

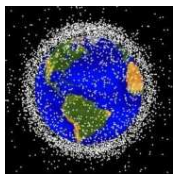
Les débris spatiaux

Pérennité des opérations dans l'espace

Christophe Bonnal

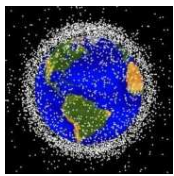
Expert Senior à la Direction des Lanceurs du CNES,
Président de la Commission Débris de l'IAA (International Academy of Astronautics)
christophe.bonnal@cnes.fr

Académie de l'Air et de l'Espace
Bordeaux, le 19 mai 2016

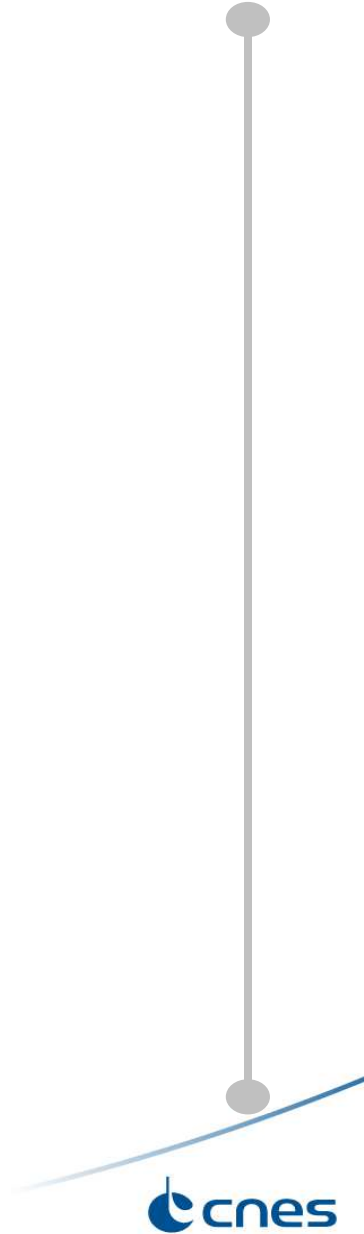


Plan de la présentation :

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



1. Situation actuelle





Introduction



Déjà le 4 octobre 1957...

- Lancement du Spoutnik 1 :

- Charge utile = 84 kg

- Etage central Semioroka = 6.500 kg sur la même orbite

- Coiffe protectrice \cong 100 kg sur la même orbite

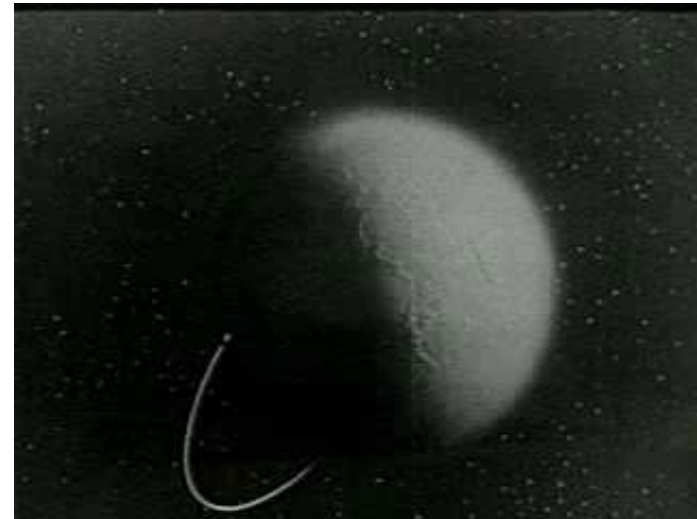
- ⇒ Charge utile \cong 1,3 % de la masse satellisée

- ⇒ Débris orbitaux \cong 98,7 % de la masse injectée

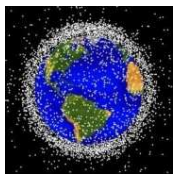
- Emission du Spoutnik pendant 21 jours :

- 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



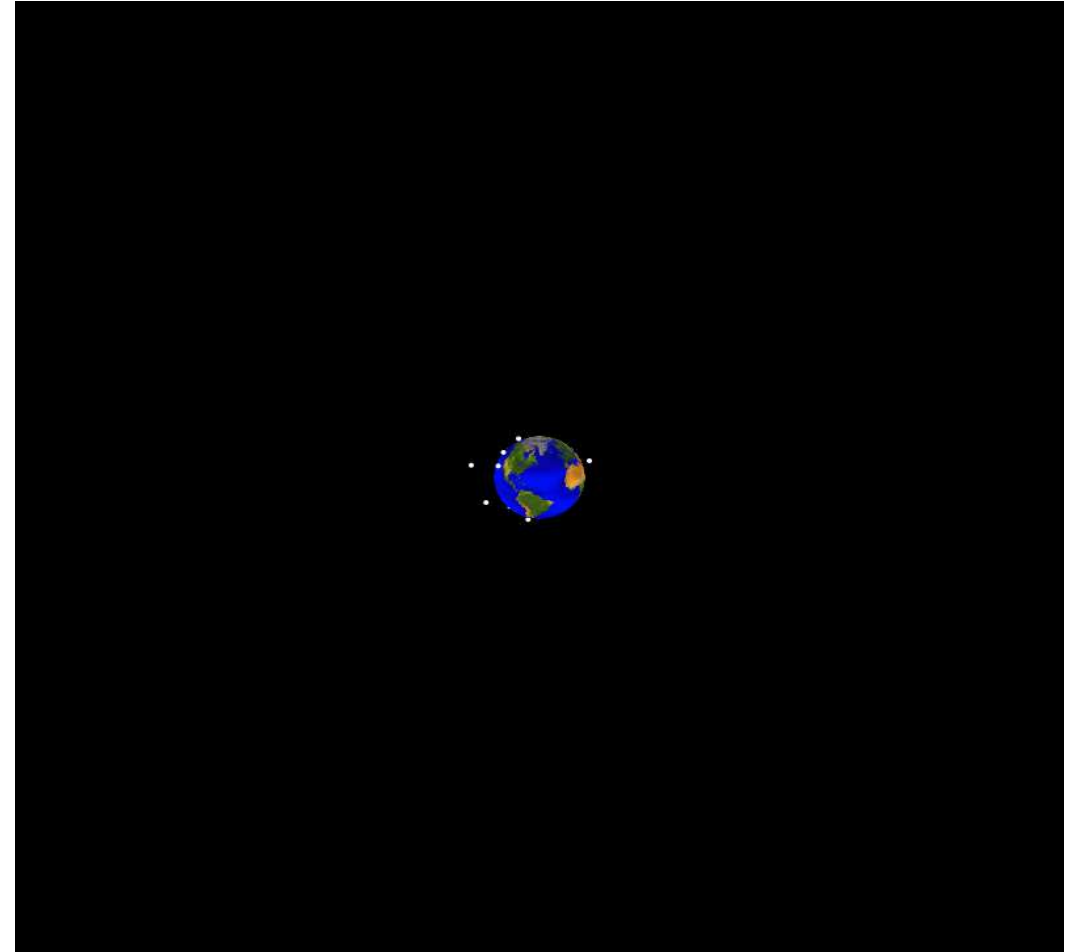
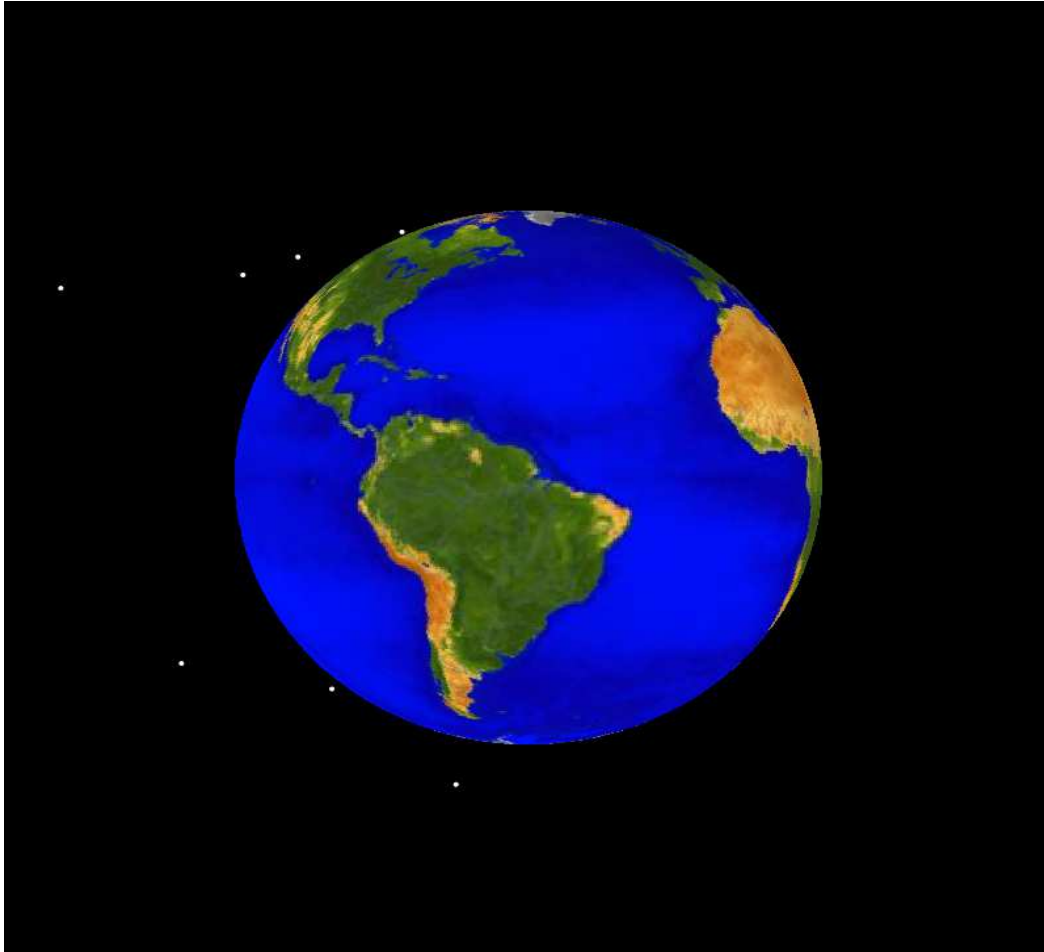
Evolution de la population orbitale



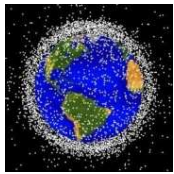
Objets catalogués : ≥ 10 cm en orbite basse, ≥ 1 m en géostationnaire

⚠ Attention à la taille exagérée des points...

1960



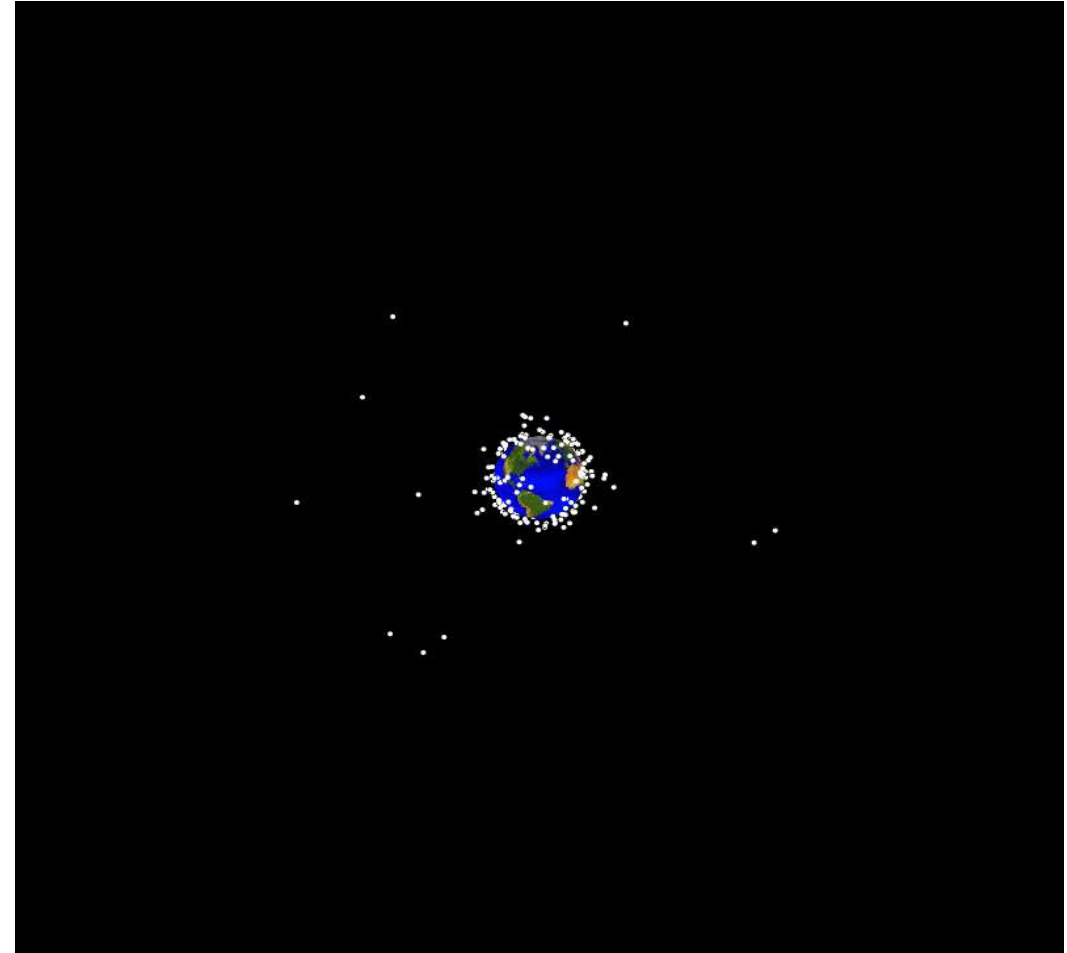
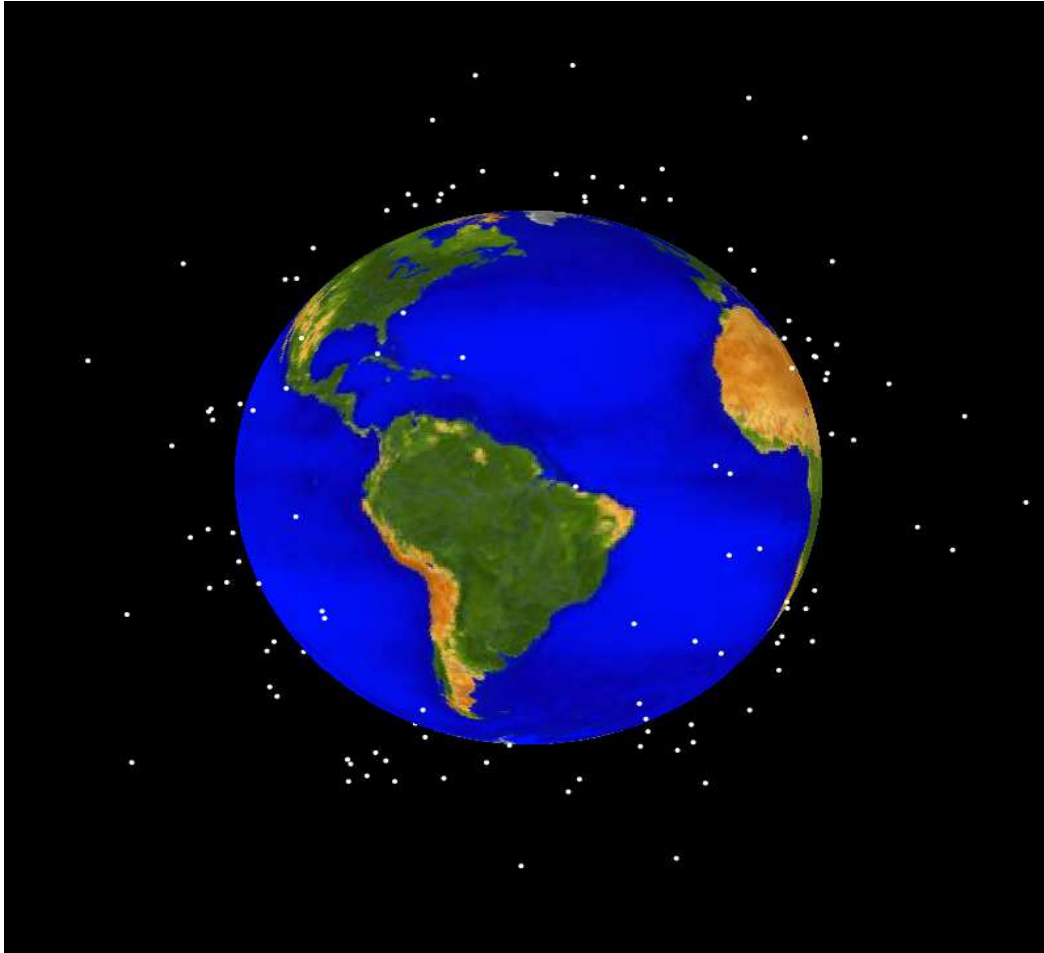
Objets catalogués > 10 cm de diamètre



Evolution de la population orbitale

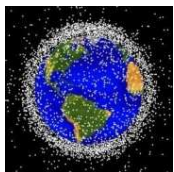


1965

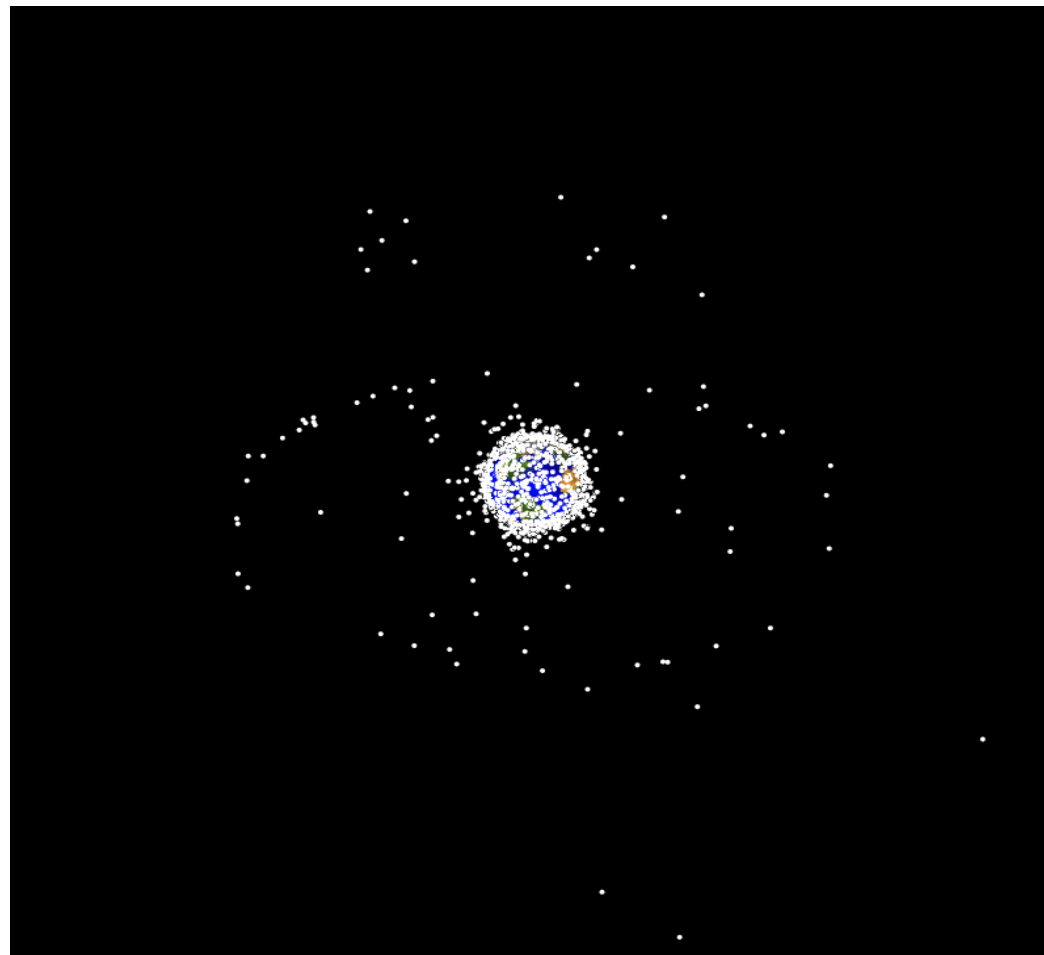
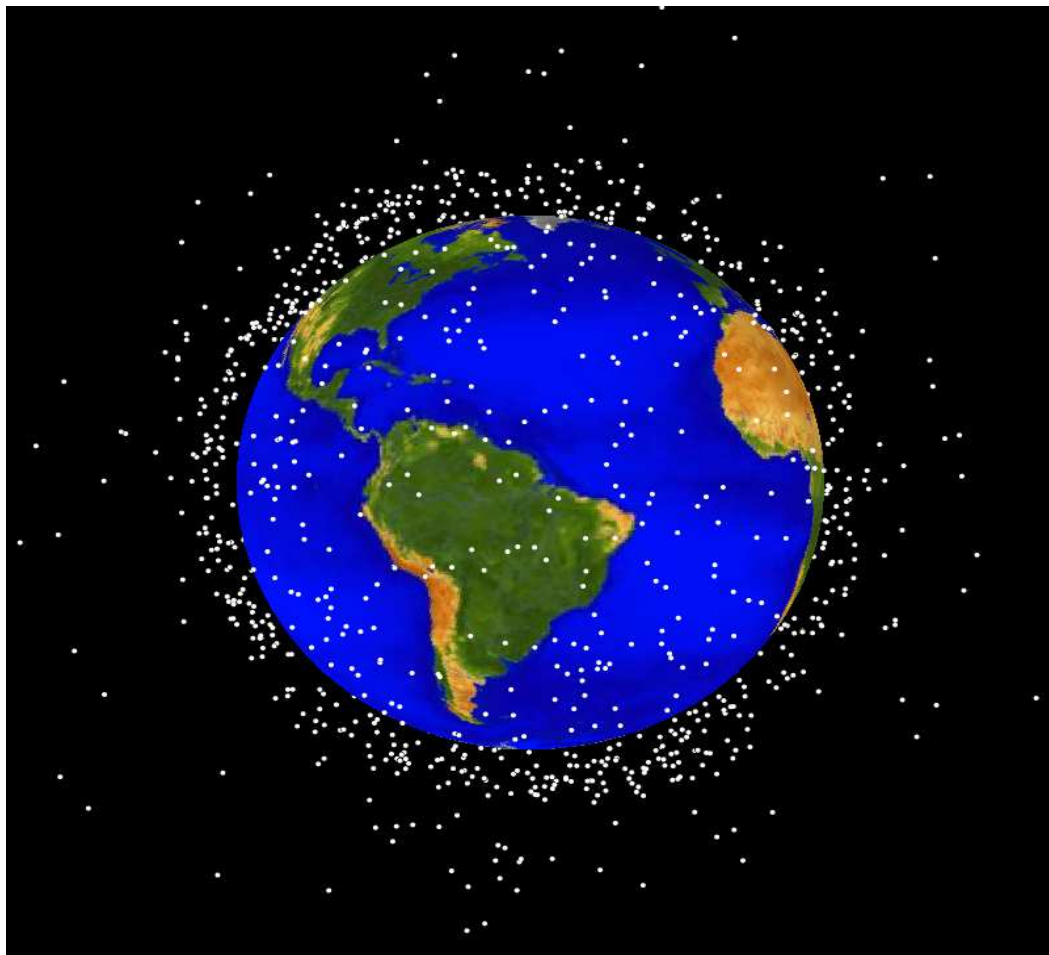


