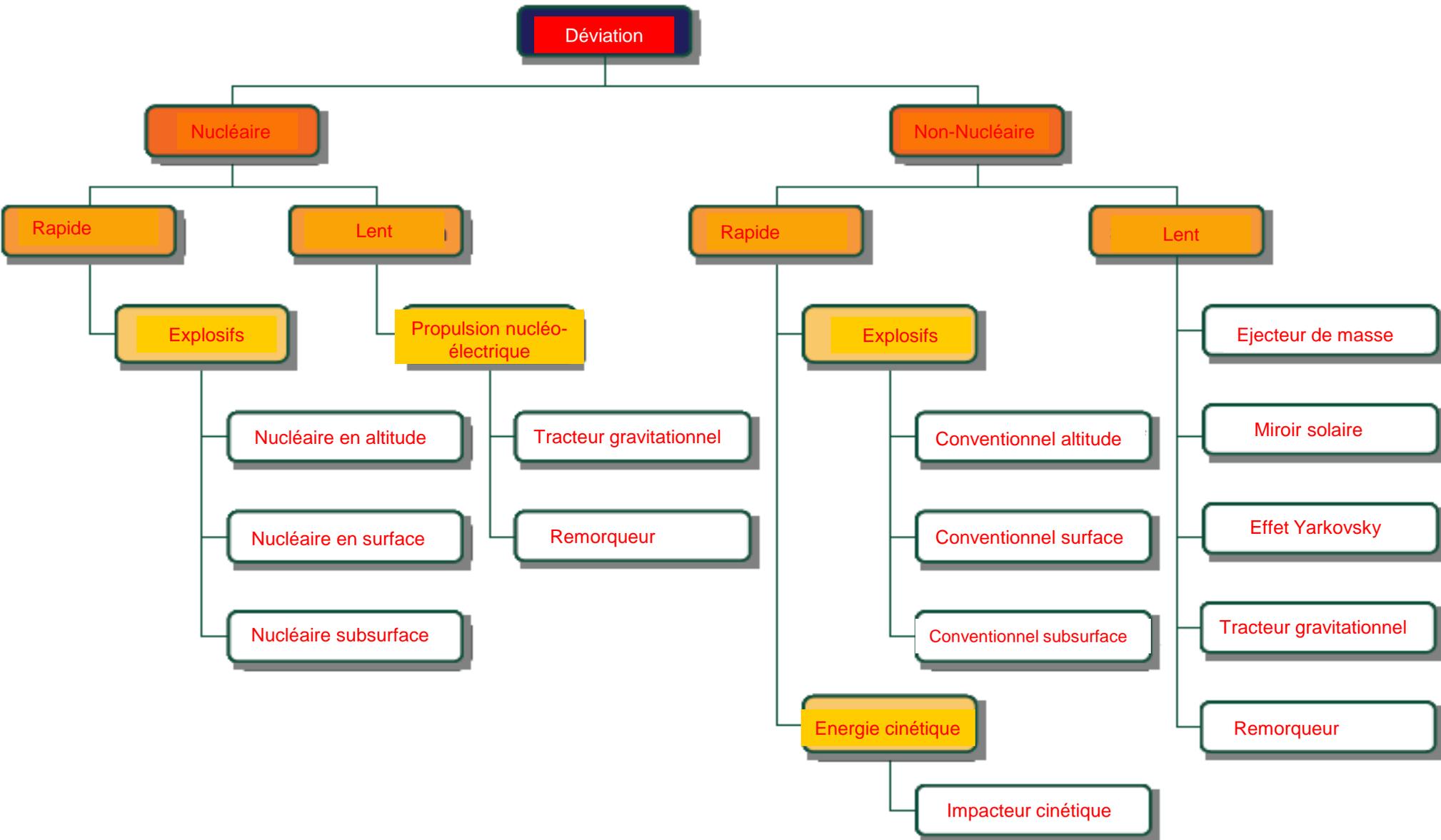
# 4. Actions potentielles

## Déviations : approche plus réaliste

↳ approche statistique prenant en compte l'incertitude de la trajectoire du NEO



# 5. Exemples de solutions de déviation



## 5. Exemples de solutions de déviation

### Fragmentation par « Explosion nucléaire »

#### Exemple : Armageddon

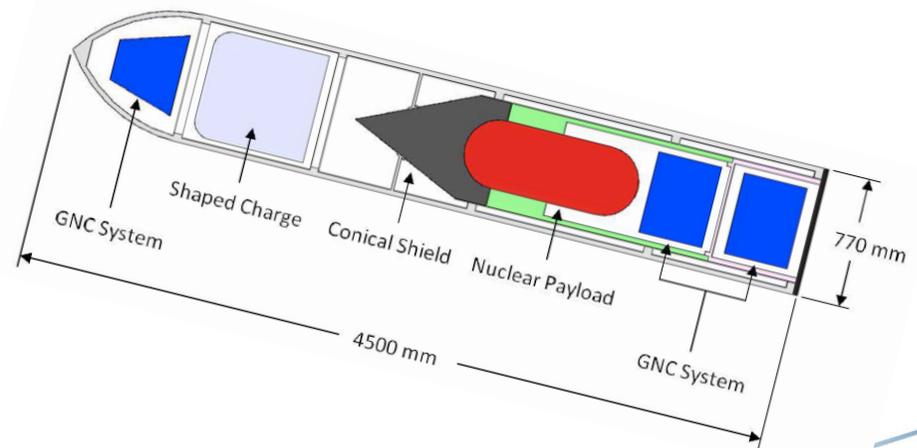
Idée imaginée dans les années 60 par Edward Teller :

- Utilisation d'armes nucléaires massives pour fragmenter le géocroiseur
- Faisable d'un point de vue énergétique
- Effets non contrôlables !
- Efficacité non démontrable

↪ Ne serait à envisager que comme solution de dernier recours



Crédit : Touchstones Pictures



Crédit : Rodionov et al

## 5. Exemples de solutions de déviation

### Fragmentation par « Collision avec un petit astéroïde »

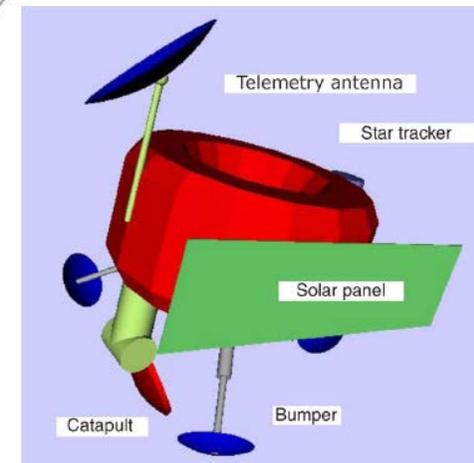
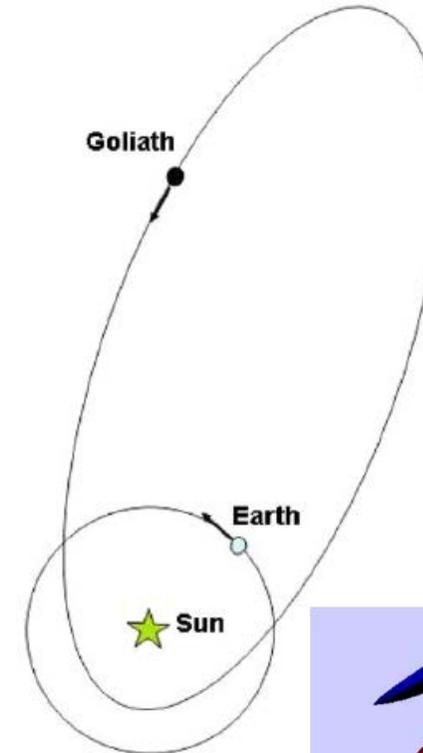
#### Exemple : Mission David & Goliath

- D. Massonet, B. Meyssignac – CNES
- Idée déjà imaginée dans les années 60

#### Domestication d'un petit astéroïde :

- Capture par modification de trajectoire
- Typiquement 20 à 40 m de diamètre
- Installation d'un système de propulsion
- Modification de sa trajectoire pour percuter un géocroiseur dangereux
- Crédible théoriquement
- Complexe à mettre en œuvre
  - Phasage
  - Vitesses et directions relatives
- Effets non contrôlables !

↪ Non retenu nominalemeent à ce jour



Crédit : CNES

# 5. Exemples de solutions de déviation

## Déviations par « Transmission d'impulsion »

### Exemple : Deep Impact (NASA)

- ↪ Compromis entre impulsion et risque de fracture
- **Crédible techniquement**
- **Complexe à mettre en œuvre**
- **Solution potentiellement intéressante**



