



# Les débris spatiaux : Comment s'en débarrasser !

Arts & Métiers – ISAE  
Groupe Professionnel Aéronautique et Espace Paris  
Paris, le 18 février 2013

Christophe Bonnal  
CNES – Direction des Lanceurs  
[christophe.bonnal@cnes.fr](mailto:christophe.bonnal@cnes.fr)



CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES



*Plan de la présentation :*

- 1. Situation actuelle**
- 2. Evènements redoutés**
- 3. Le syndrome de Kessler**
- 4. Quelques solutions potentielles**



CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES



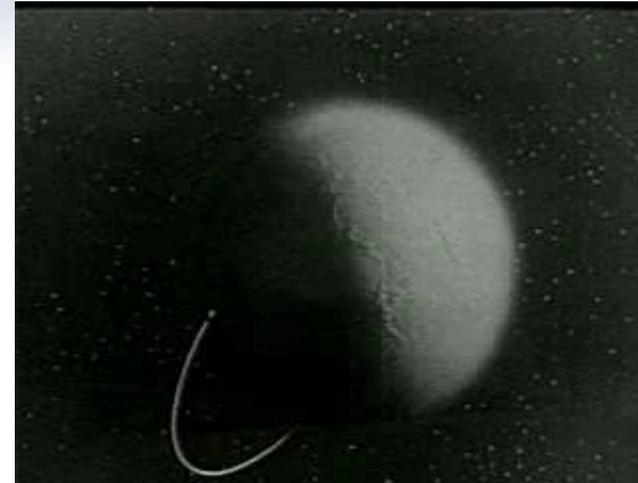
# 1. Situation actuelle



CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES

## Déjà le 4 octobre 1957...

- Lancement du Spoutnik 1 :
  - Charge utile = 84 kg
  - Etage central Semiorka = 6.500 kg sur la même orbite
  - Coiffe protectrice  $\cong$  100 kg sur la même orbite
    - ⇒ Charge utile  $\cong$  1,3 % de la masse satellisée
    - ⇒ Débris orbitaux  $\cong$  98,7 % de la masse injectée
- Emission du Spoutnik pendant 21 jours :
  - Rentrée atmosphérique après 92 jours
    - ⇒ Spoutnik a été un débris orbital pendant les  $\frac{3}{4}$  de sa vie...



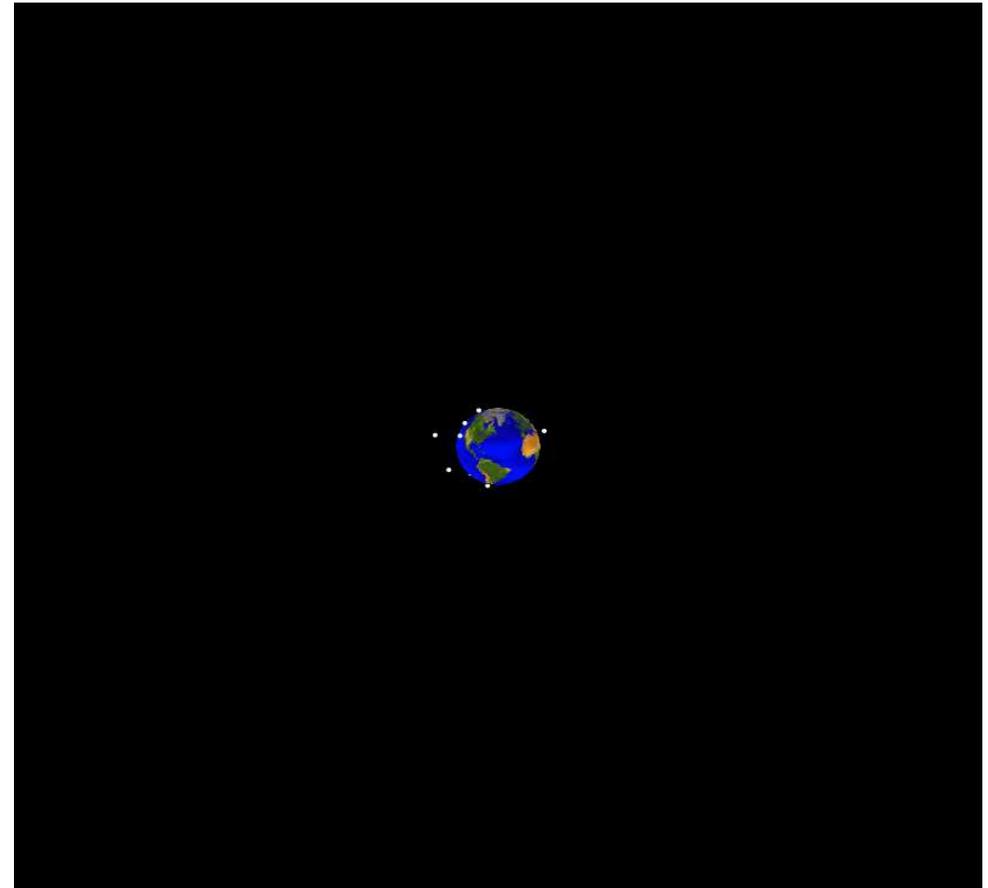
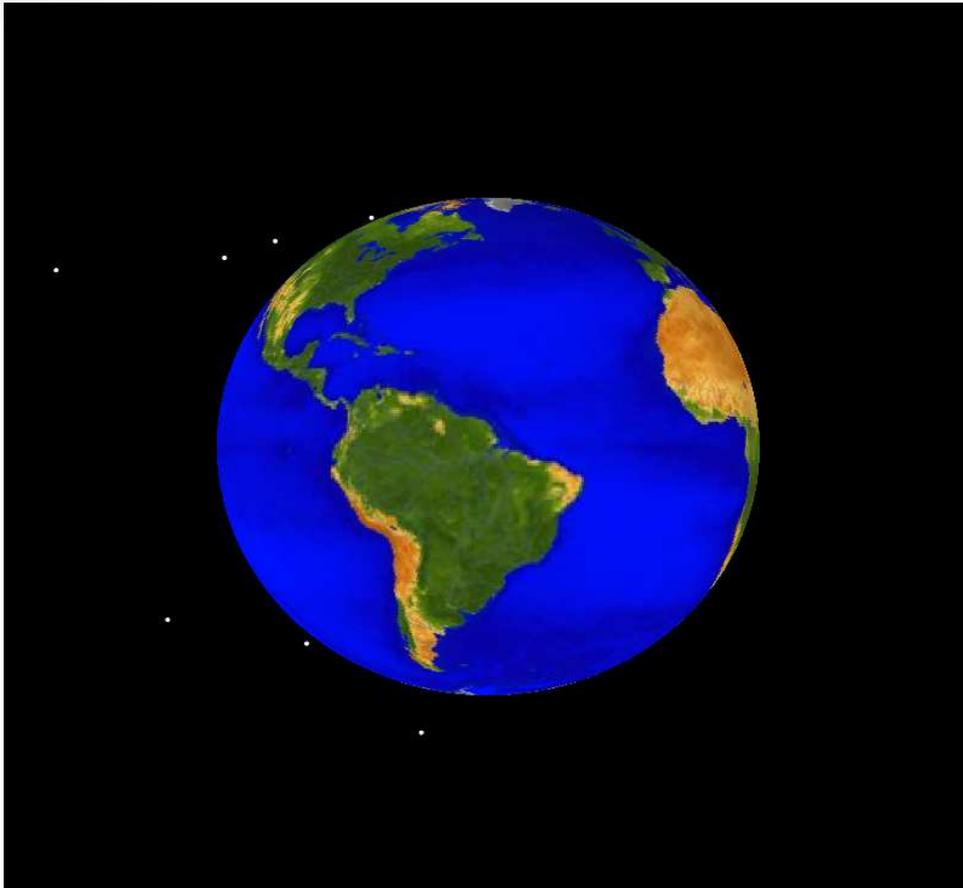
Un débris spatial est un objet orbital artificiel non fonctionnel

Objets catalogués :  $\geq 10$  cm en orbite basse,  $\geq 1$  m en géostationnaire

⚠ Attention à la taille exagérée des points...

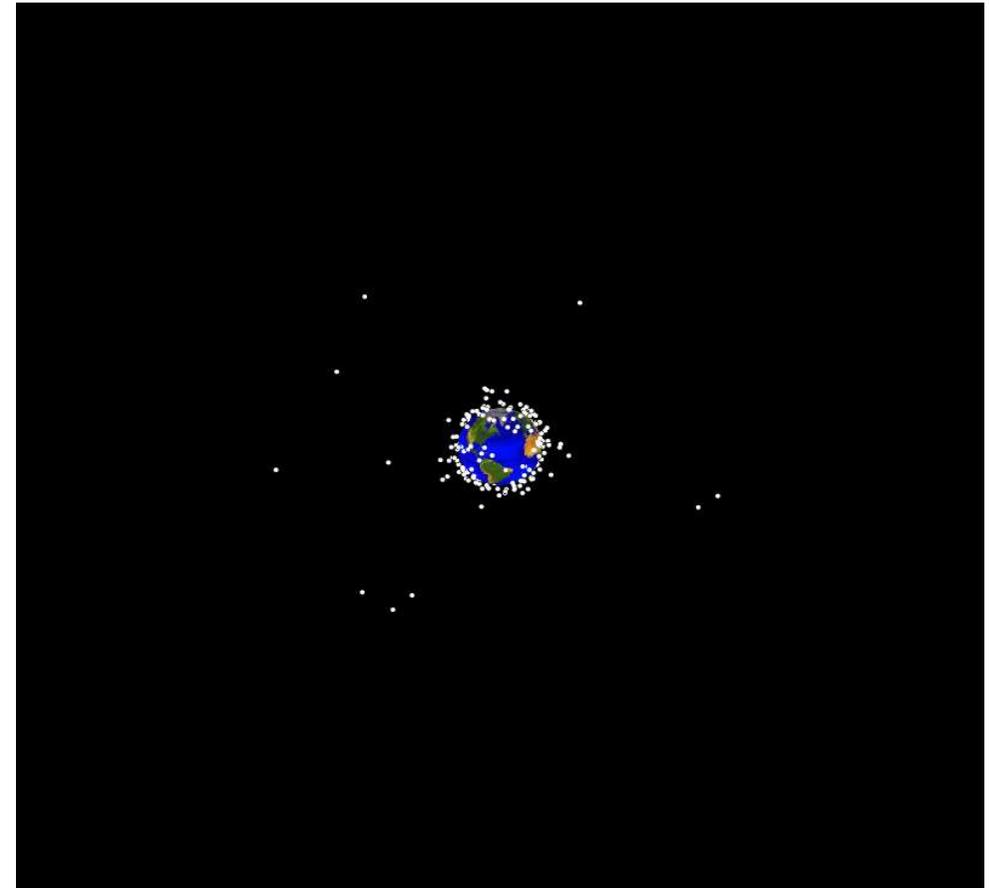
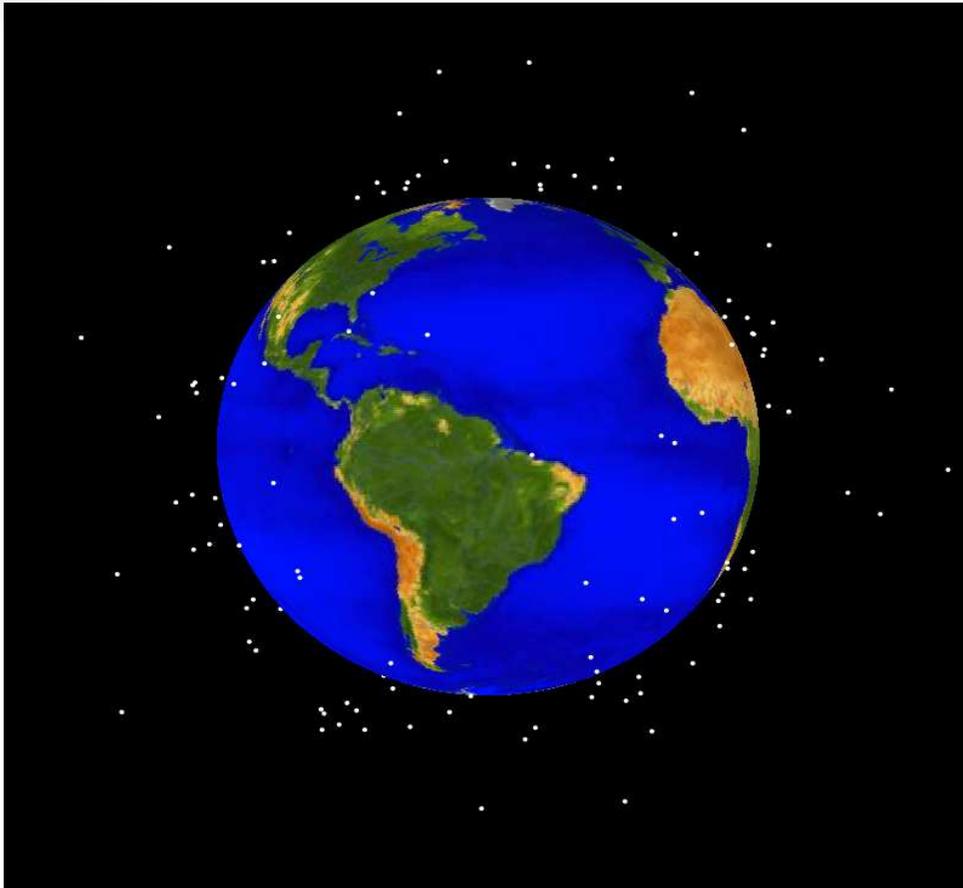


**1960**



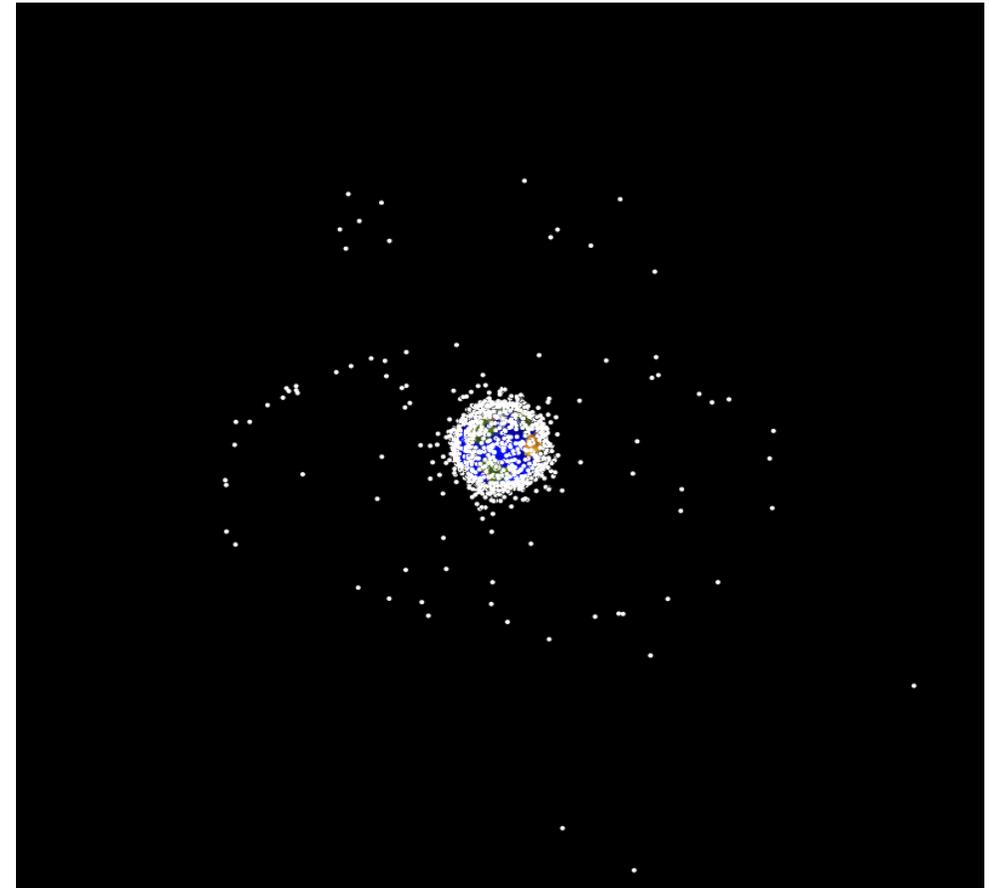
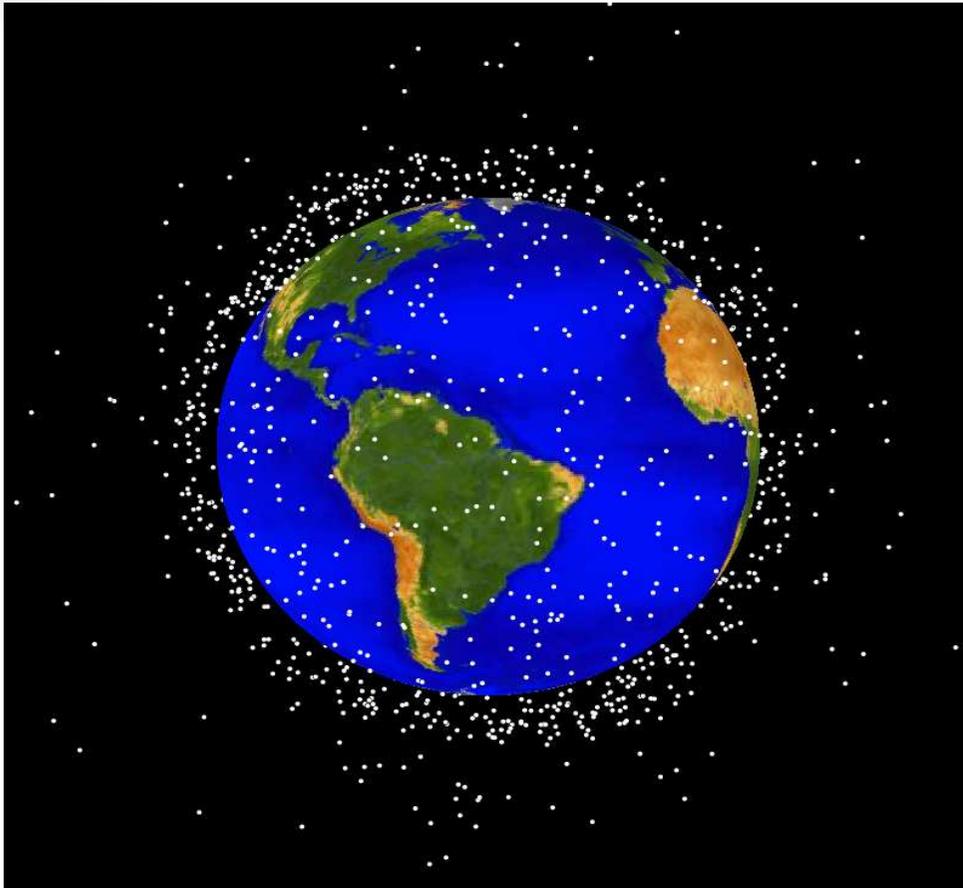
**Objets catalogués > 10 cm de diamètre**

1965



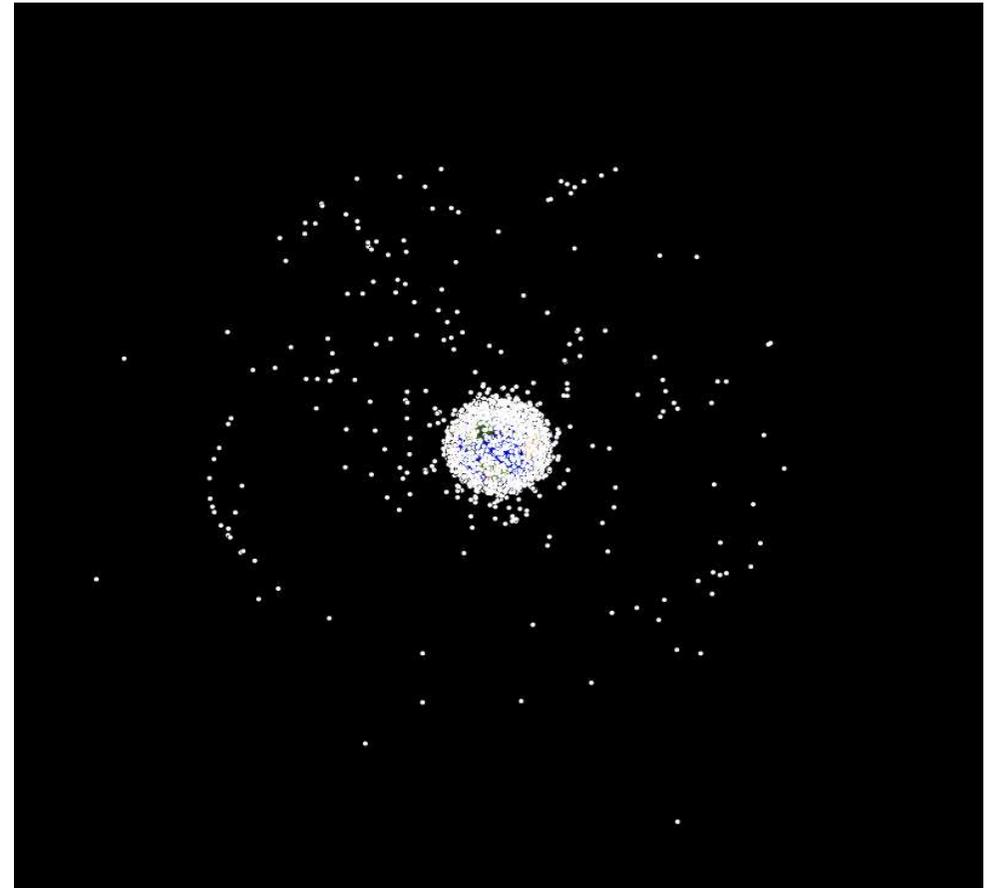
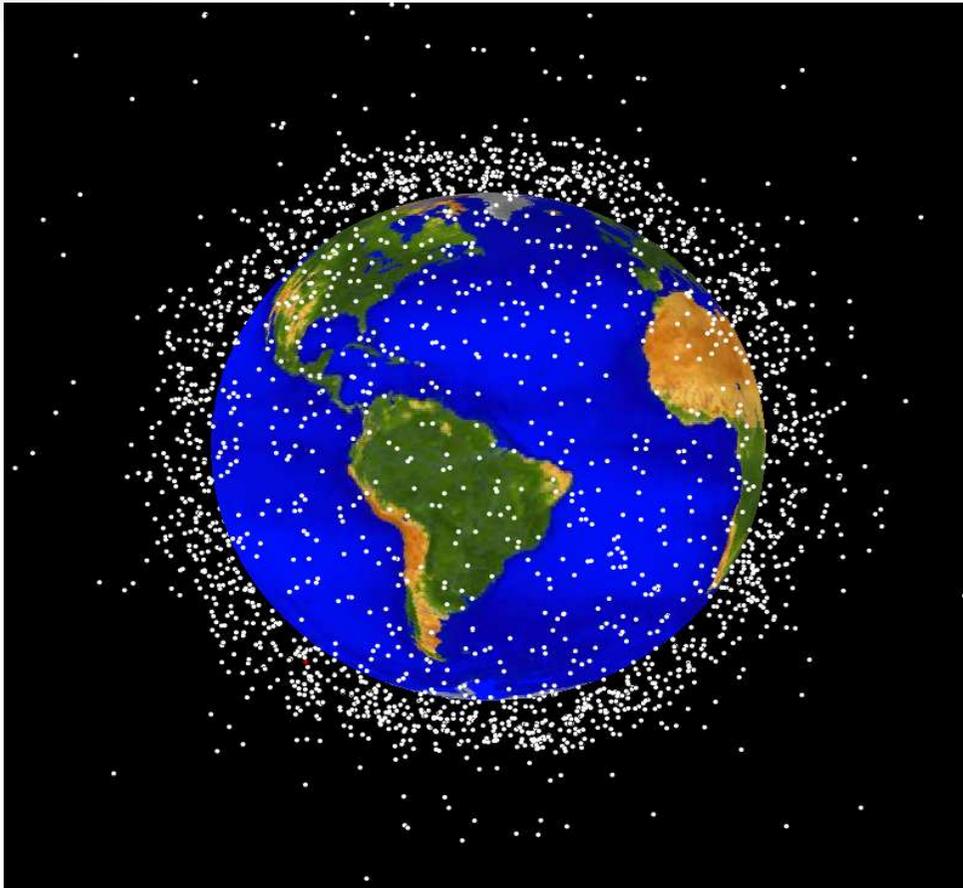
**Objets catalogués > 10 cm de diamètre**