Objets catalogués > 10 cm de diamètre

Evolution de la population orbitale

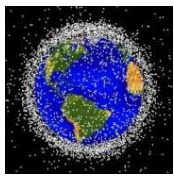


1970

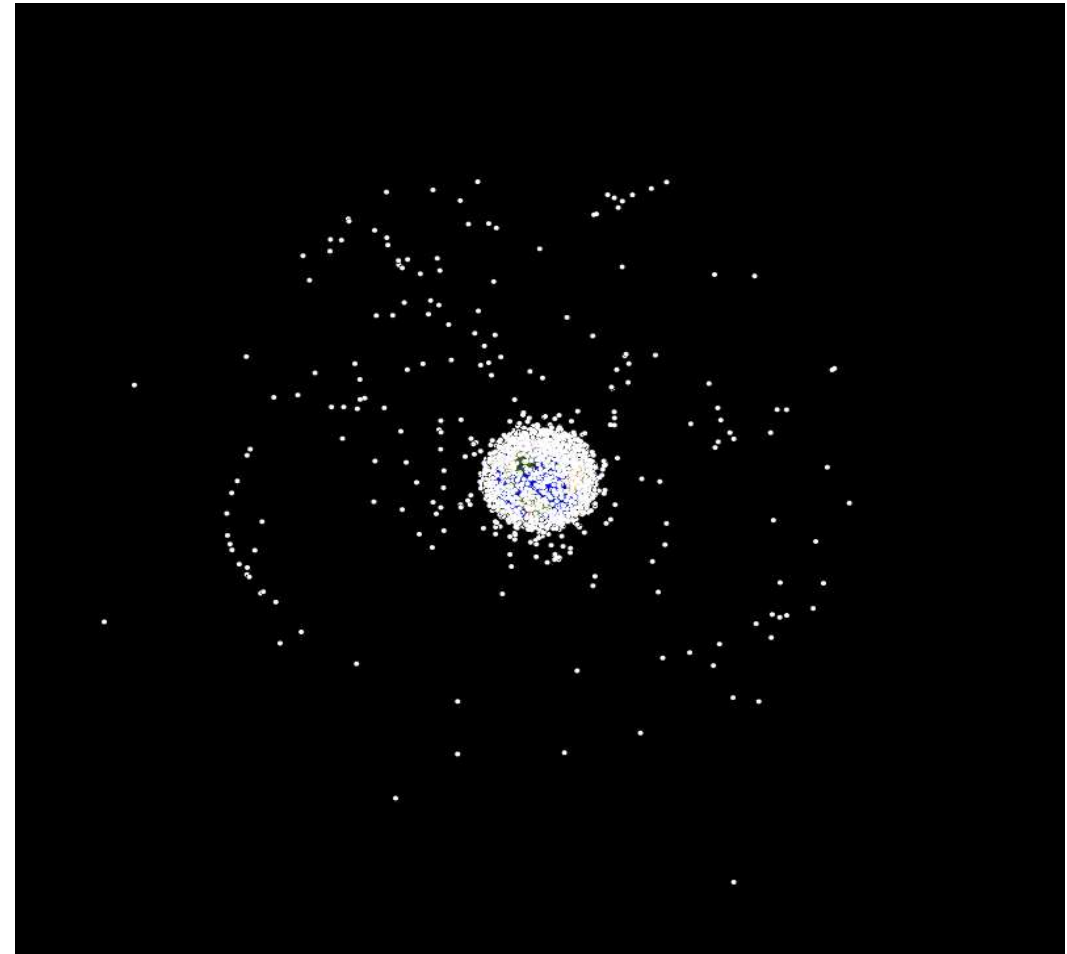
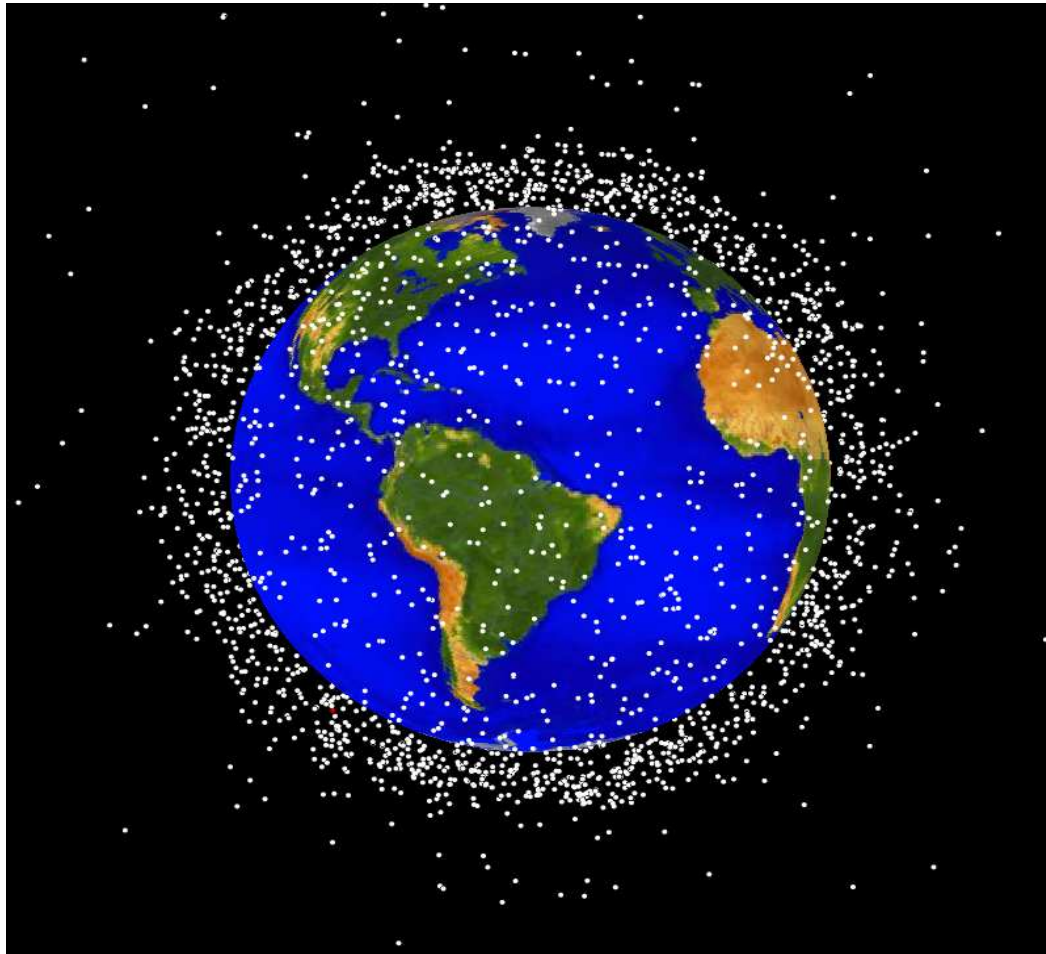


Objets catalogués > 10 cm de diamètre

Evolution de la population orbitale

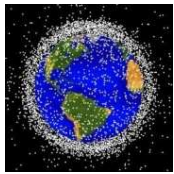


1975

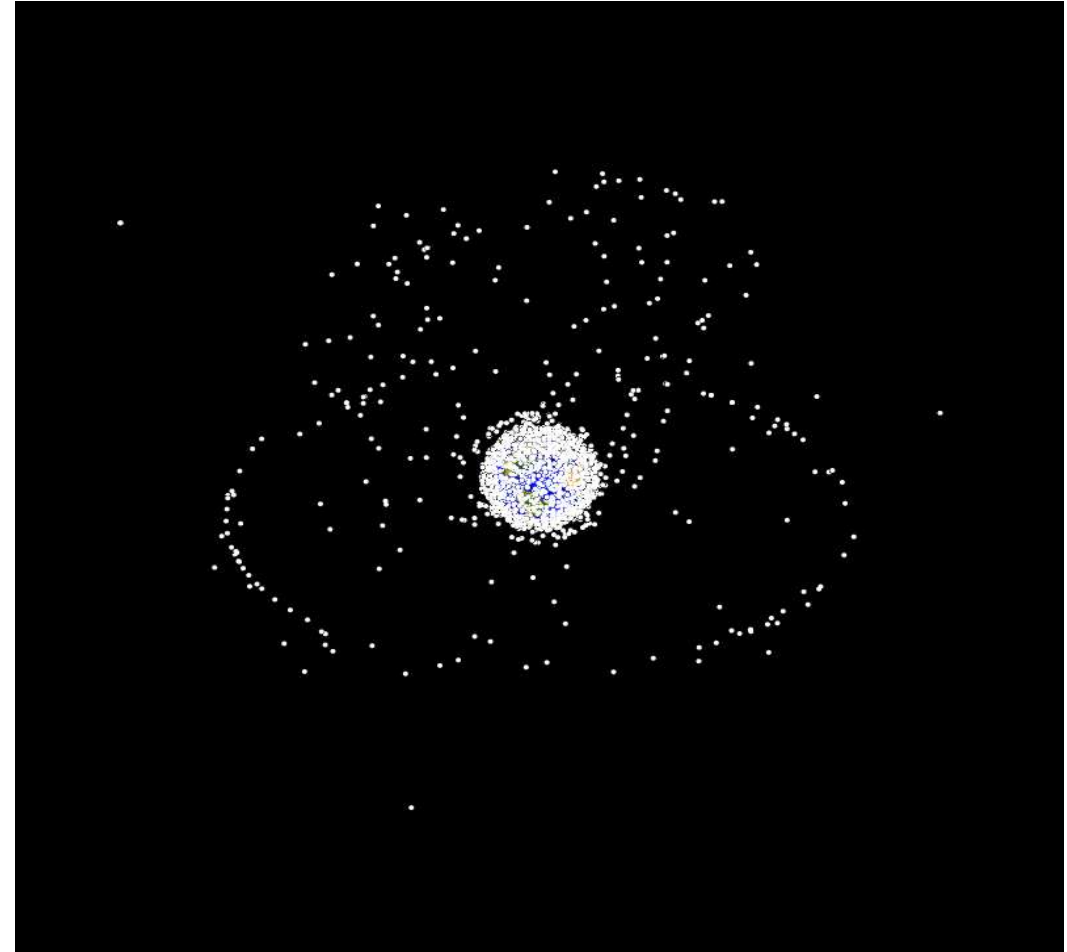
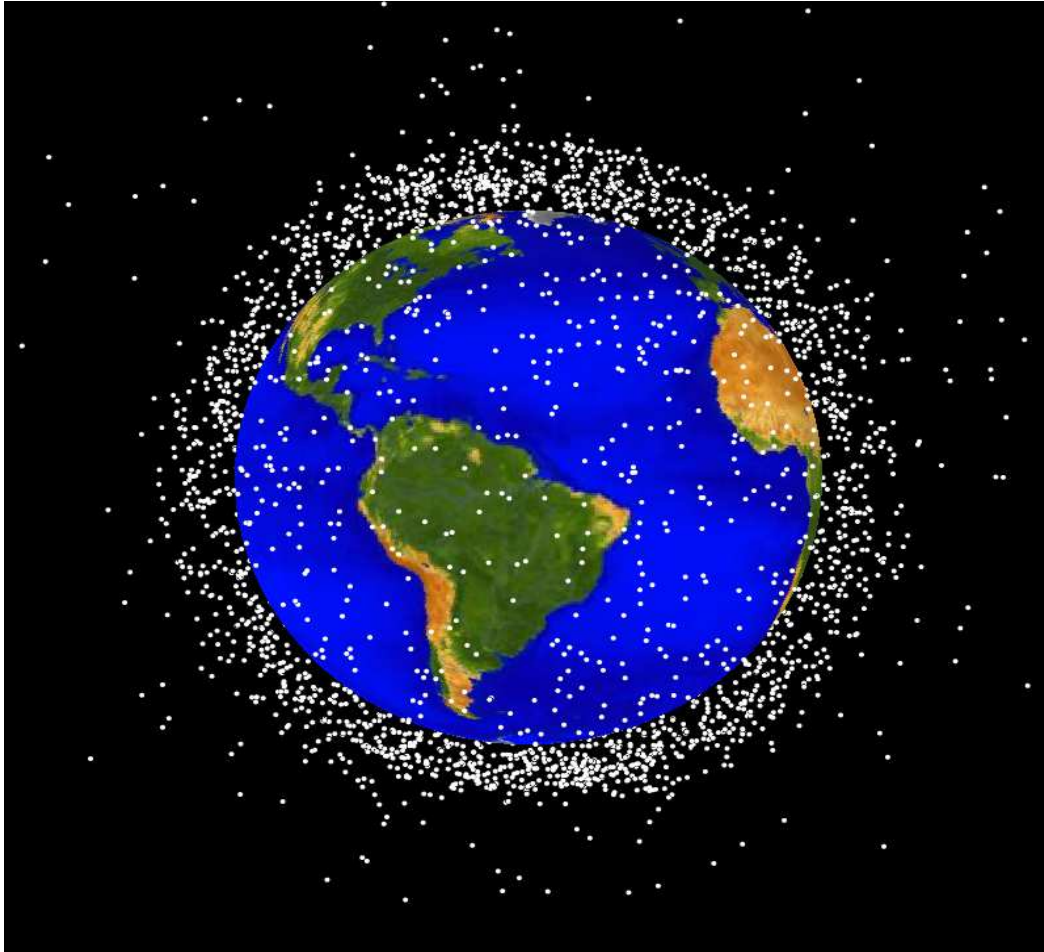


Objets catalogués > 10 cm de diamètre

Evolution de la population orbitale

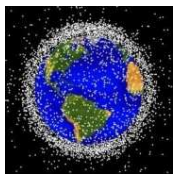


1980

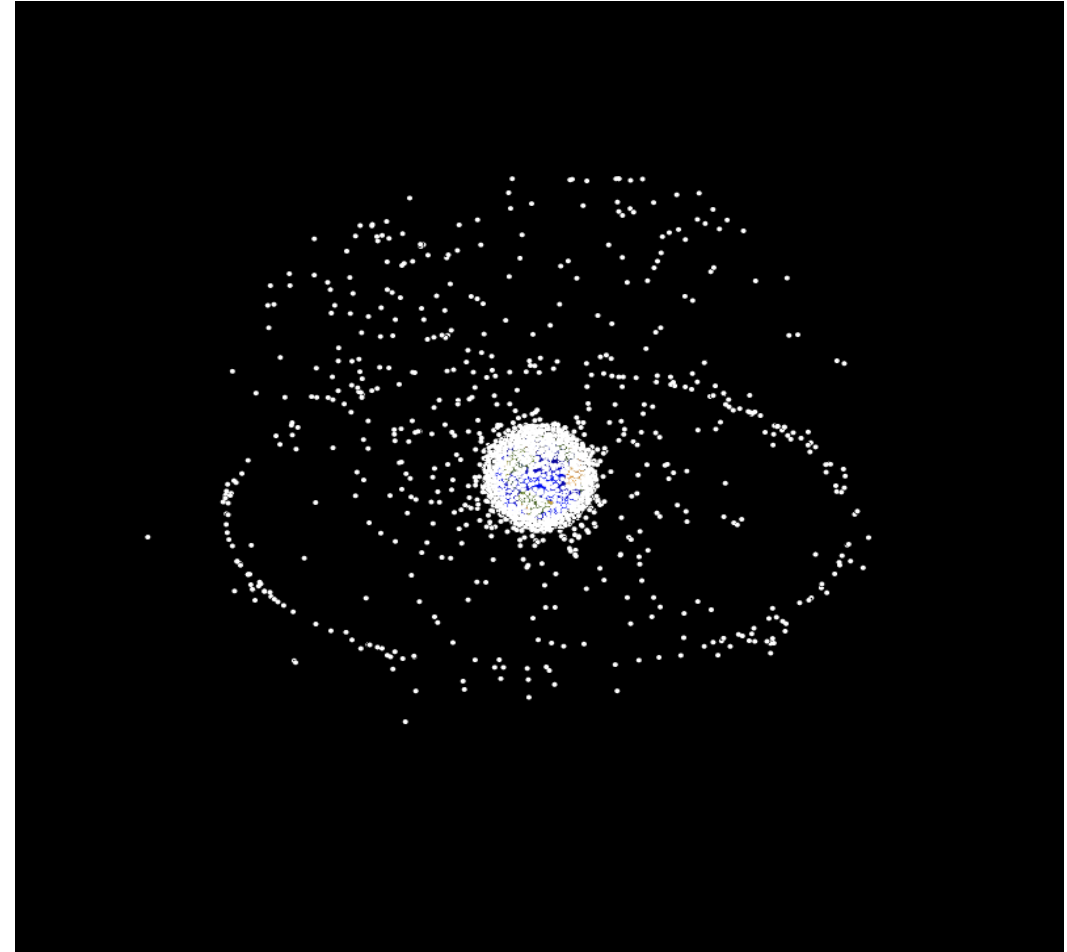
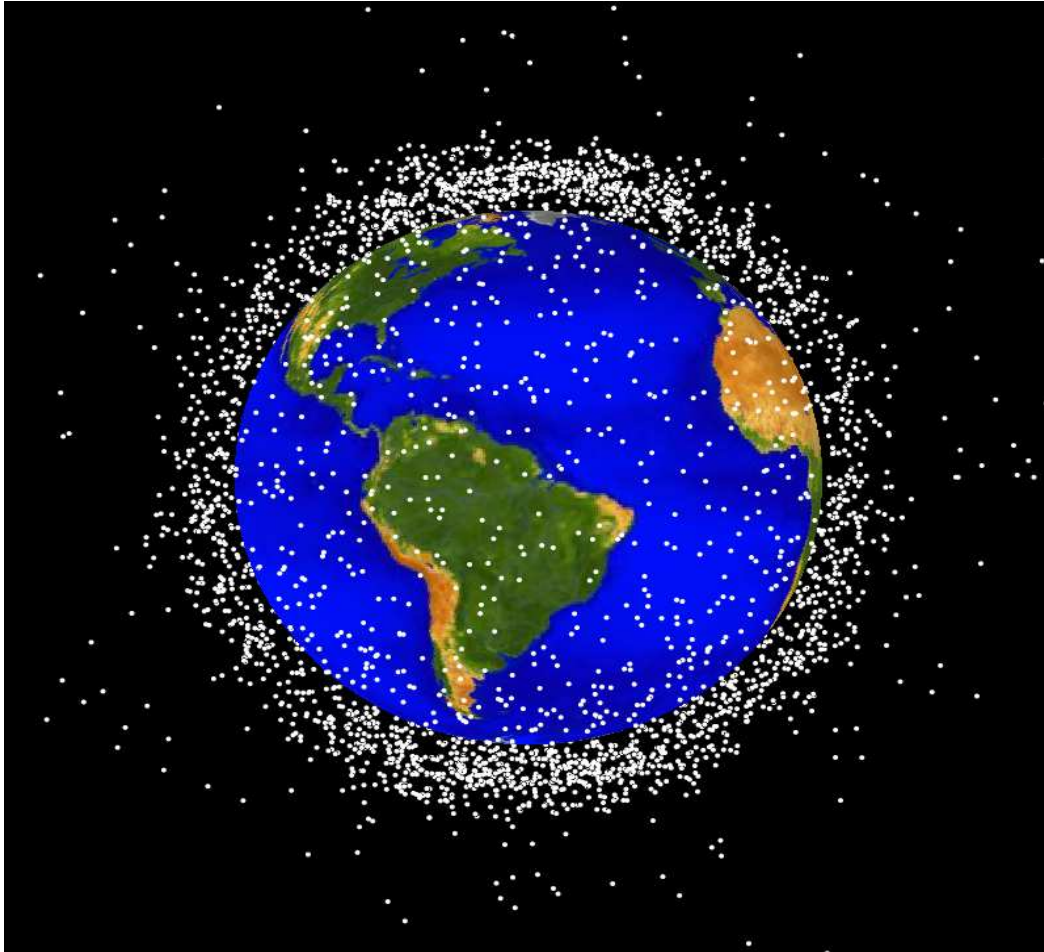