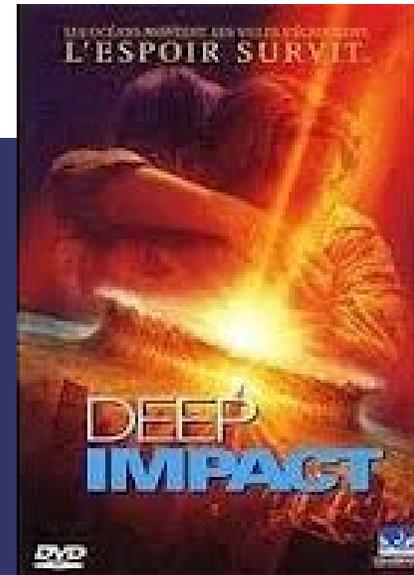
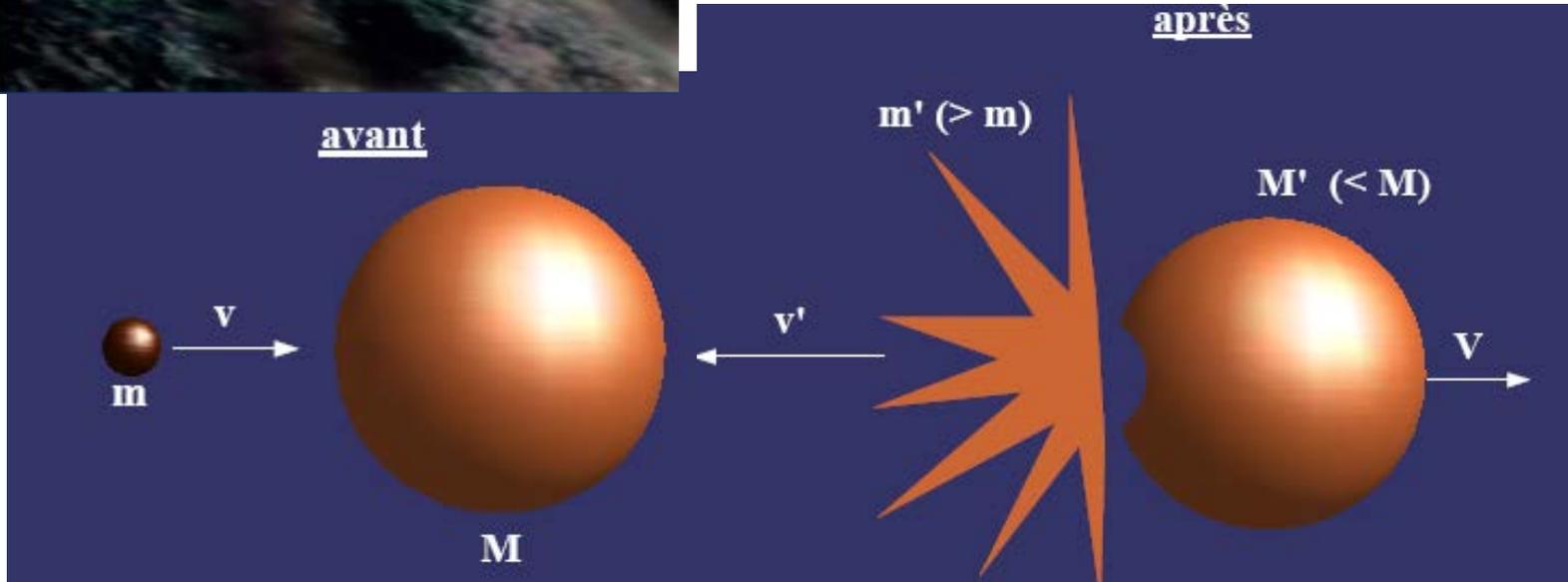
Figure 4-2: Deep impact spacecraft kinetic collision on comet Tempel-

Credit : NASA



*Quantité de mouvement, petit rappel...*  
 $(M_1.V_1 + M_2.V_2)_{avant} = (M_1.V_1 + M_2.V_2)_{après}$

Credit : SpaceWorks

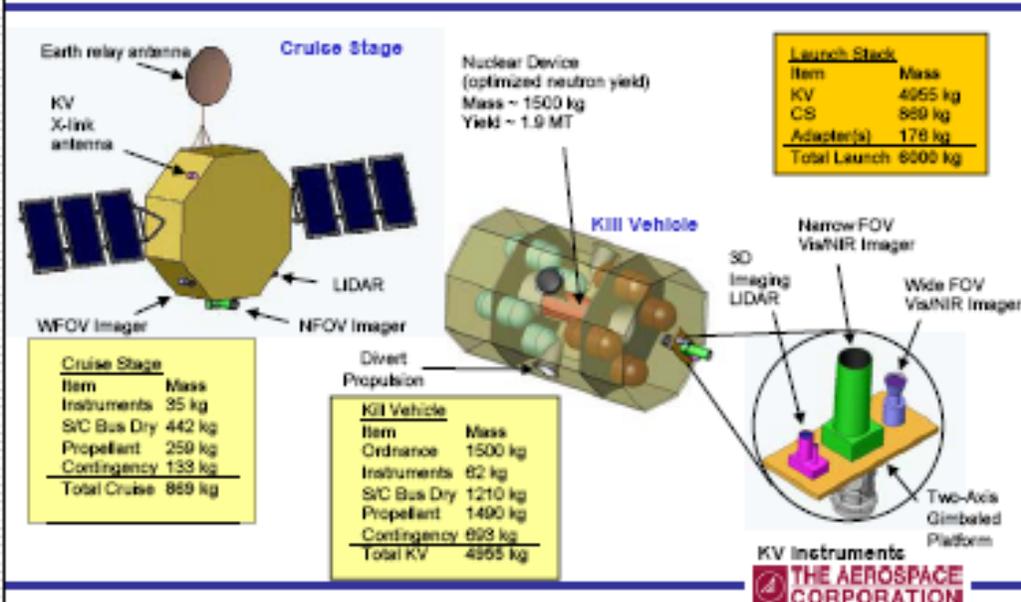


# 5. Exemples de solutions de déviation

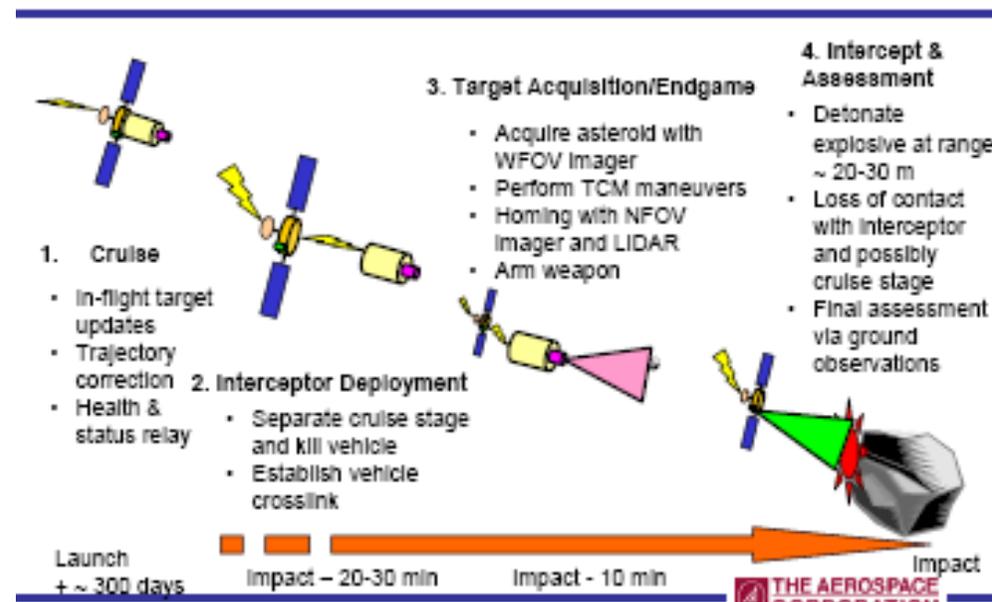
## Déviations par « Impulsion nucléaire »

- . Installation d'une charge nucléaire à la surface ou à proximité du NEO
  - Très bonne efficacité théorique : pression, pas fragmentation
  - Nombreux problèmes potentiels
    - . Contrôle de l'impulsion
    - . Nucléaire dans l'Espace : politique ?
- ↳ Prometteur comme solution avec peu de préavis

### Design de l'intercepteur



### Concept opérationnel de l'interception



## 5. Exemples de solutions de déviation

### Déviations par « Ejecteur de Masse »

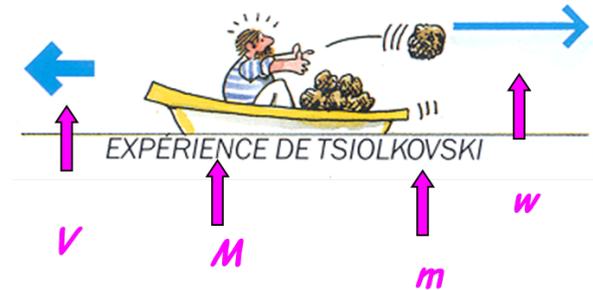
Excavation de matière à la surface du NEO, puis éjection générant une force de recul

- « munitions » potentiellement limitées
- orientation des tirs

⇒ Process très complexe !



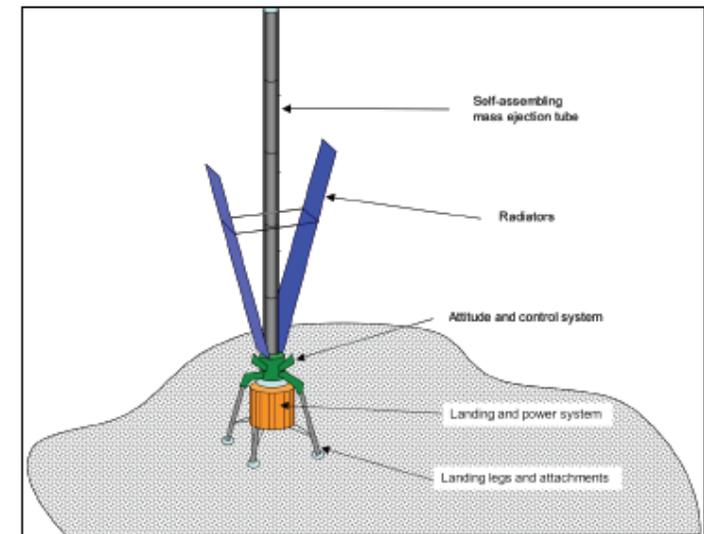
Credit : SpaceWorks



Quantité de mouvement, petit rappel...