1970



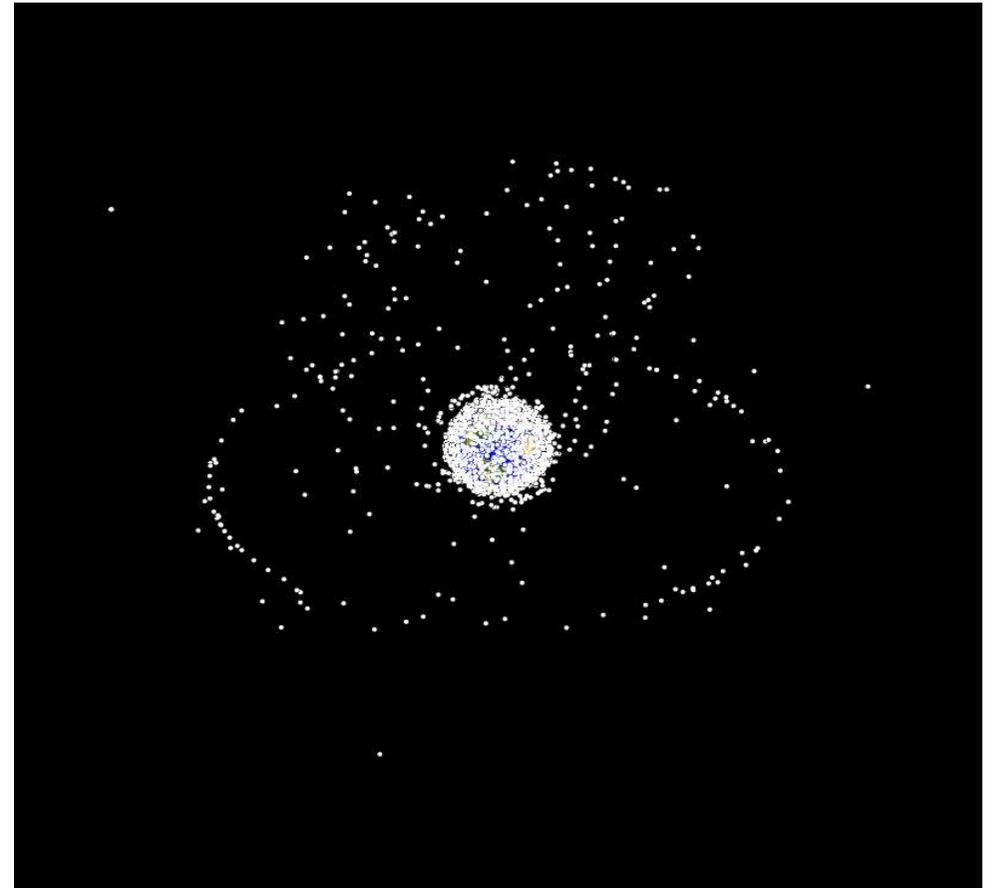
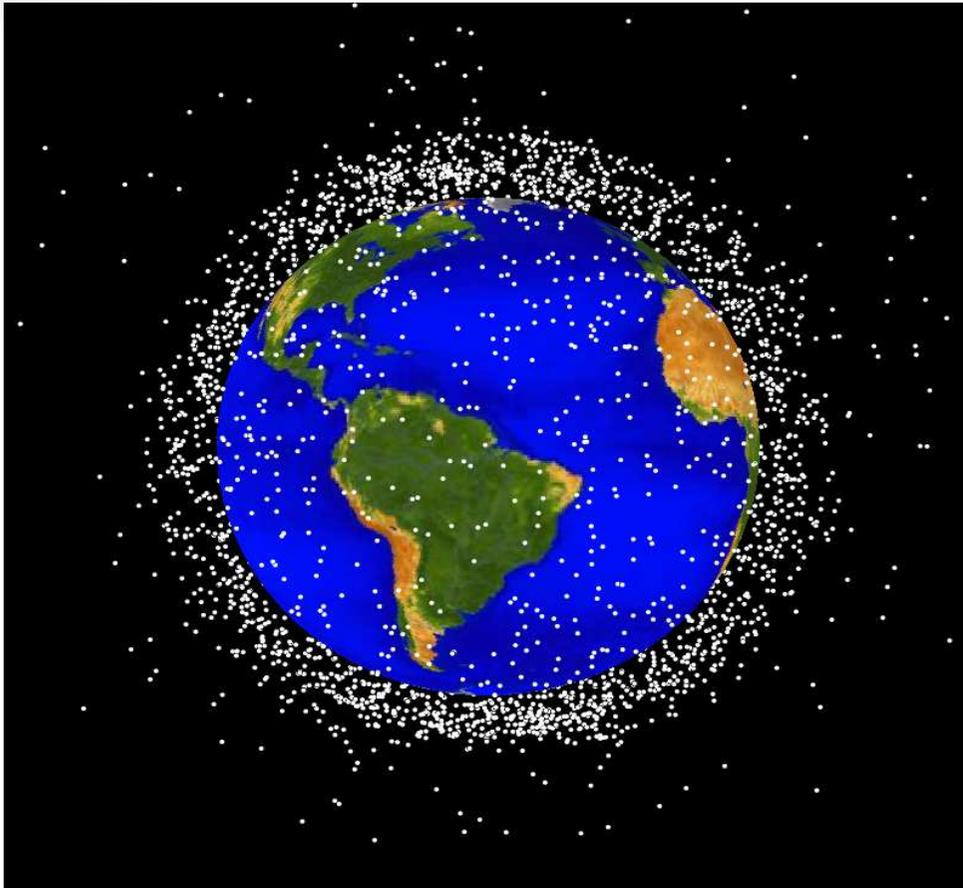
**Objets catalogués > 10 cm de diamètre**

1975



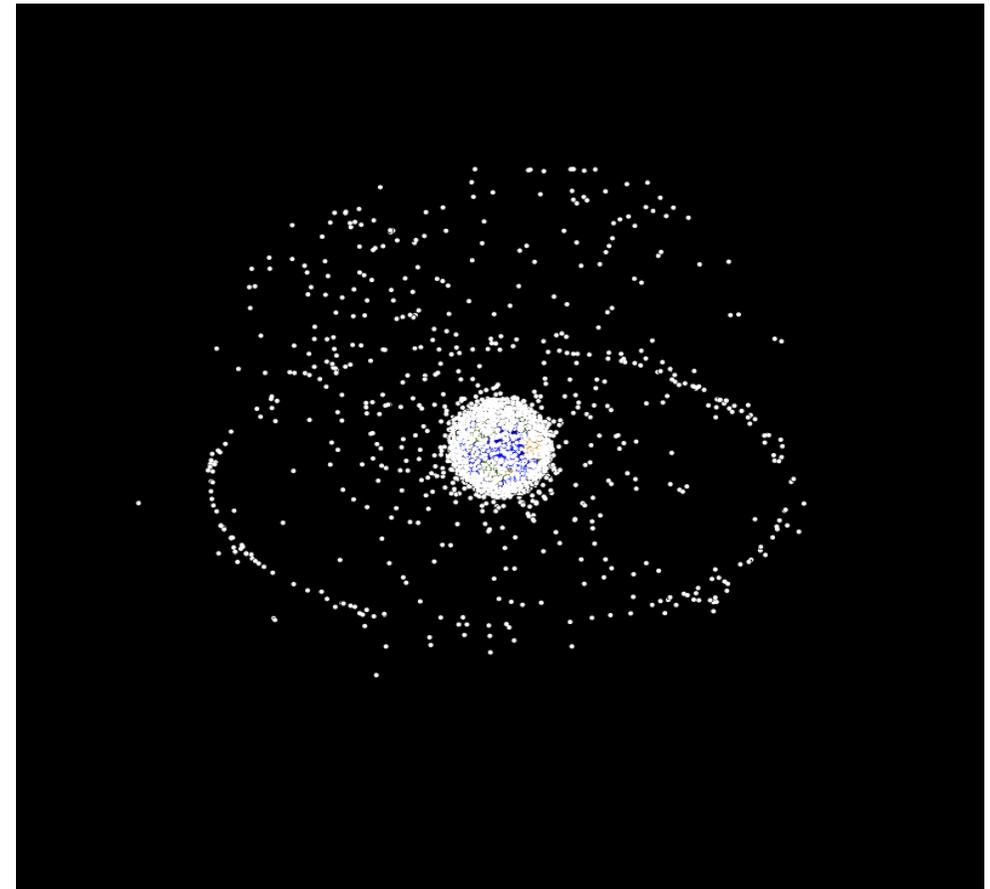
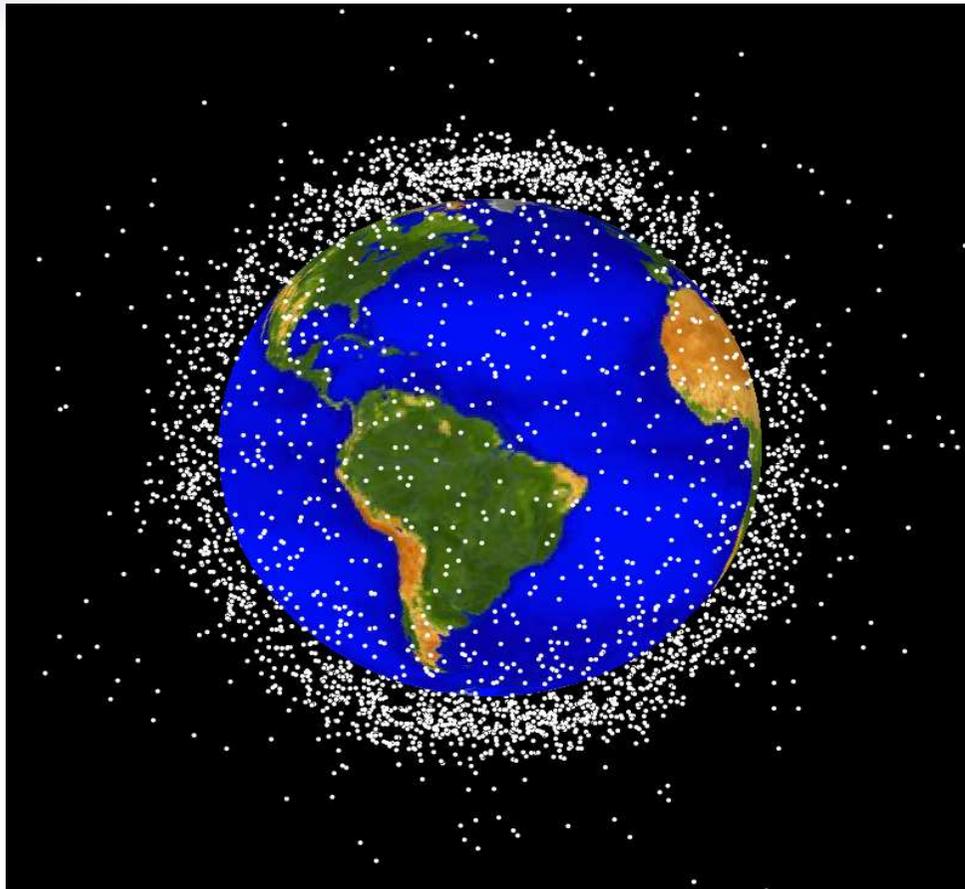
**Objets catalogués > 10 cm de diamètre**

1980



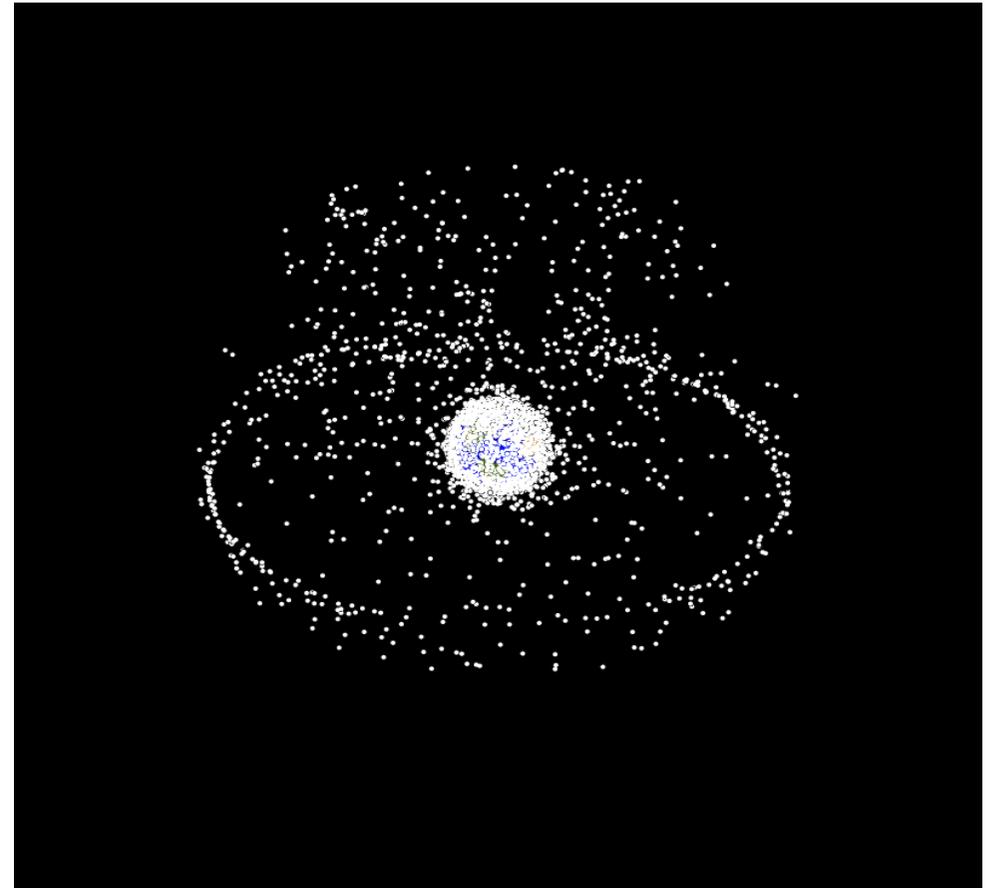
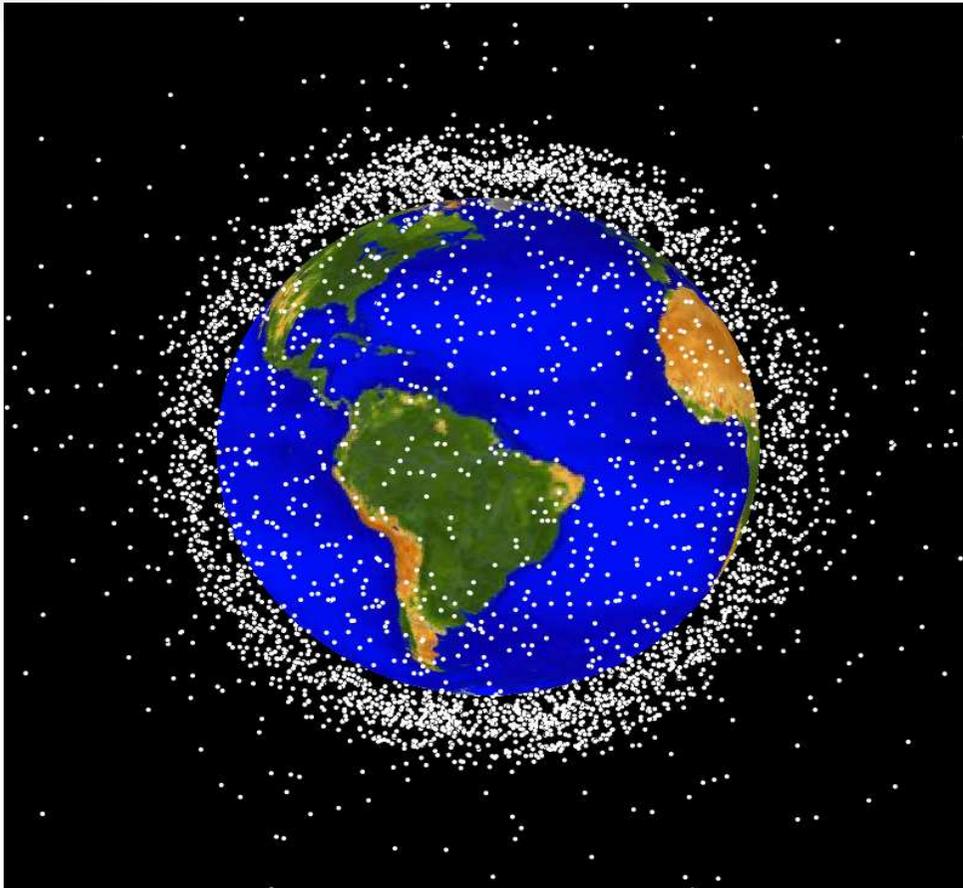
**Objets catalogués > 10 cm de diamètre**

1985



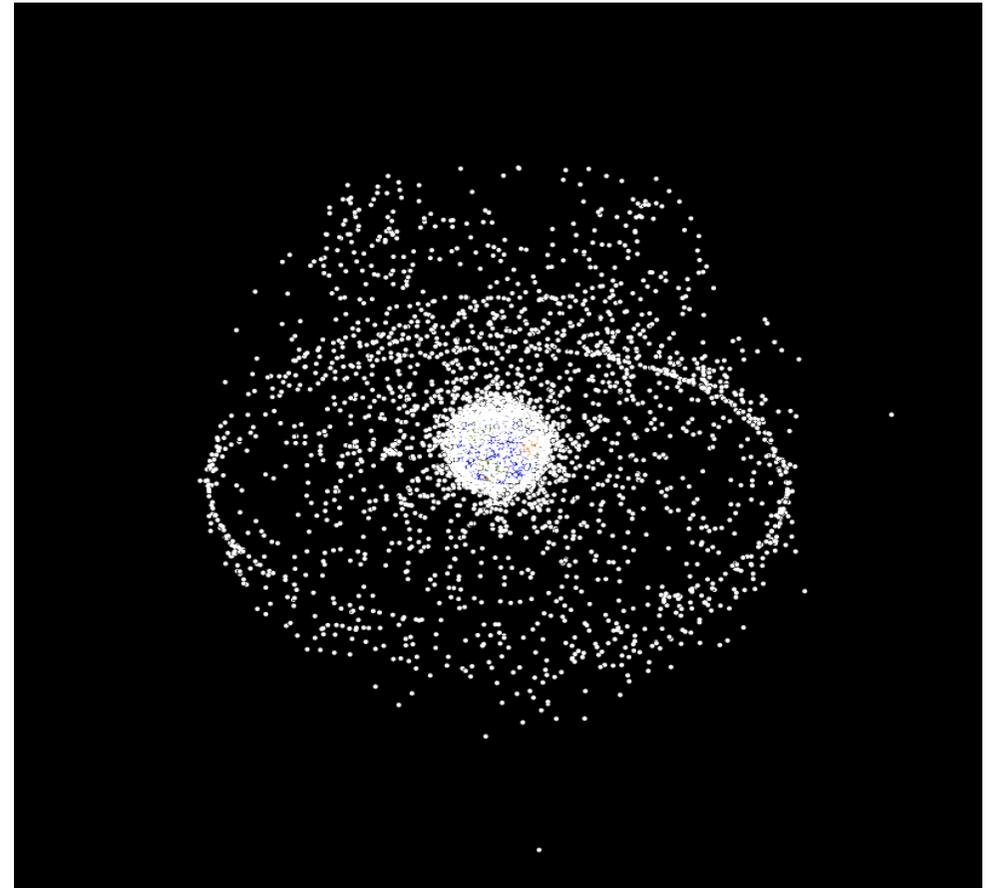
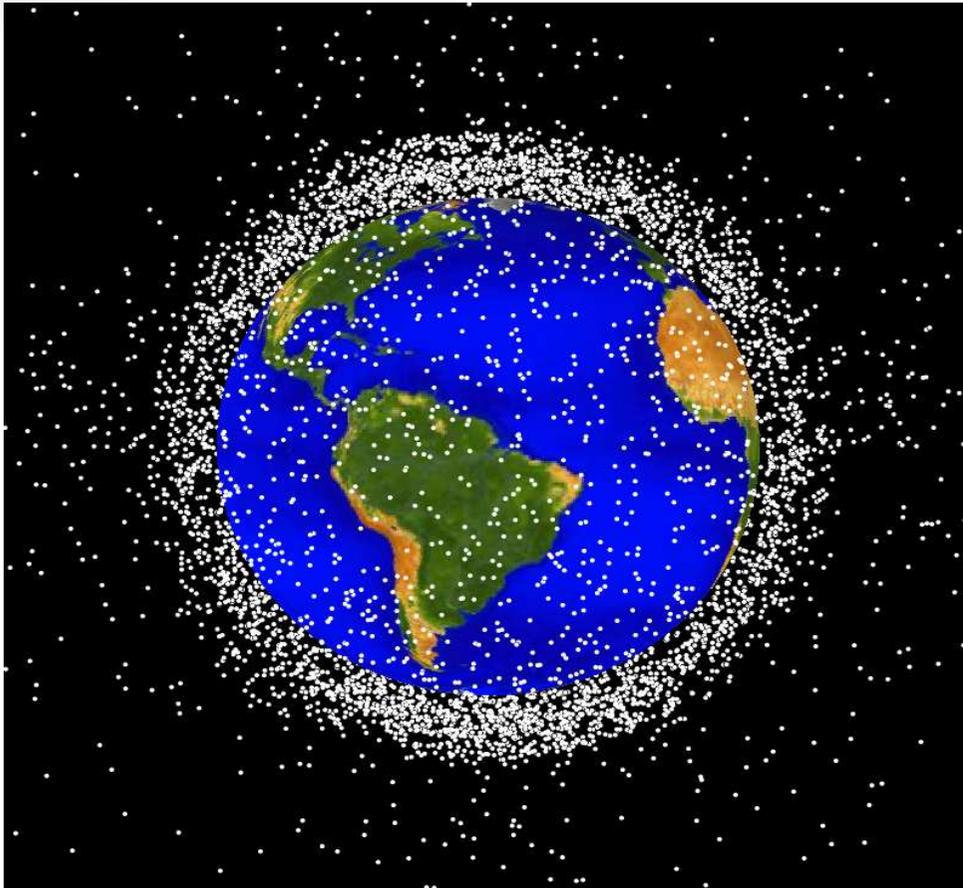
**Objets catalogués > 10 cm de diamètre**