Objets catalogués > 10 cm de diamètre

Evolution de la population orbitale

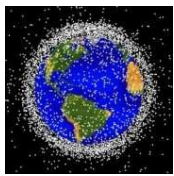


1985

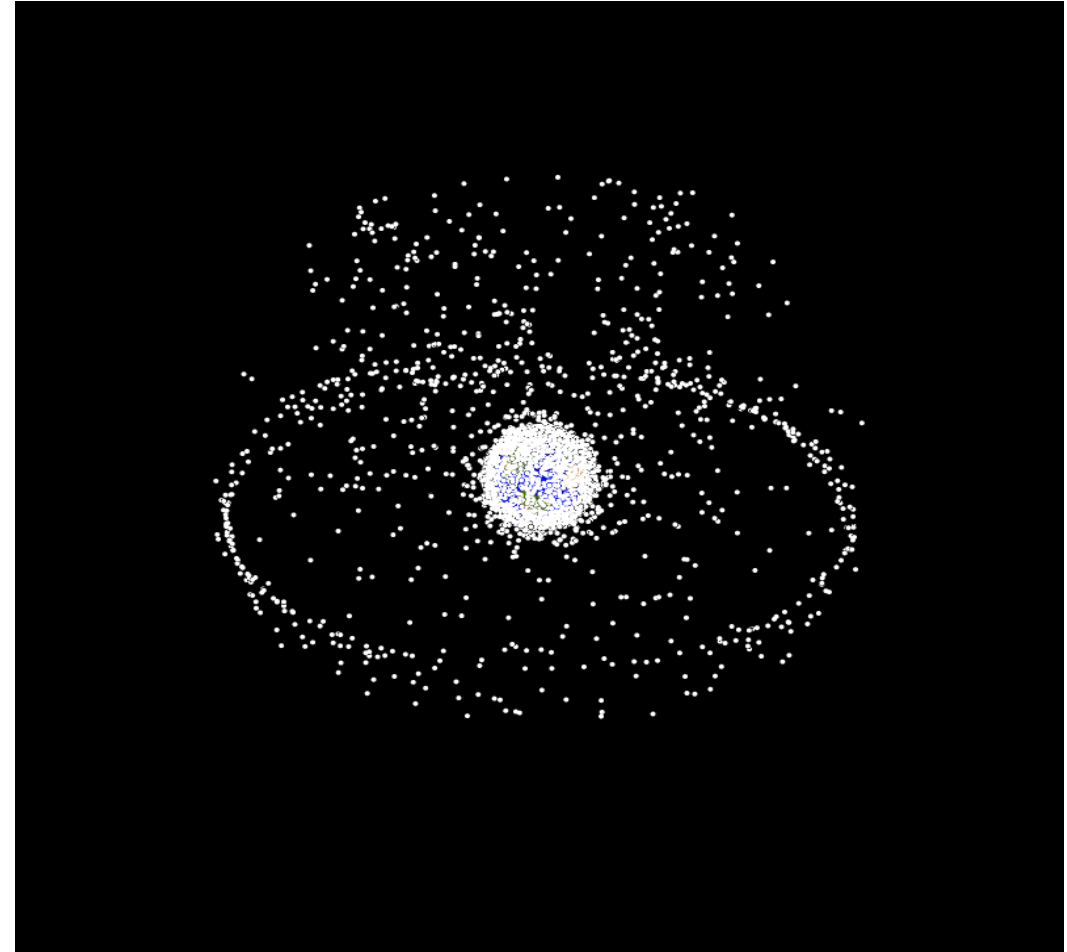
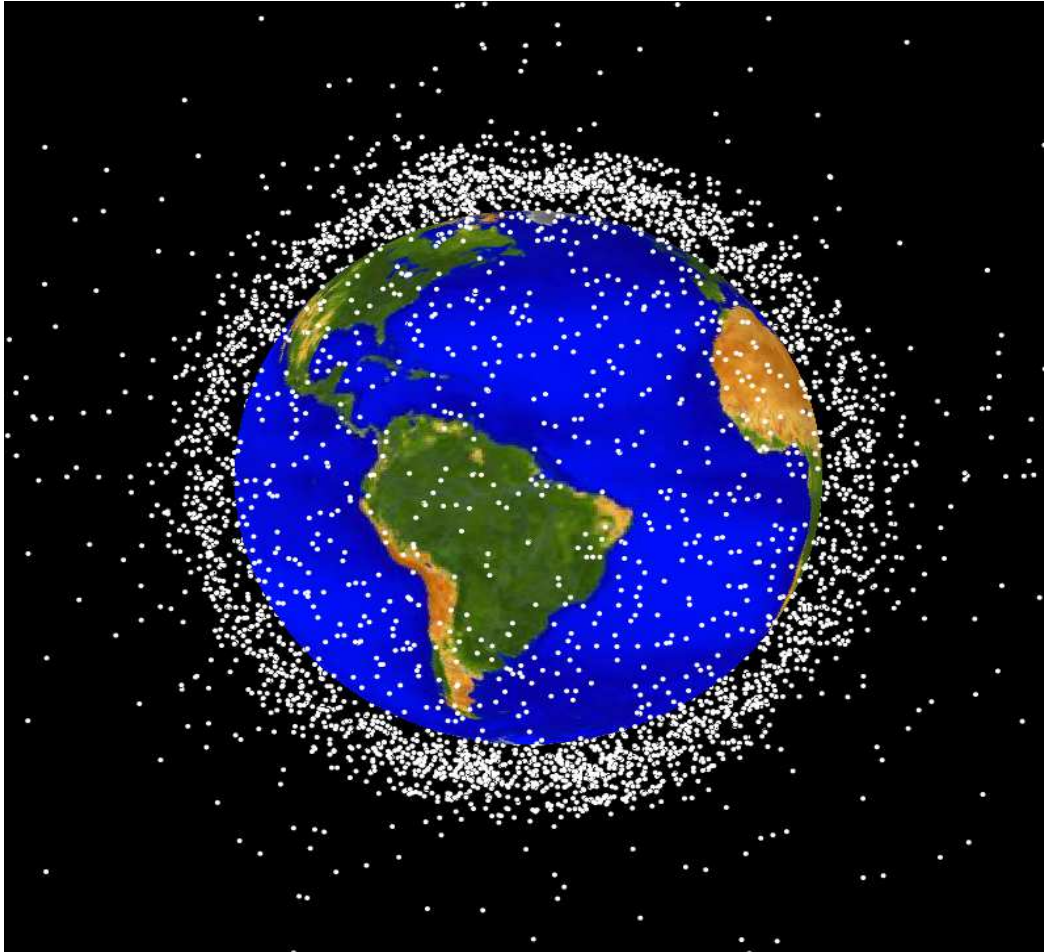


Objets catalogués > 10 cm de diamètre

Evolution de la population orbitale



1990

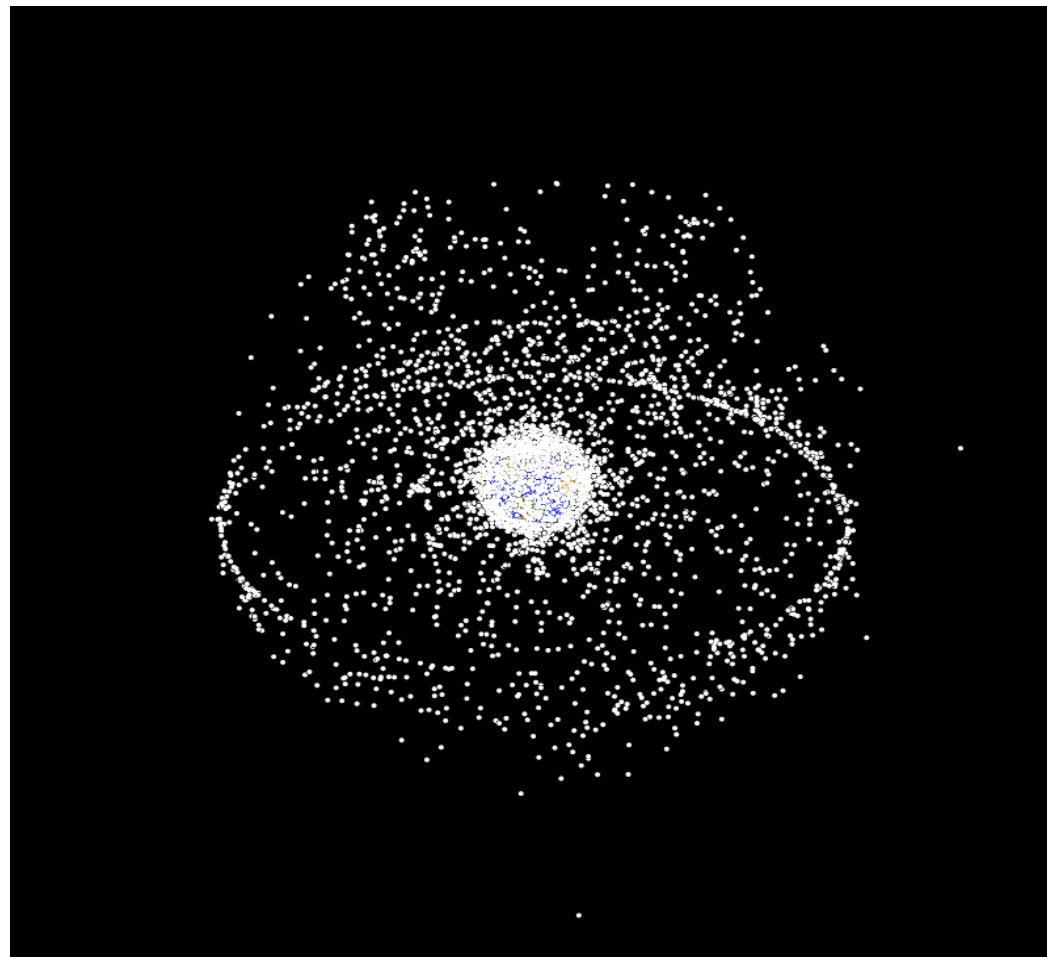
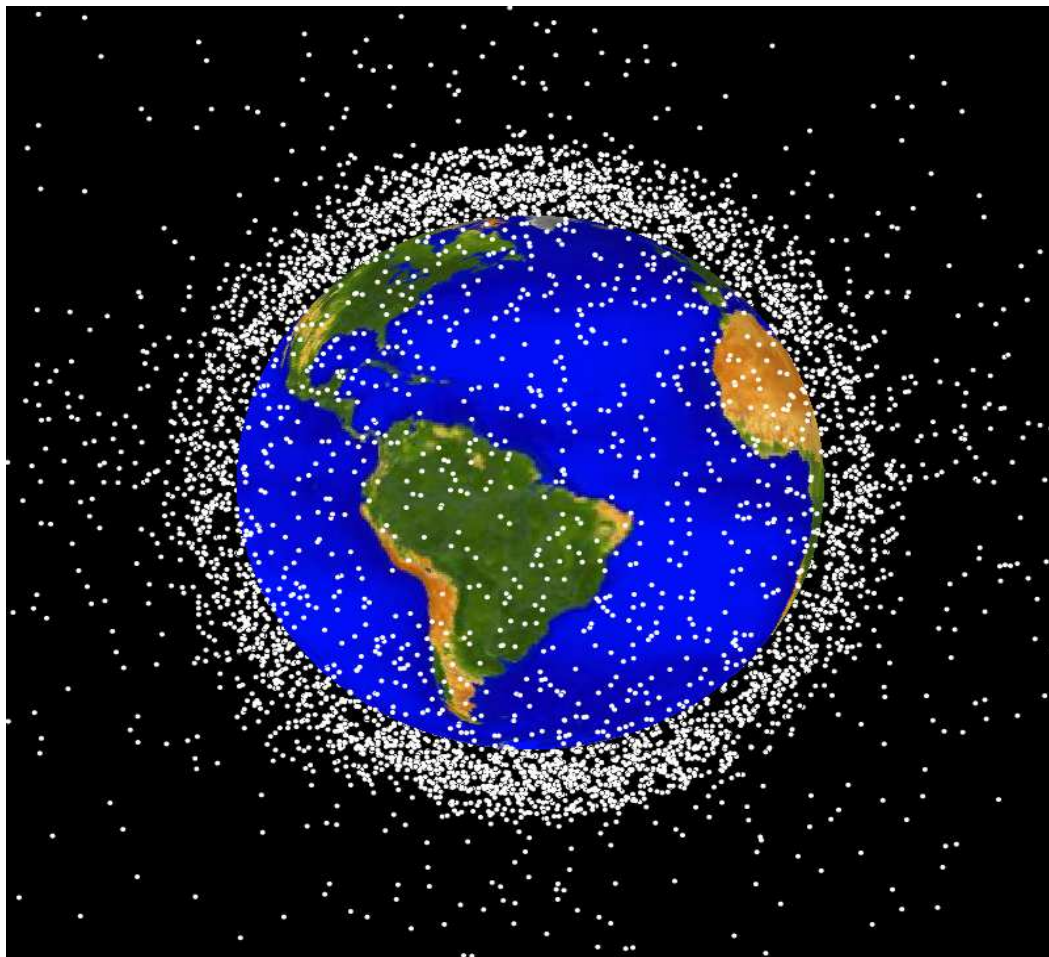


Objets catalogués > 10 cm de diamètre

Evolution de la population orbitale

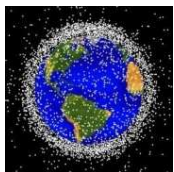


1995

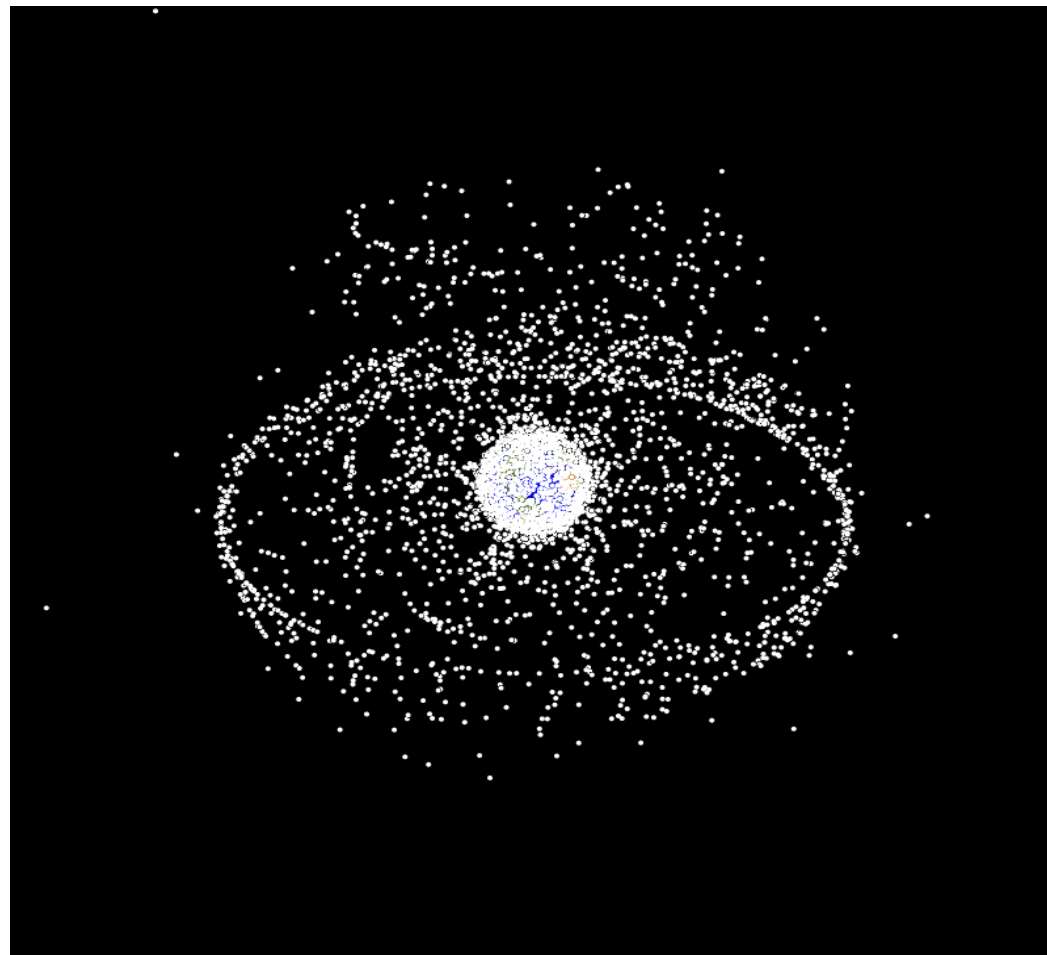
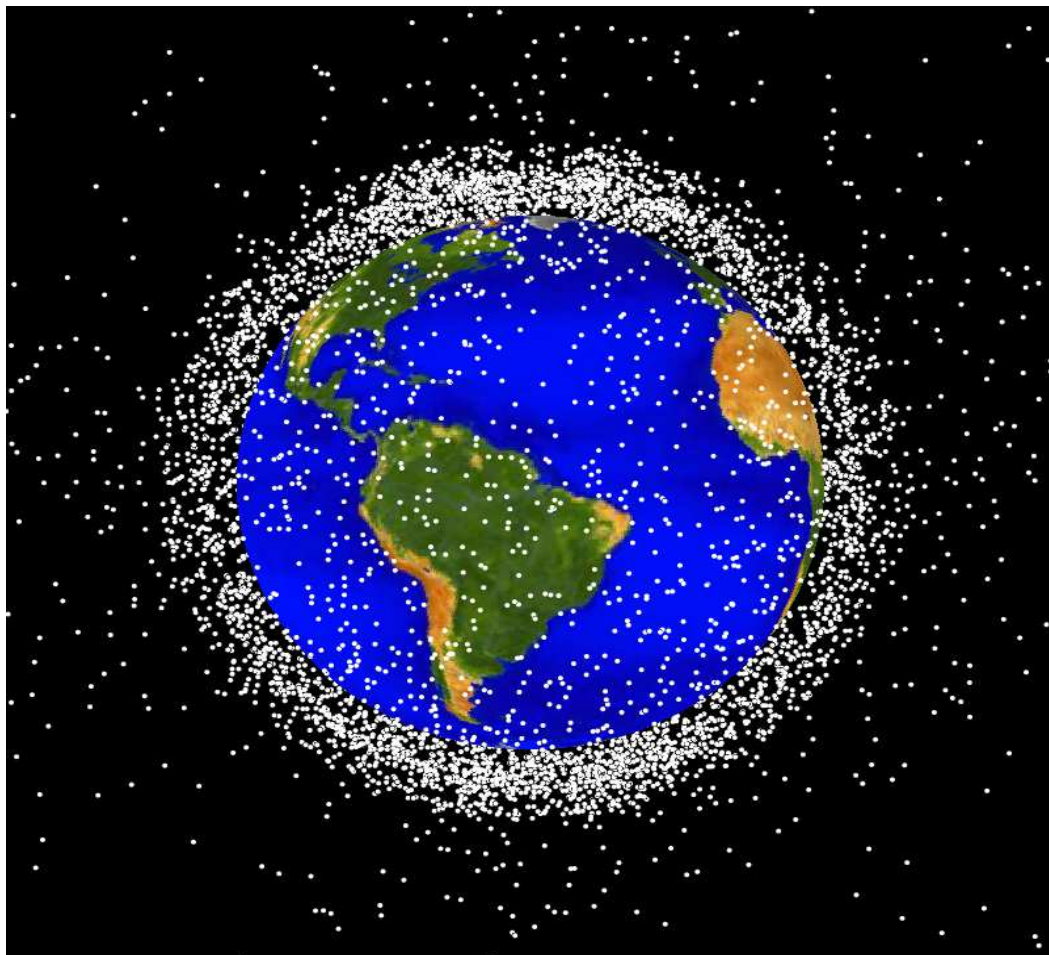


Objets catalogués > 10 cm de diamètre

Evolution de la population orbitale

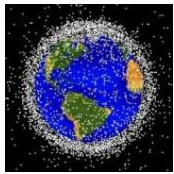


2000

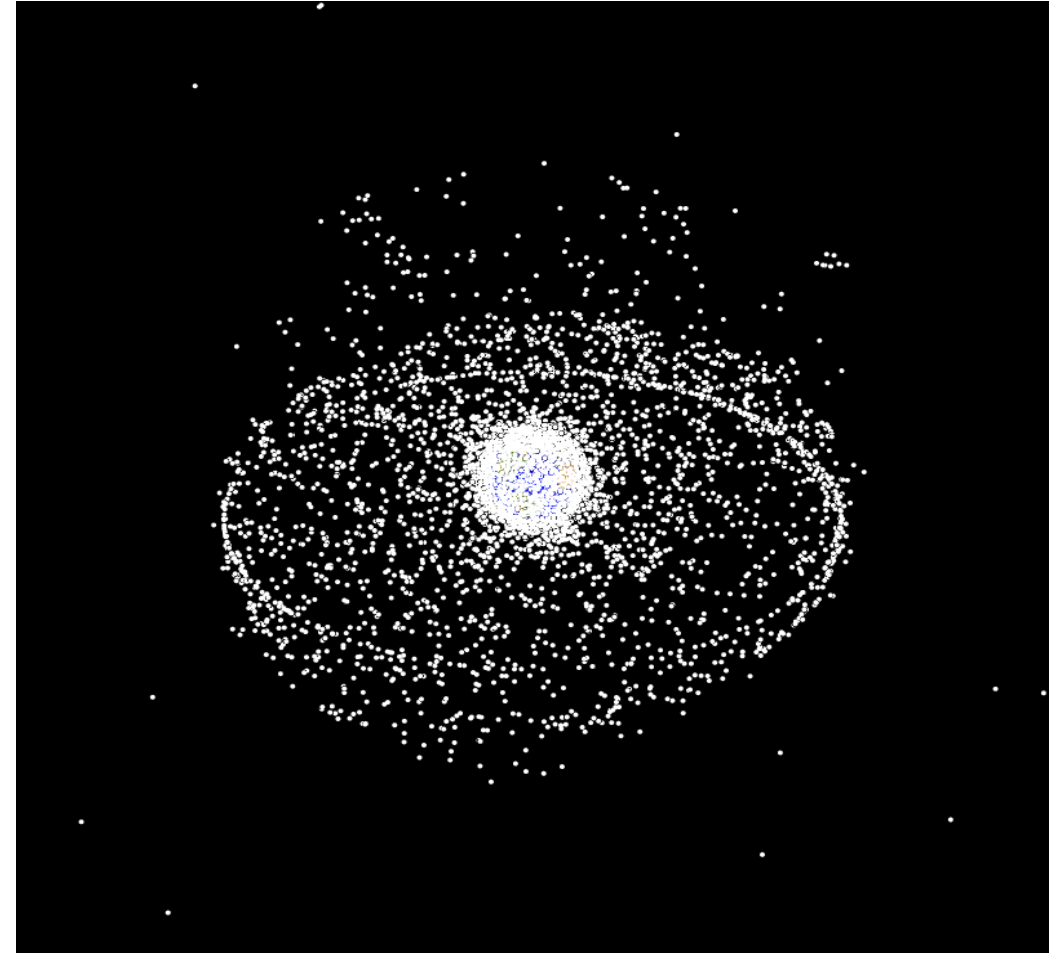
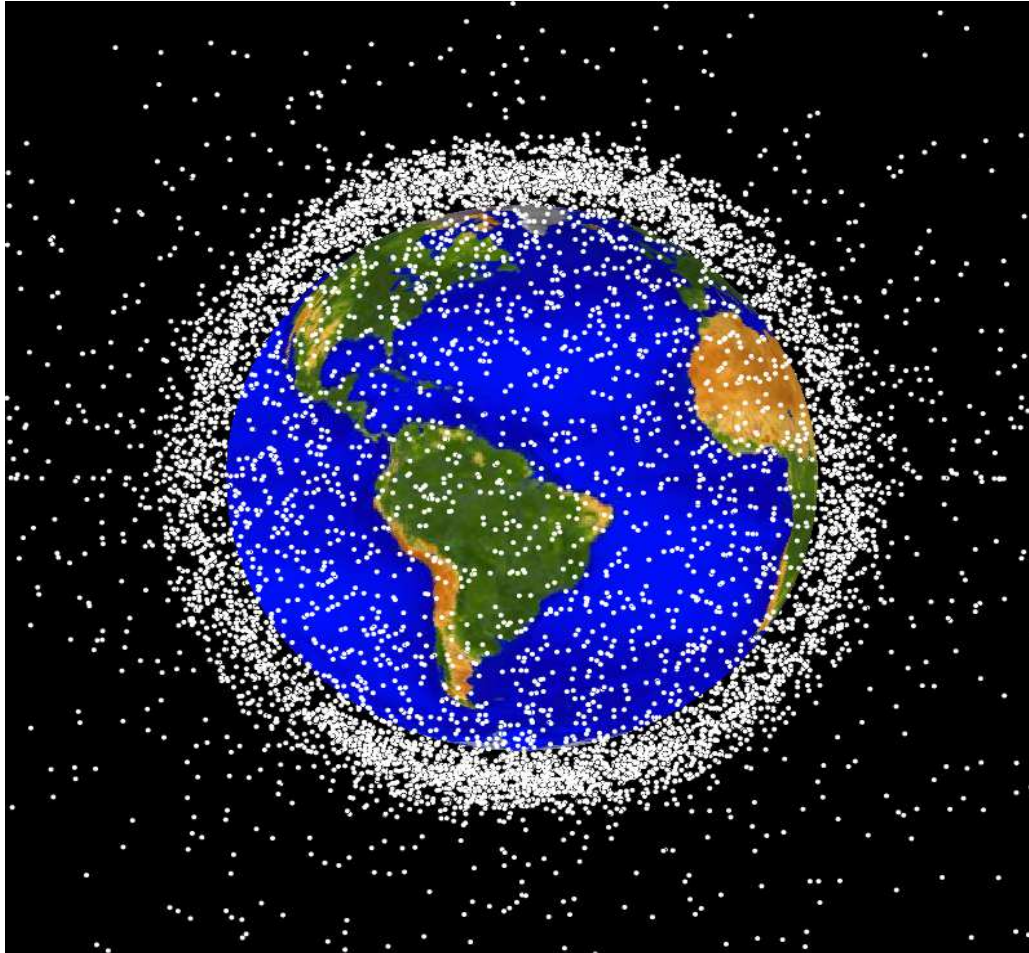