$$M.\Delta V = m.w$$

$$\text{Dérivée : } F = q.w = \text{débit}.w$$



Courtesy John Olds

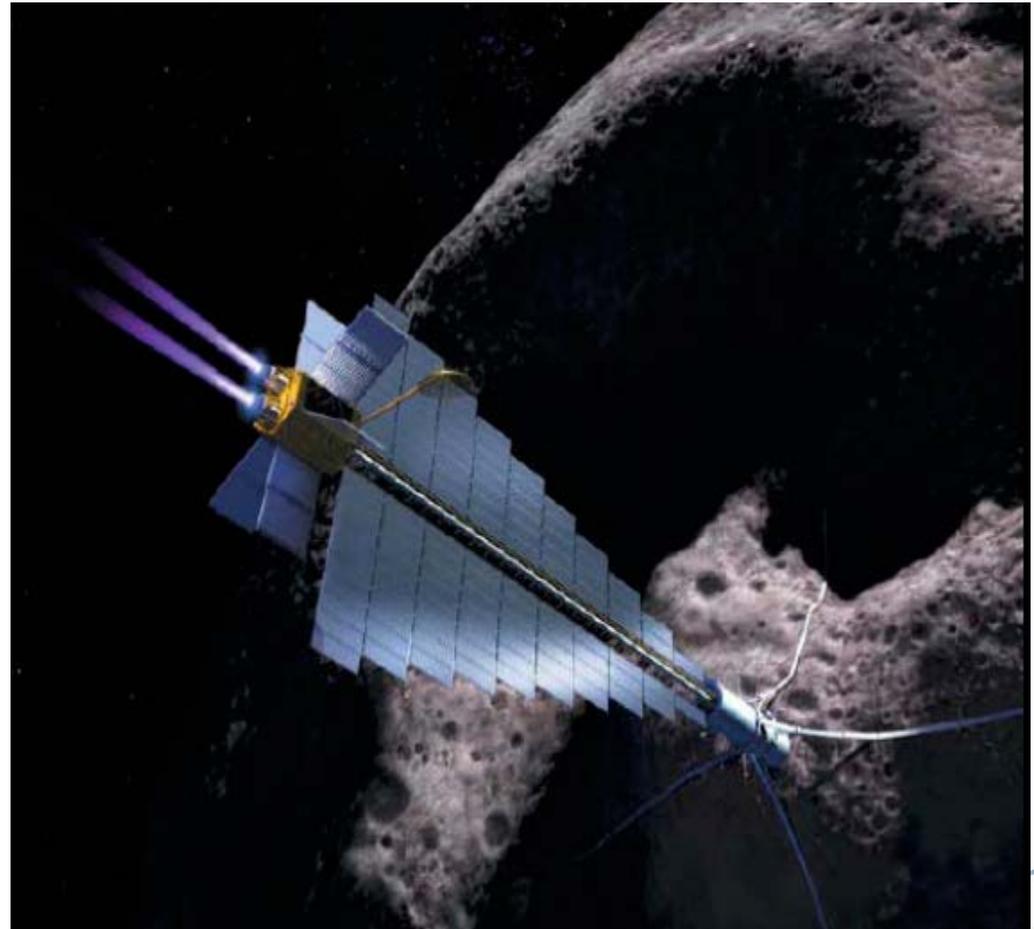
## 5. Exemples de solutions de déviation

### Déviations par « Pousseur - Remorqueur »

Amélioration en considérant une propulsion nucléaire-électrique, continue, de faible poussée

- Propulsion par Vasimr
- Étudié en détail par Schweikart (B612)
- Problème de la rotation propre du NEO

↪ Il faut une solution contact



Crédit : Ed Lu B612

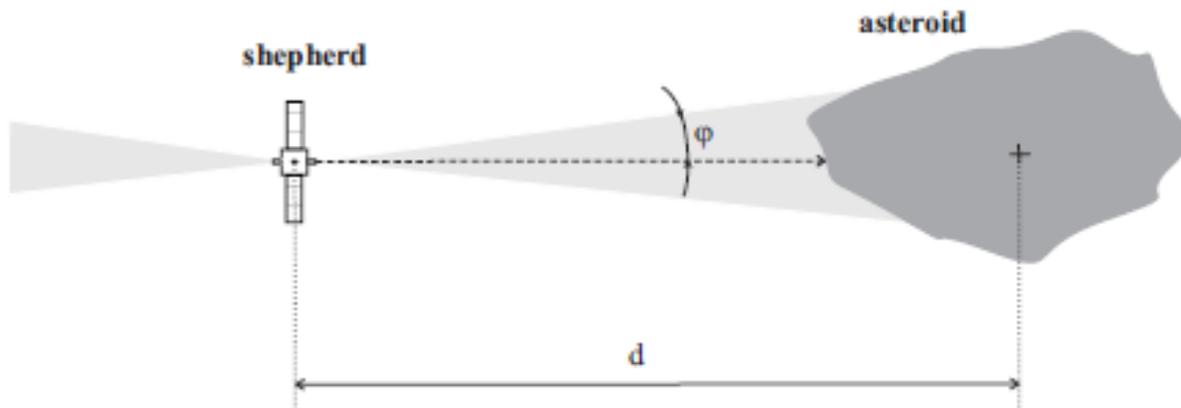
# 5. Exemples de solutions de déviation

## Déviations par « Soufflage »

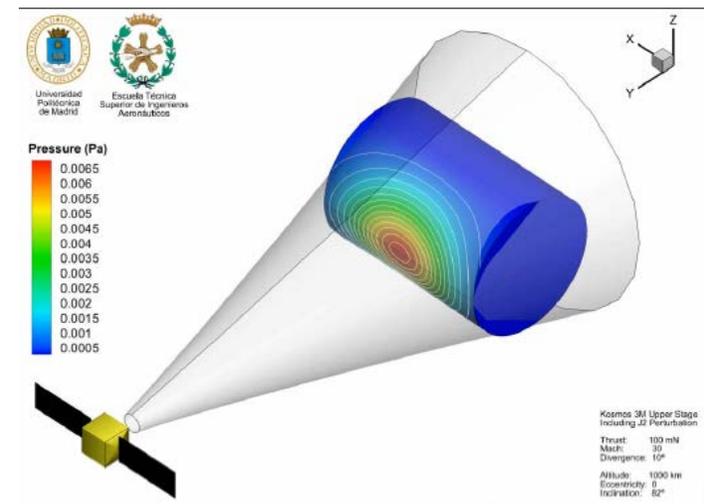
Un « chasseur » souffle sur le NEO à l'aide d'un moteur ionique

- Forte efficacité car propulsion électrique
- Moteur complémentaire pour suivre le mouvement du NEO
- Très faible poussée  $\approx 1$  N pour 25 kW de puissance électrique
- Solution étudiée également pour les débris orbitaux
- Etudié en détail par C. Bombardelli et al. (Université de Madrid)

↪ Aucun problème de faisabilité identifié à ce jour sans contact



Crédit : TU Madrid – ESA-ACT



## 5. Exemples de solutions de déviation

### Déviations par « Tracteur gravitationnel »

#### Principe :

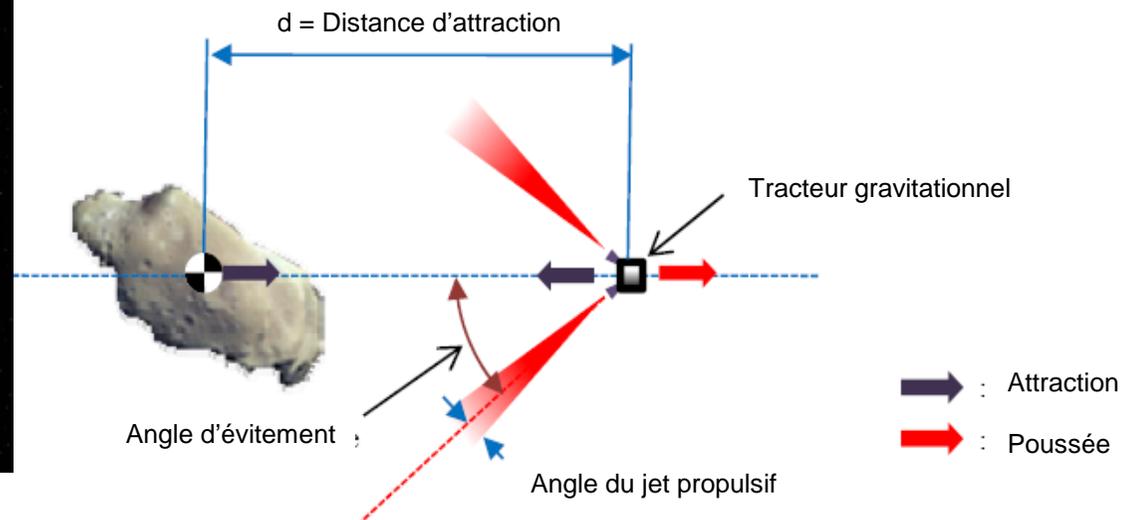
- le tracteur d'une certaine masse se maintient très près du NEO
  - l'attraction gravitationnelle mutuelle attire le NEO vers le tracteur
  - maintien de la distance par propulsion électrique, on modifie la trajectoire du NEO : « laisse » virtuelle
  - solution très similaire par attraction électrostatique avec canon à électrons
- ↳ Aucun problème de faisabilité identifié à ce jour

*Attraction universelle, petit rappel...*

$$F = G.M.m/d^2$$



*Crédit : Ed Lu B612*



## 5. Exemples de solutions de déviation

### Déviations par « Vaporisation »

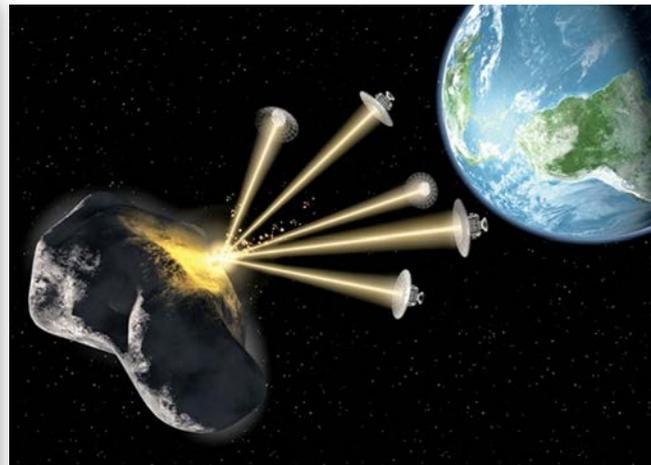
#### Principe :

- chauffage intense local de la surface du NEO : vaporisation de sa surface
- le dégazage associé induit une poussée
- bien orientée, celle-ci induit une déviation du NEO
- deux solutions de « chauffage »

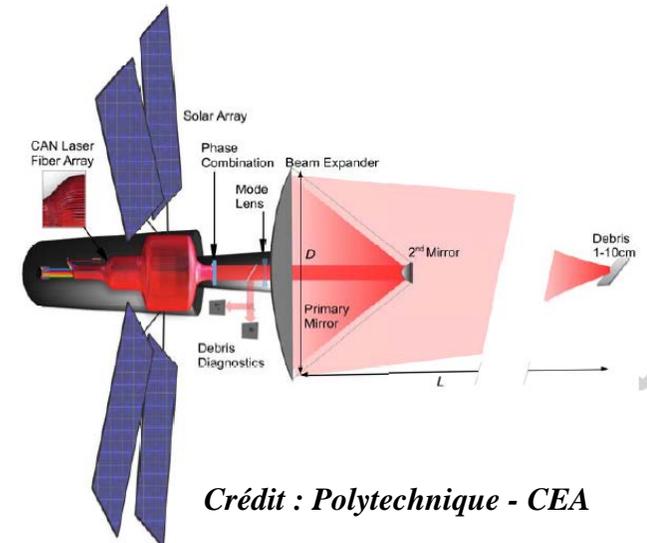
Concentrateurs solaires

Laser pulsé : forte efficacité, synergie avec débris (études CNES)