1990



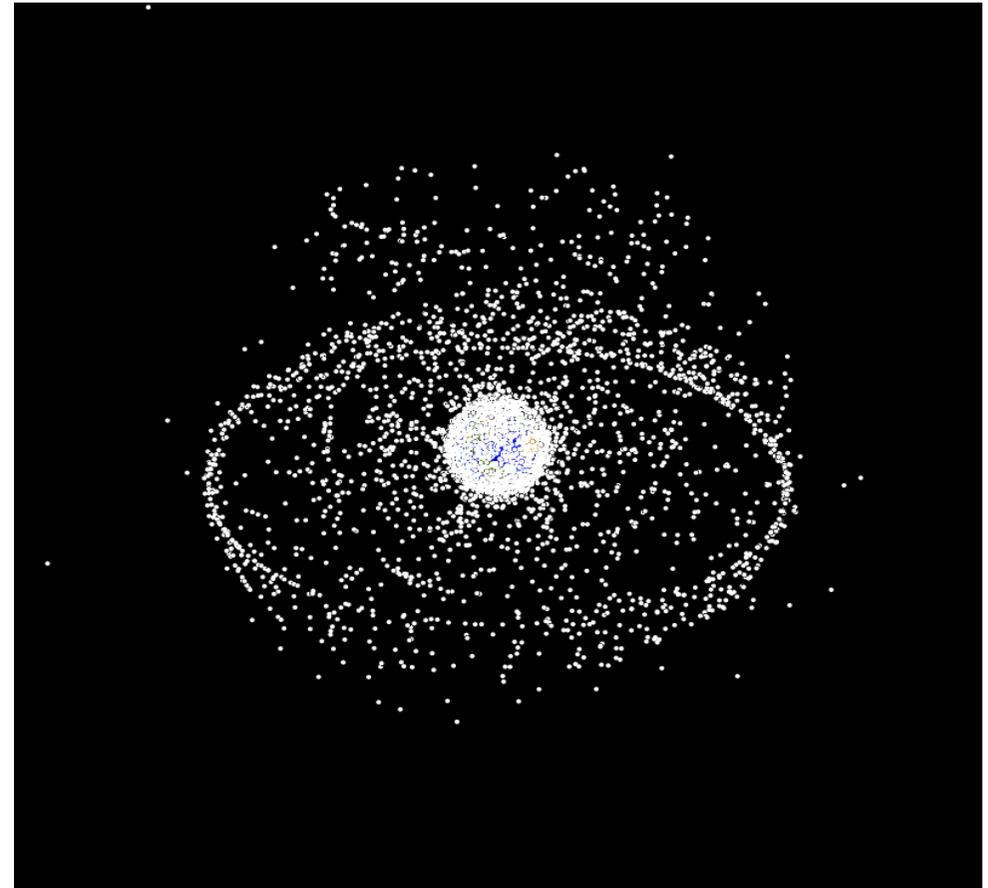
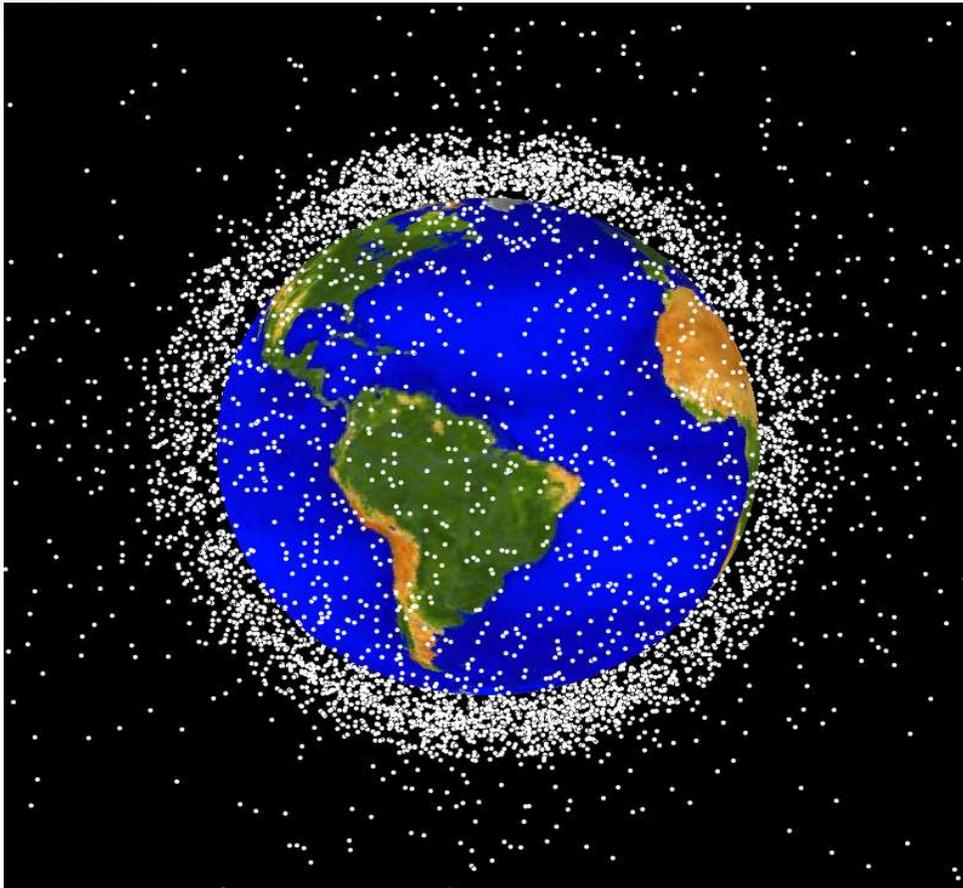
**Objets catalogués > 10 cm de diamètre**

1995



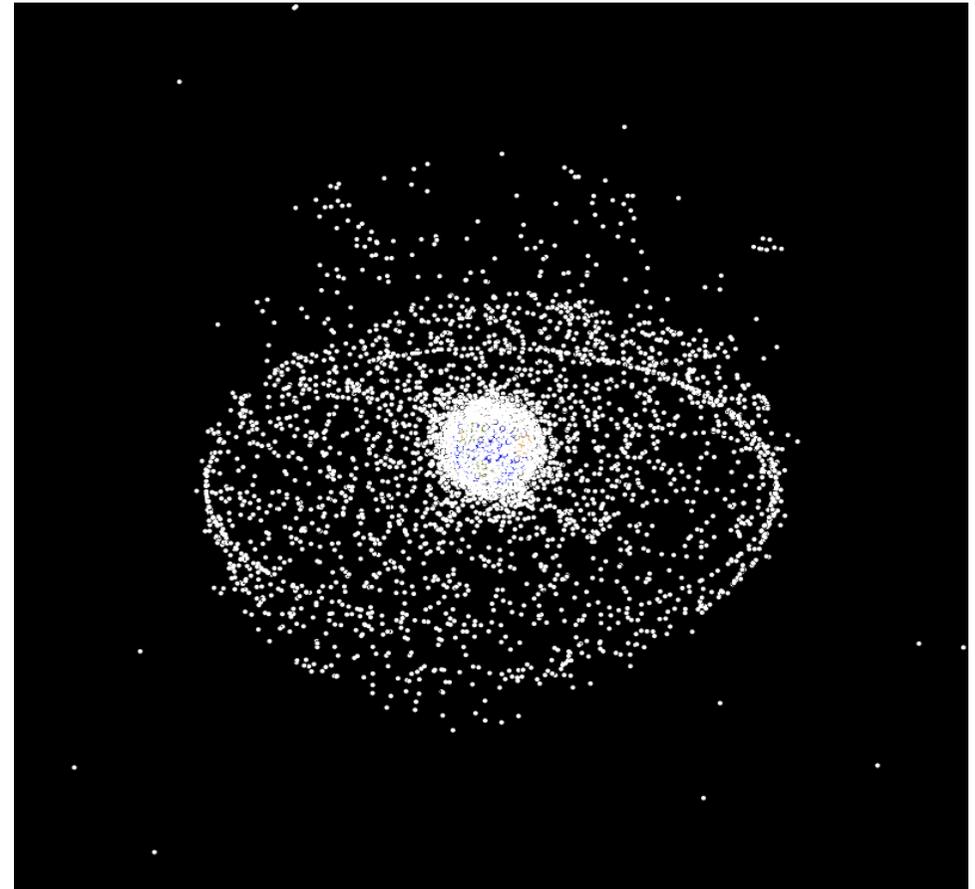
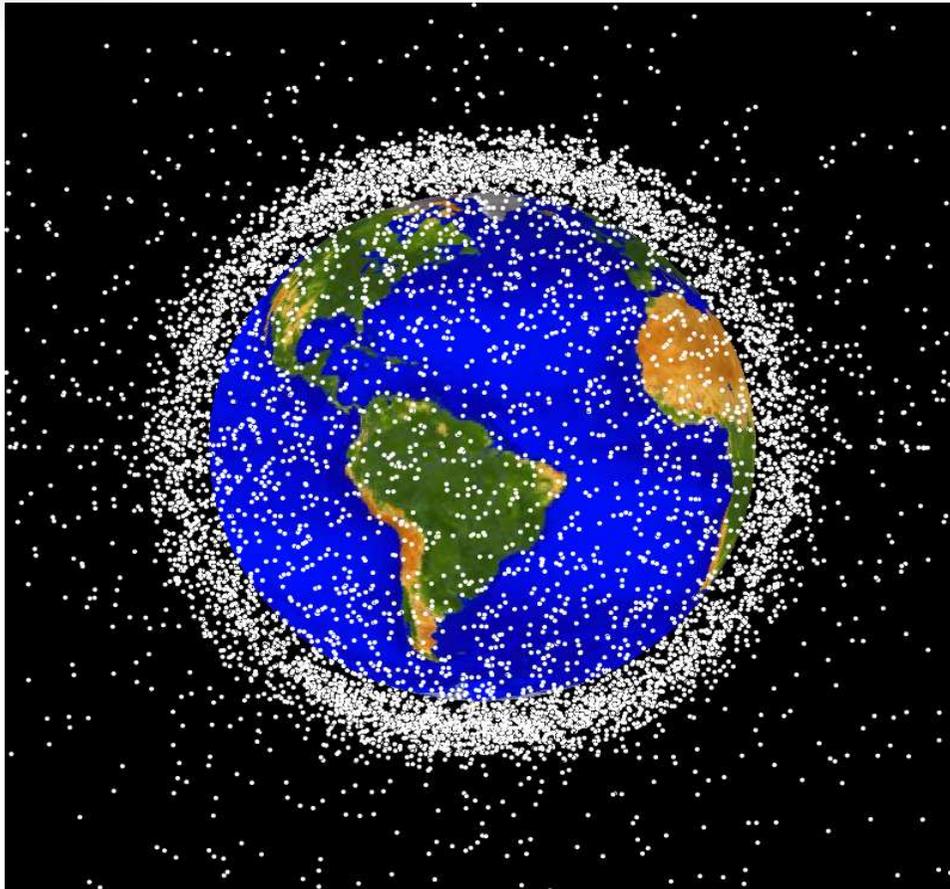
**Objets catalogués > 10 cm de diamètre**

2000



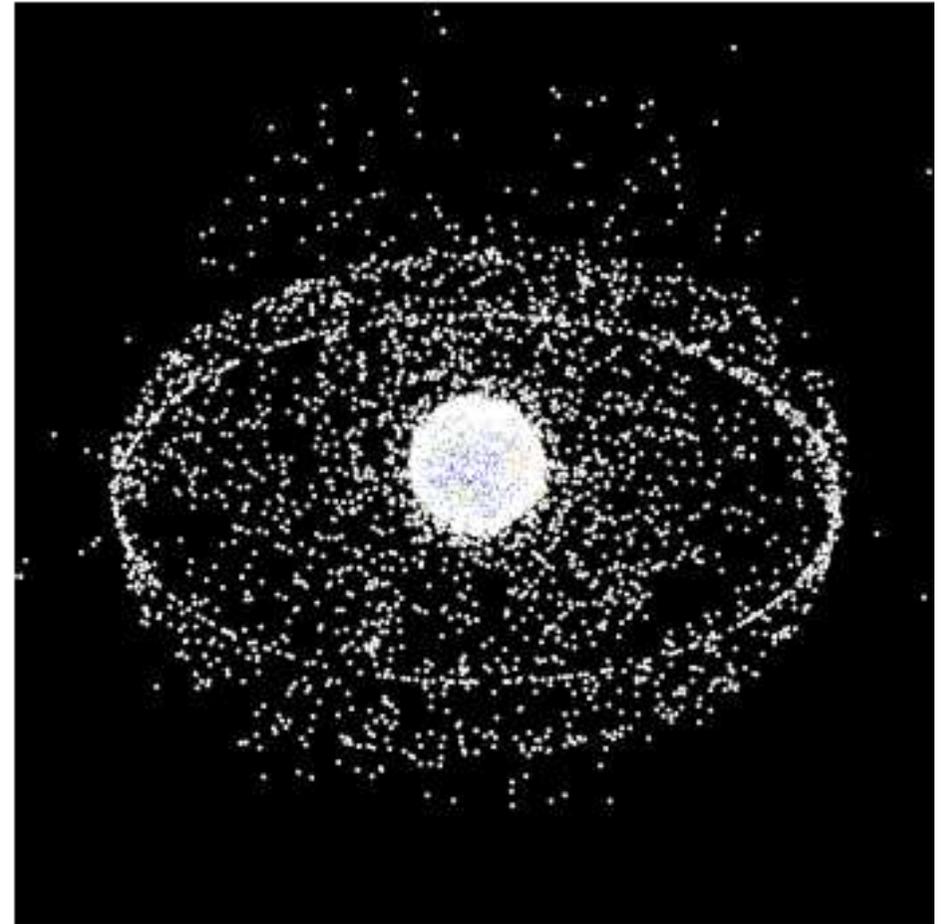
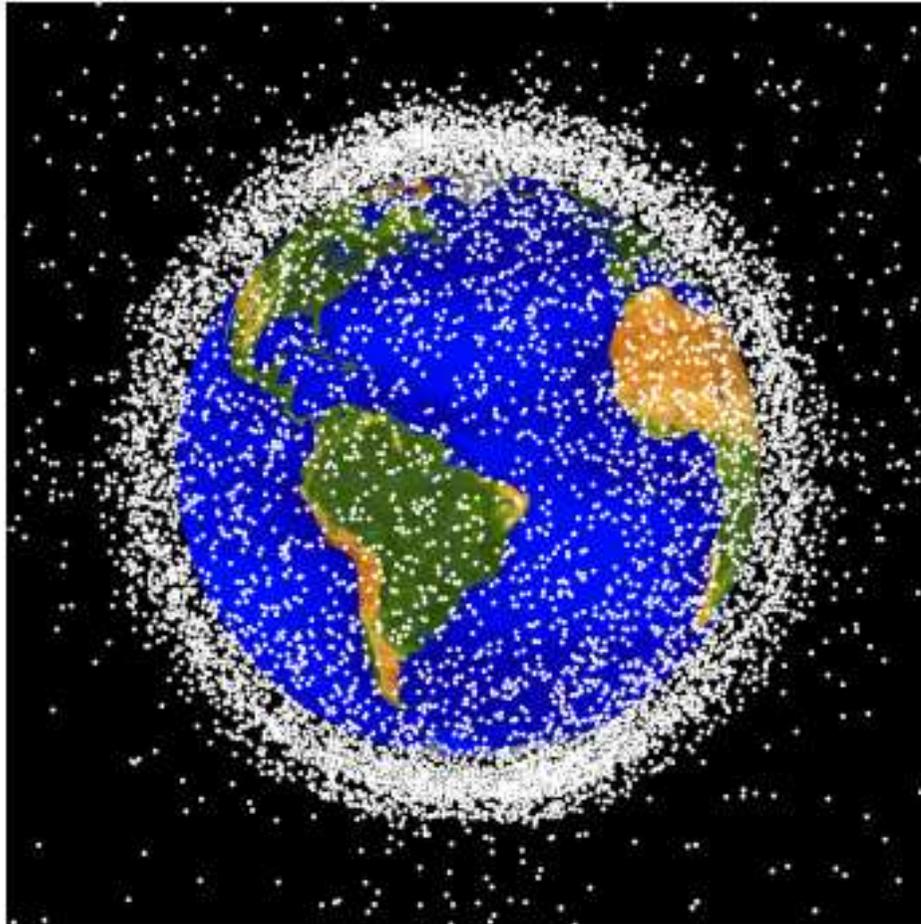
**Objets catalogués > 10 cm de diamètre**

2005



**Objets catalogués > 10 cm de diamètre**

2010



**Objets catalogués > 10 cm de diamètre**

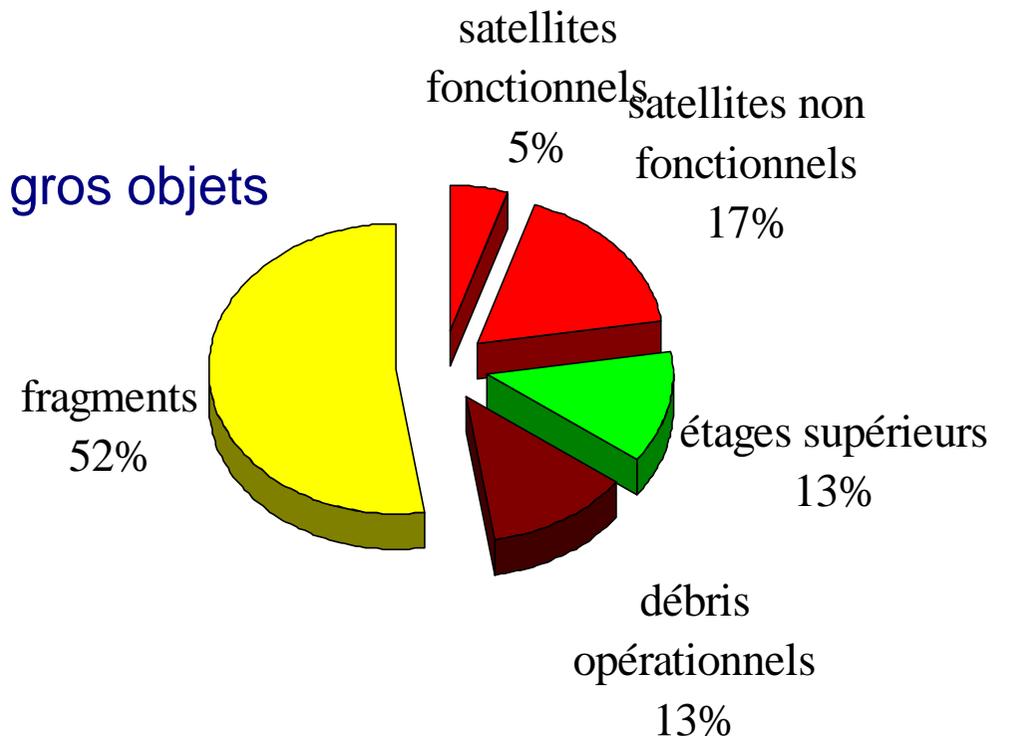
## Environ 20.000 gros objets dans l'espace

- 16.000 objets catalogués
  - ↳ environ 4.000 objets supplémentaires identifiés mais non catalogués
- 700.000 débris de plus de 1 cm
- 135 million de débris de plus de 1 mm

⚠ Mais l'espace est infiniment grand !