Objets catalogués > 10 cm de diamètre

Evolution de la population orbitale

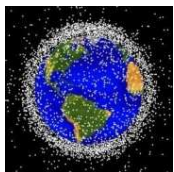


2005

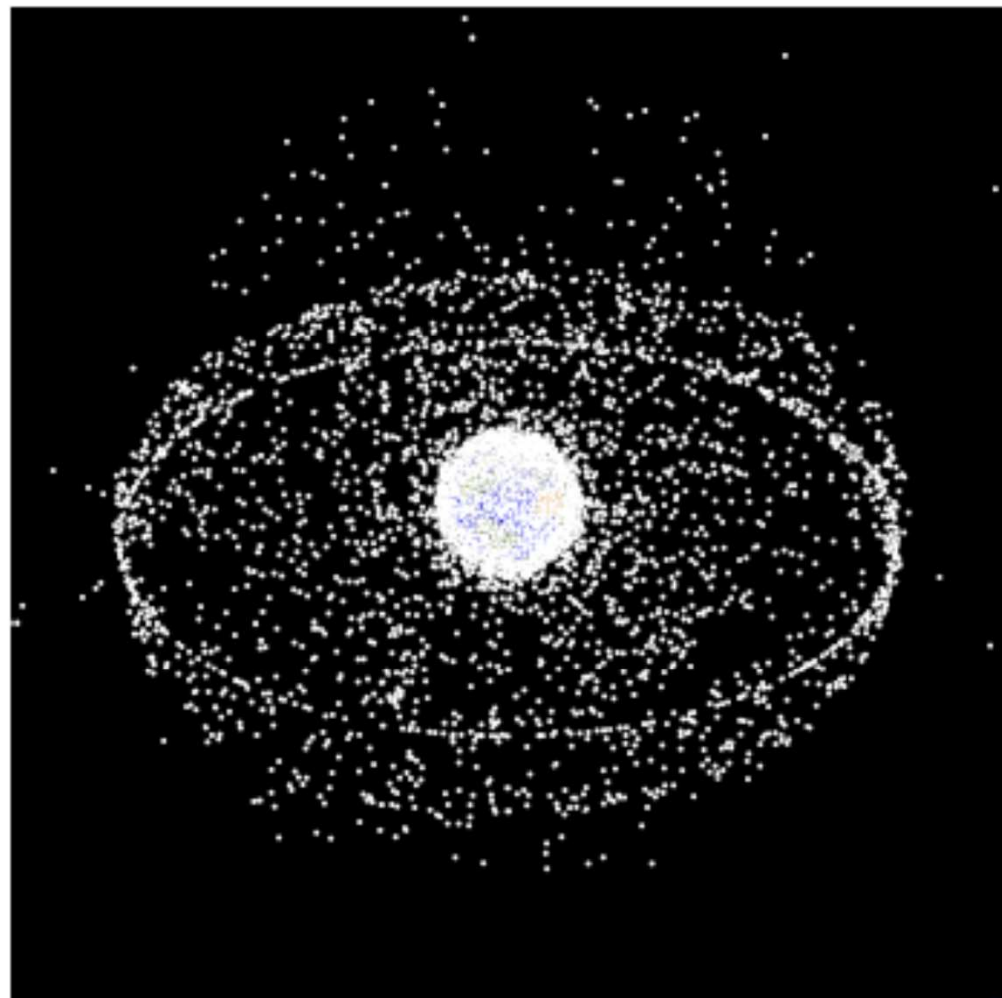
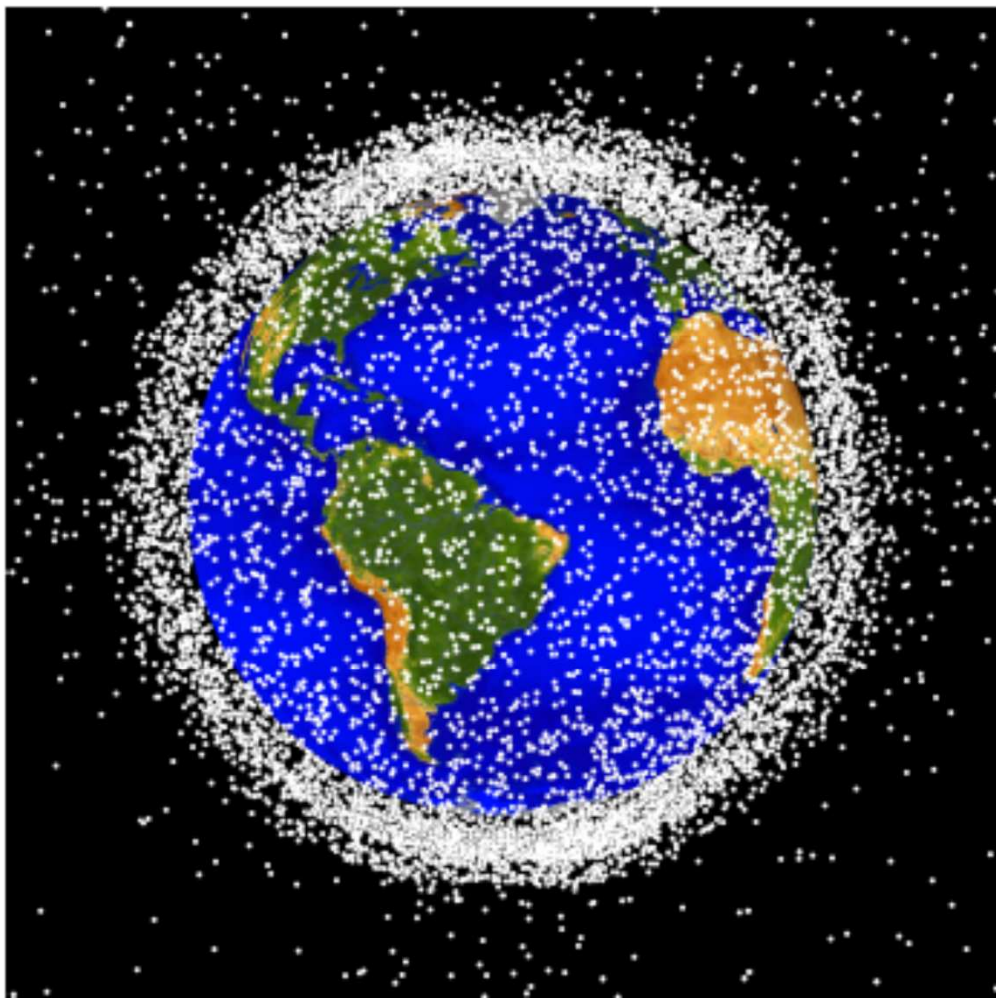


Objets catalogués > 10 cm de diamètre

Evolution de la population orbitale

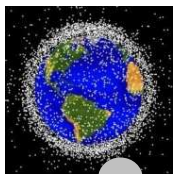


2010

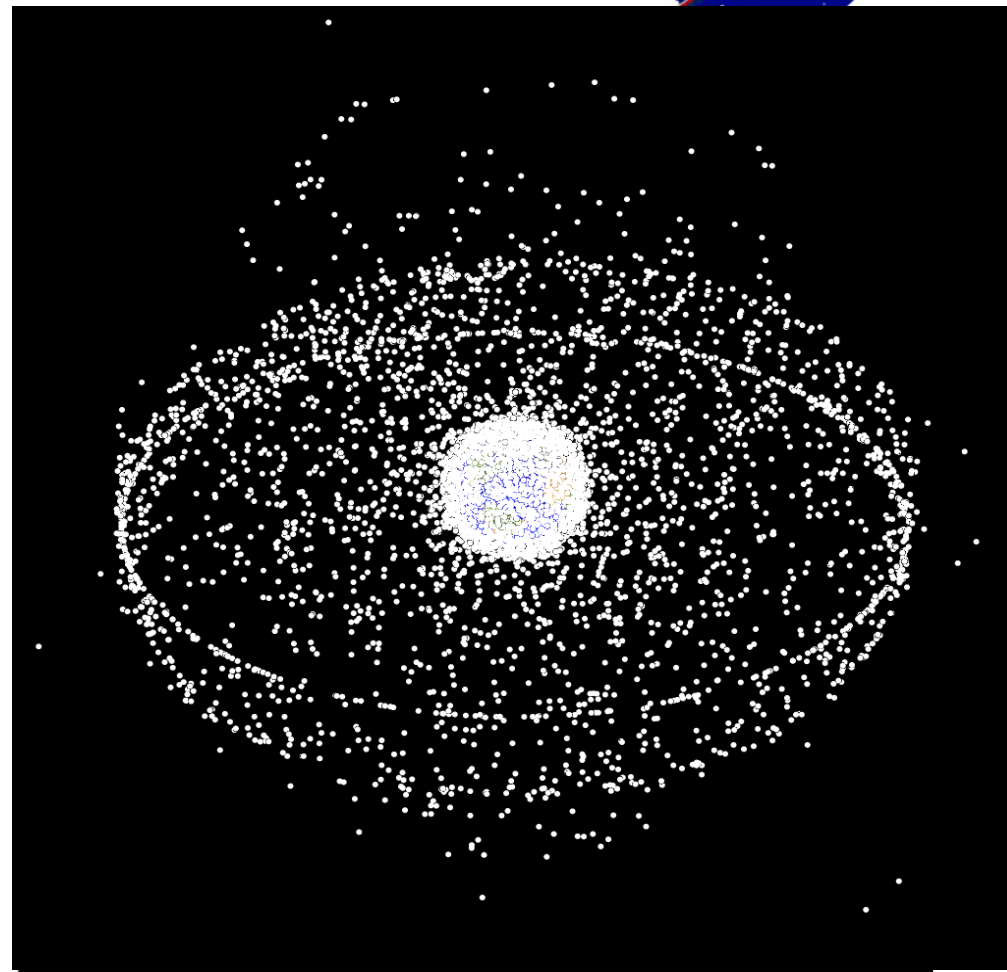
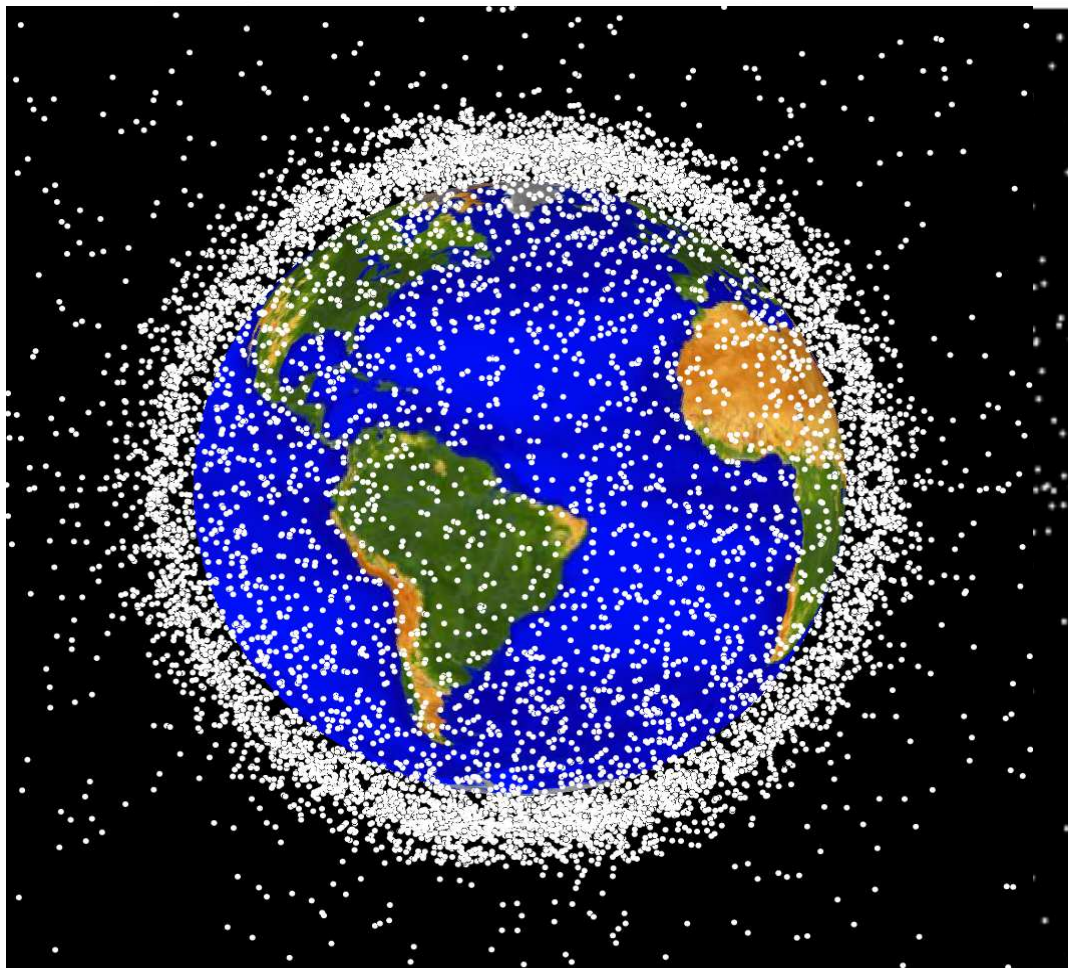


Objets catalogués > 10 cm de diamètre

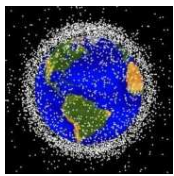
Evolution de la population orbitale



2015



Objets catalogués > 10 cm de diamètre



Situation actuelle



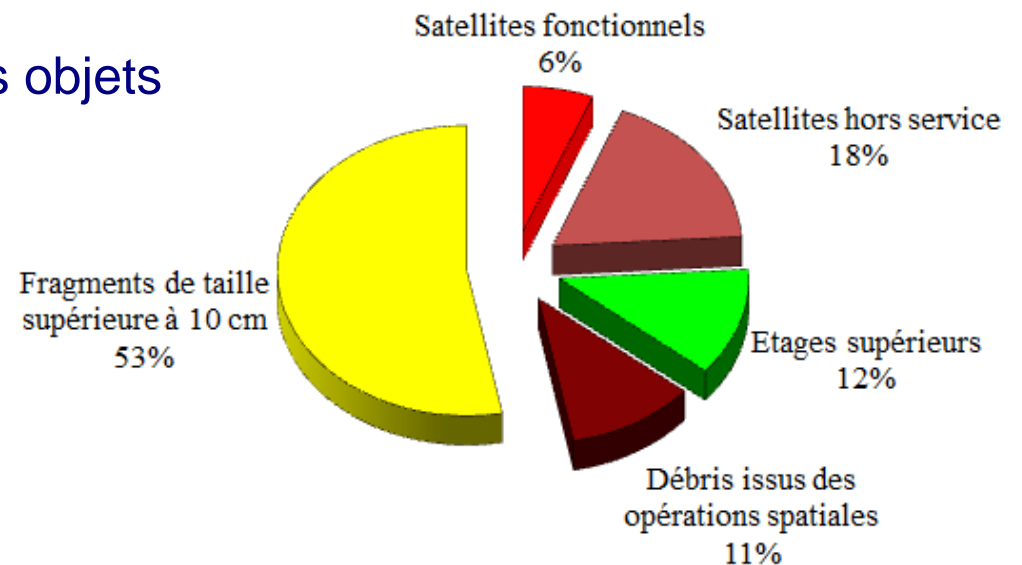
Environ 23.000 gros objets dans l'espace

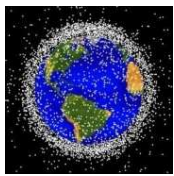
- Nombre mal déterminé...
 - ↳ 29.200 objets de plus de 10 cm d'après le modèle MASTER-2009 ESA
- 17.607 gros objets catalogués à ce jour (18/05/2016)
 - ↳ environ 6.000 objets supplémentaires identifiés mais non catalogués
- 720.000 débris de plus de 1 cm
- 135 million de débris de plus de 1 mm

⚠ Mais l'espace est infiniment grand !