↪ Faisabilité non encore démontré à ce jour



*Crédit : The Planetary Society*



*Crédit : Polytechnique - CEA*

## 5. Exemples de solutions de déviation

### Modification de l'effet Yarkovsky

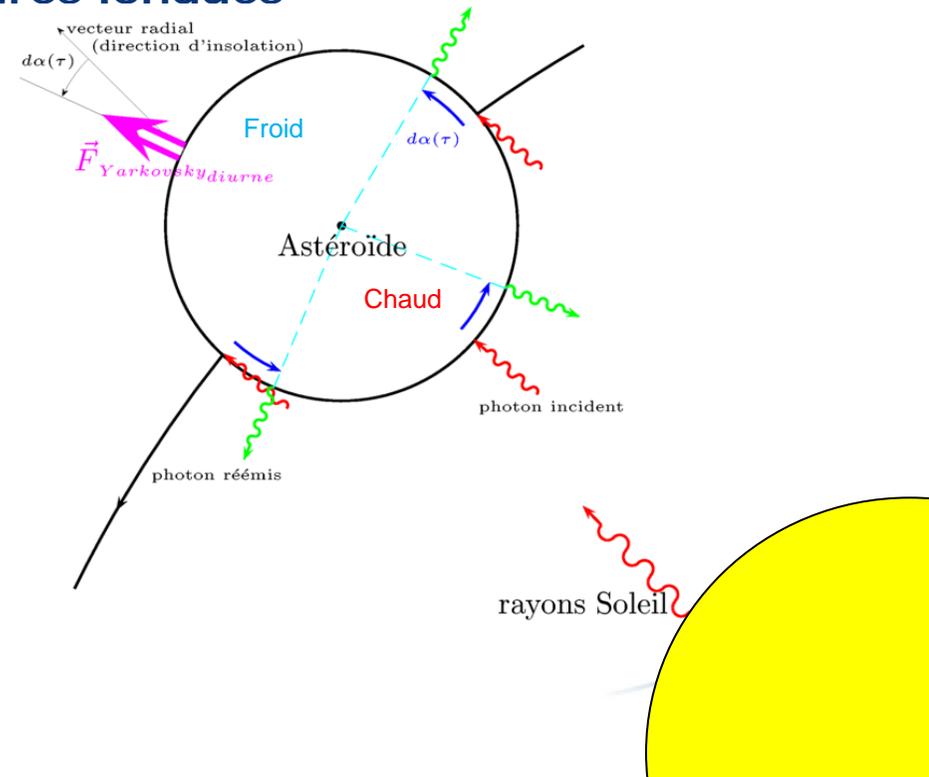
**Yarkovsky** : Force résultant de l'écart entre absorption solaire et émission thermique par rayonnement

- Chauffage d'une face du géocroiseur par le Soleil
- Rayonnement vers le « noir » de l'Espace  $\equiv$  Corps froid (4 K)
- Résultante varie avec la vitesse de rotation du géocroiseur

$\Rightarrow$  Force faible, mais intégrée sur des durées très longues

#### Propositions :

- **Modifier les propriétés optiques**
  - $\Rightarrow$  Peindre le géocroiseur en blanc !
  - $\Rightarrow$  Ou en Noir  $\Rightarrow$  Changer l'émissivité
- **Modifier la radiation solaire**
  - $\Rightarrow$  Ecran entre le soleil et le géocroiseur
- **Modifier la direction de la force**
  - $\Rightarrow$  Changer la rotation du géocroiseur
- **Augmenter la radiation solaire**
  - $\Rightarrow$  Concentrateur solaire