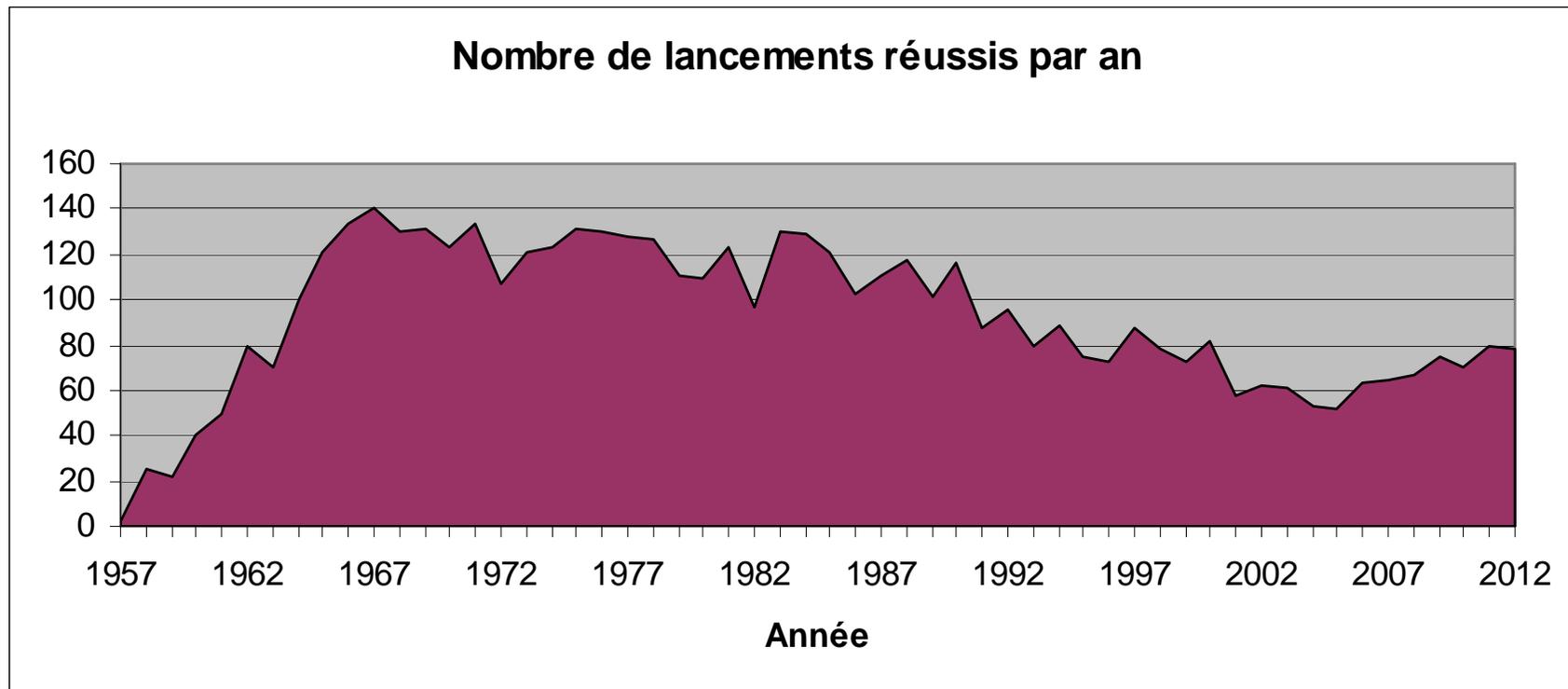
↳ A un instant donné, seulement 18 gros objets au dessus de la France

- Environ 900 satellites actifs (5 %) :
  - 400 en GEO (géostationnaire)
  - 400 en LEO (orbites basses)
  - 100 ailleurs



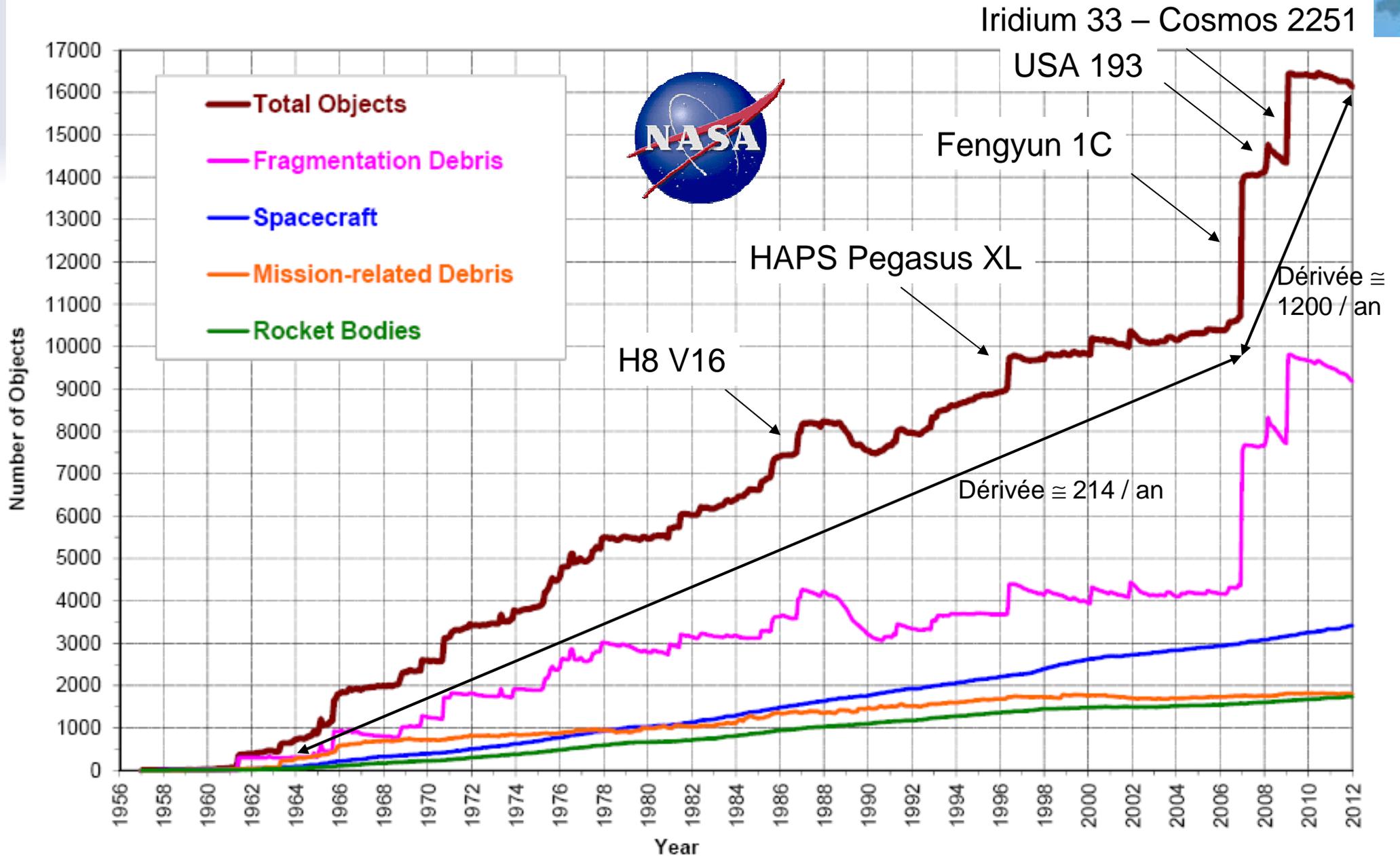
### *Le nombre d'objets en orbite augmente fortement dans le temps*

- Principalement en Orbites Basses (Region A =  $\leq 2000$  km,  $\forall i$ )
- Significativement en Orbite Géostationnaire (Region B = GEO  $\pm 200$  km  $\pm 15^\circ$ )
- Malgré une forte réduction du nombre de lancements par rapport à 60-80

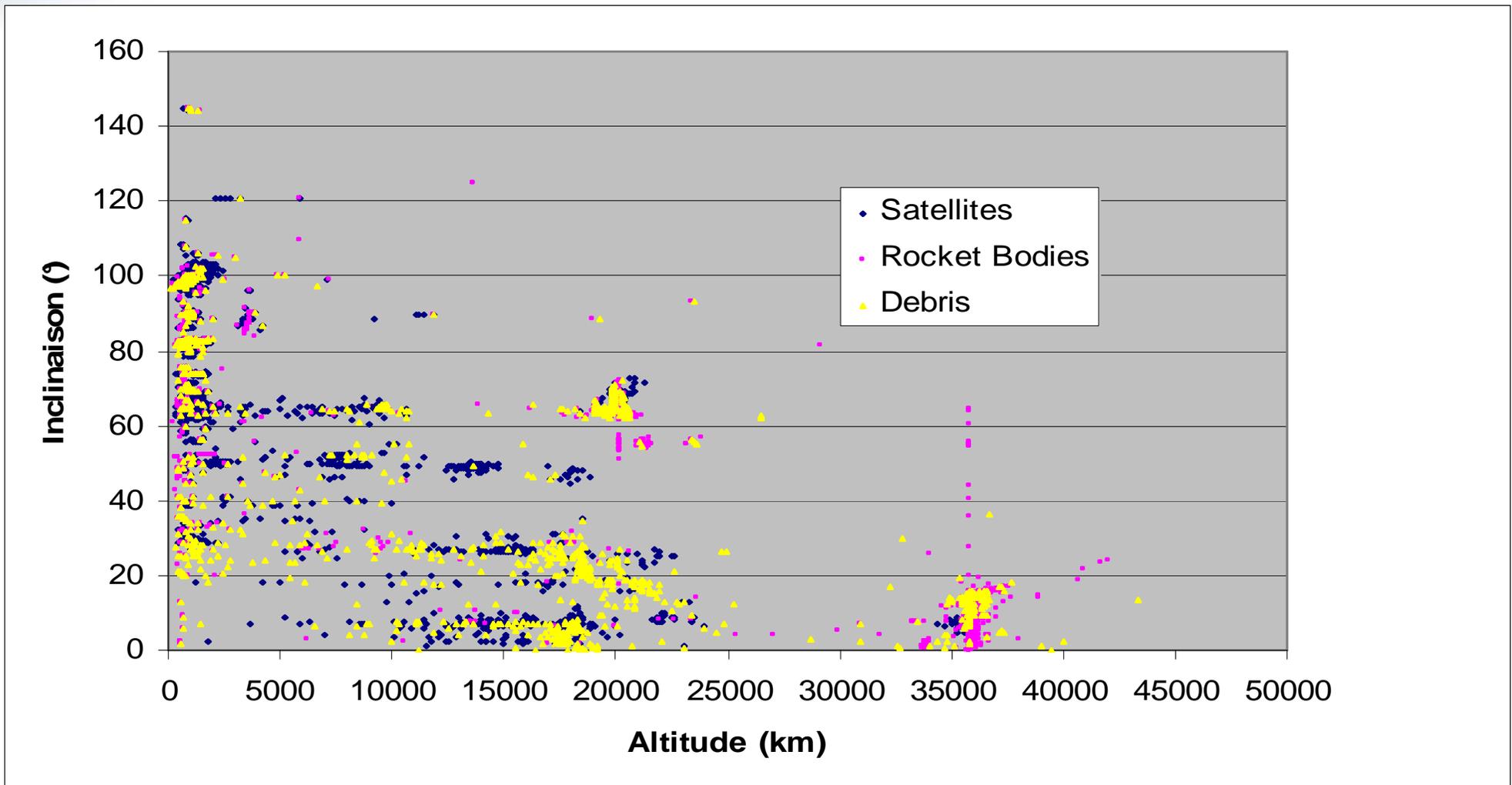


# Situation actuelle : Nombre d'objets catalogués (NASA)

Monthly Number of Objects in Earth Orbit by Object Type

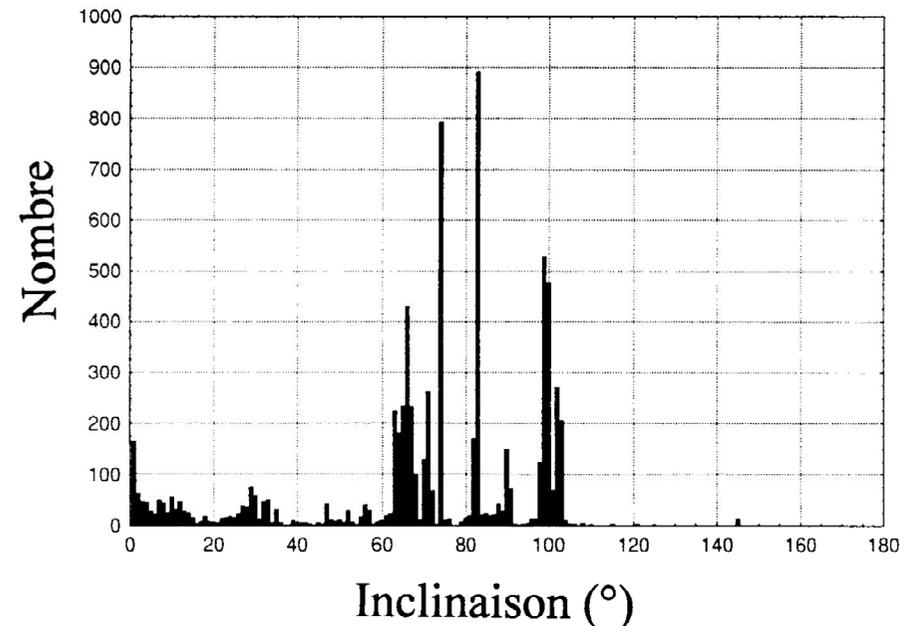
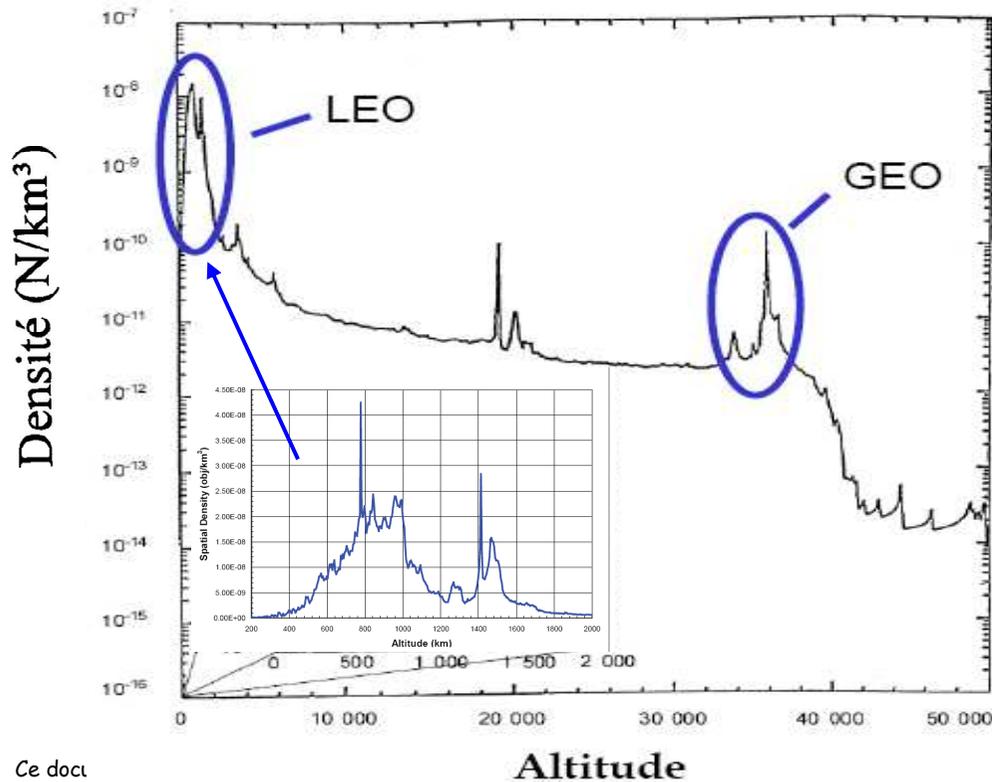


## Position des objets catalogués dans le plan Altitude - Inclinaison (source : TLE USSPACECOM – 05.02.13)



## Distribution en orbite des objets artificiels

- Bien connue pour les gros objets ( $\phi \geq 10$  cm), beaucoup moins bien pour les petits
- En majorité Orbites Basses, altitudes de moins de 1700 km, pics à 800 et 1500 km
- En majorité orbites fortement inclinées, 70 à 105°
- Pics en orbites « Navigation » et en Géostationnaire



### Origine des débris : 4 sources principales

#### - Lancement

↳ Exemple de 2012 : 78 lancements ⇒ 374 objets catalogués

#### - Vieillesse des matériaux

**(Protections Thermiques, cellules électriques, Mylars...)**

↳ Principalement des très petits débris

#### - Fragmentations, volontaires ou non

↳ 213 enregistrées au 24 février 2012

⇒ Exemples of fragmentations volontaires (59) :

Feng-Yun 1C : 3000 débris catalogués en 2007

USA-193 : 500 débris catalogués en 2008 (tous rentrés à ce jour)

⇒ Exemples de fragmentations accidentelles (154) :

Etage supérieur d'Ariane V16 : 796 débris catalogués en 1986

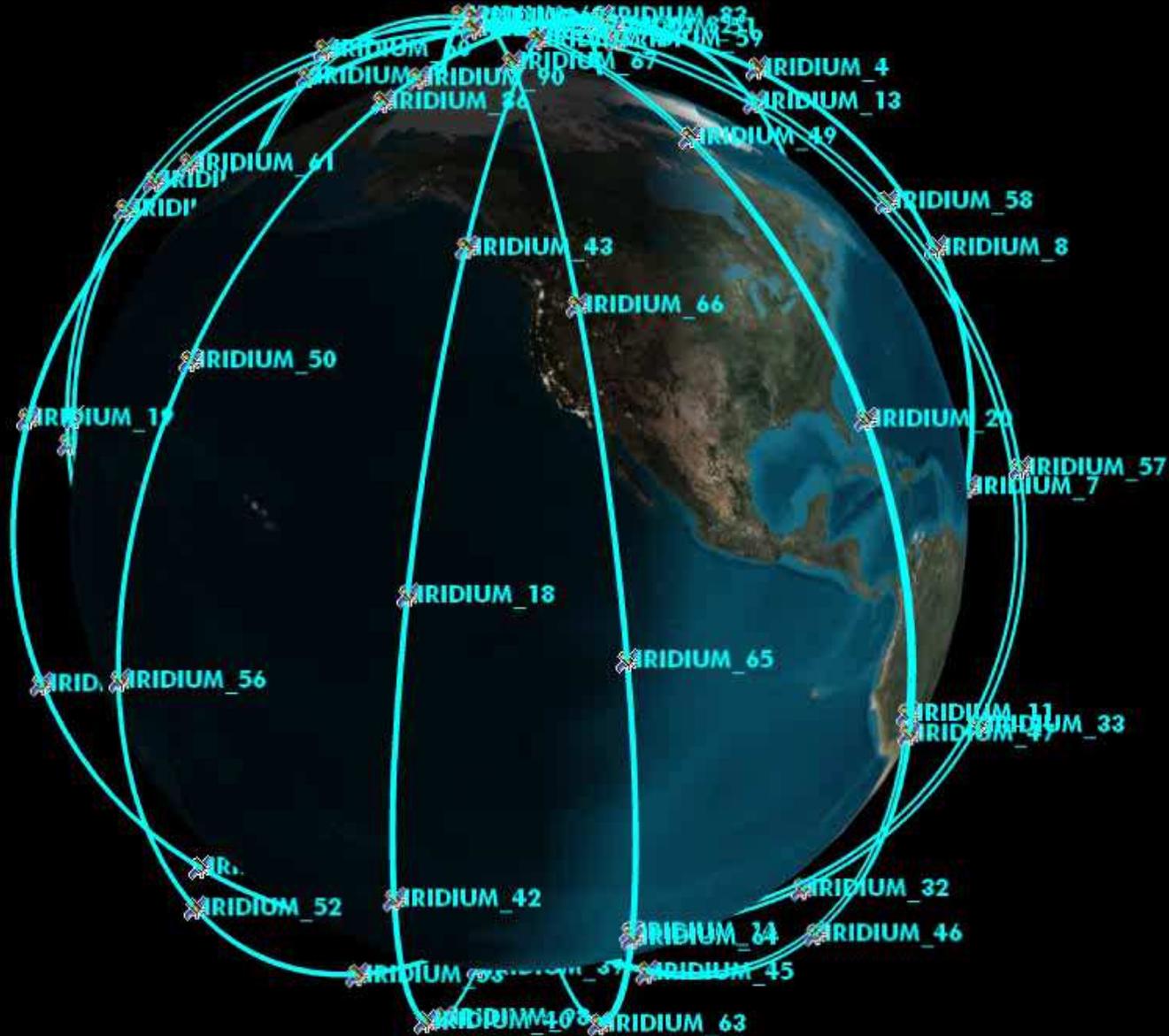
Etage supérieur de Pegasus XL : 601 débris catalogués en 1996

#### - Collisions

↳ 4 collisions officiellement, probablement beaucoup plus non enregistrées

⇒ Exemple : Iridium 33 – Cosmos 2251 → 1000 débris catalogués en 2009

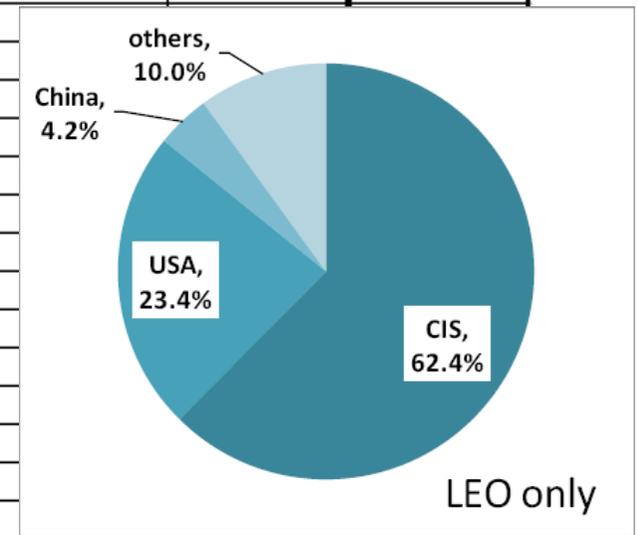
# Collision Iridium 33 – Cosmos 2251 (AGI)