↳ A un instant donné, seulement 20 gros objets au dessus de la France

- Environ 1100 satellites actifs (6 %) :
 - 450 en GEO (géostationnaire)
 - 550 en LEO (orbites basses)
 - 100 ailleurs





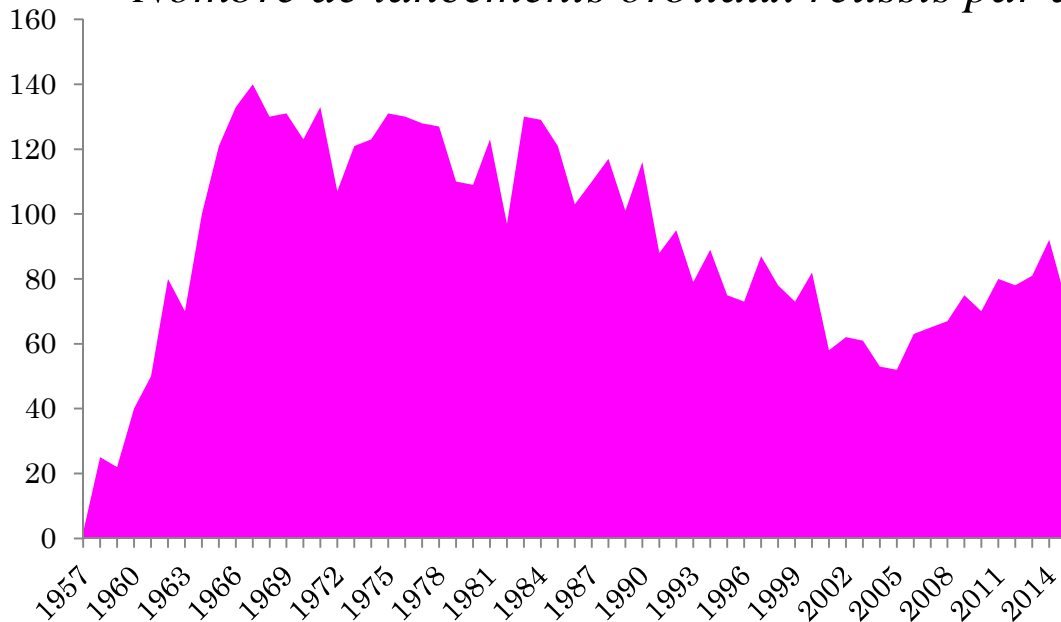
Situation actuelle



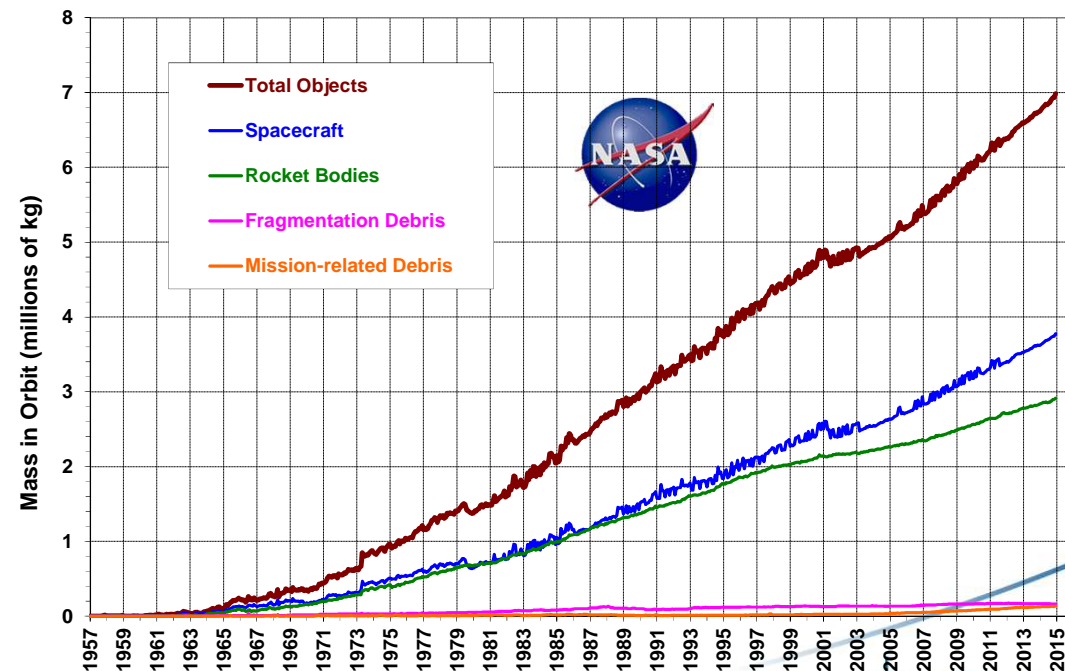
Le nombre et la masse d'objets en orbite augmentent fortement dans le temps

- Principalement en Orbites Basses (Region A = ≤ 2000 km, $\forall i$)
- Significativement en Orbite Géostationnaire (Region B = GEO ± 200 km $\pm 15^\circ$)
- Malgré une forte réduction du nombre de lancements par rapport à 60-80
- Malgré les efforts réglementaires depuis près de 20 ans

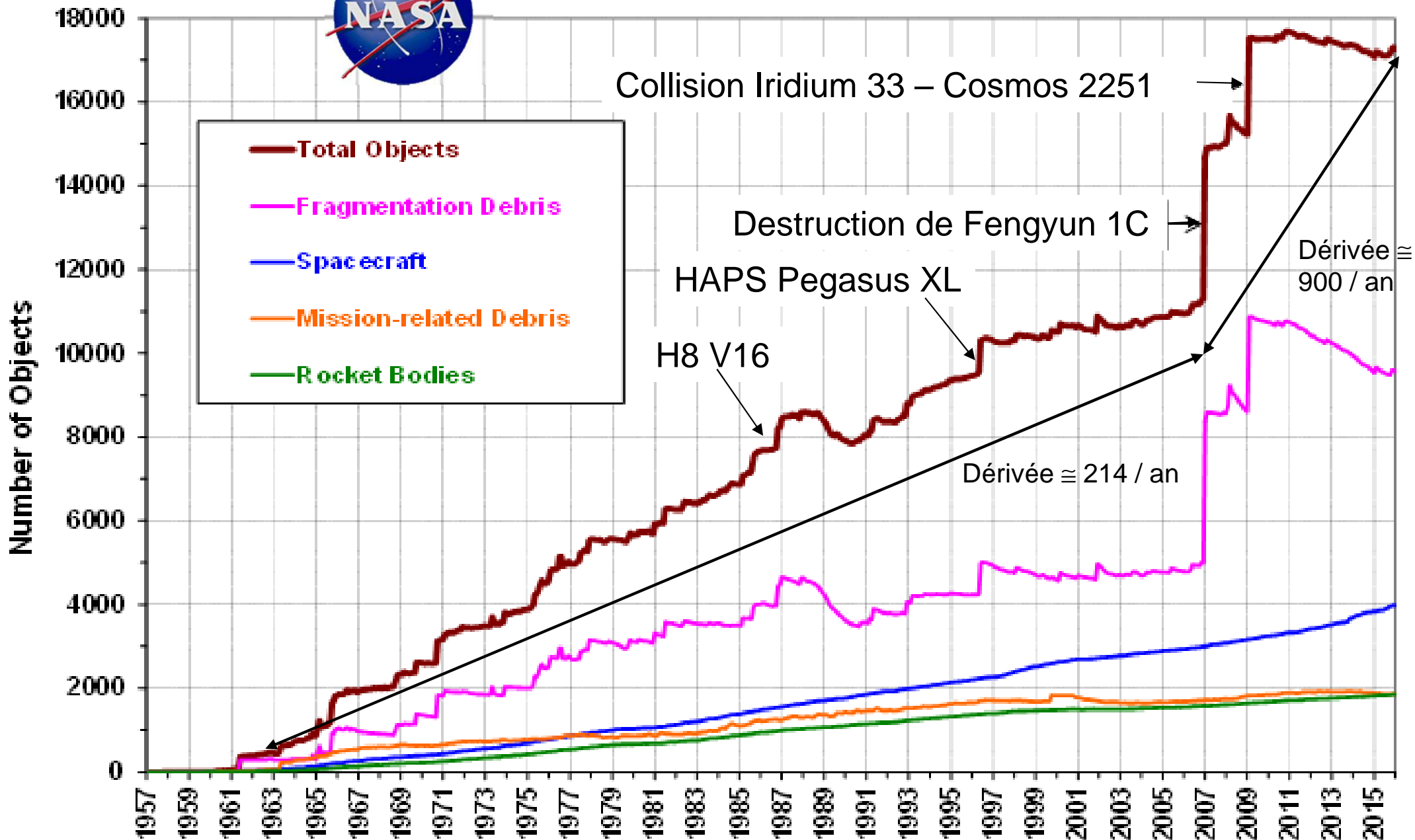
Nombre de lancements orbitaux réussis par an

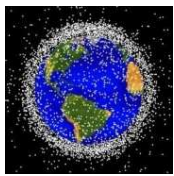


Masse des objets artificiels en orbite



Situation actuelle : Nombre d'objets catalogués



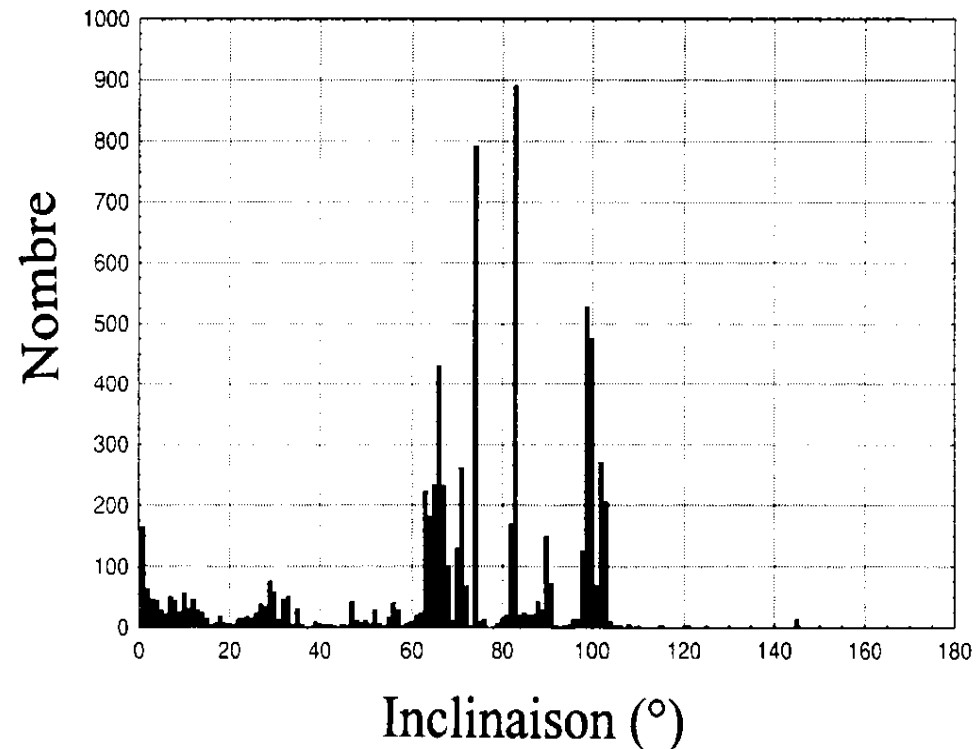
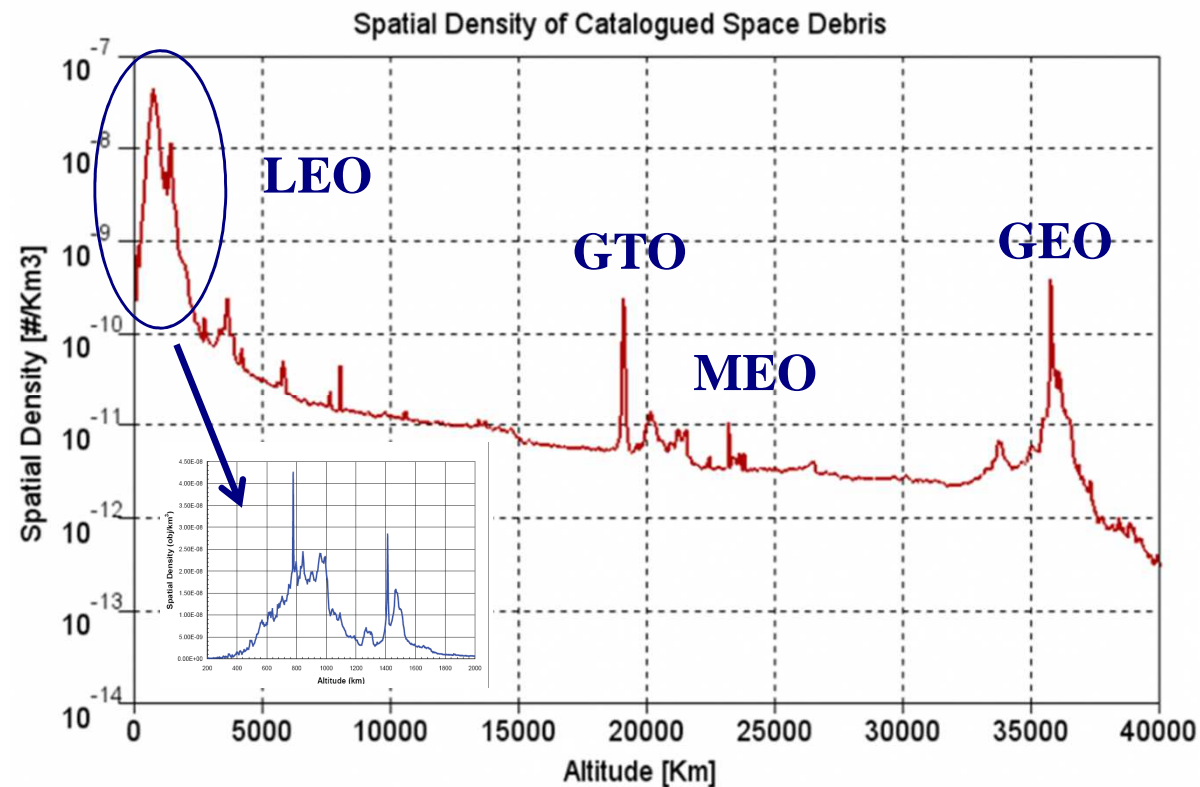


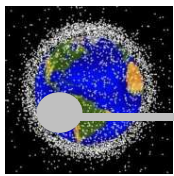
Situation actuelle



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

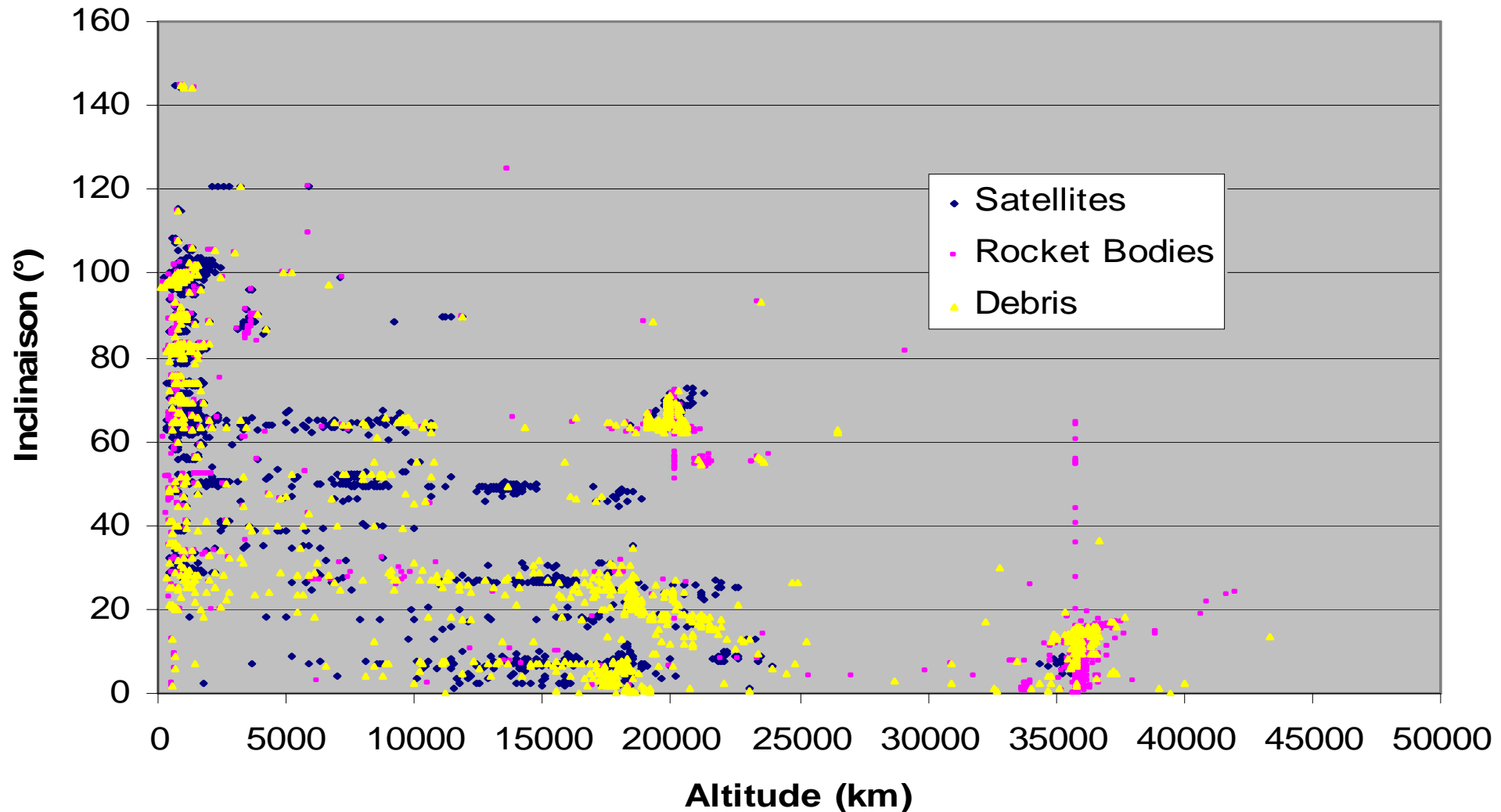




Situation actuelle



Position des objets catalogués dans le plan Altitude – Inclinaison (source: TLE USSPACECOM – 050213)





Origine des débris : 4 sources principales

- Lancement

↳ Exemple de 2015 : 86 lancements ⇒ 313 objets catalogués

- Vieillesse des matériaux

(Protections thermiques, cellules électriques, Mylars...)

↳ Principalement des très petits débris

- Fragmentations, volontaires ou non

↳ 280 enregistrées au 22 janvier 2013 (en attente de réactualisation)

⇒ 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

⇒ 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)

- Collisions

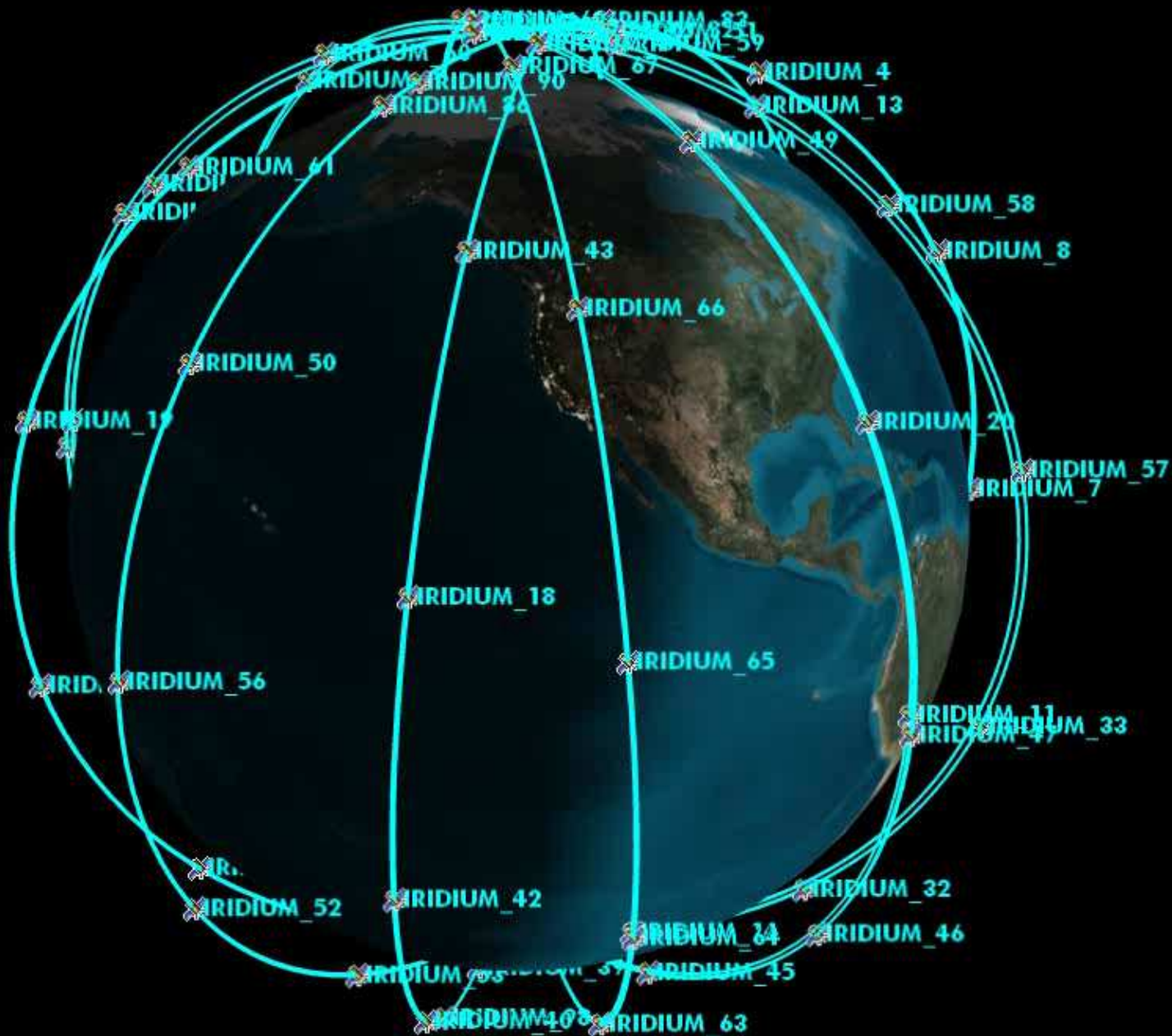
↳ 5 collisions entre catalogués, 64 suspectées avec des débris plus petits

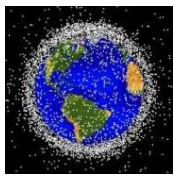
⇒ Exemple : Iridium 33 – Cosmos 2251 → 2269 débris catalogués à ce jour



*MLI après 10 ans
dans l'espace
LDEF - CNES*

Collision Iridium 33 – Cosmos 2251 (AGI)





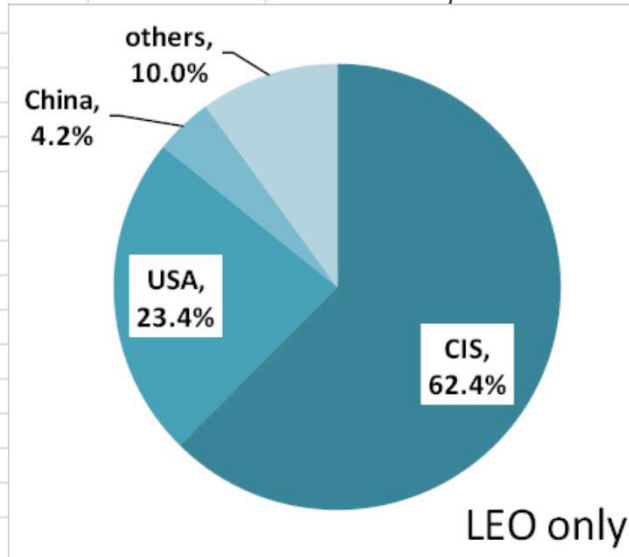
Situation actuelle

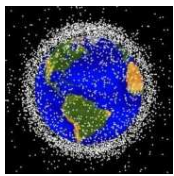


Contribution de la France

- 4^{ème} contributeur après Russie, USA, Chine, sur 85 pays ou organisations
- Mais contribution globalement très faible : 3% des objets en orbite