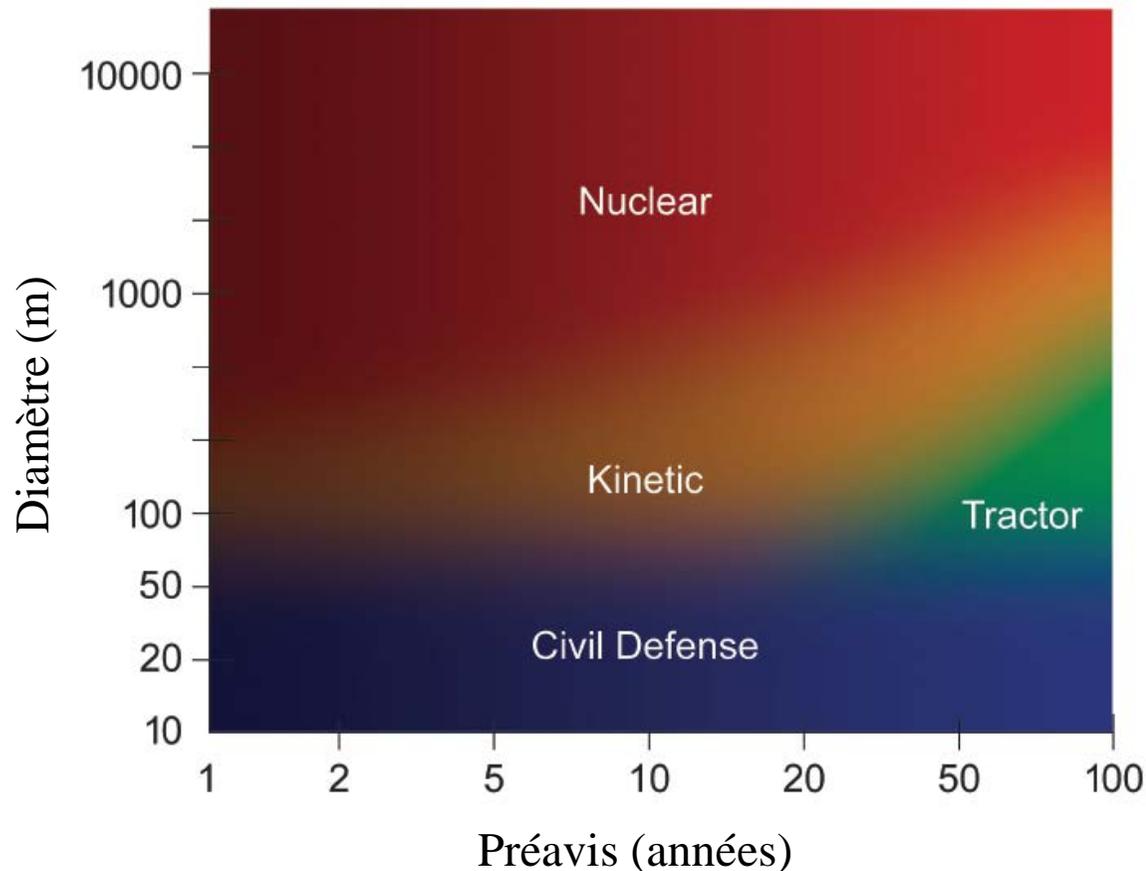


## 5. Exemples de solutions de déviation

### Synthèse : pas de solution unique

#### Solutions fonction de deux paramètres

- Taille du NEO
- Préavis

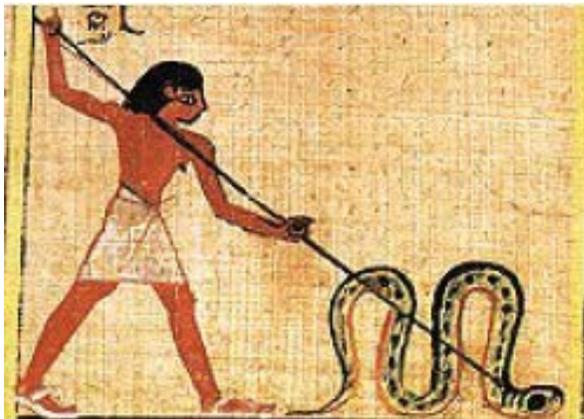


Crédit : Tim Warchocki - NRC

## 6. Exemple d'Apophis

Apophis = 99942 = 2004-MN4

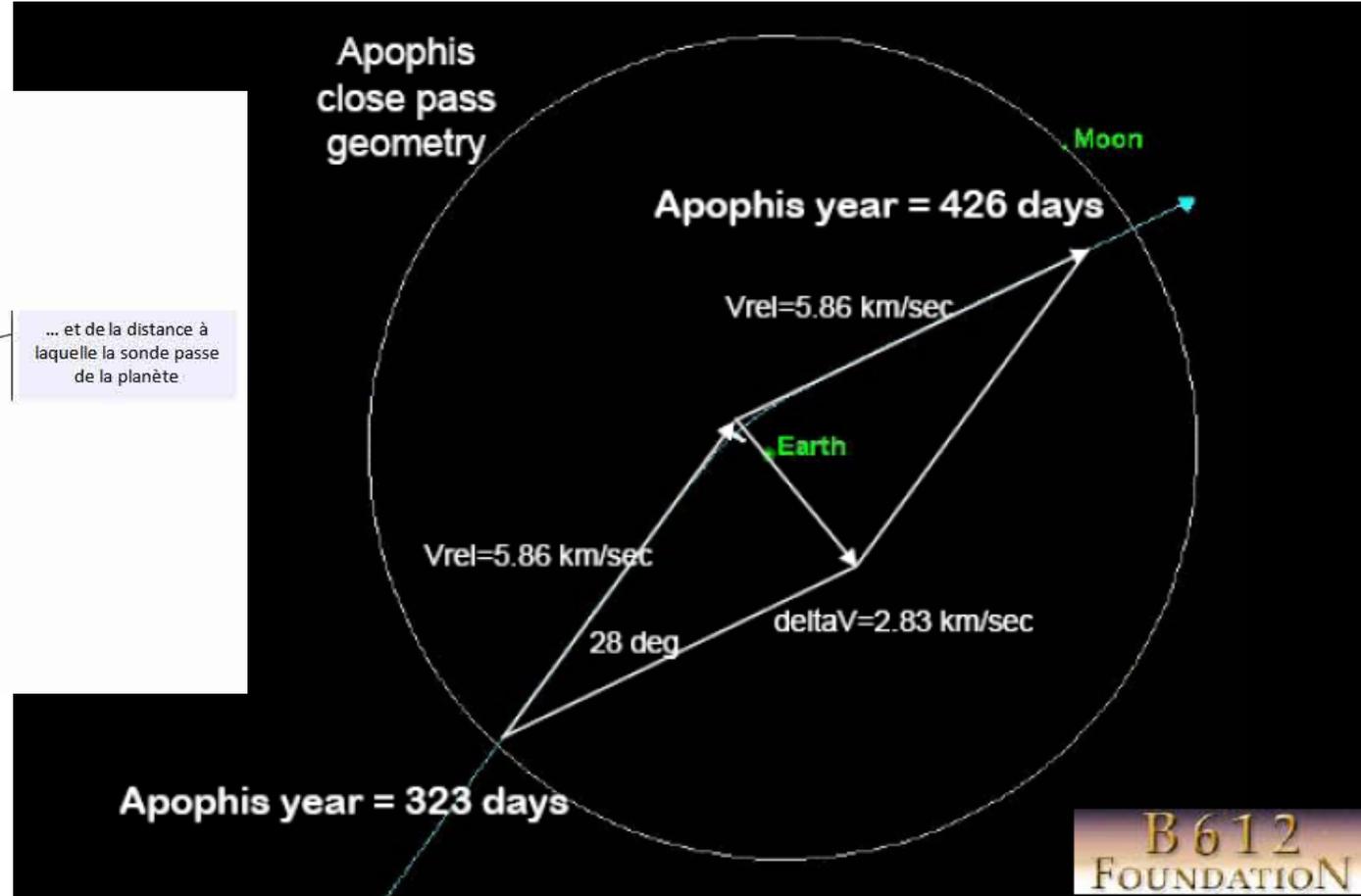
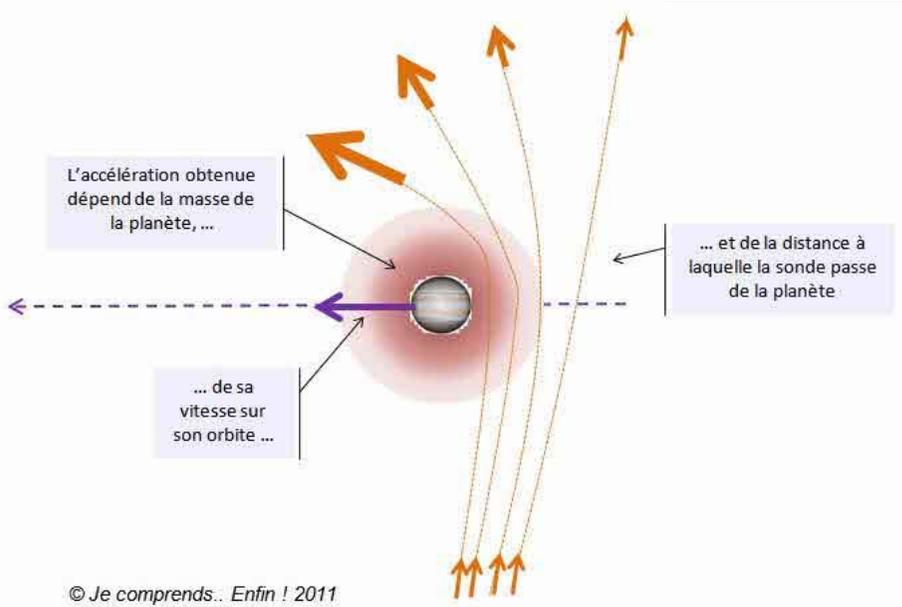
- ⇒ Géocroiseur de taille moyenne (250 m), découvert en 2004
- ⇒ Passage à 25.000 km  $\pm$  5.000 km de la Terre le 13 avril 2029
- ⇒ Modification de l'orbite d'Apophis par assistance gravitationnelle
- ⇒ **Récemment déclassé car ne posant pas de risque avant 2060**
  - . Probabilité cumulée d'impact à ce jour  $\cong 1/175.000 \cong 5,7 \cdot 10^{-6}$  (NASA)
  - . Notion de « trous de serrure », zones de passage entraînant une collision
  - . Conséquences potentielles catastrophiques
  - . 12 impacts possibles d'ici 2100



Characteristic	Value	Unit
Epoch	6/18/2009	
a	0.9224	AU
e	0.1912	
i	3.3314	deg
$\Omega$	204.4425	deg
$\omega$	126.4042	deg
$\theta_0$	134.7126	deg
Orbit Period	323.5969	d
Rotational Period	30.5	h
Diameter	270	m
Mass	2.70e10	kg
Escape Velocity	0.1389	m/s
Albedo	0.33	
Absolute Magnitude H	19.7	

# 6. Exemple d'Apophis

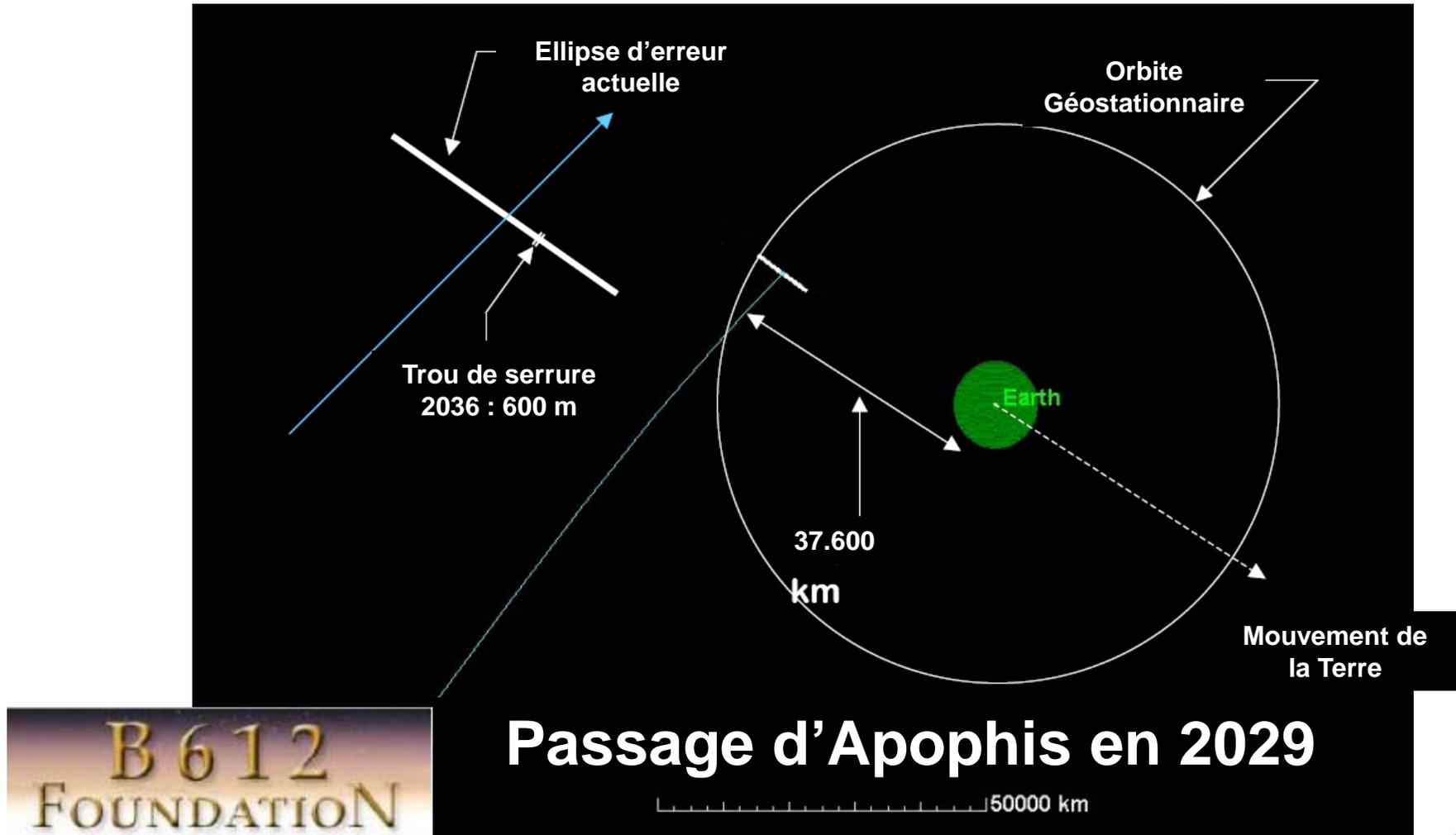
## Apophis = Modification typique de trajectoire en Avril 2029