## Contribution de la France

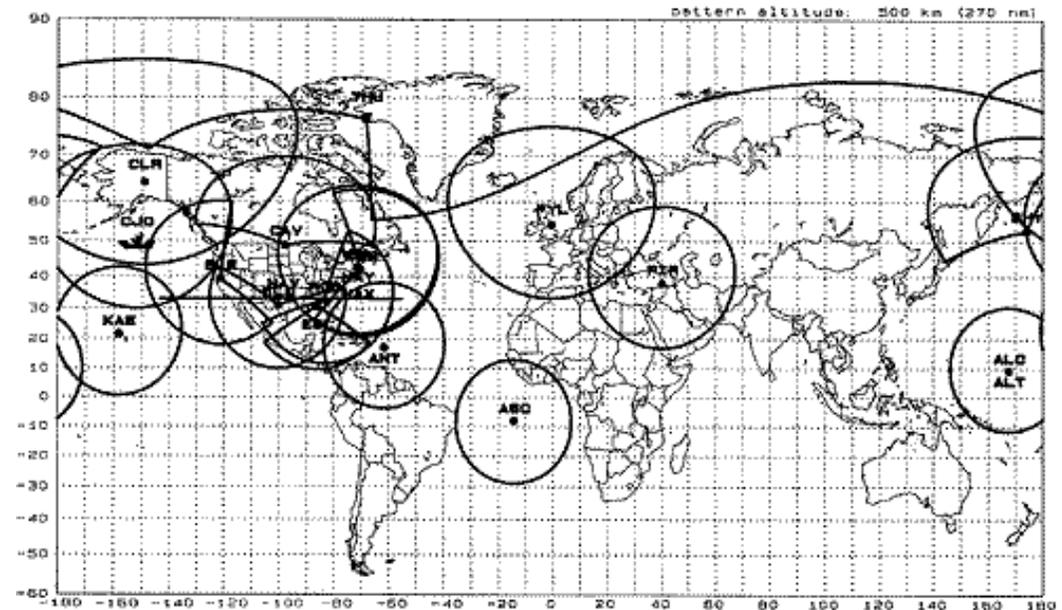
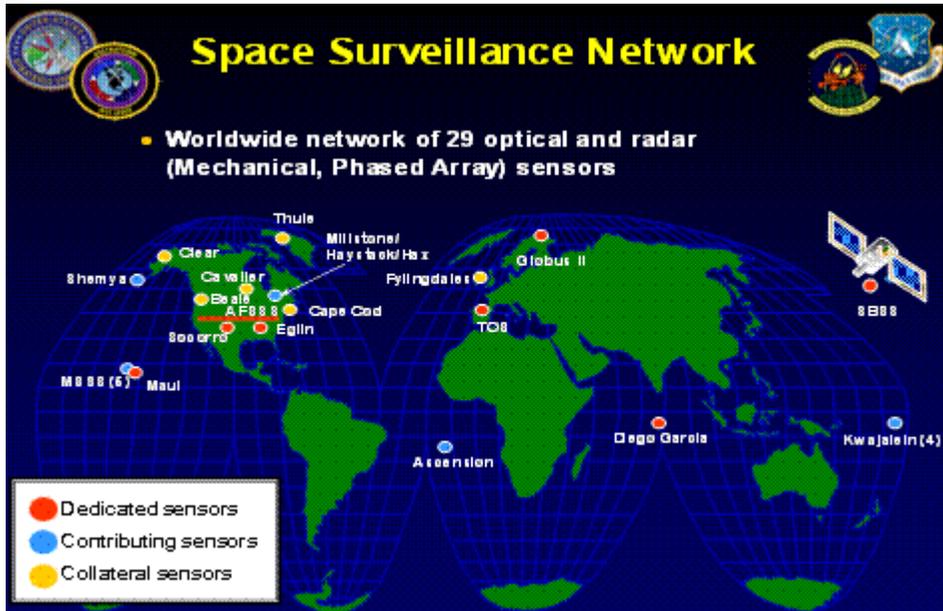
- 4<sup>ème</sup> contributeur après Russie, USA, Chine, sur 69 pays ou organisations
- Mais contribution globalement très faible : 3% des objets en orbite

Pays	Objets en orbite				Objets rentrés				Grand Total
	Satellite	Etage lanceur	Débris	Total	Satellite	Etage lanceur	Débris	Total	
<b>Total</b>	<b>3694</b>	<b>1955</b>	<b>11251</b>	<b>16900</b>	<b>3467</b>	<b>3617</b>	<b>15033</b>	<b>22117</b>	<b>39017</b>
CIS	1464	996	3868	6328	2483	2745	9094	14322	20650
US	1114	654	3234	5002	803	621	4114	5538	10540
PRC	143	75	3565	3783	60	97	665	822	4605
<b>FR</b>	<b>56</b>	<b>132</b>	<b>308</b>	<b>496</b>	<b>8</b>	<b>65</b>	<b>612</b>	<b>685</b>	<b>1181</b>
IND	51	16	109	176	10	11	274	295	471
JPN	135	42	47	224	30	59	141	230	454
ESA	49	7	38	94	11	7	15	33	127
CHBZ	3	0	72	75	0	0	14	14	89
ISS	5	0	0	5	1	0			
GLOB	78	0	1	79	0	0			
ITSO	79	0	0	79	1	0			
GER	42	0	1	43	15	0			
SES	46	0	0	46	0	0			
UK	29	1	0	30	9	0			
ORB	41	0	0	41	0	0			
CA	34	0	3	37	1	0			
EUTE	40	0	0	40	0	0			
SEAL	1	28	3	32	0	3			
IT	21	2	0	23	9	0			
ISRA	11	0	0	11	3	6			
AUS	12	2	0	14	2	0			
SDN	14	0	0	14	1	0			



## Connaissance de la population orbitale

- Réseau de radars et télescopes américains du Space Surveillance Network



- Elaboration du catalogue grand public TLE (Two Line Elements) - Exemple :

*ARIANE 5 R/B*

```
1 28913U 05049C 06301.83789682 -.00000128 00000-0 10000-3 0 1462
2 28913 003.8481 113.5422 7138090 062.7753 351.3958 02.24835509 6991
```



## 2. Evènements redoutés



CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES

## ① Rentrée atmosphérique non contrôlée :



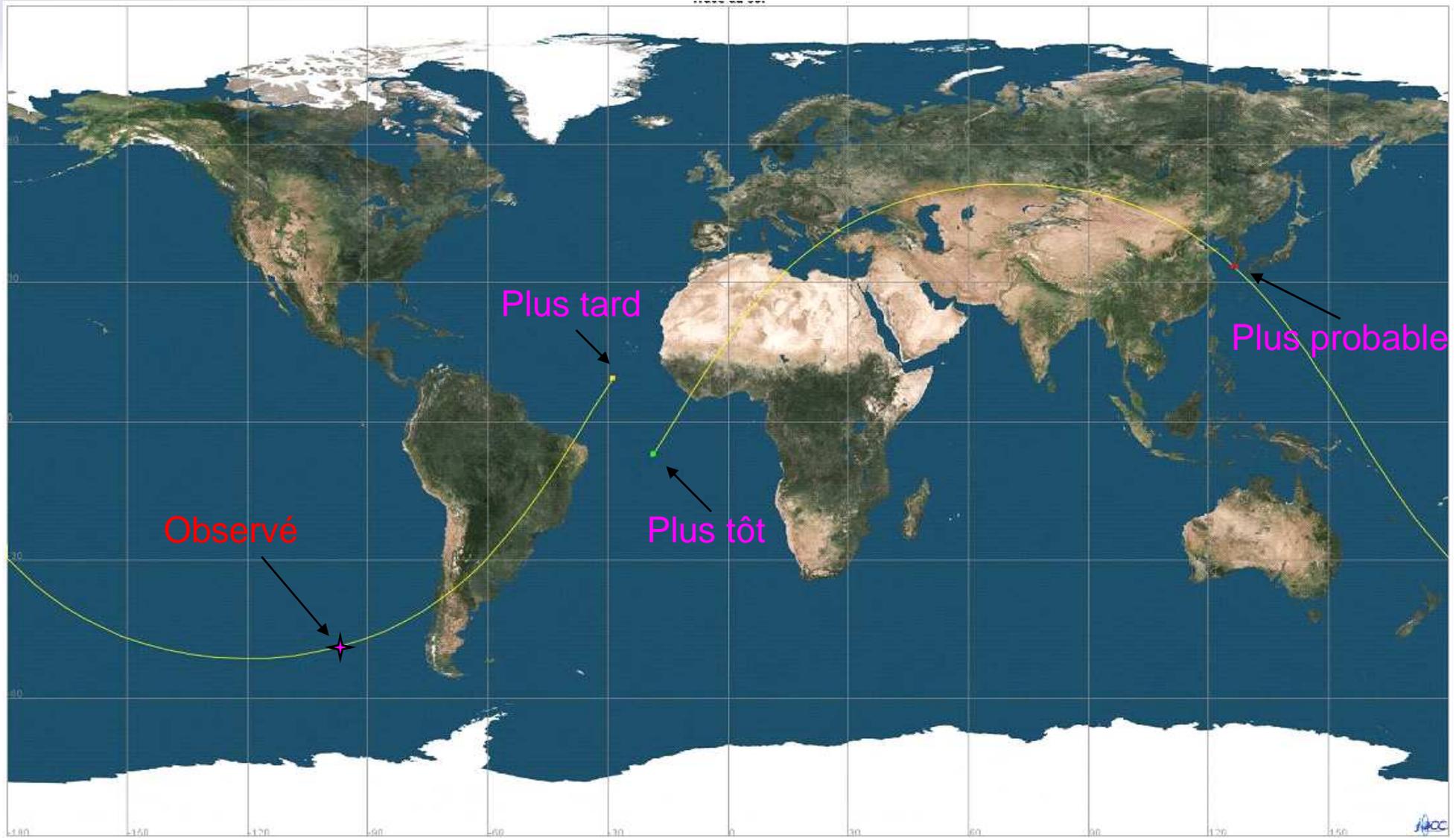
En cas de rentrée non contrôlée de satellites, étages et gros débris :  
→ Proportion importante "sublimée" à la rentrée,  
mais...

- Risque de retombée au sol de fragments (aciers, titane, composites, ...)
- Survivabilité élevée surtout pour les grandes structures (effet de masque)  
exemples : Skylab  $\approx$  80 Tonnes en orbite  $\Rightarrow$  20 Tonnes de morceaux au sol  
Mir  $\approx$  140 Tonnes en orbite  $\Rightarrow$  20 % au sol ?
- Préviation du point de retombée difficile : la précision est de l'ordre de 10%  
→ 10 jours avant la retombée : précision de 1 jour sur la date de rentrée  
→ 1 jour avant : précision de 1 ou 2 orbites

**↪ effet : erreur de 2 mn sur la date  $\Rightarrow$  erreur de 1000 km sur le point de chute**

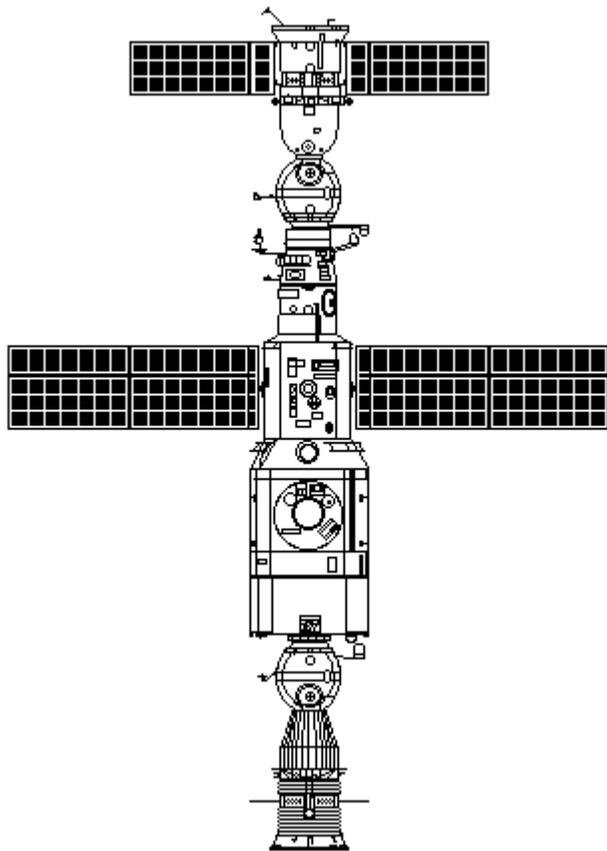
## ① Rentrée atmosphérique non contrôlée :

Exemple : estimée de la rentrée de Phobos-Grunt, 15 heures avant sa rentrée et **Observé**

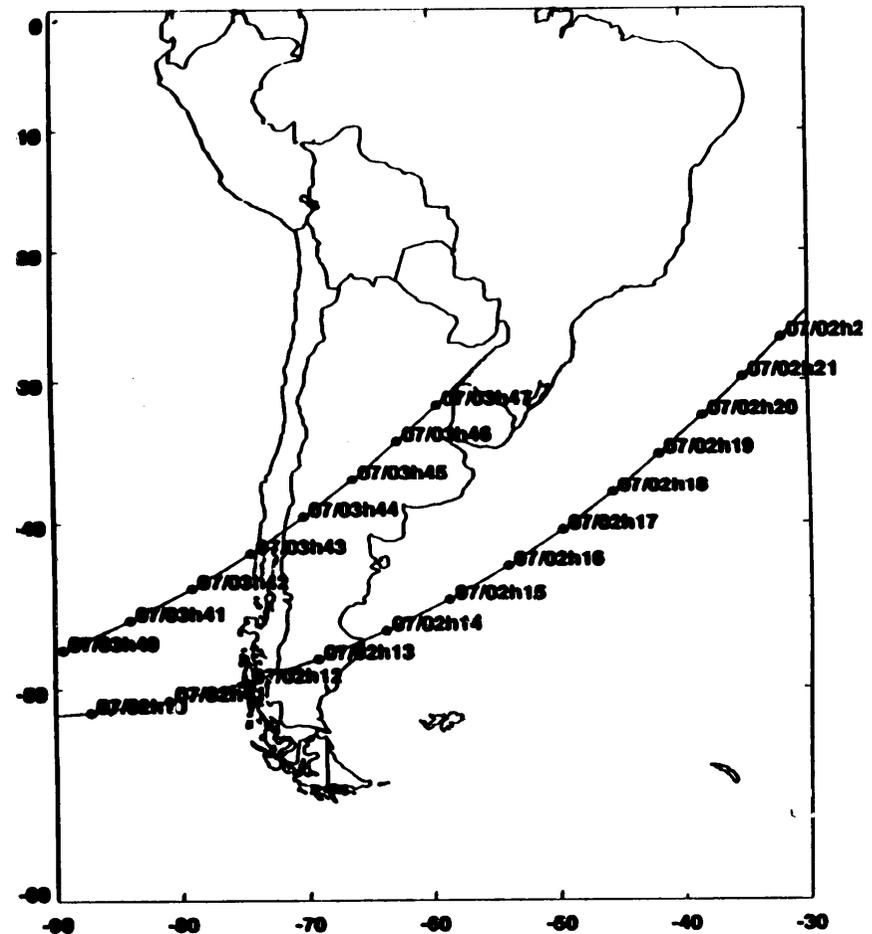


## ① Rentrée atmosphérique non contrôlée :

### Retombée de Saliut 7 le 7 février 1991 sur l'Amérique du Sud



19 tonnes



## ① Rentrée atmosphérique non contrôlée :

### Retombée d'un second étage Delta 2 au Texas (22.01.97)



### ① *Rentrée atmosphérique non contrôlée :*

## Retombée d'un second étage Delta 2 au Texas (22.01.97)

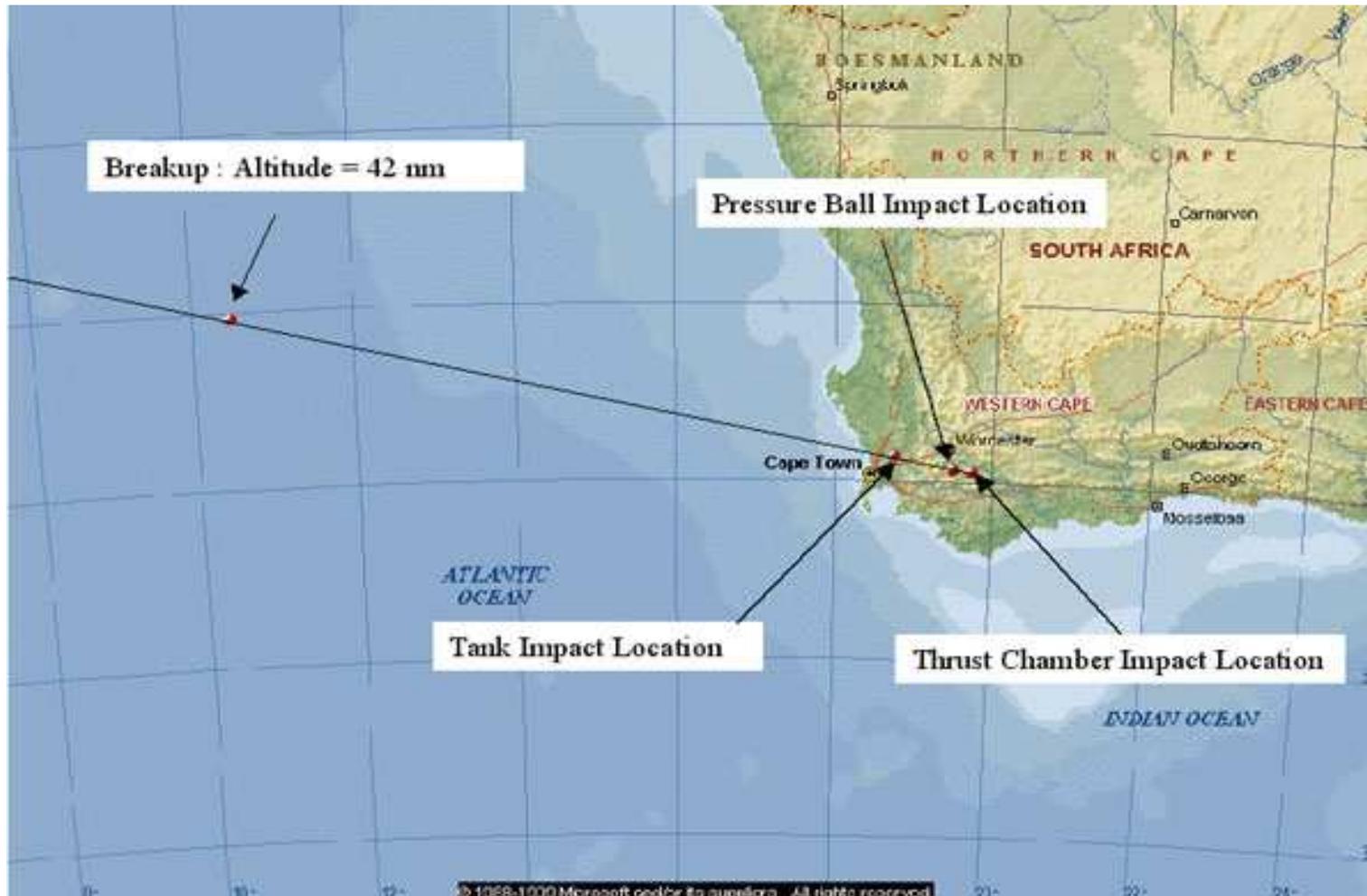
### Chute au sol de plusieurs éléments :

- . Chambre de combustion du moteur
- . Capacité Haute Pression
- . Réservoir de 250 kg en acier inox
- . Morceaux de protection thermique



## ① Rentrée atmosphérique non contrôlée :

### Retombée d'un second Delta 2 en Afrique du Sud (27.04.00)



## ① Rentrée atmosphérique non contrôlée :

### Retombée d'un second étage Delta 2 en Afrique du Sud (27.04.00)

Événement en tous points semblable à celui du Texas



## ① Rentrée atmosphérique non contrôlée :

### - Rentrée atmosphérique par freinage et usure progressive de l'orbite :

- ⇒ En moyenne 1 objet catalogué par jour  
1 ou 2 gros objets intègres par semaine
- ⇒ Exemples français récents

Etage EPS vol 510 : rentré le 21 novembre 2012

Sylda ESCA vol 521 : rentré le 2 décembre 2012

H10 vol 116 : prévu le 23 janvier 2013



## ① Rentrée atmosphérique non contrôlée :



Niger



PAM-D (USA) en Arabie



Telstar 402 au Brésil



Ariane en Ouganda

## ② Collision entre objets orbitaux

### - Divers modèles sont disponibles, tous cohérents :

- ⇒ Master (ESA), ORDEM (NASA), DAS (NASA)
- ⇒ Difficultés de mise à jour : la situation évolue trop vite !