Pays 17.01.2016	En orbite				Rentrés				Total par pays
	Satellites	Etages	Débris	Total	Satellites	Etages	Débris	Total	
Tous	4155	2053	11266	17477	3146	3756	16854	23756	41233
COMMONWEALTH OF INDEPENDENT STATES (CIS)	1504	1027	3794	6325	2001	2811	10167	14979	21304
UNITED STATES OF AMERICA (US)	1274	669	3418	5361	920	655	4443	6018	11379
PEOPLES REPUBLIC OF CHINA (PRC)	212	99	3490	3804	68	119	1000	1187	4991
FRANCE (FR)	60	142	322	524	9	73	630	712	1236
JAPAN (JPN)	149	46	34	229	49	64	163	276	505
INDIA (IND)	64	26	84	174	10	13	301	324	498
EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA)	64	7	47	118	13	7	19	39	157
GLOBALSTAR (GLOB)	84	0	1	85	0	0	1	1	86
INTERNATIONAL TELECOMMUNICATIONS SATELLIT	82	0	0	82	1	0	0	1	83
PEOPLES REPUBLIC OF CHINA/BRAZIL (CHBZ)	3	0	57	60	0	0	30	30	90
SOCIÉTÉ EUROPÉENNE DES SATELLITES (SES)	54	0	0	54	1	0	0	0	0
GERMANY (GER)	49	0	1	50	15	0	0	0	0
EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS SATELLITE ORG	50	0	0	50	0	0	0	0	0
CANADA (CA)	43	0	5	48	1	0	0	0	0
ORBITAL TELECOMMUNICATIONS SATELLITE (GLOB	41	0	0	41	0	0	0	0	0
UNITED KINGDOM (UK)	40	1	0	41	9	0	0	0	0
SEA LAUNCH DEMO (SEAL)	1	30	3	34	0	3	0	0	0
ITALY (IT)	22	2	0	24	11	0	0	0	0
SPAIN (SPN)	18	0	0	18	2	0	0	0	0
SOUTH KOREA (SKOR)	17	1	0	18	1	0	0	0	0
AUSTRALIA (AUS)	14	2	0	16	2	0	0	0	0
BRAZIL (BRAZ)	16	0	0	16	1	0	0	0	0
EUROPEAN ORGANIZATION FOR THE EXPLOITATIO	8	0	8	16	0	0	0	0	0
INTERNATIONAL MARITIME SATELLITE ORGANIZAT	16	0	0	16	0	0	0	0	0
ISRAEL (ISRA)	14	0	0	14	3	7	0	0	0
ARGENTINA (ARGN)	14	0	0	14	0	0	0	0	0



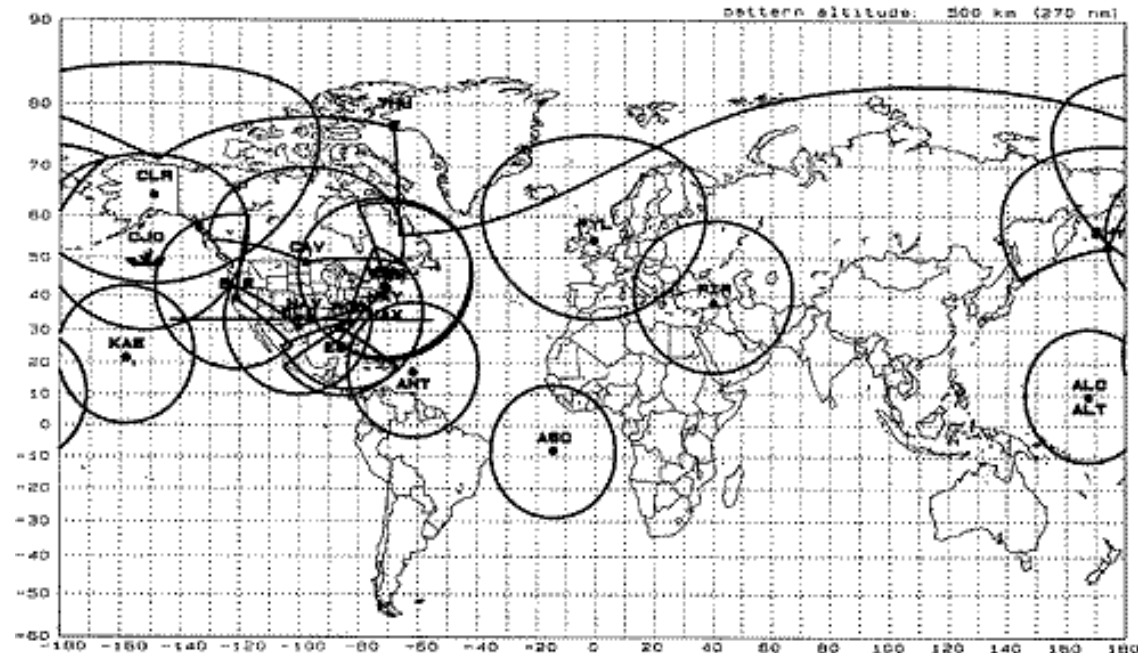
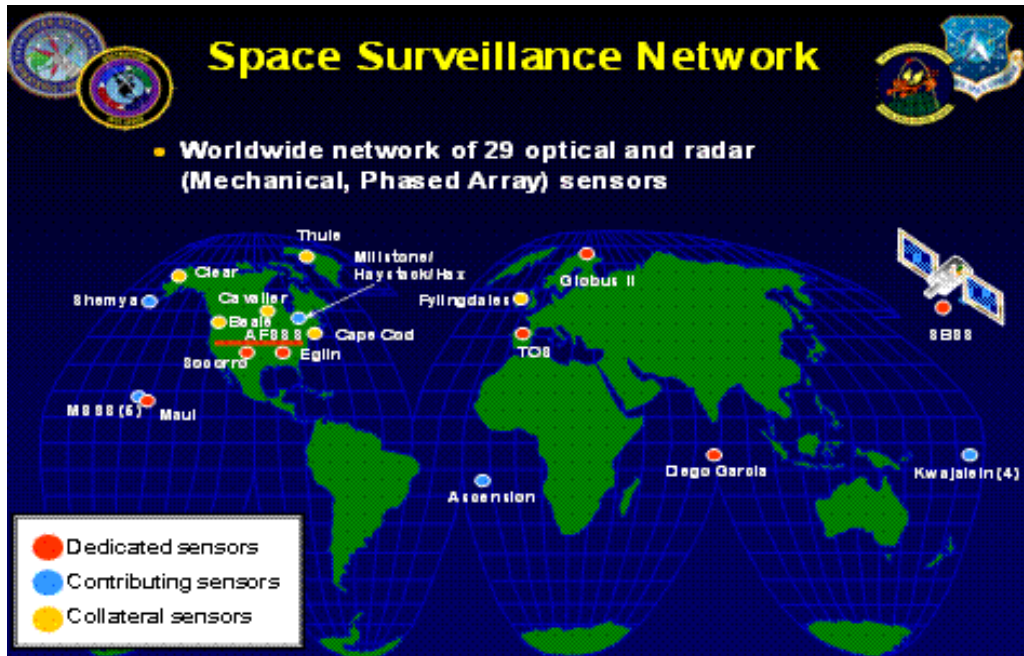


Situation actuelle



Connaissance de la population orbitale

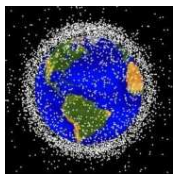
- Réseau de radars et télescopes américains du Space Surveillance Network



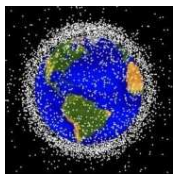
- Elaboration du catalogue grand public TLE (Two Line Elements) - Exemple :