*Assistance gravitationnelle, petit rappel...*

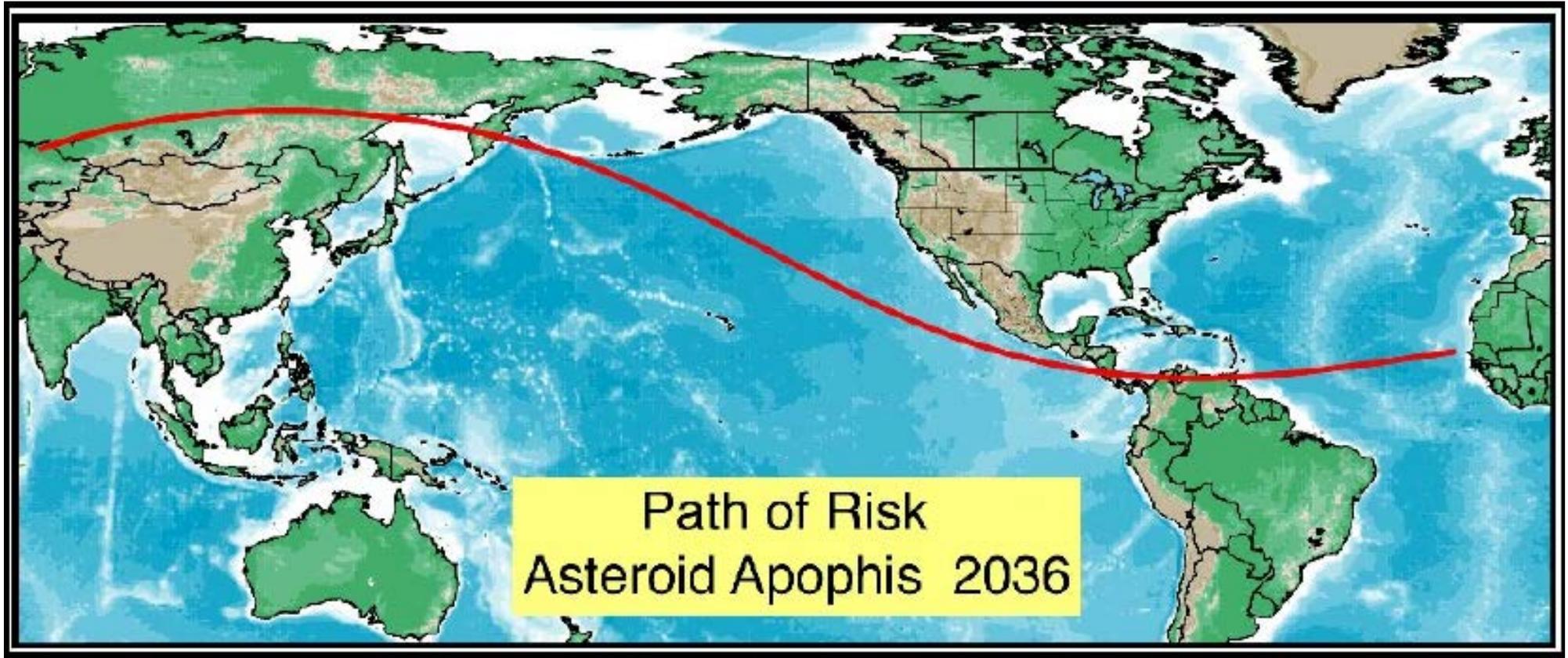
# 6. Exemple d'Apophis

## Apophis = Modification typique de trajectoire en Avril 2029



## 6. Exemple d'Apophis

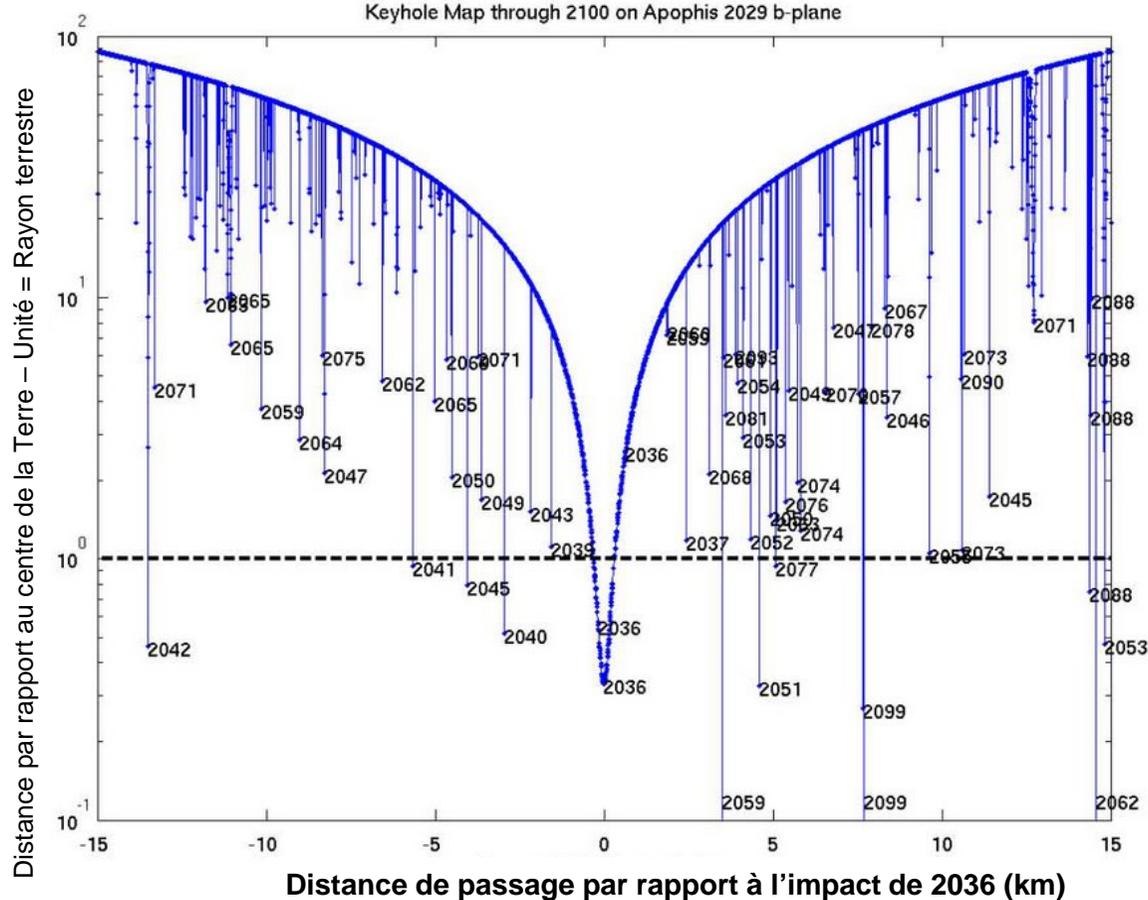
Apophis = Trajectoire potentielle de collision



Path of Risk = 64 km x 30,250 km

# 6. Exemple d'Apophis

## Apophis = Trou de serrure



Loupe autour du trou de serrure de 2036

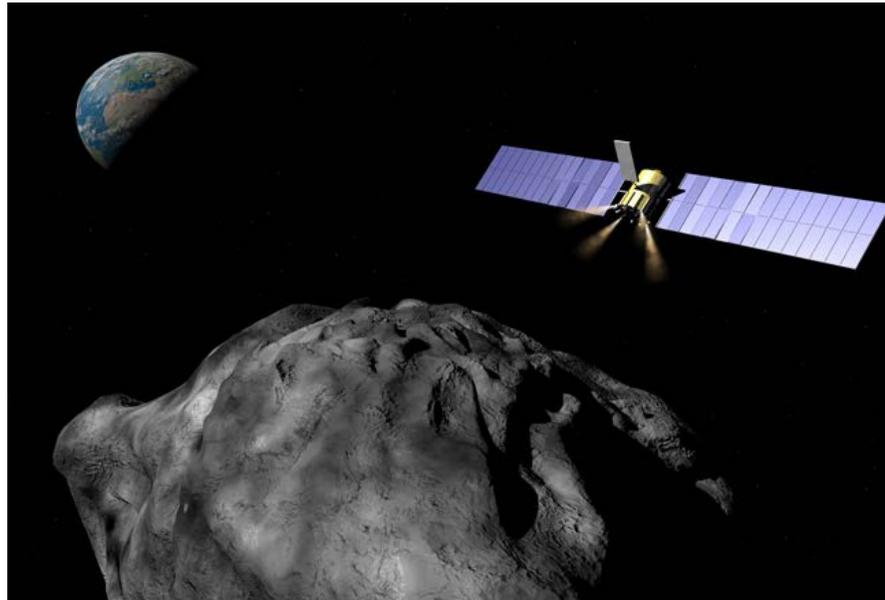
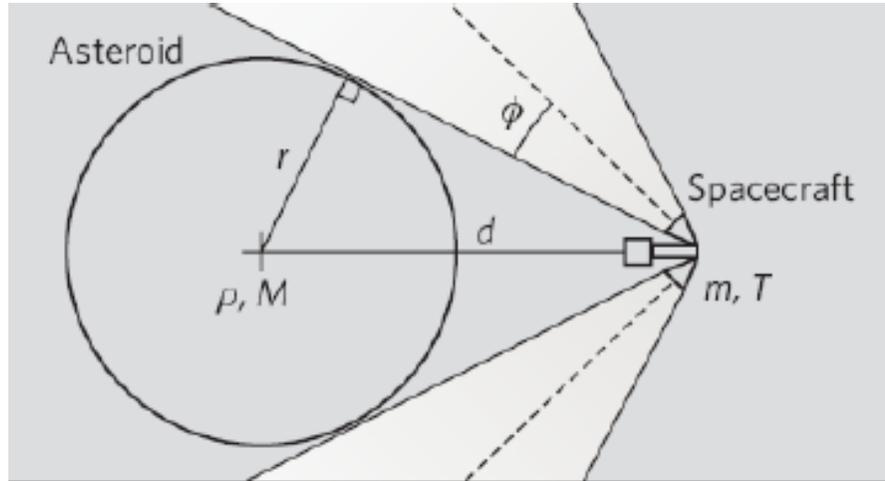
On note bien la largeur du trou de 610 m

Les risques de passages à moins de 10 rayons terrestres sont datés

⇒ A remettre à jour avec les données récentes

## 6. Exemple d'Apophis

### Déviaton : Tracteur gravitationnel (Schweikart – Lu)



$$T = GMm/d^2$$

$$\Delta V/\text{sec} = Gm/d^2$$

#### Tracteur gravitationnel Performance Apophis

$$M = 4.6 \times 10^{10} \text{ Kg}$$

$$m = 1 \times 10^3 \text{ Kg}$$

$$d = 1.5 r = 240 \text{ meters}$$

$$\theta = 20 \text{ degrees}$$

$$T = 0.053 \text{ Newtons}$$

$$\Delta V = 3.7 \times 10^{-5} \text{ m/sec/year}$$

$$\Delta V_{\text{req}} = 2 \times 10^{-6} \text{ m/sec}$$

$$\text{Deflection } T_{\text{req}} = 20 \text{ days}$$

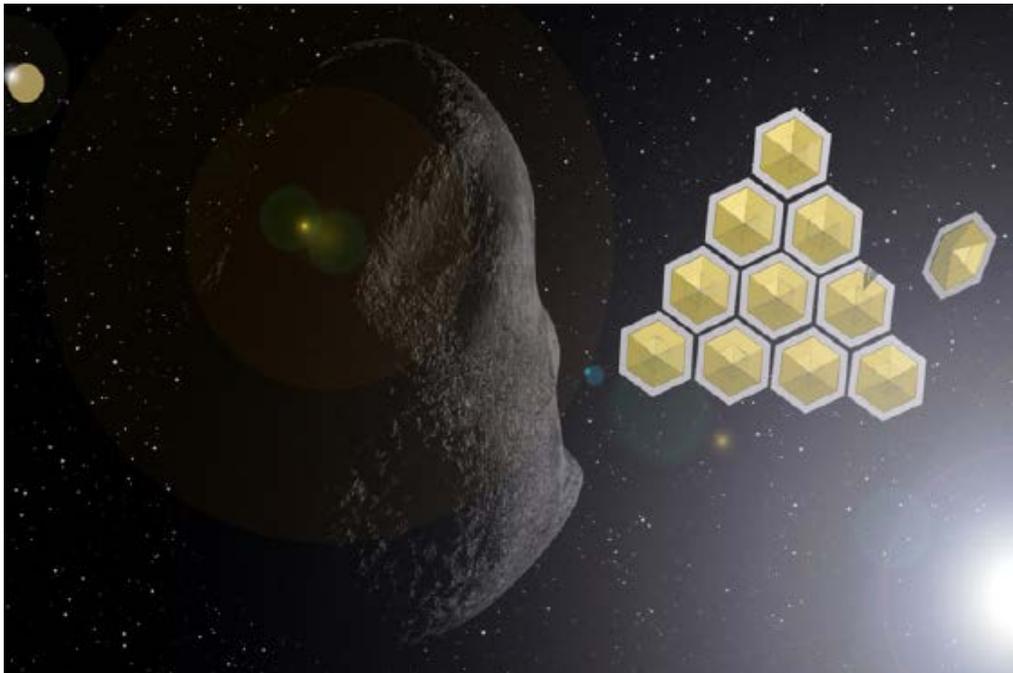
$$\text{Fuel}_{\text{req}} = \sim 10 \text{ kg}$$