### - Pas de consensus réel sur la taille d'un débris létal :

- ⇒ débris de 1 cm de rayon = 1 MJ = Grosse voiture à 130 km/h
- débris de 1 mm de rayon = 1 kJ = Boule de bowling à 100 km/h
- ⇒ 1 cm ⇒ destruction massive
- 1 mm ⇒ perte de fonctions

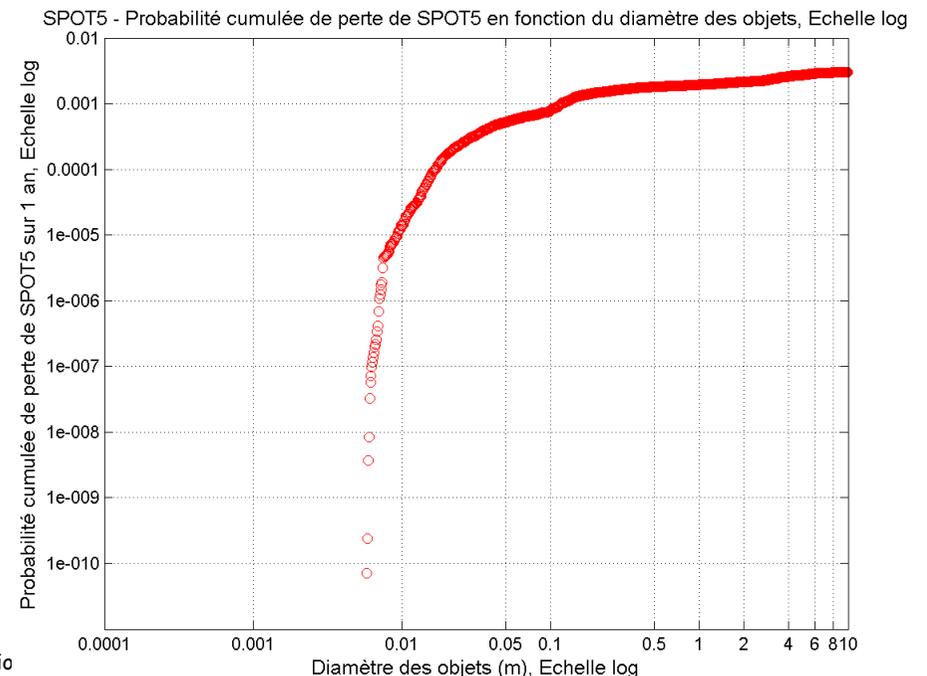
### - Exemples :

. Satellite Spot 5 = 10 m<sup>2</sup> sans panneaux solaires  
 Intégration sur la durée de vie complète = 15 ans  
 Proba de perte  $\cong 3 \cdot 10^{-3}$  par an

$\cong 3$  à 5%

. Sentinel-1 sur la durée de vie = 7,5 ans  
 Perte d'un composant = 53 %,  
 Perte mission > 3.2 %

⇒ Supérieure à la défiabilité  
 du satellite ou du lanceur



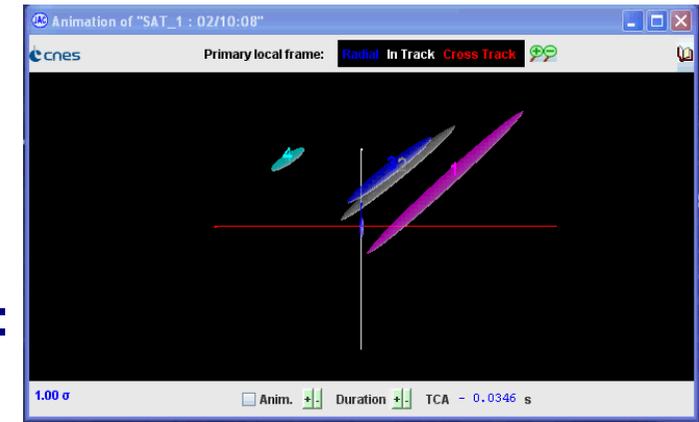
## ② Collision entre objets orbitaux

### - Possibilités d'évitement entre objets catalogués manœuvrant :

- ⇒ Propagation orbitale des objets catalogués
  - Identification des risques de rapprochement
  - Messages d'alerte provenant du JSPOC (USA)
  - Décision de manœuvre quand risque > critère
- ⇒ Permet d'éviter la perte d'un satellite opérationnel

### - Activité fondamentale au COO (CNES-Toulouse) :

- ⇒ Nombreux moyens radar – optique en appui des décisions
  - Catalogue orbital issu du système GRAVES
- ⇒ Service probatoire anti-collision CAESAR du CNES : 1<sup>er</sup> du genre en Europe !



### - Analyse du risque de collision au lancement (ARCL) :

- ⇒ A chaque vol depuis CSG Risque vis-à-vis de l'ISS

### - Exemples en 2011 :

- . Envisat : 62 alertes collision – 3 manœuvres
- . ASI : 17 manœuvres pour 12 satellites
- . CNES : 9 manœuvres pour 17 satellites
- . DLR : 8 manœuvres pour 10 satellites
- . ISRO, JAXA : 1 manœuvre, etc...

## ② Collision entre objets orbitaux

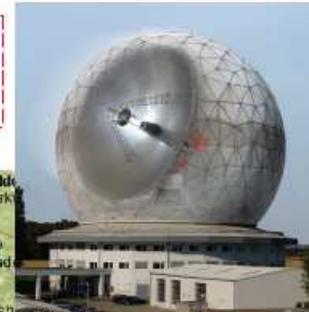
### Les capacités françaises SST utilisées par le CNES



**MONGE :**  
radars de  
poursuite  
ARMOR 1&2 et  
Normandie



**+** Radar de poursuite et  
d'imagerie TIRA  
(Fraunhofer FHR)

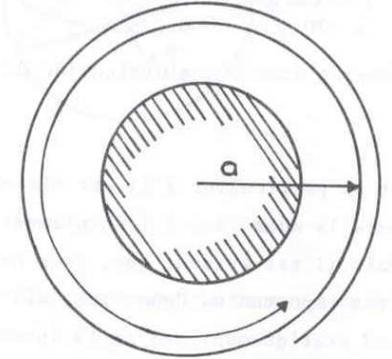




### 3. Le syndrome de Kessler



CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES



### Durée de vie orbitale d'un débris

$$\frac{da}{dt} = -\rho \sqrt{\mu a} \frac{S.C_x}{m}$$

Même à très haute altitude, nettoyage naturel dû à l'atmosphère résiduelle :

→ **Traînée = freinage = érosion de l'orbite ⇒ rentrée atmosphérique**

⇒ Nettoyage rapide pour les orbites basses (apogées inférieurs à 300 km),

⇒ Nettoyage lent pour les orbites hautes (périgées supérieurs à 600 km).

↳ *Exemples (Attention : ordres de grandeur seulement !)* :

Satellite GRACE	(400 km/ 400 km) :	6 mois
Télescope Spatial Hubble	(600 km/ 600 km) :	10 ans
Composite Supérieur Ariane 4	(200 km/ 36.000 km) :	> 23 ans
Composite Supérieur Ariane 5 ECA	(250 km/ 36.000 km) :	> 60 ans
Satellite SPOT	(800 km/ 800 km) :	200 ans
Etage Cosmos 3M	(1.000 km/ 1.000 km) :	2.000 ans
Satellite Globalstar	(1.400 km/ 1.400 km) :	10.000 ans
Satellite géostationnaire	(36.000 km/ 36.000 km) :	millions d'années

## Une « réaction en chaîne » s'amorce en Orbite Basse

### - Deux phénomènes antagonistes

1. Production permanente de nouveaux débris orbitaux
2. Nettoyage naturel des orbites par traînée atmosphérique

↪ Réaction en chaîne quand  $1 > 2$

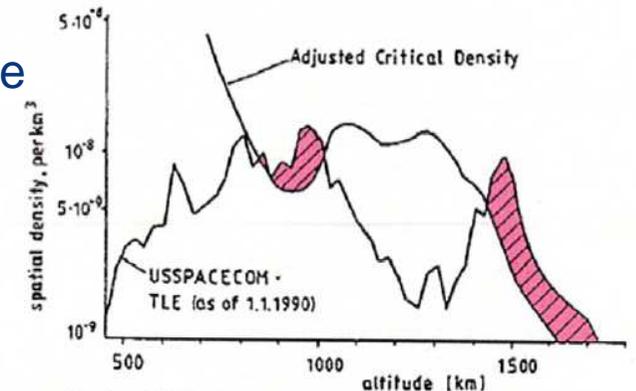
⇒ Plus l'altitude est haute

Moins la traînée est importante, mais

Moins il y a de débris

et vice versa...

↪ Instabilité connue sous le nom de **Syndrome de Kessler**



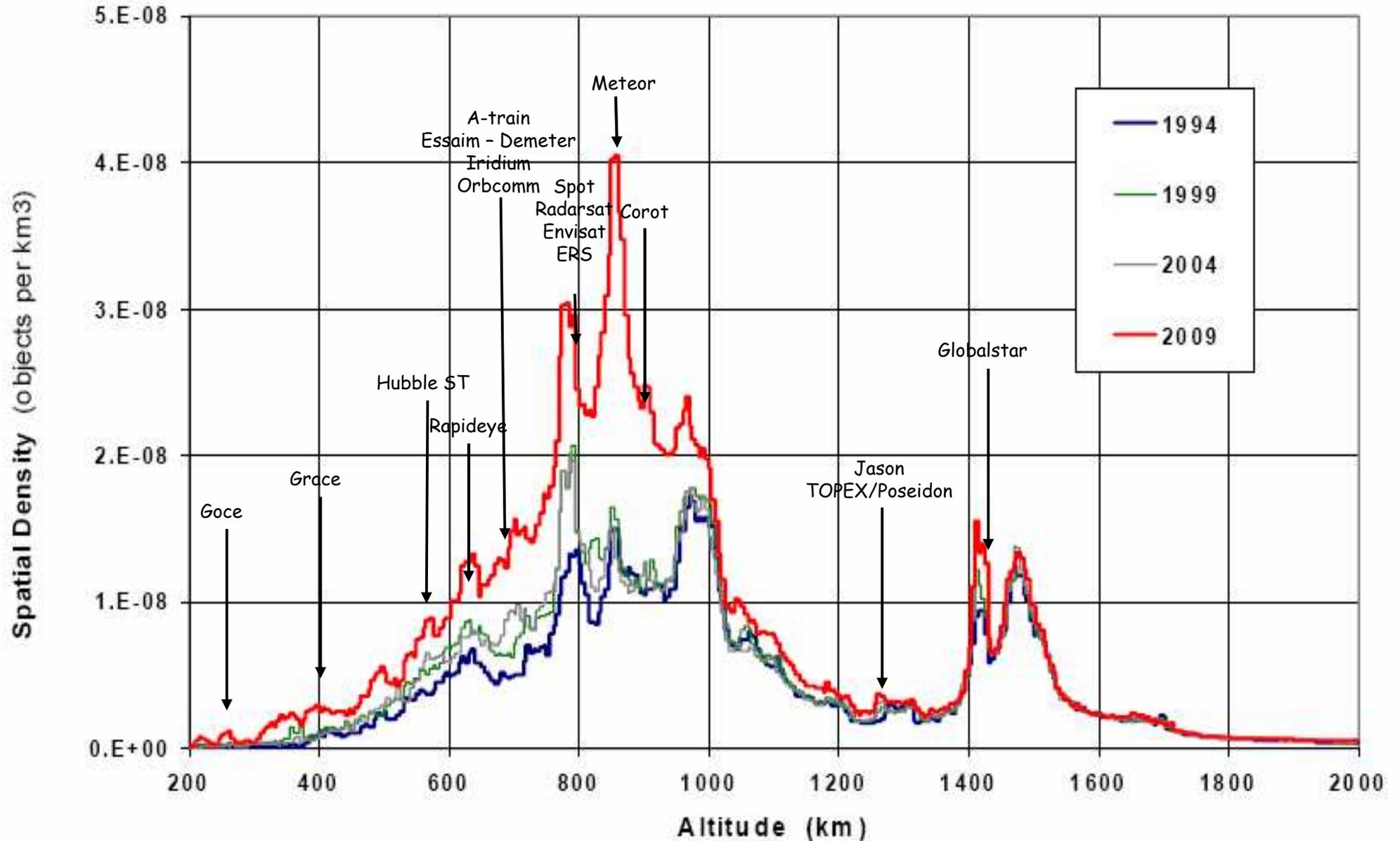
Kessler, Collisional cascading: The limits of population growth in low Earth orbit, Advances in Space Research 11(12):63-66, 1991

- Observée actuellement entre 700 et 1000 km (et vers 1500 km à confirmer)

- Très problématique, car la part « collision » de la régénération de débris devient nettement supérieure à la part « nettoyage atmosphérique »

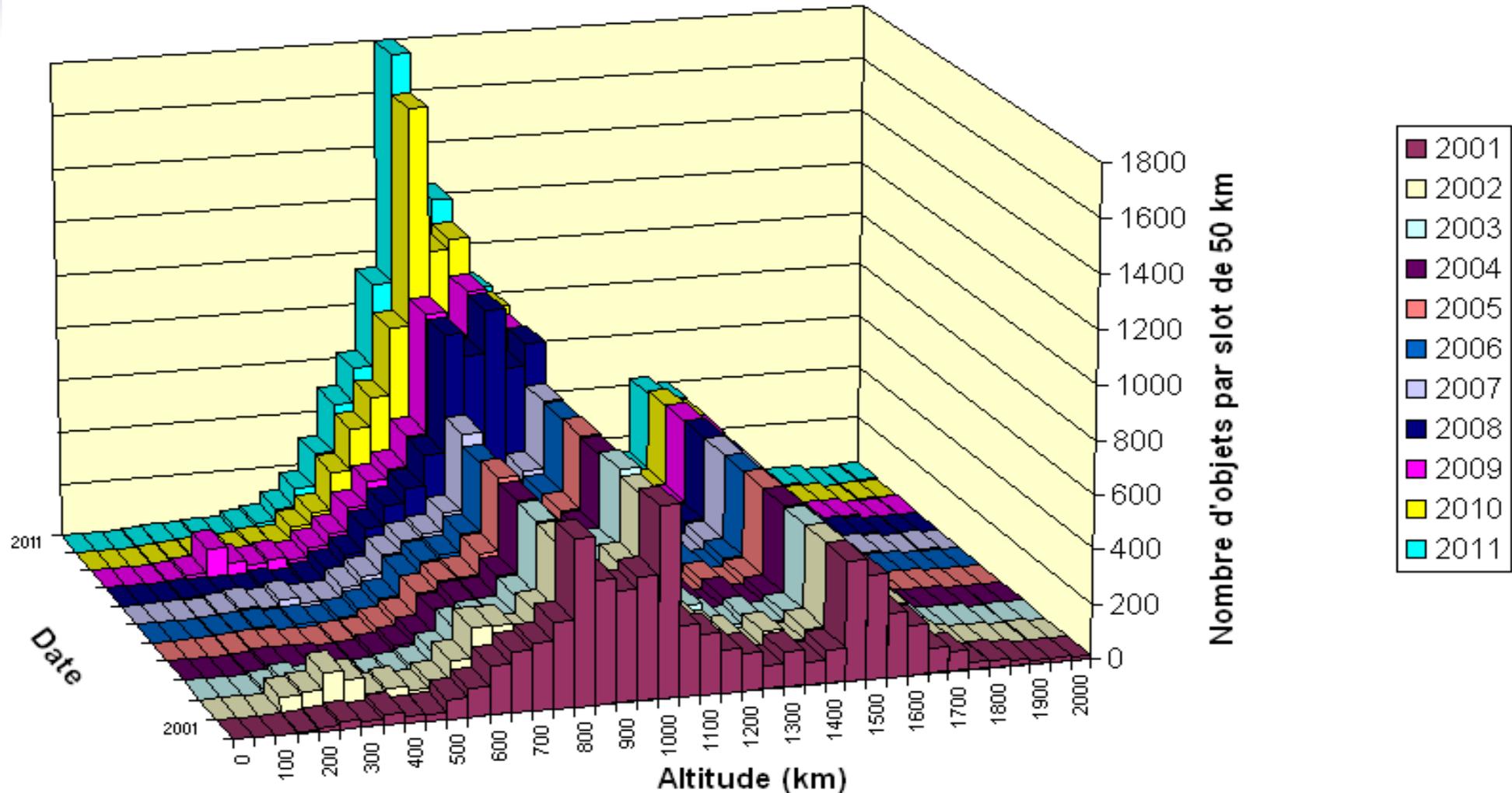
↪ Même s'il n'y a plus aucun lancement à partir de demain, **le nombre d'objets orbitaux dans la bande 700 – 1000 km va croître exponentiellement**

## Densité des objets en Orbites Basses (NASA)



### Syndrome de Kessler

Evolution du nombre d'objets artificiels dans l'espace depuis 2001



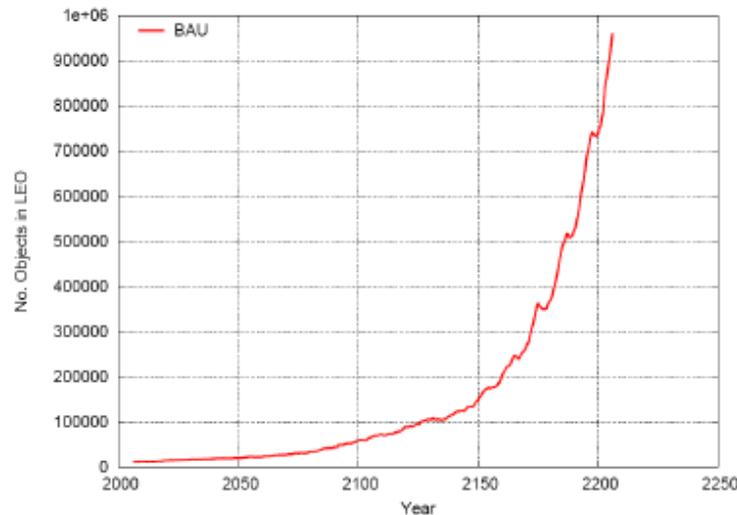
**Si rien n'est fait,**

**la situation à long terme peut devenir catastrophique**

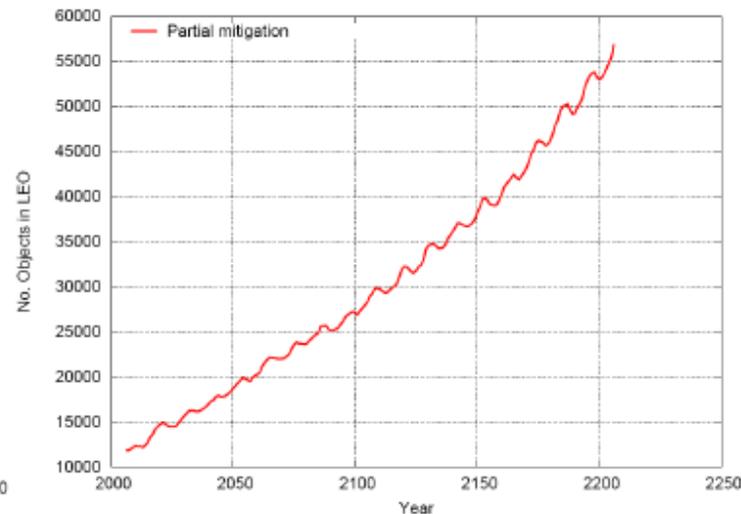
## - Nombreux modèles d'évolution de densité orbitale dans le temps

- ↪ Evolve, Legend (NASA), Delta (Qinetiq –ESA), CNUCE (Italie), JAXA, ...
- ⇨ Simulations relativement complexes
  - Effet des collisions, génération de débris, champs de vitesses, formes des débris
- ↪ Résultats globalement cohérents

Business-As-Usual (BAU)



Partial mitigation



Starting in 2020:

- De-orbiting of objects below 1300 km
- Passivation

*Exemple d'une simulation ESA*

***Il est fondamental de respecter la législation en vigueur***

**Nombreux Standards, Codes de bonne conduite, Lois...  
tous dérivés des recommandations IADC**

- IADC Guidelines (2002),  
12 agences, réunions annuelles, 4 Working Groups
- UN Guidelines (2007),
- Standards nationaux (NASA 1995, JAXA 1996, CNES 1999, ESA 2007)
- European Code of Conduct (approuvé ASI-BNSC-CNES-DLR-ESA en 2004),
- Standard ISO 24113 et documents de support,
- Loi Française portant sur les Opérations Spatiales LOS (approuvée en 2008,  
en vigueur depuis Décembre 2010)  
Nombreux paragraphes dédiés aux débris spatiaux (rentrées, collisions)

***Il est fondamental de respecter la législation en vigueur***

**Législation existante très pertinente :**

Ensemble de recommandations simples, applicables à tous, dérivées des règles IADC

① Court terme :

- minimisation des débris opérationnels  $\Rightarrow$  *soyons propres !*
- passivation systématique en fin de vie  $\Rightarrow$  *n'explosons plus !*
- protection des zones vitales (GEO et LEO)

$\rightarrow$  limitation de la durée de vie à 25 ans

$\Rightarrow$  *moins de sources de débris !*

② Long terme :

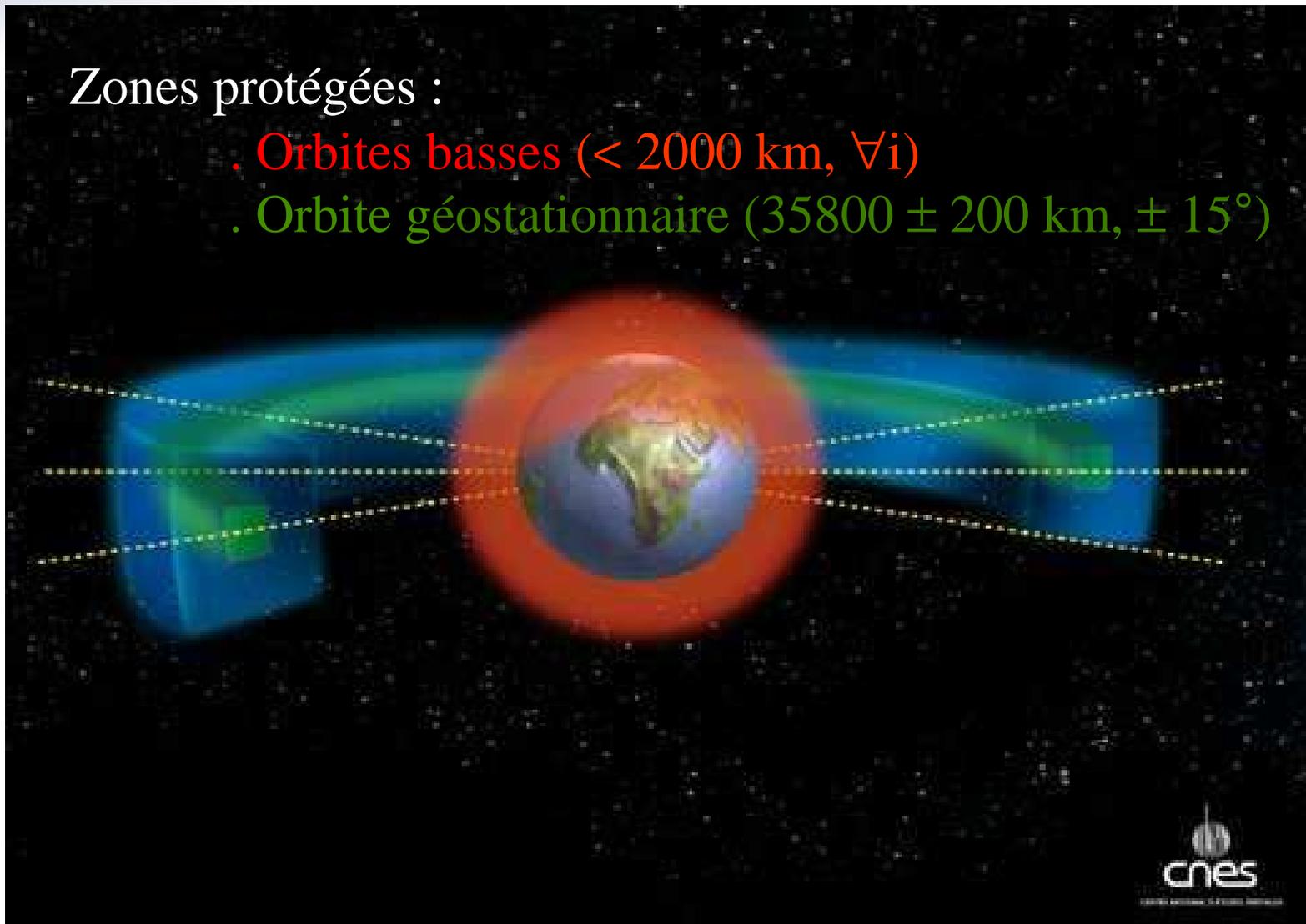
- désorbitation systématique en fin de vie