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
```



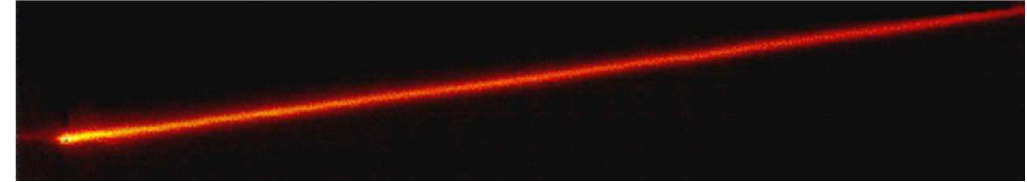
2. Evènements redoutés



Evènements redoutés



① Rentrée atmosphérique non contrôlée :



En cas de rentrée atmosphérique non contrôlée de satellites, étages et gros débris :

→ Fragmentation par la pression dynamique $\frac{1}{2} \rho V^2$

→ Fusion et sublimation par le flux thermique $k \sqrt{\rho} V^{3,15}$

mais...

- Risque de retombée au sol de fragments (aciers, titane, composites, ...)
- Survivabilité élevée, 10 à 20% en masse, 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 ?
- Prévion 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



Evènements redoutés

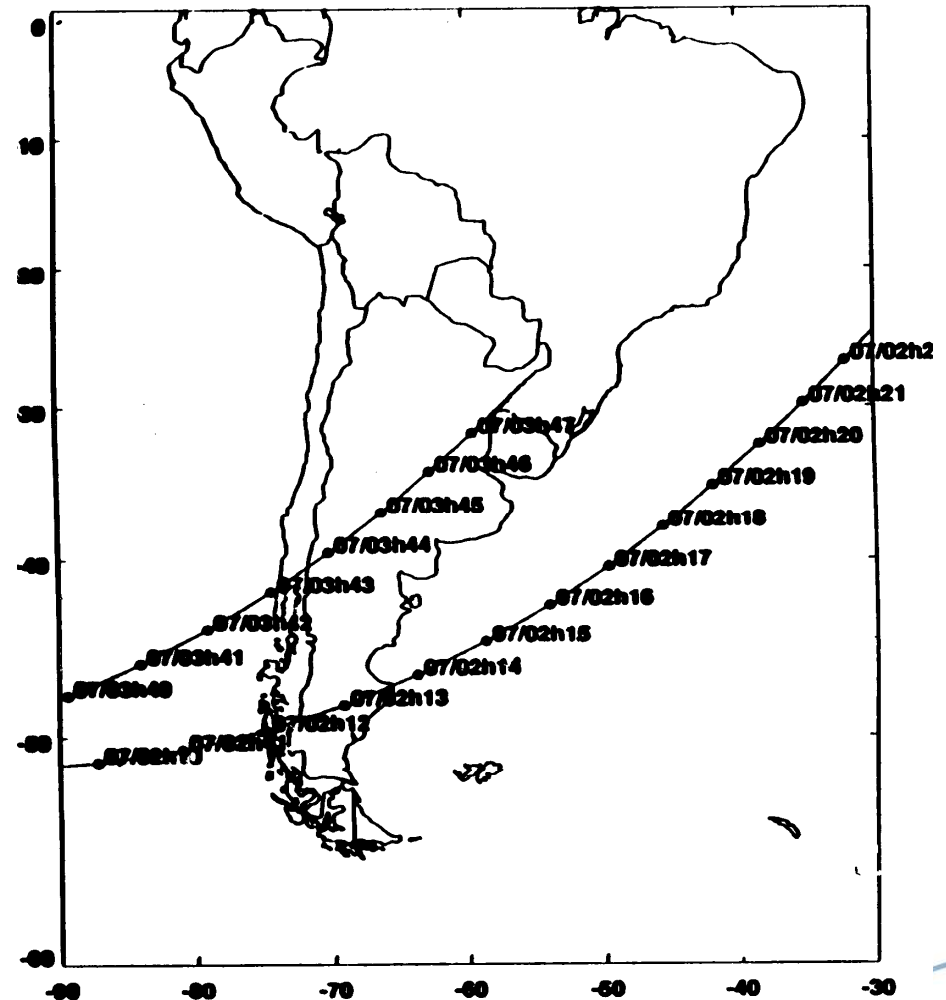


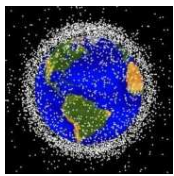
① Rentrée atmosphérique non contrôlée :

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



19 tonnes





Evènements redoutés



① Rentrée atmosphérique non contrôlée :

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





Evènements redoutés



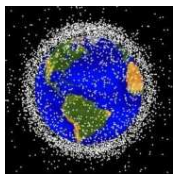
① Rentrée atmosphérique non contrôlée :

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



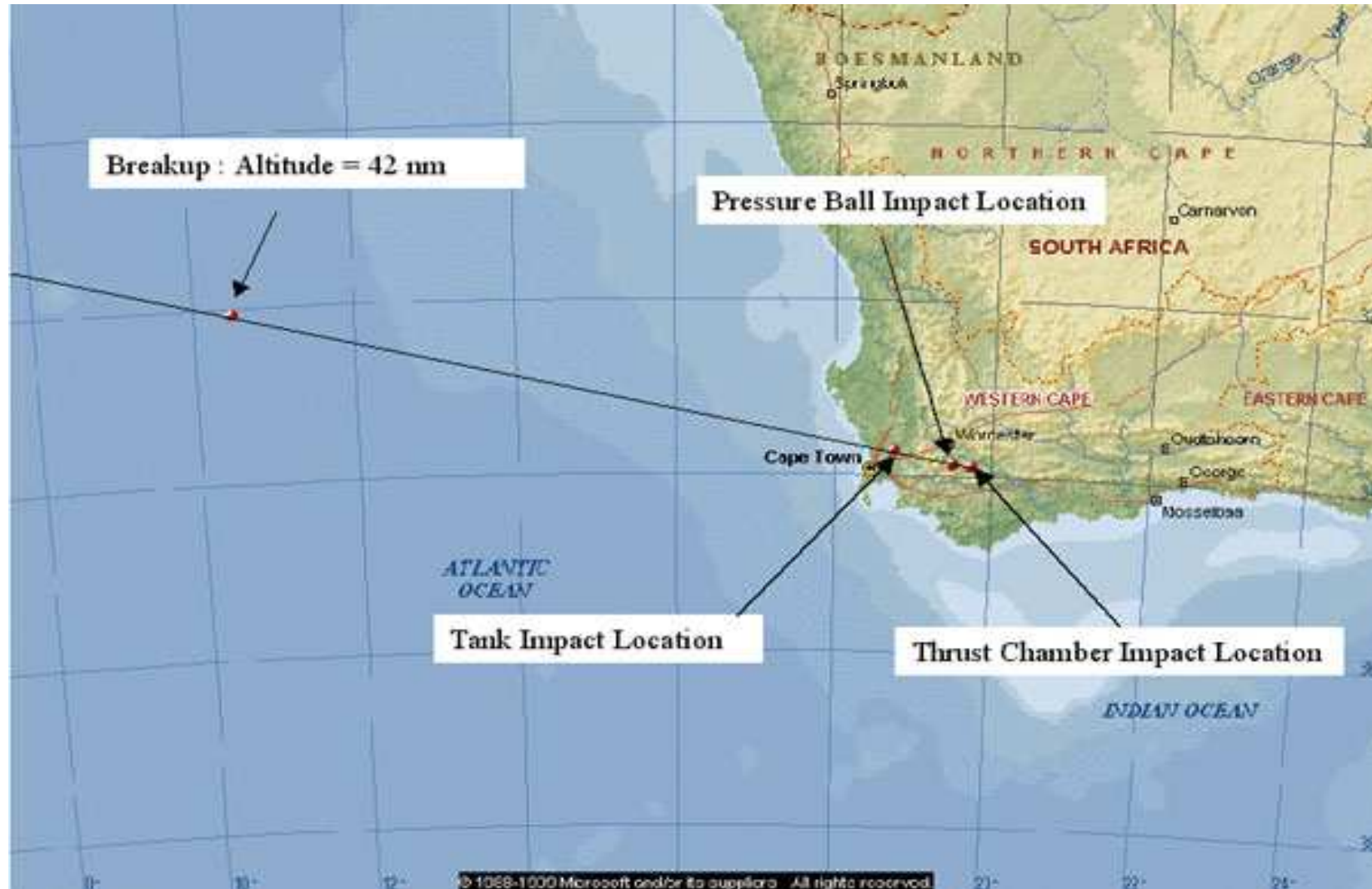


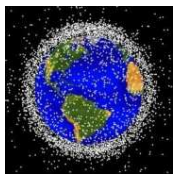
Evènements redoutés



① Rentrée atmosphérique non contrôlée :

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





Evènements redoutés



① Rentrée atmosphérique non contrôlée :

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

Evénement en tous points semblable à celui du Texas





Evènements redoutés



① Rentrée atmosphérique non contrôlée :

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

- ⇒ En moyenne > 1,5 objet catalogué par jour (610 en 2014, 452 en 2015)
- > 2 gros objets intègres par semaine (138 en 2014, 115 en 2015)

⇒ Exemples français récents

9 débris catalogués en 2015
 Etages H10 : 12 Mai 2015, 17 Mai 2015
 Sylva : 19 Septembre 2015, 2 Novembre 2015

Cosmos sur Hawaiï Rentrée ATV



Titanium casing of the STAR-48B solid rocket motor found in northeastern Argentina.



Evènements redoutés



① Rentrée atmosphérique non contrôlée :



Niger



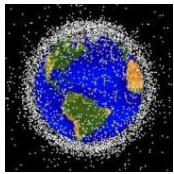
PAM-D (USA) en Arabie



Telstar 402 au Brésil



Ariane V19 en Ouganda



Evènements redoutés



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 :

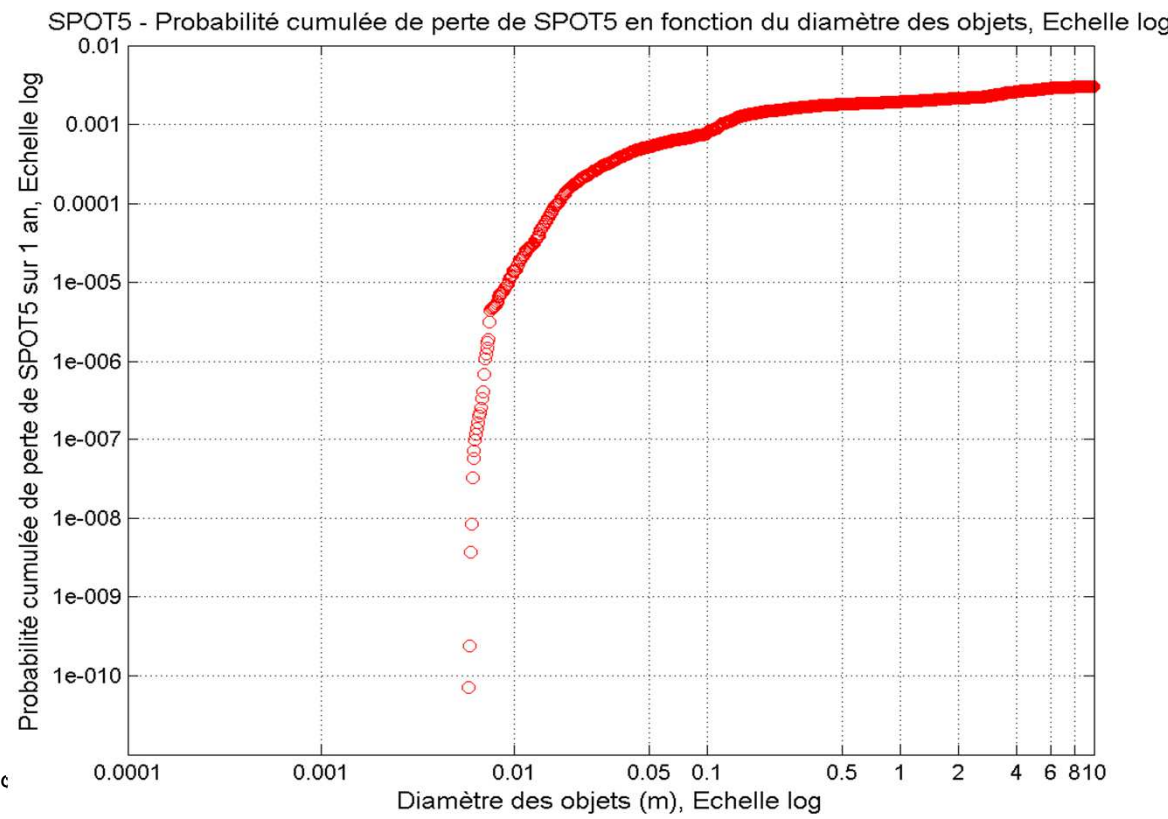
- ⇒ débris de 1 mm de rayon = 1 kJ = Boule de bowling à 100 km/h
- débris de 1 cm de rayon = 1 MJ = Grosse voiture à 130 km/h
- ⇒ 1 cm ⇒ destruction massive
- 1 mm ⇒ perte de fonctions

- Exemples :

. Satellite Spot 5 = 10 m² sans panneaux solaires
 Intégration sur la durée de vie complète = 15 ans
 Proba de perte $\cong 3 \cdot 10^{-3}$ par an
 $\cong 5\%$ au total

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

⇒ Probabilité de perte mission par collision supérieure à la défiabilité du satellite





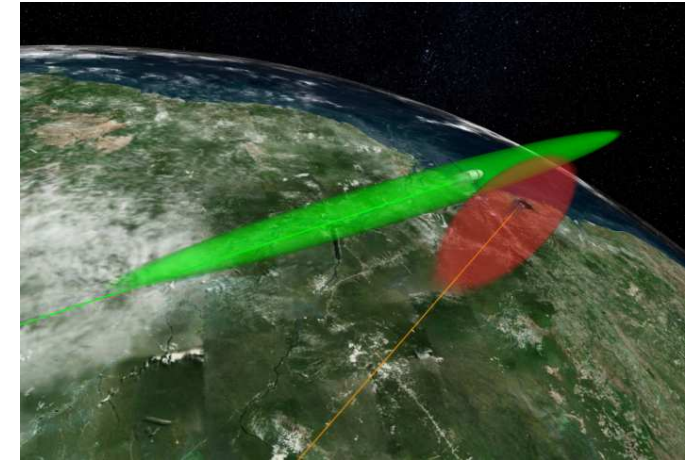
Evènements redoutés



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



AGI

- 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^{er} du genre en Europe !

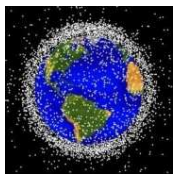
- Analyse du risque de collision au lancement (ARCL) :

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

- Exemples en 2015 : environ 1 manœuvre tous les 3 jours

- . USA : 30 manœuvres dont 4 de l'ISS
- . ASI : 10 manœuvres
- . CNES : 21 manœuvres pour 13 satellites en LEO et 8 en GEO (67 au total opérés par CNES)
- . ESA : 11 manœuvres, etc...

[Collision Avoidance USAF](#)



Evènements redoutés



② Collision entre objets orbitaux

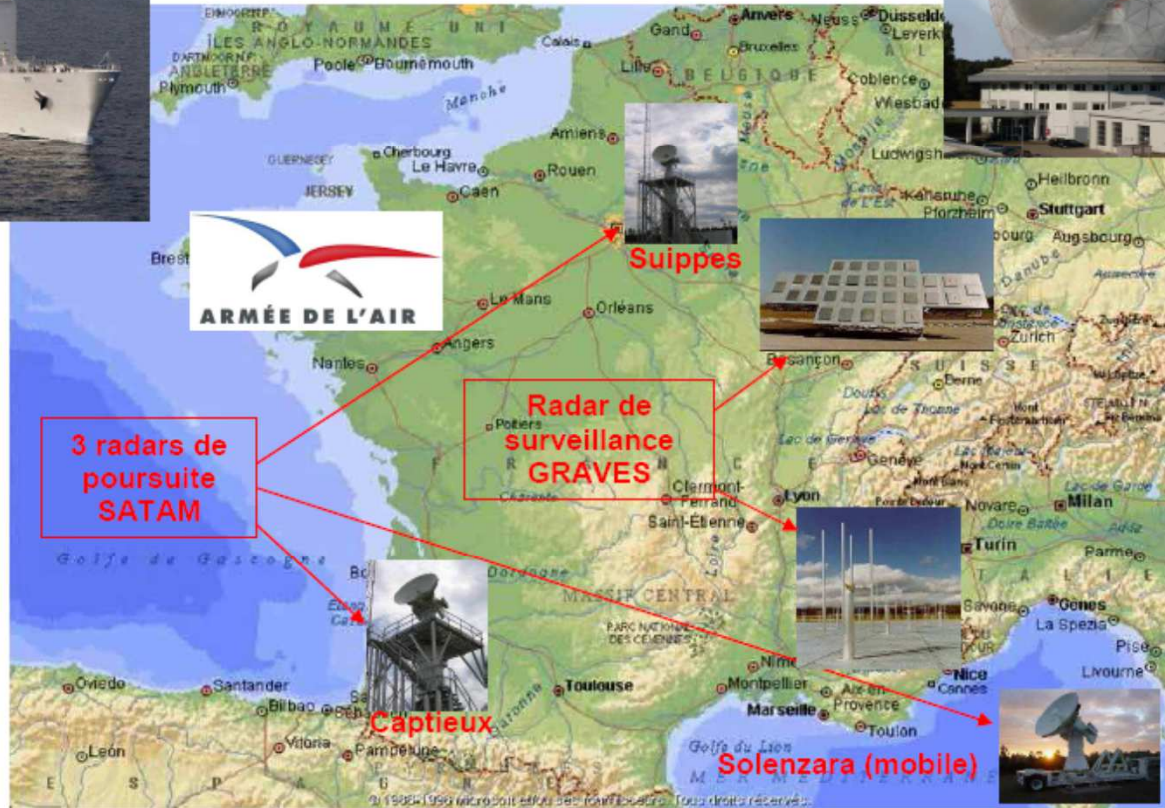
Les capacités françaises SST utilisées par le CNES



MONGE :
radars de
poursuite
ARMOR 1&2 et
Normandie

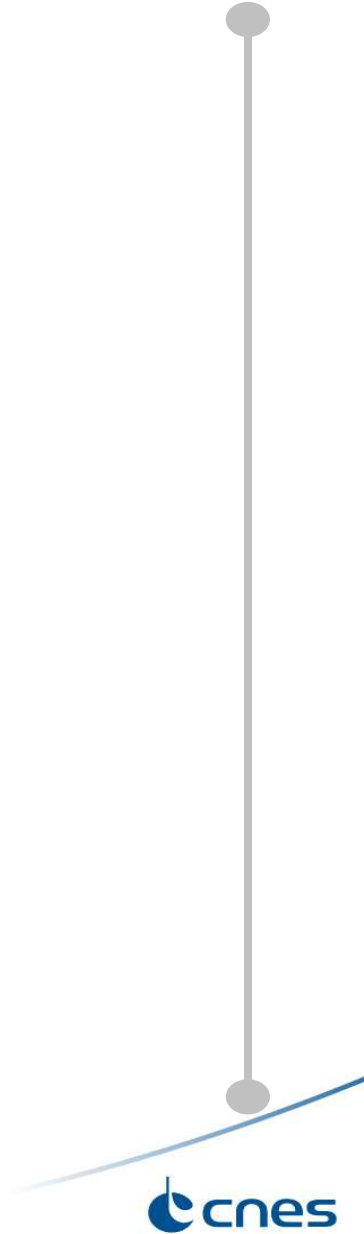


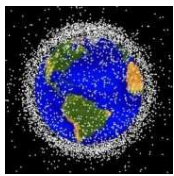
+
**Radar de poursuite et
d'imagerie TIRA
(Fraunhofer FHR)**



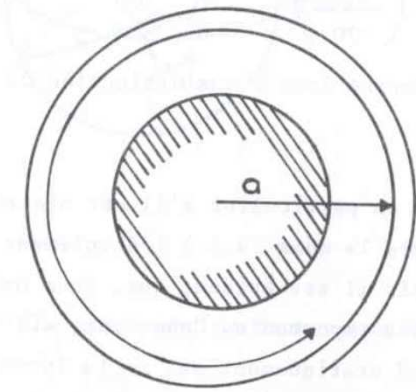


3. Le syndrome de Kessler





Le syndrome de Kessler



Durée de vie orbitale d'un débris

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

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

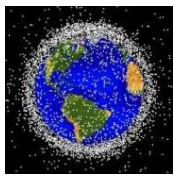
→ **Traînée = freinage = érosion de l'orbite ⇒ rentrée atmosphérique**

⇒ 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) :	12 mois
Télescope Spatial Hubble	(600 km/ 600 km) :	15 à 20 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



Le syndrome de Kessler



Une « réaction en chaîne » peut s'amorcer 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 $1 > 2$

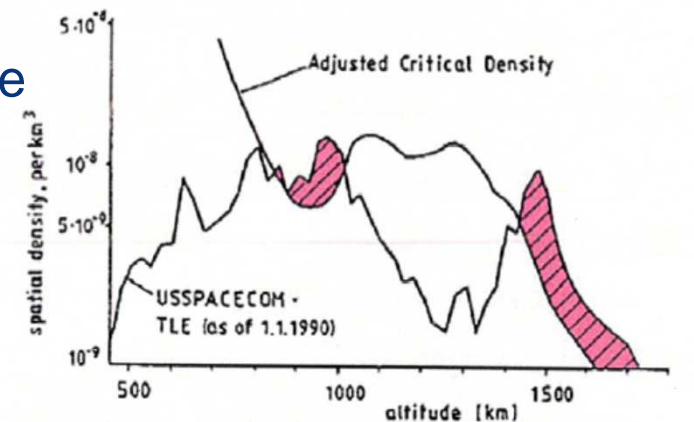
⇒ Plus l'altitude est haute