Crédit : NEOshield – Airbus D&S

## 6. Exemple d'Apophis

### Déviaton : mission Shadow (Jean-Yves Prado, CNES, 2009)

- ⇒ Modification de l'effet Yarkovsky par insertion d'un écran
- ⇒ Besoin de couverture  $\cong 300.000 \text{ m}^2 = 16$  panneaux hexagonaux de 50 m
- ⇒ Besoin en lancement estimé à 3 Soyouz ou 1 Ariane



#### *Devis de masse typique par panneau*

Ecran solaire	40 kg
Electronique, communications...	20 kg
Contrôle d'attitude	40 kg
Ergols	100 kg

*Crédit : JY Prado - CNES*

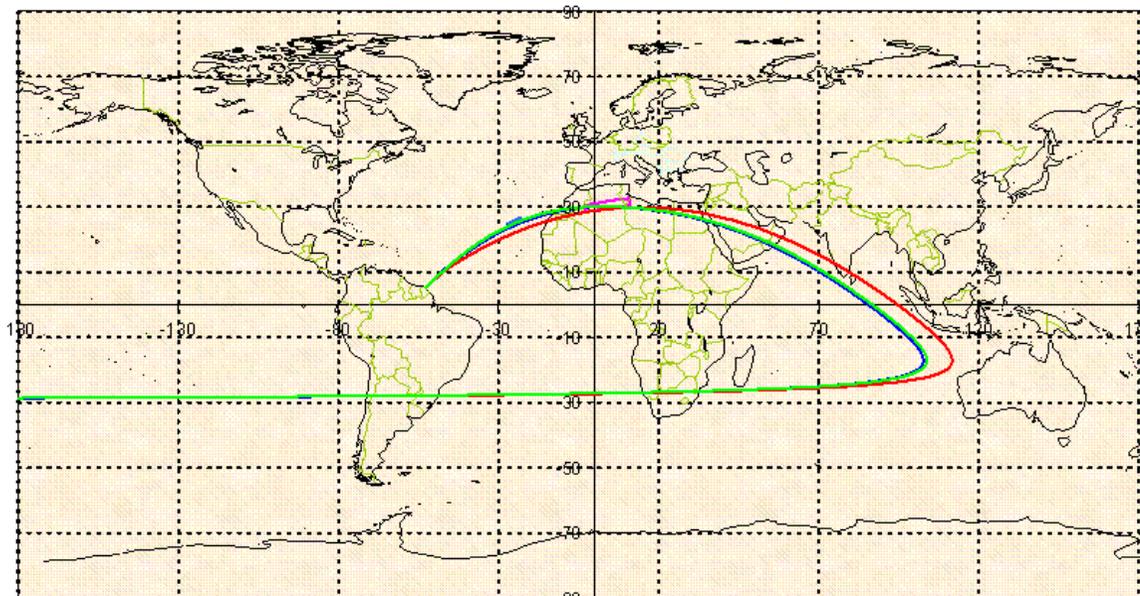
# 6. Exemple d'Apophis

## Etude CNES vers Apophis en 2029

### Trajectoires :

- . Très belle mission, originale
- . On vise Apophis sur sa branche amont, avant le passage vers la Terre
- . Dimensionnement du véhicule de transfert passant de l'orbite de lancement au co-orbitant avec Apophis
- . Dimensionnement de l'atterrisseur Mirza
- . Robustesse à la date de tir

Trace au sol et taches retombé EPC



— A5ME EPC — A5ME — A5ECA EPC — ECA — A6 - PPH

Za (altitude d'apogée)	600 000 km
Zp (altitude de périégée)	250 km
i (inclinaison)	30°
$\omega$ (argument du périégée)	90°

		A5ME
CARACTERISTIQUES		
Azimut de tir / Nord	(degrés)	45.958
Facteur de charge min.	(m/s <sup>2</sup> )	5.912
Facteur de charge max.	(m/s <sup>2</sup> )	39.841
Pression dynamique Mach 1	(Pa)	30010
Pression dynamique max.	(Pa)	37070
Premier pic de flux	(kW/m <sup>2</sup> )	50.641
Seuil accelero. a H1	(m/s <sup>2</sup> )	5.987
Pression dyn. sep. 1/2	(Pa)	514
Flux au largage coiffe	(kW/m <sup>2</sup> )	1.135
Second pic de flux	(kW/m <sup>2</sup> )	0.189
Intégrale de flux	(kJ/m <sup>2</sup> )	98.719
PERFORMANCE		
Masse utile	(kg)	5415

# 6. Exemple d'Apophis

## Etude CNES vers Apophis en 2029

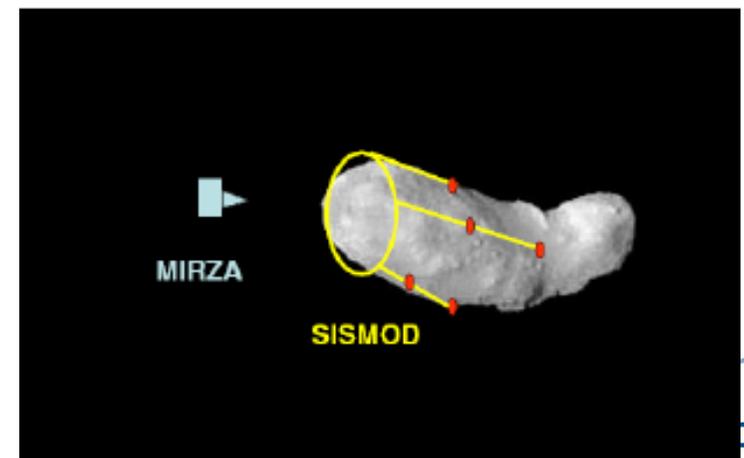
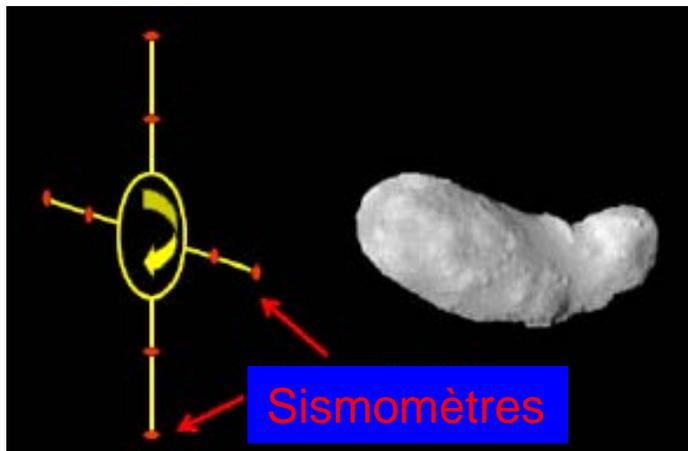
IAC-09-B4.2.3

AOPHIS 2029, A UNIQUE MISSION OPPORTUNITY

- ⇒ Bilan de masse typique
- ⇒ Pas mal de marges à ce stade
- ⇒ Module de transfert  $\cong 6 \text{ km/s} \cong 4250 \text{ kg}$  d'ergols ⇒ Etude du véhicule

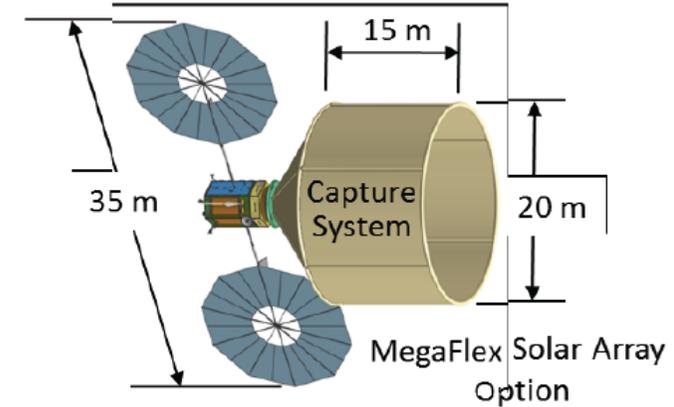
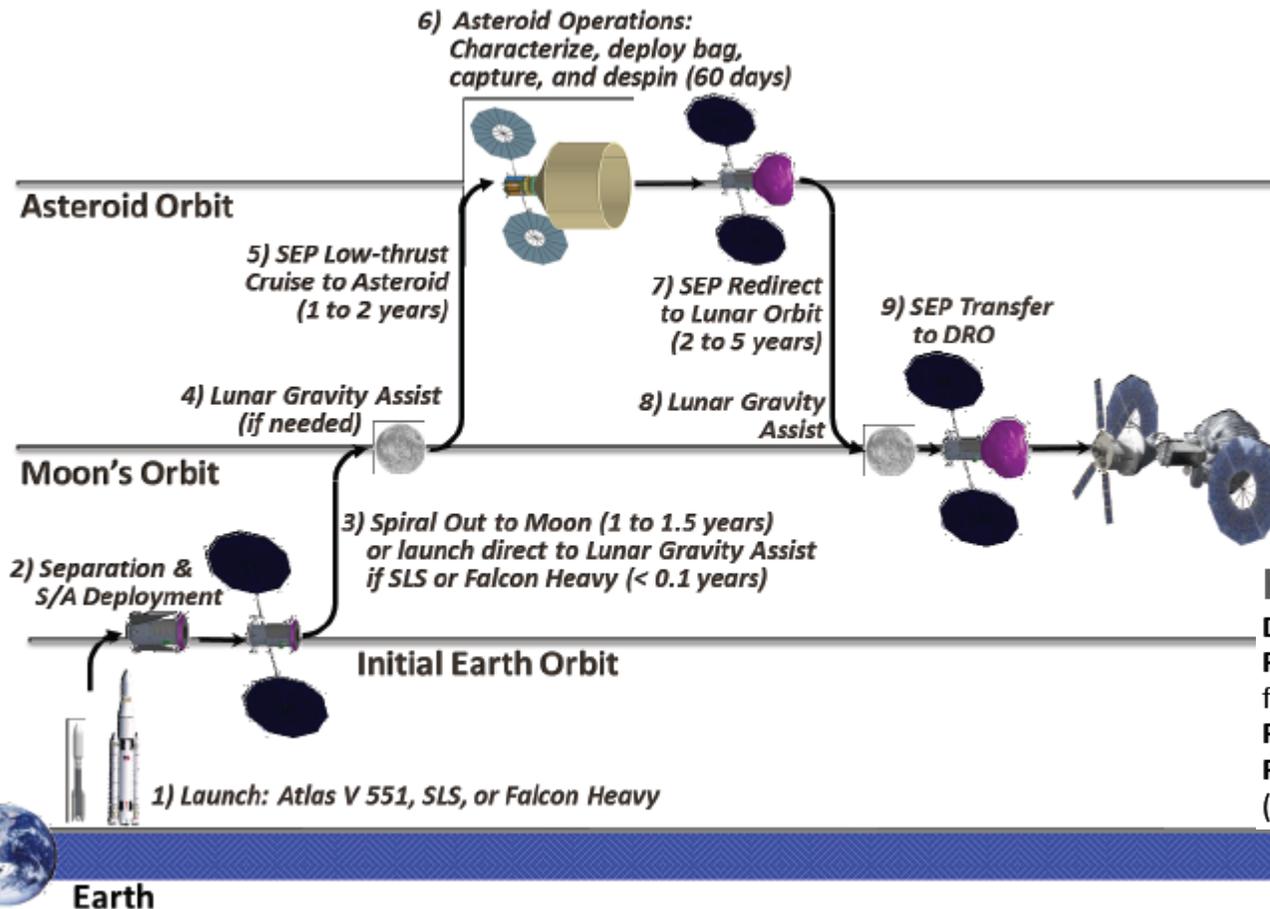
Jean-Yves Prado  
CNES, FRANCE  
jean-yves.prado@cnes.fr