*Il est fondamental de respecter la législation en vigueur*

Zones protégées :

- . Orbites basses ( $< 2000 \text{ km}, \forall i$ )
- . Orbite géostationnaire ( $35800 \pm 200 \text{ km}, \pm 15^\circ$ )



## Respect de la règle des 25 ans en 2011

### Etages supérieurs : 79 %

- 53 upper-stages have been injected into LEO-crossing orbits
- 42 comply with the 25y rule and 11 don't
- 26 of them already decayed
- Accumulated mass of compliant upper-stages: 127,317kg
- Accumulated mass of non-compliant upper-stages: 23,916kg



### Satellites : 36 %

- 47 LEO payloads have reached their end of life in 2010/2011
- 17 comply with the 25y rule and 30 don't
- 14 of them already decayed (11 of them are cubesats)
- A de-orbit manoeuvre seems to have been conducted in three cases (UK-DMC BNSC SAT, Icesat, Orbview-3)
- Accumulated mass of compliant payloads: 7,394kg
- Accumulated mass of non-compliant payloads: 16,181kg

↪ **Mais, ça ne suffit pas !**

- **Pour stabiliser l'environnement, il faut retirer 5 à 10 gros objets par an des Orbites Basses**

↪ Exemple NASA

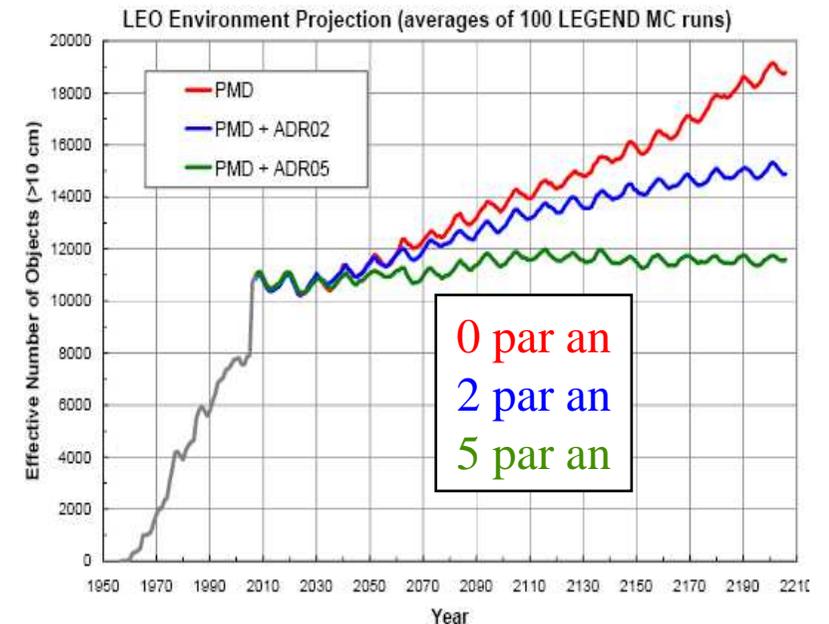
(très optimiste : plus de lancements à partir de 2006 et application parfaite de la réglementation en vigueur)

↪ Résultats confirmés par d'autres simulations  
Action IADC AI 27.1 : 7 Agences

↪ Simulations plus réalistes

⇒ Très grand nombre d'objets à retirer chaque année

Ref 1: Controlling the growth of future LEO debris populations – Liou, Johnson, Hill – Acta Astronautica 66(2010) – pp 648-653



©Liou – Johnson – Hill NASA-JSC<sup>1</sup>

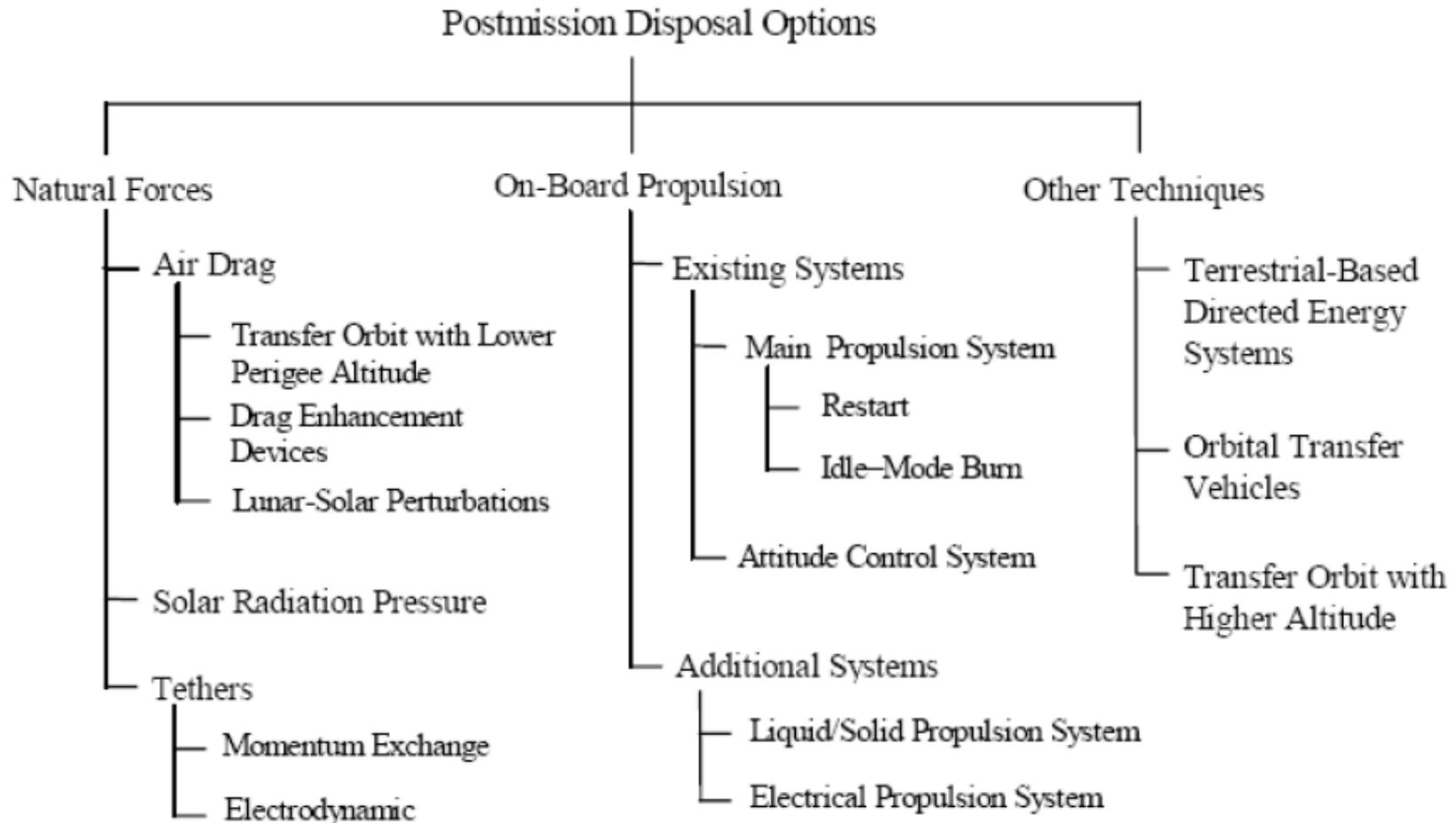


## 4. Quelques solutions potentielles



CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES

**Retirer des gros objets des Orbites Basses est très complexe, mais faisable techniquement**



© Désolé, je sais plus où j'ai piqué cette figure...

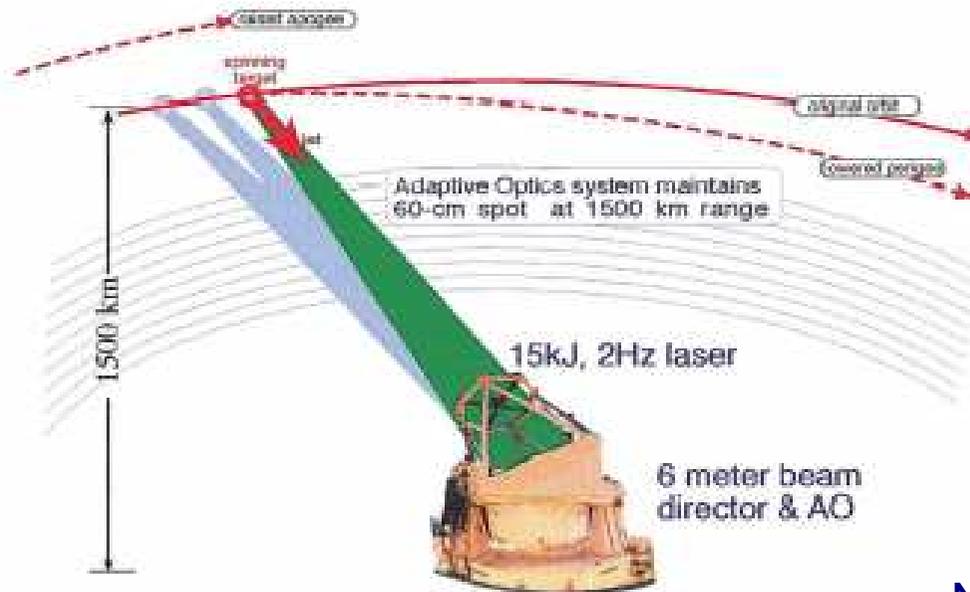


Boeing

Sans contact :  
Lasers



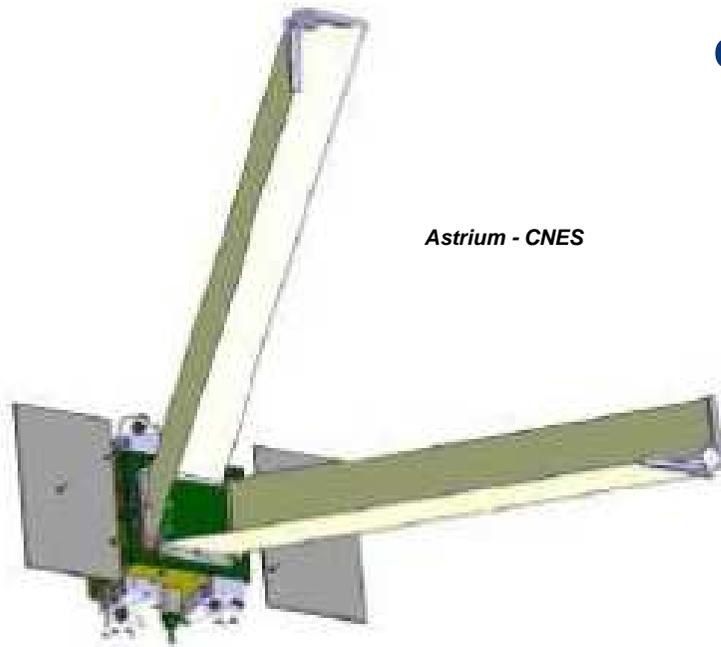
Martin-Marietta



NASA-Photonic

Non adapté pour les gros débris

## Augmentation de traînée passive : Voiles, Ballons



Astrium - CNES

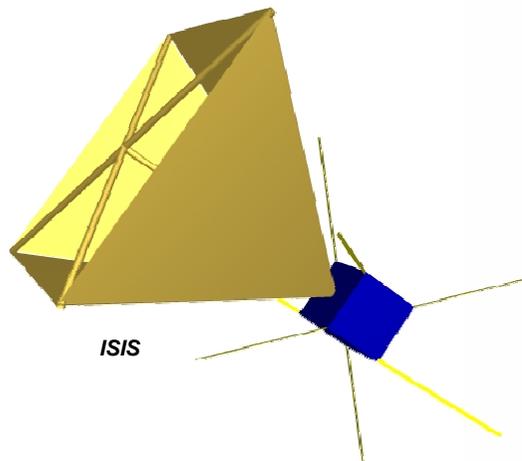


Passive deceleration system (PDS)

Global Aerospace



Sirdaria - UniRoma

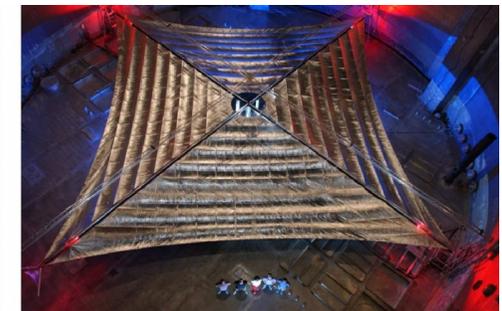
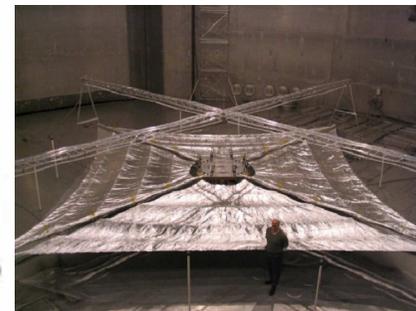


ISIS



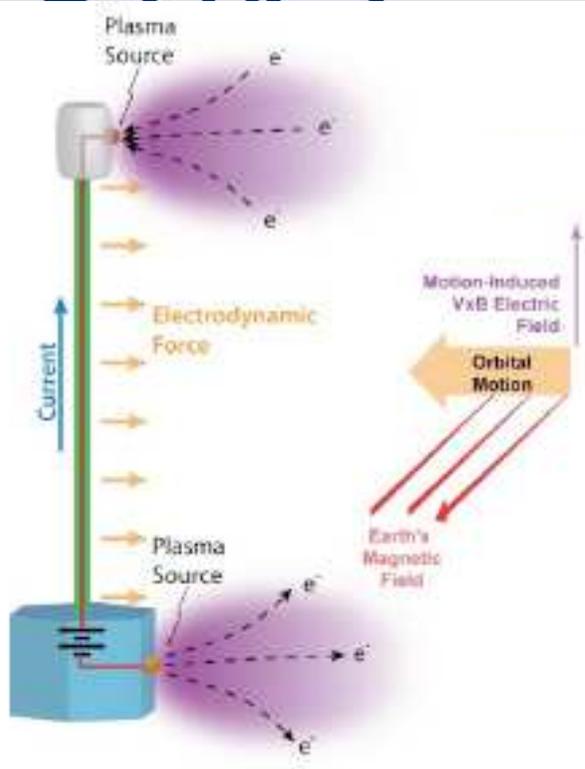
Roscosmos

30kg PDS  
10m diameter shell

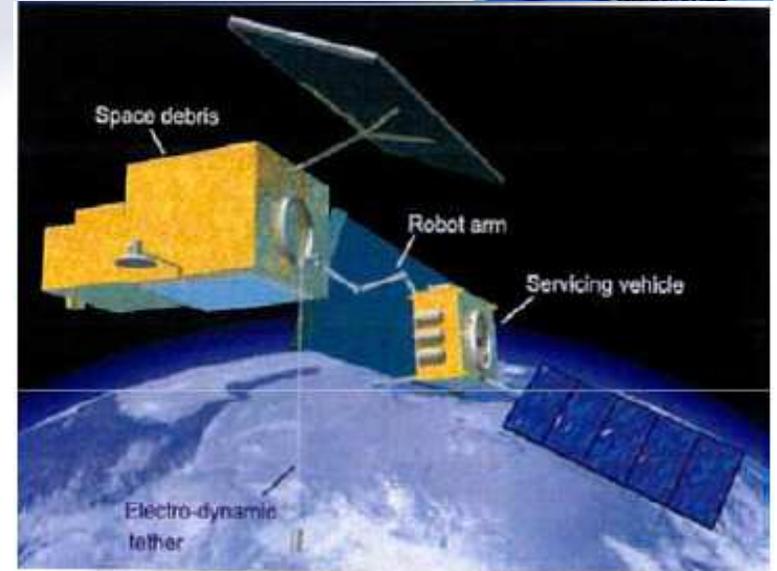


L'Garde

### Mal adaptée aux plus hautes altitudes



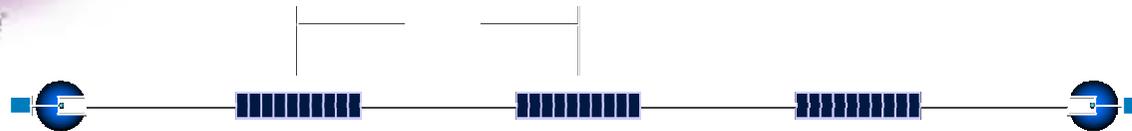
**Augmentation  
de traînée :  
EDT  
Câble Electro Dynamique**



JAXA

Deboost

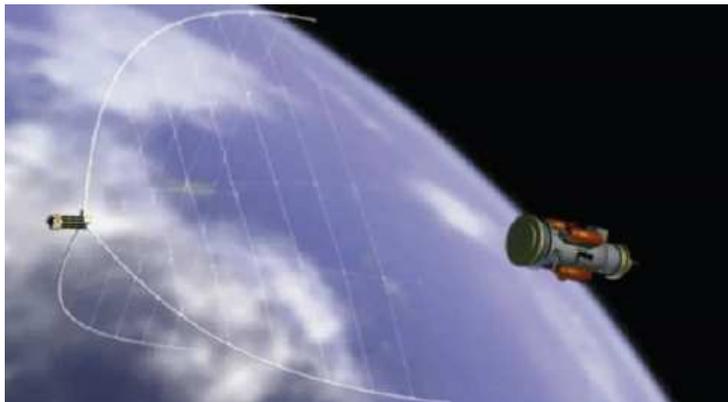
Tethers Unlimited



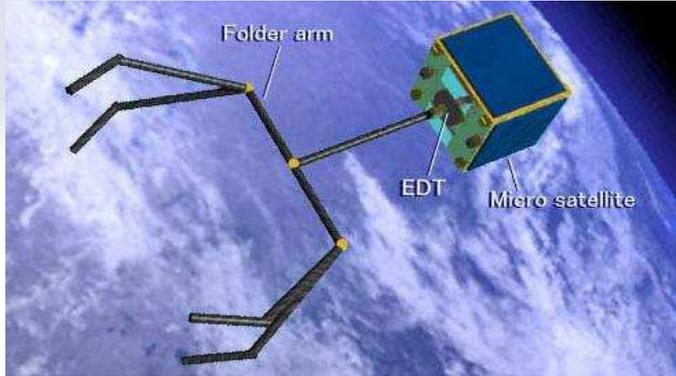
EDDE: Pearson, Carroll et al.