Launched mass		5000	
	Transfer Module	4800	
	Dry mass		550
	Fuel	4250	Isp 325 s
	MIRZA	200	
	Dry mass		90
	Fuel		40
	SISMOD		70 Including 50kg P/L
Launch Margin		1500	



## Etude Asteroid Redirect Mission

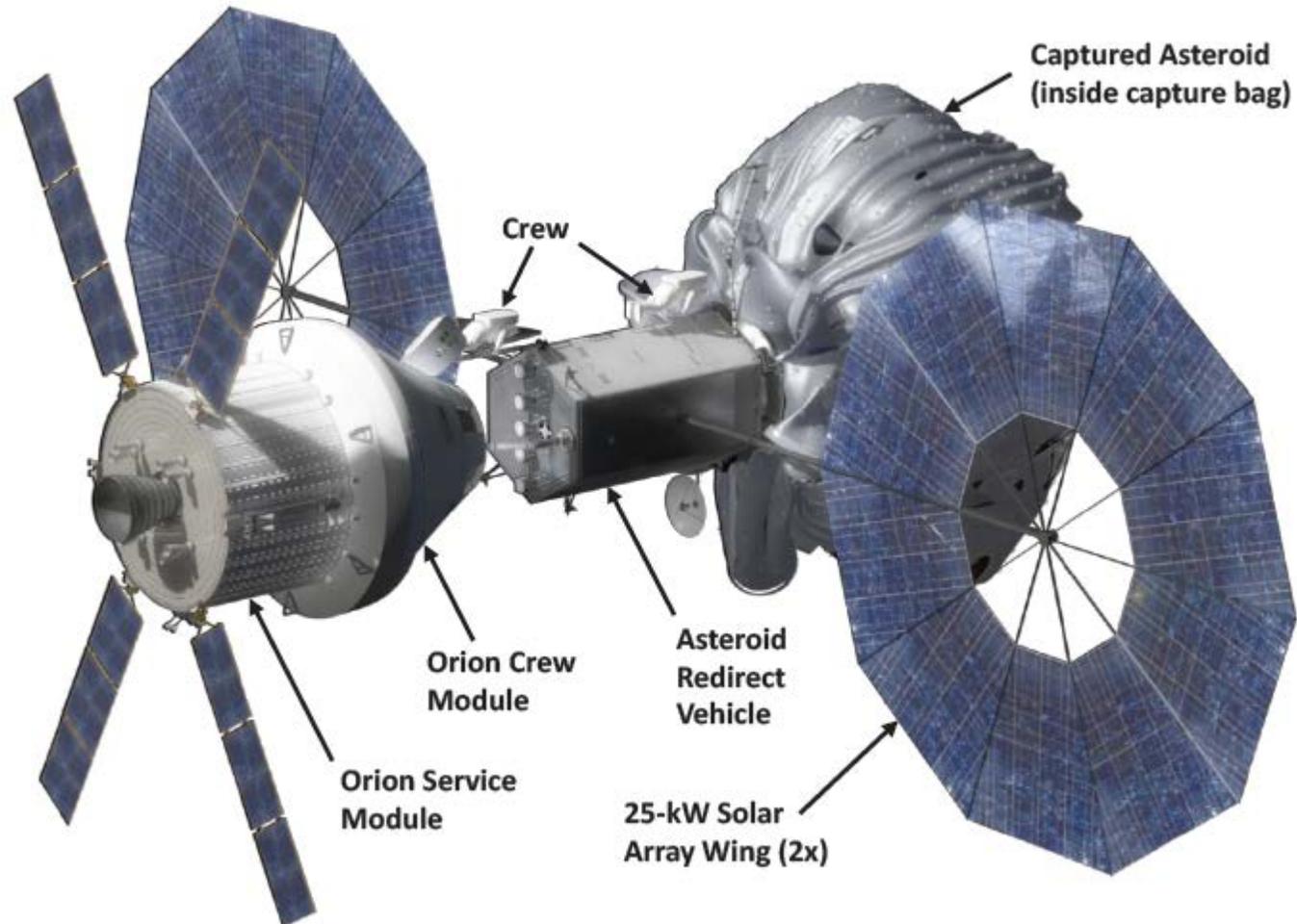
↪ Analyse en cours d'une mission de capture d'astéroïde pour examen



### Key Spacecraft Characteristics

- Dry Mass:** 3950 kg dry (maximum expected value)
- Propulsion:** 40-kW, 3000-s Hall thruster-based SEP with four 10-kW thrusters plus one spare
- Propellant:** up to 12 t of xenon
- Power:** 50-kW ROSA or MegaFlex solar arrays (beginning of life at 1 AU)

## Etude Asteroid Redirect Mission



*Credit : NASA*

### Sujet passionnant au niveau Éthique et Relations Internationales

#### Apophis exemple représentatif de ce qui peut arriver

- . Probabilité effective de collision très faible
- . Mais, probablement > 10.000 géocroiseurs de cette taille non encore détectés
  - ↪ Faut il se préparer ? Comment le justifier ?
  - ↪ Suivant les solutions, Recherche & Technologie amont importante
  - ↪ Projet robuste à une diminution (prévisible) de la probabilité d'impact ?

#### La fiabilité d'une telle mission doit être très élevée :

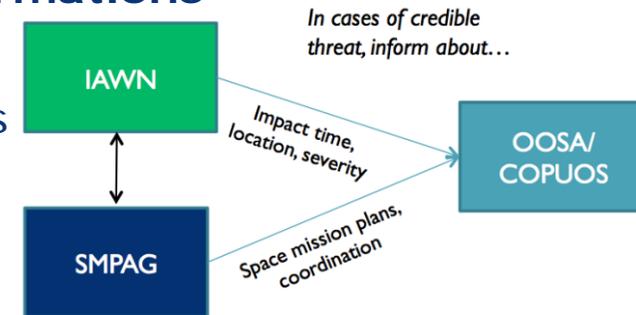
- . En cas d'échec, nombre potentiellement très élevé de victimes
- . Mais, risque d'aggraver la situation en cas de mission partielle ?
  - ↪ Quels sont les critères de décision d'une telle mission ?
  - ↪ Qui doit prendre la responsabilité de décider ce type de mission ?
  - ↪ Quand doit on s'y préparer ? Est-ce déjà trop tard ? Financement ?
  - ↪ Quelle est la responsabilité en cas d'échec, par exemple mauvaise déviation et impact différent du nominal ?

### Sujet passionnant au niveau Éthique et Relations Internationales

#### Responsabilité du réseau de détection, partage des informations

##### . Groupe international récent SMPAG + IAWN

Space Mission Planning Advisory Group : 15 membres  
International Asteroid Warning Group



##### . Prééminence évidente des USA

- ⇒ Responsabilité de l'information ? Protocoles d'échanges d'informations ?
- ⇒ Fiabilité des prédictions ?
- ⇒ Certains impacts sont ils acceptables ? (si hors US par exemple...)

#### Responsabilités mutuelles des états ou des agences :

- . Un pays peut il ne pas s'impliquer dans la mitigation d'un risque à échelle régionale, nationale, multi-nationale ?
- . Quelle priorité donner à ce type de programme au niveau des Agences ? (rôle régalien, sujet sociétal)
- . Pas mal d'actions actuelles au niveau USA, UK, Italie, Allemagne, Japon

⇒ **Coordination Internationale fondamentale**

ONU : UNCOPUOS

### Sujet passionnant au niveau Éthique et Relations Internationales

#### Information du public

- . **Paramètre fondamental : confiance à gagner**

- ↳ Risque de paniques → Faut il informer le public, et quand ?

- ↳ Risques de dérives « sectaires », d'interprétations hasardeuses

- ⇒ Éducation, information, démystification... fondamentales !

- ⇒ Impliquer des sociologues spécialistes du comportement des foules

- ⇒ Jouer avec les différences de culture

- . **Justifier par avance les fausses alarmes (effet Grippe –H1N1 ?)**

- . **Préparation d'évacuations éventuelles ?**

- ⇒ Le vrai danger d'un gros Géocroiseur comme Apophis est peut être la panique la veille de l'impact et le pillage associé, même si les scientifiques garantissent l'absence d'impact !



*Credit : NewYorker*

# Merci de votre attention

*(n'hésitez pas à me contacter pour toute question)*

**christophe.bonnal@cnes.fr**