**Complexe  
pour les inclinaisons élevées**

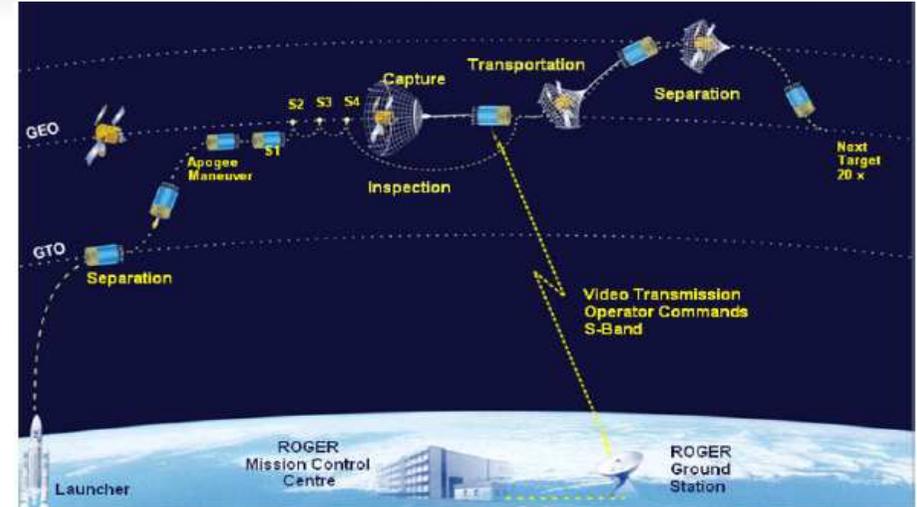
Hoyt



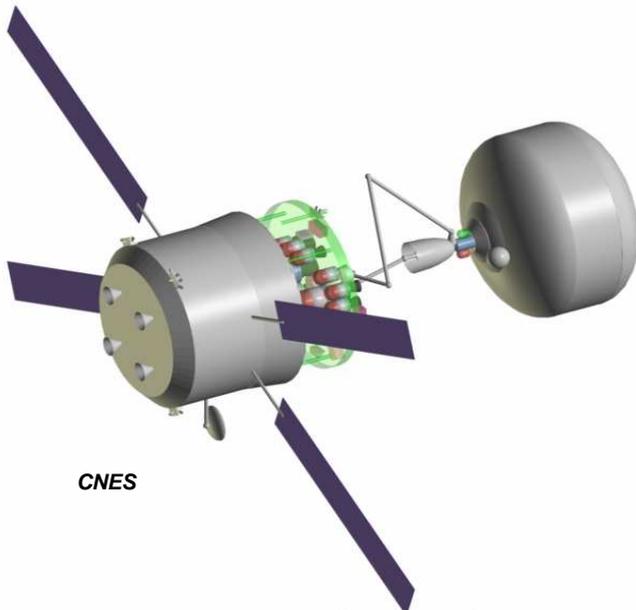
## Capture & Désorbitation



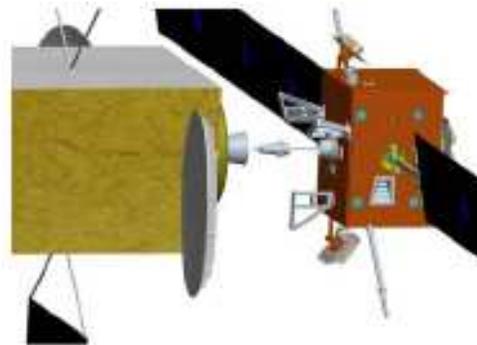
JAXA



ESA-Astrium



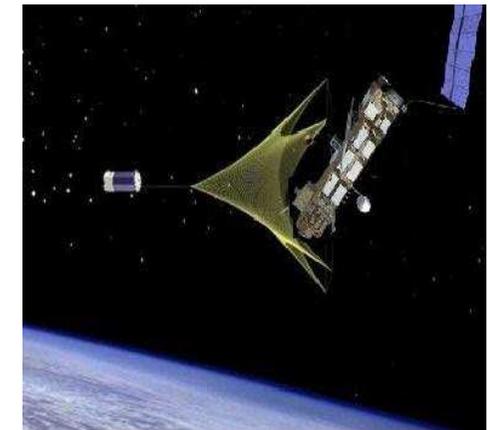
CNES



OSS



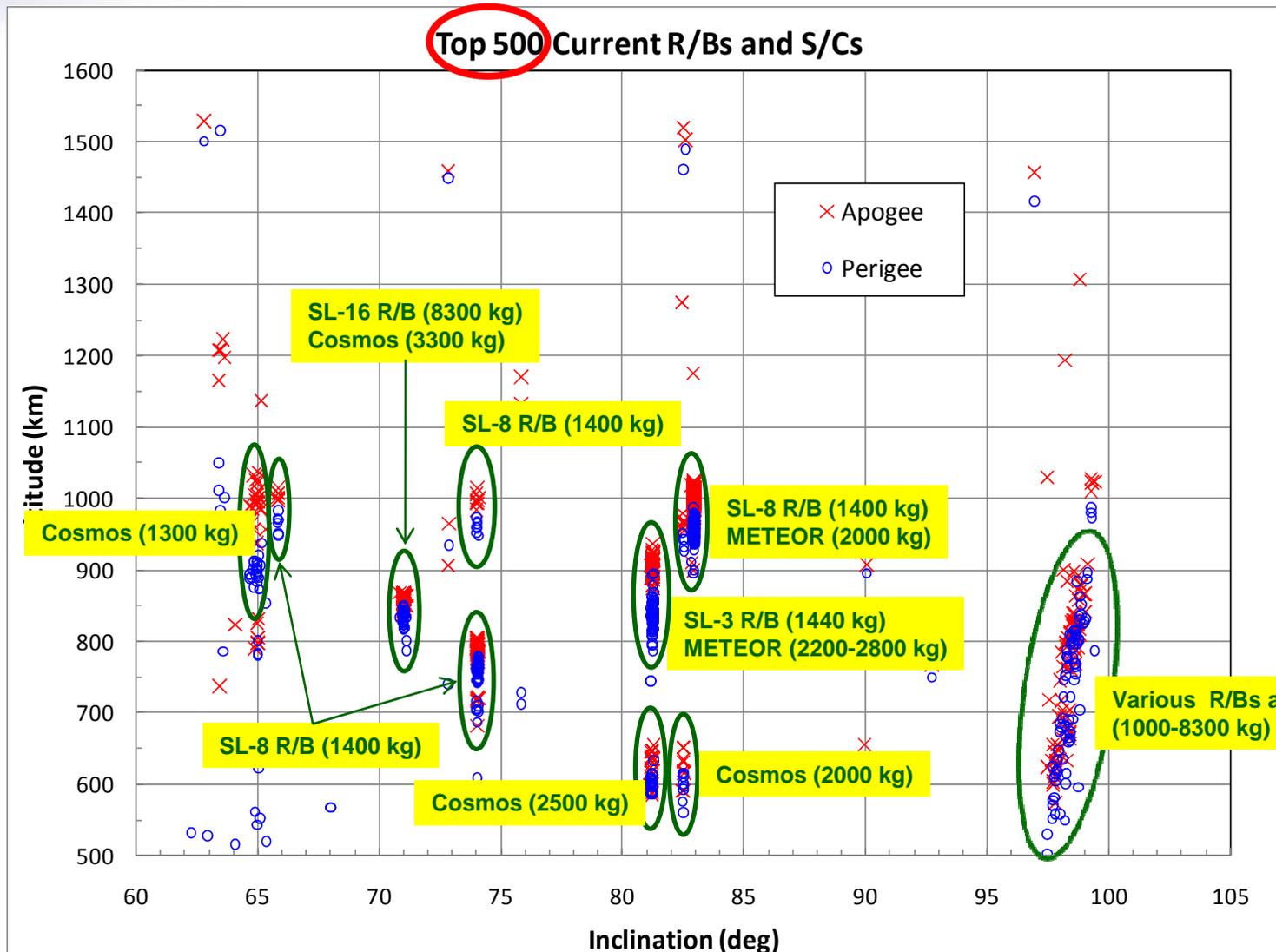
Astrium



## Complexe pour des débris en rotation

## Nombreux travaux en cours

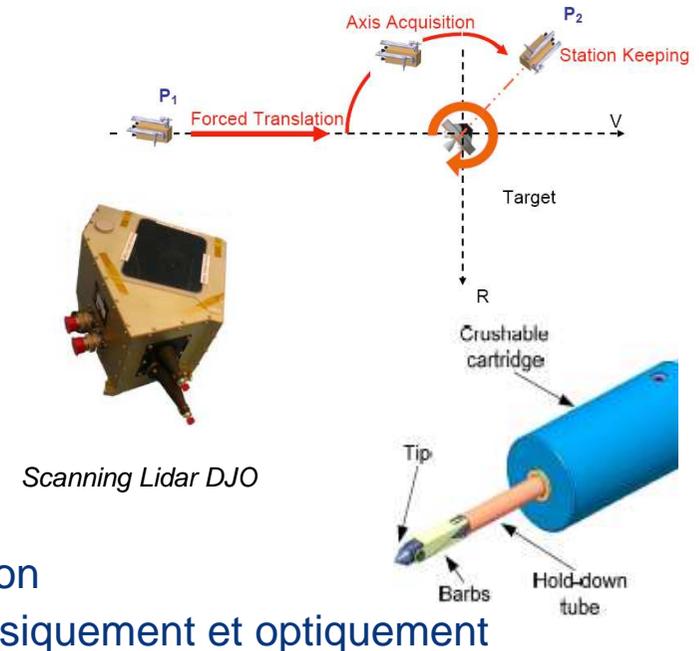
### 1. Sélection des zones orbitales à nettoyer



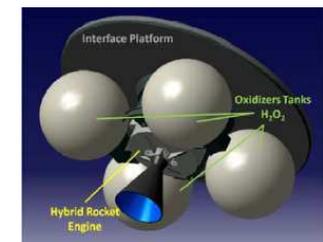
## Nombreux travaux en cours

### 2. Fonctions principales à réaliser

- F1 : Rendez-vous lointain entre chasseur et débris :
  - Entre 10 et 1 km de la cible
  - Peut être réalisé par navigation absolue
  - Déjà démontrée et qualifiée en orbite
- F2 : Rendez-vous courte distance, jusqu'à contact
  - Jamais démontré (publié) à ce jour pour des objets :
    - Non coopératifs
    - Non préparés
    - Potentiellement en mouvement de rotation
    - Potentiellement différents d'attendu, physiquement et optiquement
- F3 : Interfaçage mécanique entre chasseur et débris
  - Jamais démontré (publié) à ce jour pour un objet non préparé
- F4 : Contrôle, arrêt de rotation et orientation du débris
  - Partiellement démontré en orbite, mais opérations humaines
- F5 : Désorbitation
  - Faible poussée ou augmentation de traînée pour info seulement
    - ↳ Rentrée non contrôlée
    - ↳ Ou trop complexe si couplée à une forte poussée à la fin



Astrium UK: harpoon

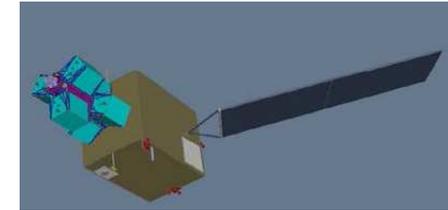


DeLuca et al. IAC-12-A6.5.8

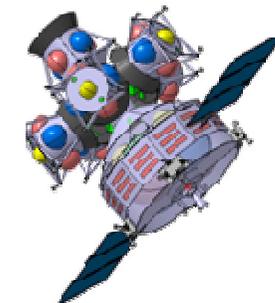
## Nombreux travaux en cours

### 3. Architecture système

- Nombreuses possibilités au niveau système :
  - Petit chasseur mono-cible lancé en piggy-back
    - Passager d'une mission principale vers SSO
  - Chasseur moyen multi-cibles
    - Exemple : lancement sur Soyouz  $\cong$  4 débris
    - Compatibilité multi-lanceurs
  - Chasseur moyen délivrant des kits de désorbitation à ses cibles
    - Exemple : lancement sur Soyouz  $\cong$  5 ou 6 débris
    - Plus complexe
  - Gros chasseur multi-cibles
    - Exemple : lancement sur Ariane 5  $\cong$  15 débris
  - Gros chasseur délivrant des kits de désorbitation à ses cibles
  - Gros chasseur délivrant N chasseurs moyens multi-cibles
  - Grosse barge dérivant à basse altitude délivrant des kits au fur et à mesure
  - ...
- Critères principaux :
  - Coût, nombre d'équipements « sensibles » (bras robotiques, rendez-vous, GNC...)
  - Flexibilité d'emploi, adaptabilité aux différents débris
  - Multi-lanceurs



Debritor (Astrium)



Mother-ship (3) + kits (1)  
(rigid link) (Astrium)

(Aviospace)



## ■ Concept étudié au CNES :

- Dimensions : diamètre 4,57 m ; longueur 6 m ; 17 tonnes au décollage

### Contrôle d'Attitude :

- 4 x 2 x 30 N à l'avant
- 4 x 4 x 30 N + 4 x 2 x 10 N à l'arrière

### Module propulsif

- 4 moteurs de 500 N
- 13 tons MON-MMH (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-Kéro ou autre couple d'ergols stockables haute performance)

### Bras robotique principal

### « Charge utile »

- 16 kits de désorbitation de tailles variées

### Bras robotique secondaire

### Senseurs GNC

- Senseurs stellaires
- Antennes GPS
- Videomètres
- Telegoniomètres
- Flash Lidar
- Cameras

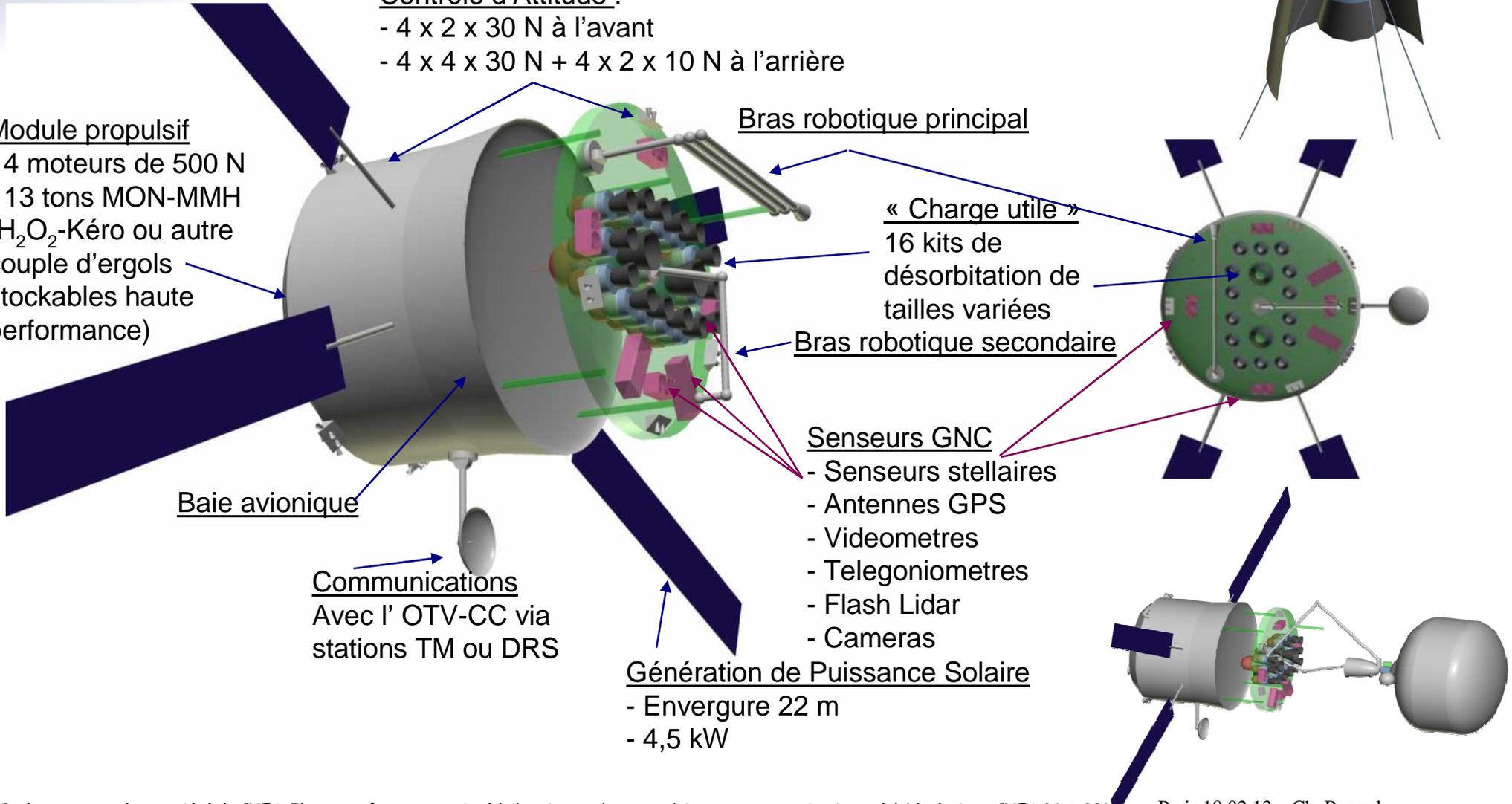
### Baie avionique

### Communications

Avec l' OTV-CC via stations TM ou DRS

### Génération de Puissance Solaire

- Envergure 22 m
- 4,5 kW



## ■ Solutions sans contrôle du débris :

▲ Question primordiale de l'interface physique avec la cible :

- Filet pour attraper le débris (cf ESA-Astrium étude Roger)
- Harpon
- Longues bandes collantes type « papier tue-mouches »

↳ Problèmes potentiels de dégradation de surface sous chocs, voire explosion

## ■ Utilisation d'un grappin relié au chasseur par un câble :

▲ Amarrage sur un interface robuste du débris - Phase d'arrimage relativement facile :

⇒ Pour un grappin de 20 cm de rayon et un débris de 4 m tournant à 10 %

↳ Précision requise de l'ordre de 1 seconde

## ■ Design d'une configuration naturellement stable :

- Câble de longueur typique 40 m
- Amortisseur type « dashpot » pour dissiper l'énergie et éviter le relâchement du câble
- Pas de nécessité de contrôle actif pendant la désorbitation

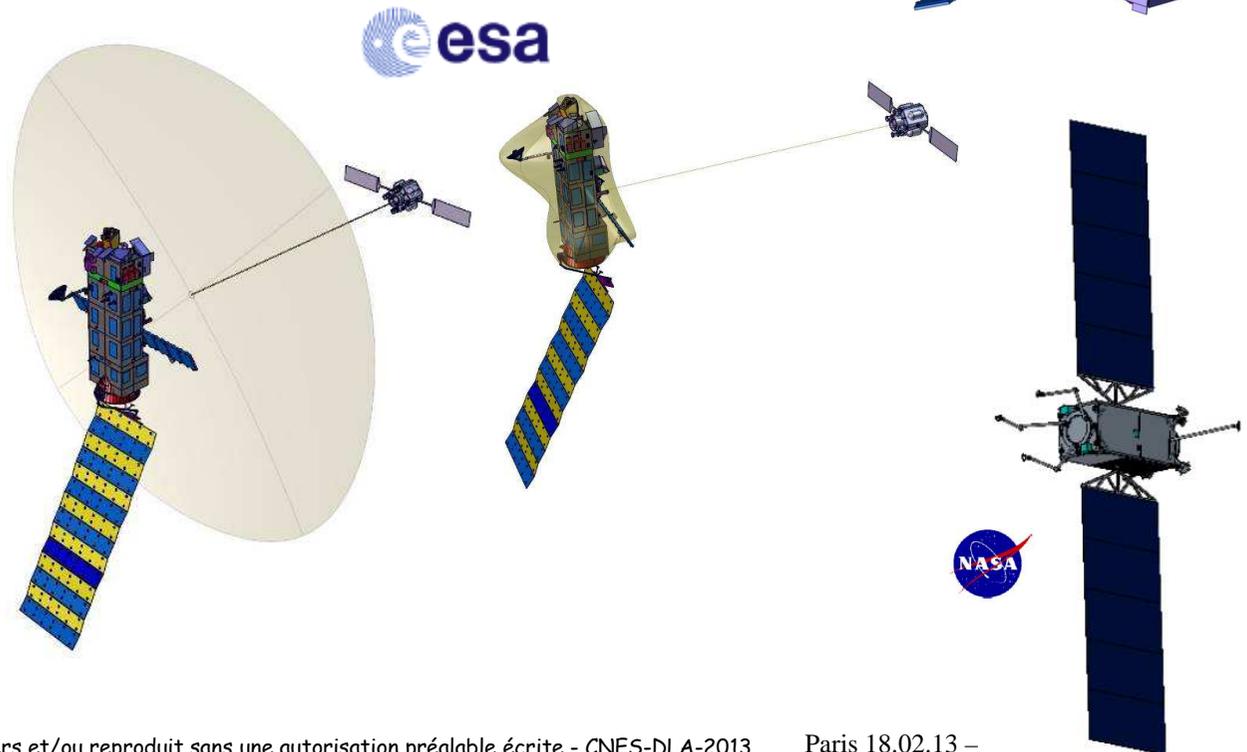


## ■ Priorité actuelle en Europe : Envisat

- ▲ Mort en mai 2012
  - ↳ 8 tonnes, 8 m de long, 800 km SSO
  - ↳ Objet civil le plus dangereux actuellement en orbite
- ▲ Nombreux travaux en cours, propositions spontanées, ...
  - ↳ Projet ESA CleanSpace



Debris Capture



## *Très fort potentiel pour des solutions innovantes*

### ▪ **Systèmes de capture :**

- Harpons, crochets, filets, bolos, « papier tue-mouches »...
- Qualification ? Comportement pour un débris non stabilisé ?

### ▪ **Propulsion innovante :**

- Hybride . Forte poussée
- .  $\Delta V$  adapté
- Stockable . Besoin d'ergols « verts »
- Propulsion électrique, dans sa grande variété
- . Forte performance, désorbitation lente en spirale

### ▪ **Augmentation de traînée :**

- Air-bags, voiles, extensions gonflables...
- Stabilité dans le temps ? Comportement avec débris non stabilisé ?

### ▪ **Câbles Electro Dynamiques :**

- Purement passif : désorbitation lente sans ergols

### ▪ **Pilotage souple :**

- Chasseur tirant la cible au bout d'un câble souple
- Stabilité du pilotage – Contrôle de la rentrée

## **Quelle que soit la solution, le vrai problème n'est pas que technique :**

- **Evaluation très grossière des coûts de désorbitation**
  - ↳ 15 M€ par débris pour les solutions conventionnelles
  - 5 M€ par débris pour les solutions très innovantes
  
- **Trois schémas de financement identifiés aujourd'hui :**
  - Conscience environnementale internationale, mission ONU, premier programme spatial « global », partage des coûts ⇒ peut être naïf...
  - Missions ciblées selon leur intérêt économique, service payant pour les opérateurs concernés ⇒ potentiellement limité
  - Écotaxe vers chaque opérateur ne respectant pas la réglementation internationale ⇒ rôle de « police » à définir, peut être avec assureurs
  
- **Barrières politiques : proche des activités militaires en orbite**
  
- **Problèmes légaux et d'assurances**
  
- **Rien de crédible aujourd'hui sans une révolution des mentalités !**
  - ↳ **Actions en cours via un groupe de travail ad-hoc de l'IAA**

## Conclusion concernant l'évolution des débris orbitaux

### ⇒ Les Orbites Basses vont plutôt mal...

- **Pas vraiment de prise de conscience concrète à ce jour**
  - Comportement analogue aux autres problèmes environnementaux
  - Peu de travail à ce jour au niveau international (NASA, JAXA, CNES, ESA, DLR...)
  - Pas encore de vision « stratégique »
- **Trop d'incohérences entre paroles et actes**
  - Encore trop de missions avec des durées de vie > 25 ans
  - L'abaissement du périhélie en fin de mission est encore très rare
  - De nombreux étages supérieurs ne sont toujours pas passivés
  - De nombreuses missions laissent de nombreux débris opérationnels en orbite
  - Difficultés fortes pour faire converger les standards et lois
- **Pas encore d'évaluation économique des mesures proposées**
- **Besoin d'un plan de R&T très significatif**
- **Des solutions de backup peuvent être considérées à terme**  
Drones d'observation, utilisation d'autres bandes orbitales, fibres optiques...
  - ↳ Tendances naturelles : abandon progressif de la zone 800 à 1400 km

### Et pendant ce temps, nos débris font des petits...

# Merci de votre attention

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

**christophe.bonnal@cnes.fr**

ARCL	Analyse de Risque de Collision au Lancement	kJ	kilo Joule (Millier de Joules)
CC	Control Center	LEO	Low Earth Orbit
DLR	Agence Spatiale Allemande	LOS	Loi portant sur les Opérations Spatiales
DRS	Data Relay Satellite	MJ	Méga Joule (Million de Joules)
EDT	Electro Dynamic Tether	MMH	Mono Methyl Hydrazin
ESA	Agence Spatiale Européenne	MON	Oxydes d'Azote
GEO	Geostationary Earth Orbit	NASA	Agence Spatiale Américaine
GNC	Guidance, Navigation, Control	OTV	Orbital Transfer Vehicle
GPS	Global Positioning System	R&T	Research and Technology
IAA	International Academy of Astronautics	SSO	Sun Synchronous Orbits
IADC	Inter Agency Debris Coordination Committee	TLE	Two Line Element
JAXA	Agence Spatiale Japonaise	TM	Telemetry