Moins la traînée est importante, mais

Moins il y a de débris

et vice versa...

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

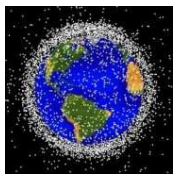


Kessler, Collisional cascading: The limits of population growth in low Earth orbit, Advances in Space Research 11(12):63-66, 1991

- Suspectée 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**



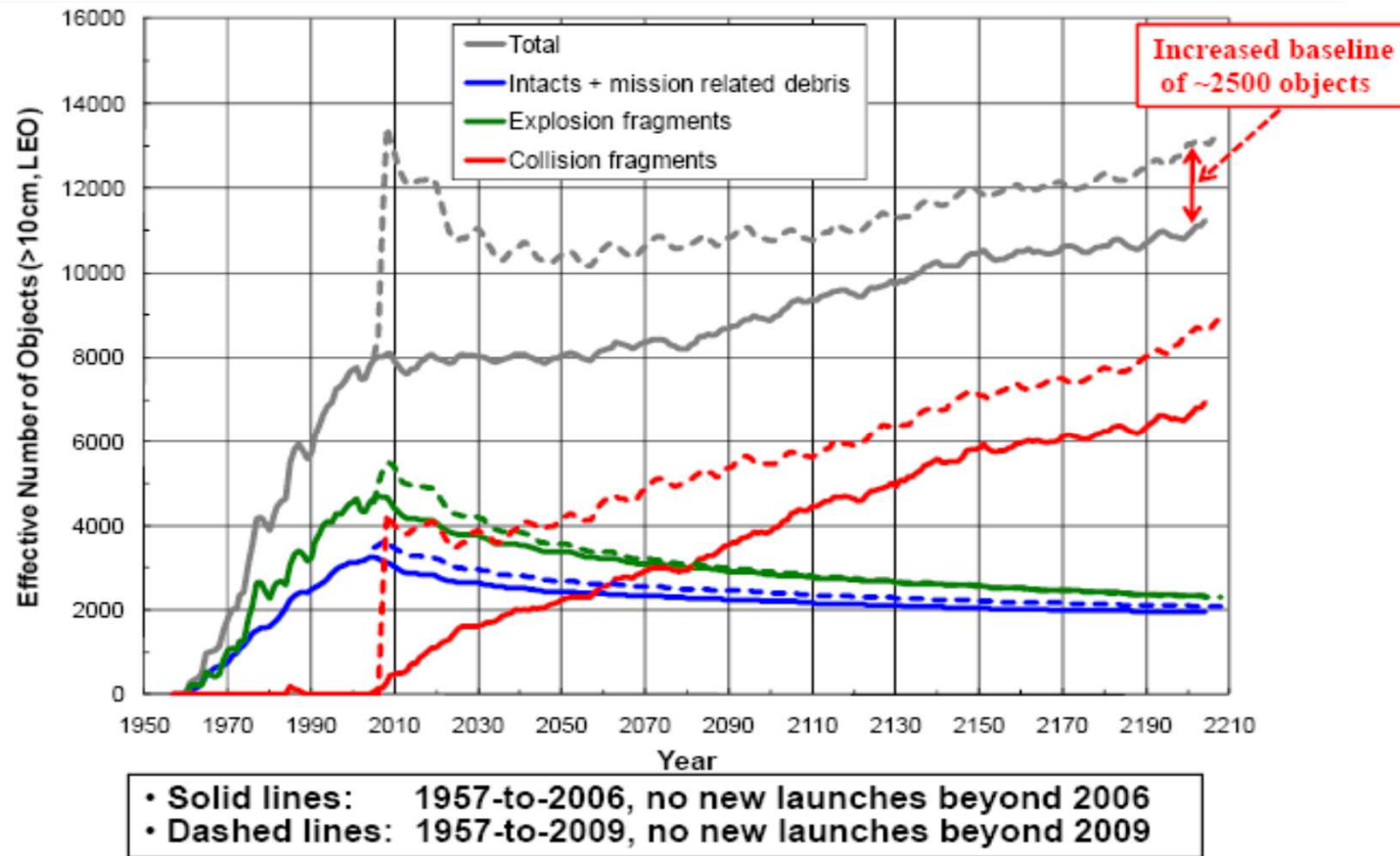
Le syndrome de Kessler



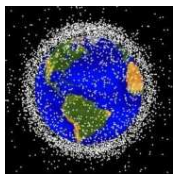
Simulations NASA-JSC – Modèle LEGEND :

Deux hypothèses

- . Plus de lancements à partir de 2006 (calcul de 2006)
- . Plus de lancements à partir de 2009 (calcul de 2009)



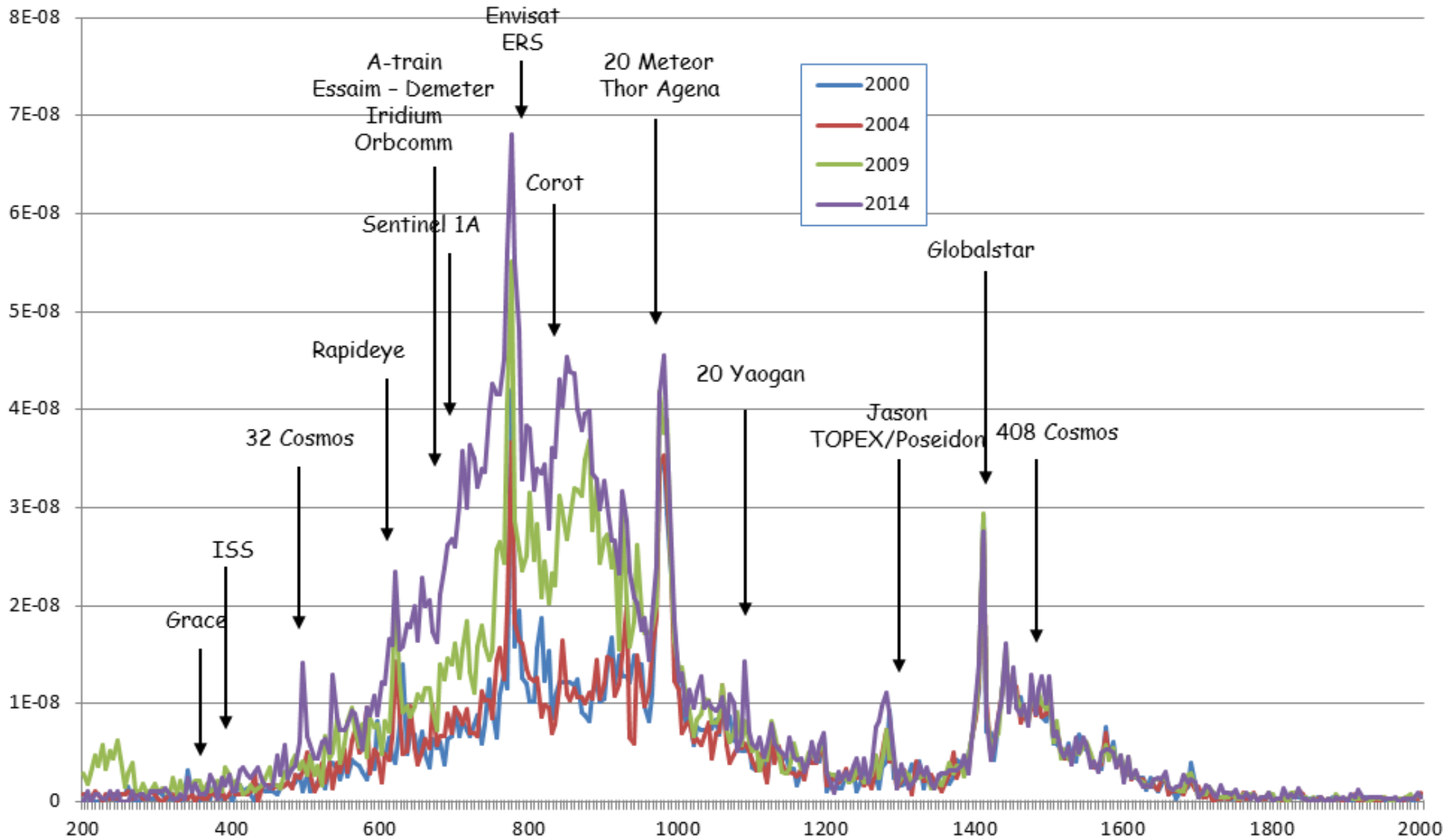
⇒ Attention : résultats non partagés par le CNES ! Actions en cours

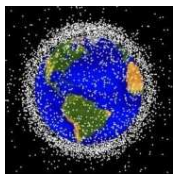


Le syndrome de Kessler



Observé : densité des objets en Orbites Basses





Le syndrome de Kessler

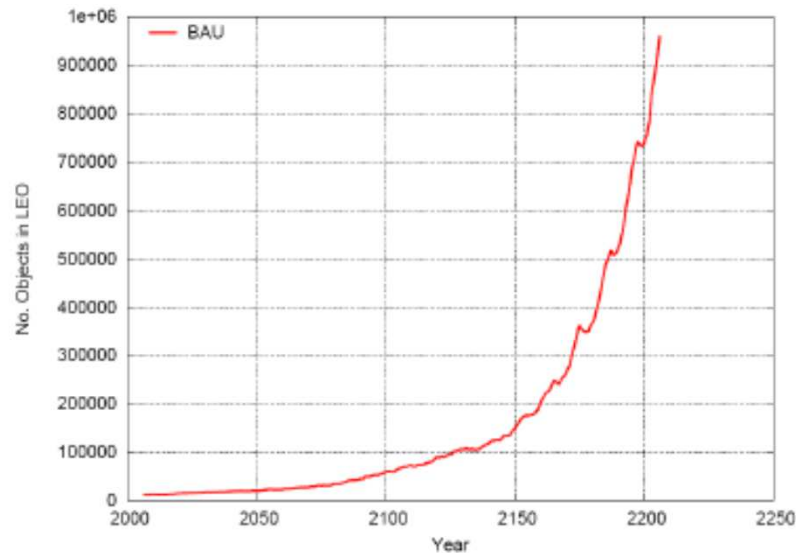


Si rien n'est fait, la situation à long terme peut devenir catastrophique

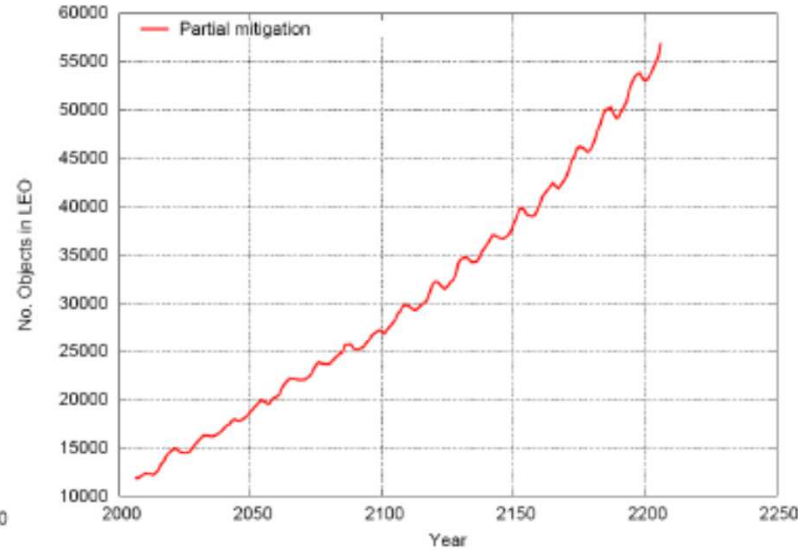
- Nombreux modèles d'évolution de densité orbitale dans le temps

- ↪ 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 **mais non encore partagés par le CNES !**

Business-As-Usual (BAU)



Partial mitigation



Starting in 2020:

- De-orbiting of objects below 1300 km
- Passivation

Exemple d'une simulation ESA



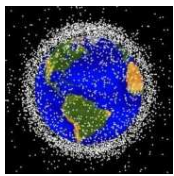
Le syndrome de Kessler



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 (2012),
- Loi Française portant sur les Opérations Spatiales LOS
(approuvée en 2008, en vigueur depuis Décembre 2010)
Nombreux paragraphes dédiés aux débris spatiaux (rentrées, collisions)



Le syndrome de Kessler



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 ⇒ *soyons propres !*
- passivation systématique en fin de vie ⇒ *n'explorons plus !*
- protection des zones vitales (GEO et LEO)

→ limitation de la durée de vie à 25 ans

⇒ *moins de sources de débris !*



② Long terme :

- désorbitation systématique en fin de vie



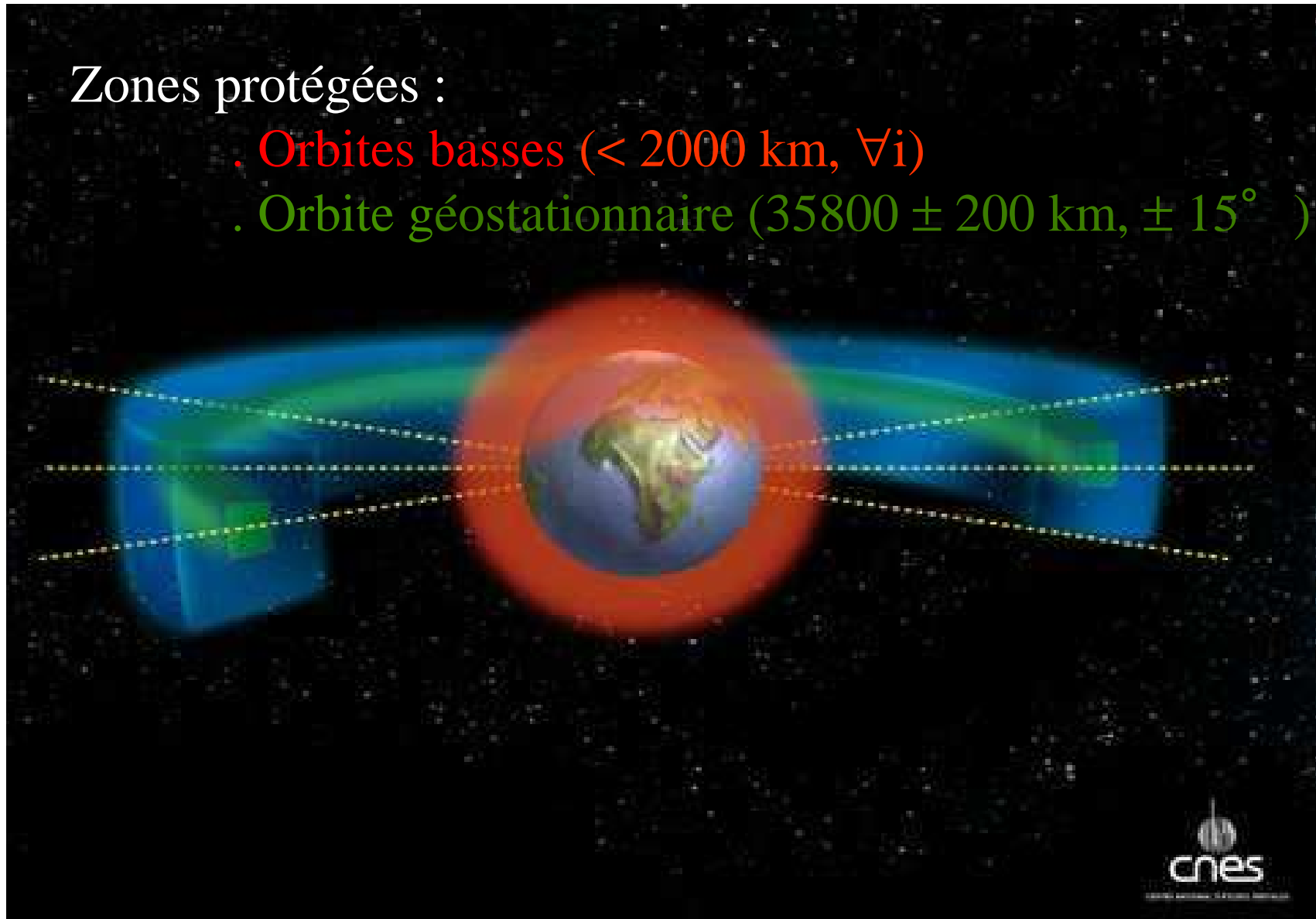
Le syndrome de Kessler

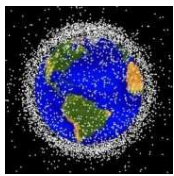


Il est fondamental de respecter la législation en vigueur

Zones protégées :

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





Le syndrome de Kessler



↪ **Mais, ça ne suffit pas !**

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

↪ Exemple NASA

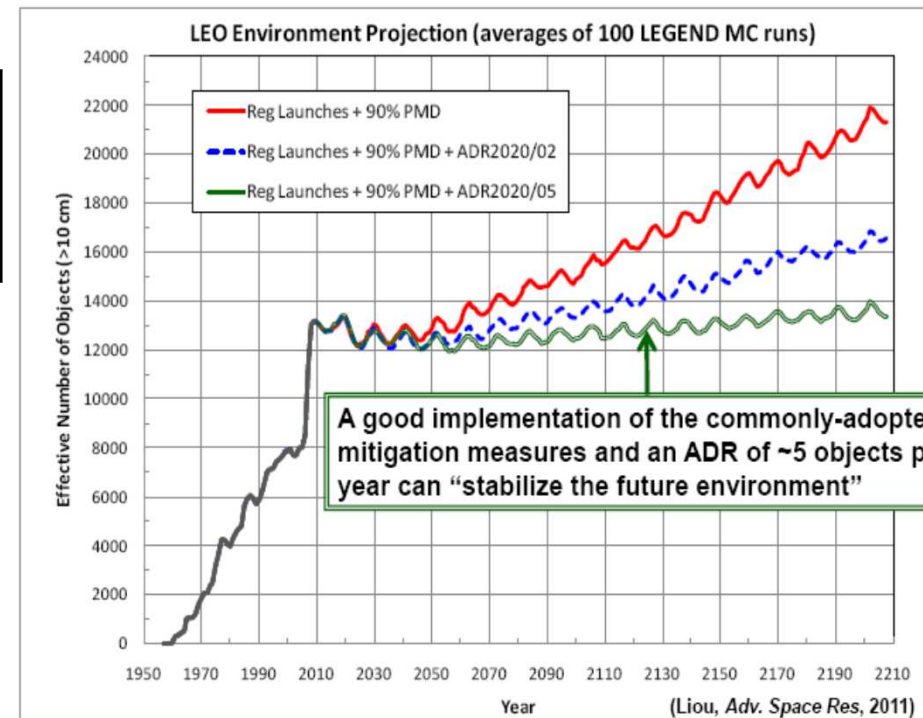
(très optimiste : plus de fragmentations et application parfaite de la réglementation en vigueur)

0 par an
2 par an
5 par an

↪ Résultats confirmés par d'autres simulations

Action IADC AI 27.1 : 7 Agences

⇒ Pas encore confirmé par CNES



©Liou – Johnson – Hill NASA-JSC¹

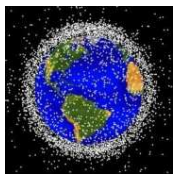
↪ Simulations plus réalistes

⇒ Très grand nombre d'objets à retirer chaque année

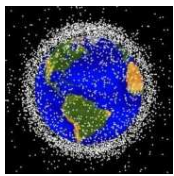
Ref. 1: Controlling the growth of future LEO debris populations – Liou, Johnson, Hill – Acta Astronautica 66(2010) – pp 648-653

Ce document est la propriété du CNES. Il ne peut être communiqué à des tiers et/ou reproduit sans une autorisation préalable écrite - Ch. Bonnal - 2016





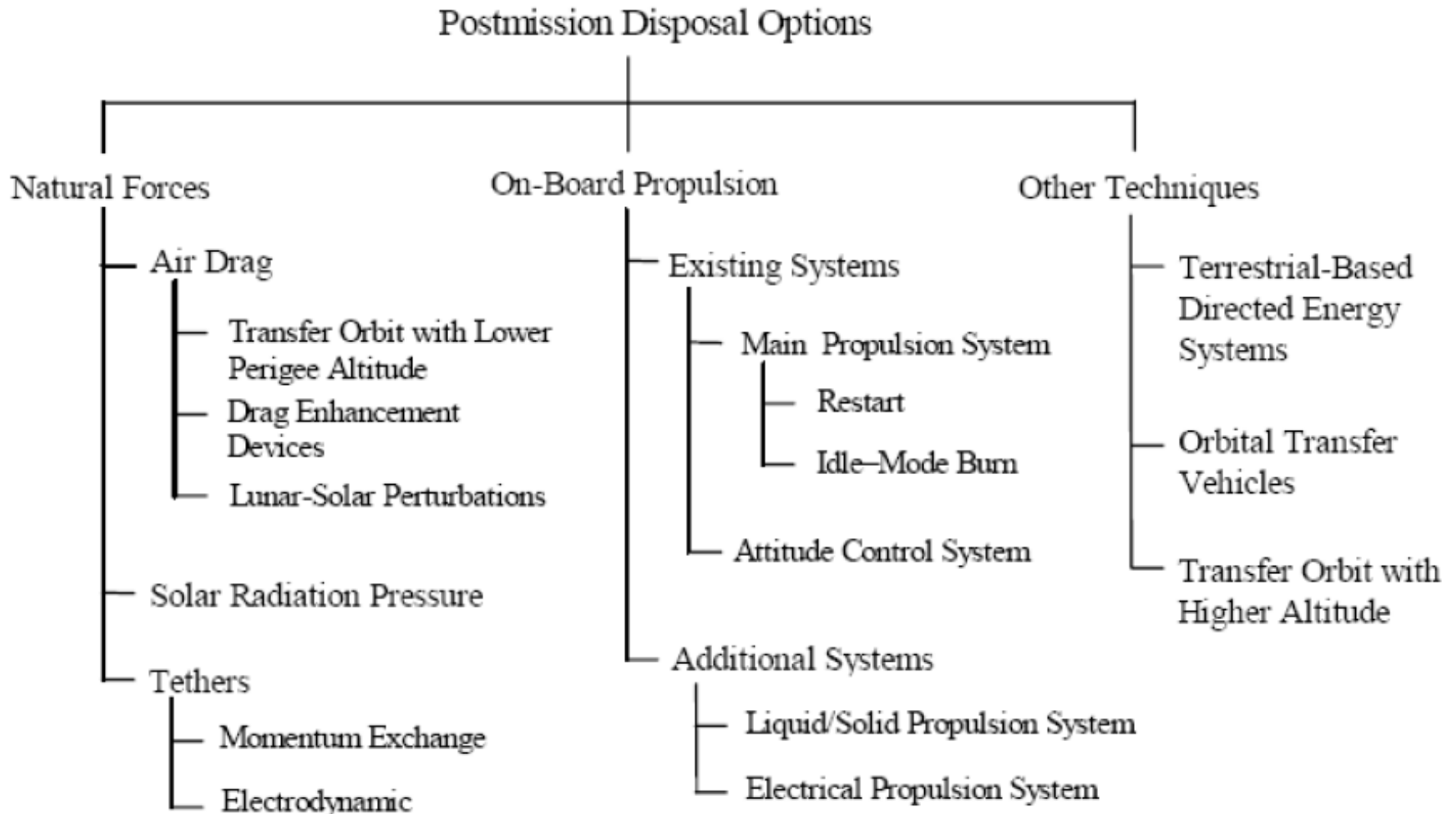
4. Quelques solutions potentielles

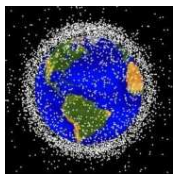


Retrait Actif de Débris Orbitaux



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





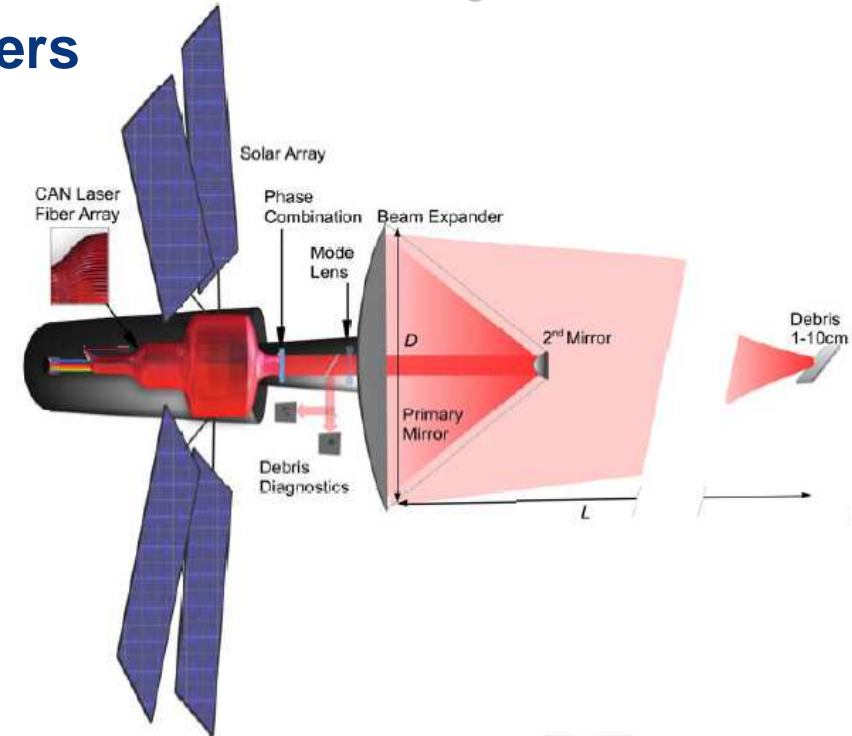
Retrait Actif de Débris Orbitaux



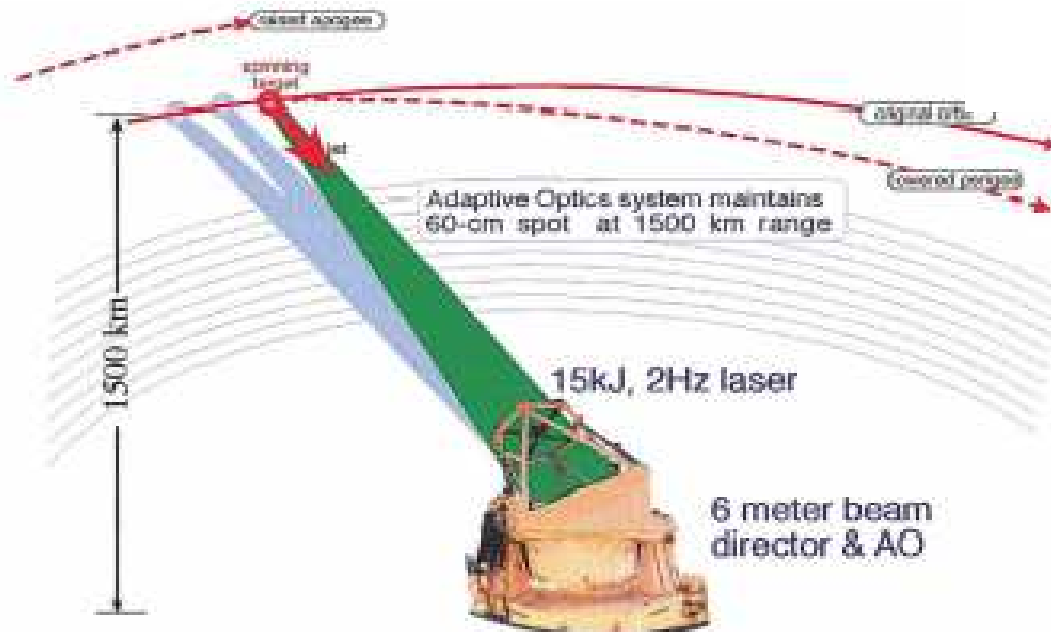
Sans contact : Lasers



Boeing



Polytechnique - CEA



NASA-Photonic

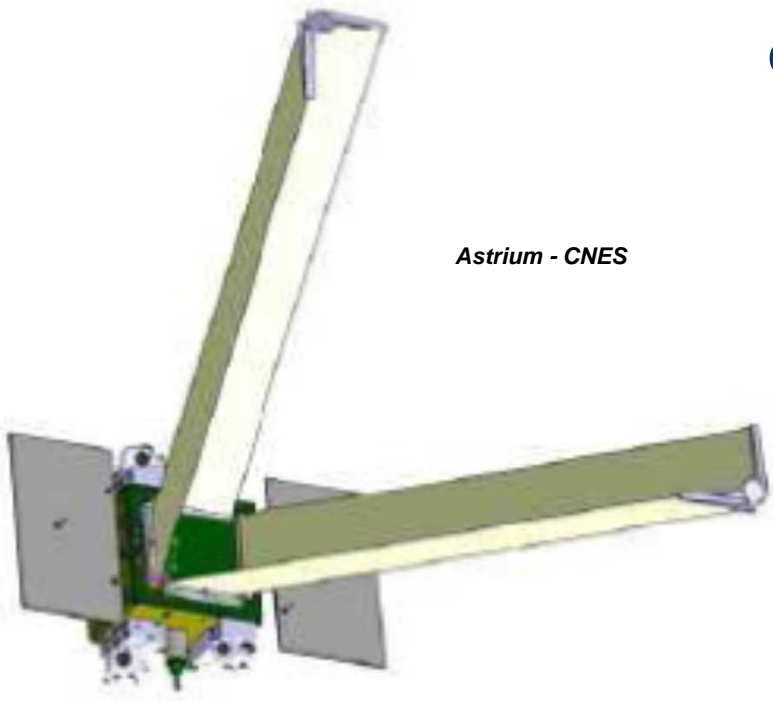
Permettrait de résoudre les petits débris, potentiellement les gros en Géostationnaire



Retrait Actif de Débris Orbitaux



Augmentation de traînée passive : Voiles, Ballons

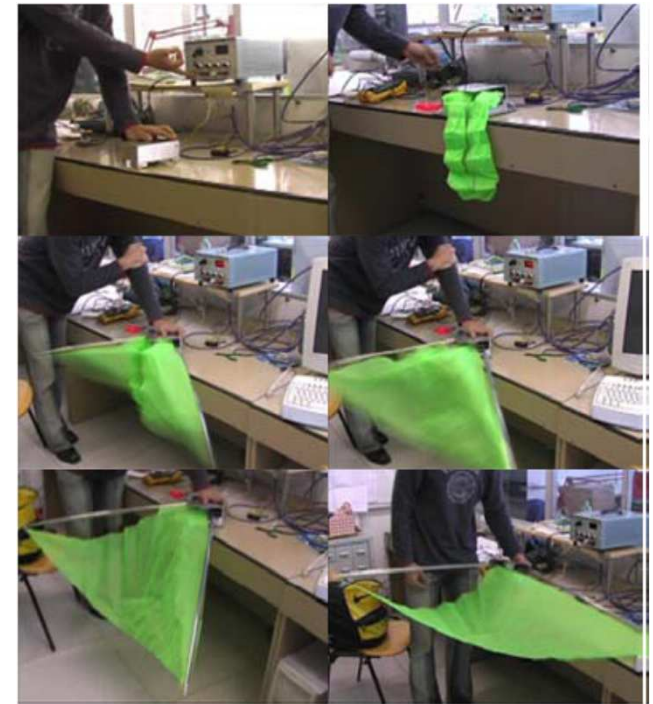


Astrium - CNES

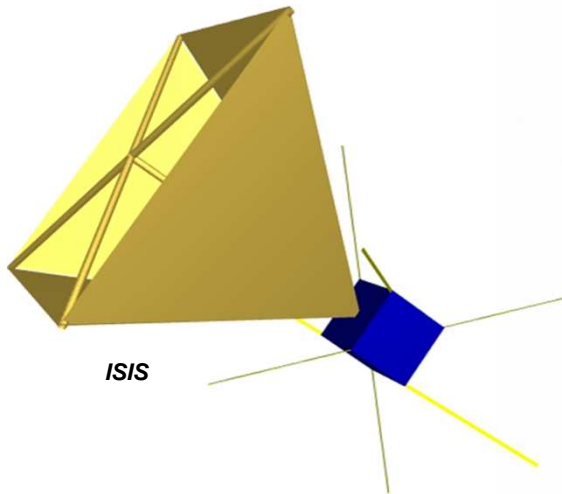


Passive deceleration system (PDS)

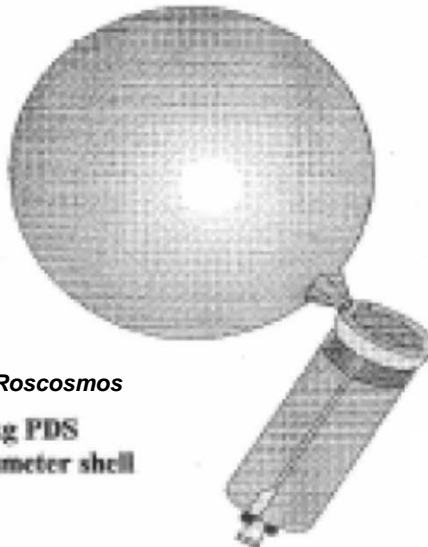
Global Aerospace



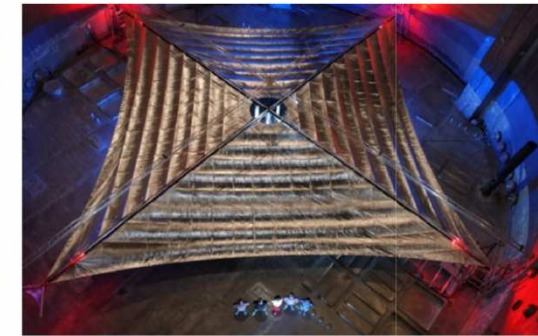
Sirdaria - UniRoma



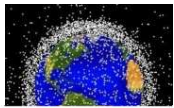
ISIS



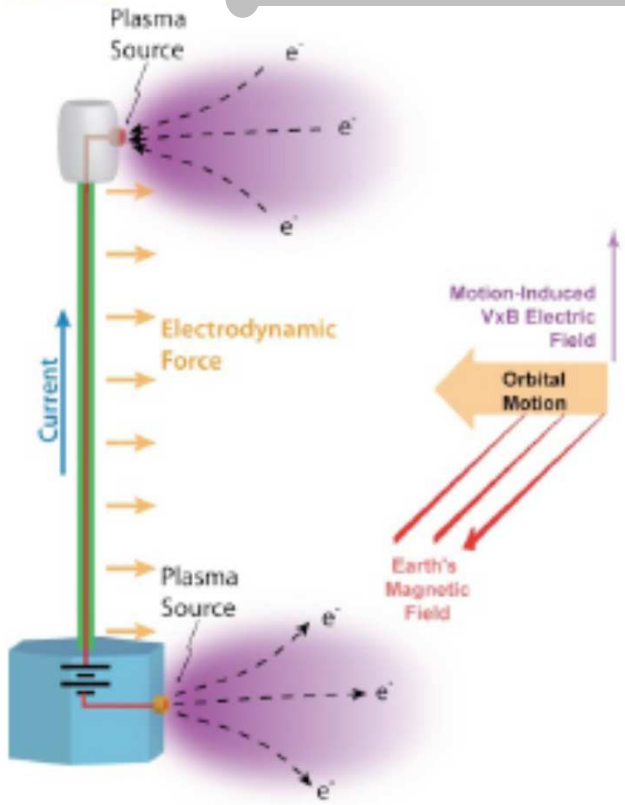
Roscosmos
30kg PDS
10m diameter shell



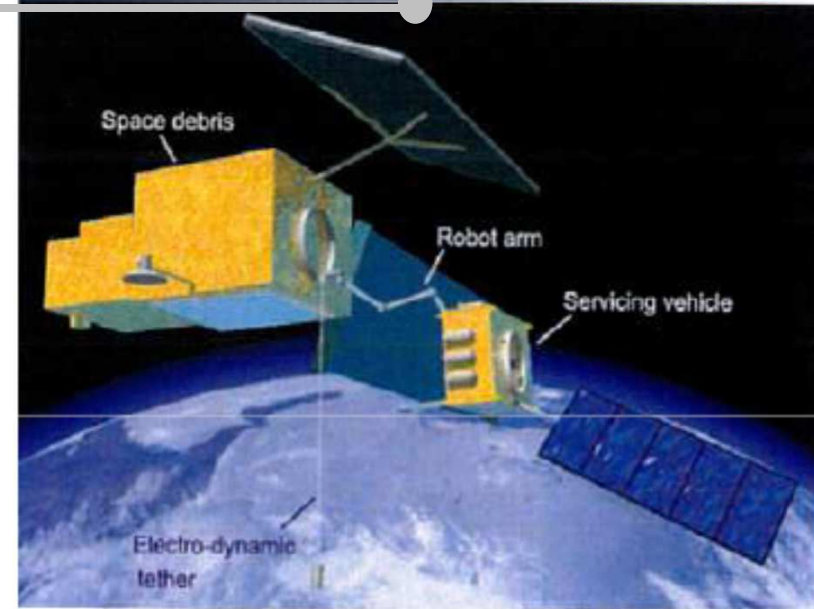
L'Garde



Retrait Actif de Débris Orbitaux



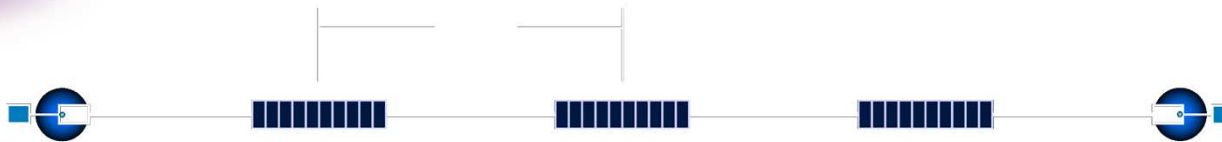
**Augmentation
de traînée :
EDT
Câble Electro Dynamique**



JAXA

Deboost

Tethers Unlimited

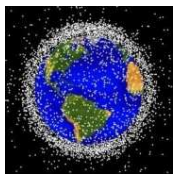


EDDE: Pearson, Carroll et al.

**Complexe
pour les inclinaisons élevées
Non adapté pour les
très hautes altitudes**

Hoyt

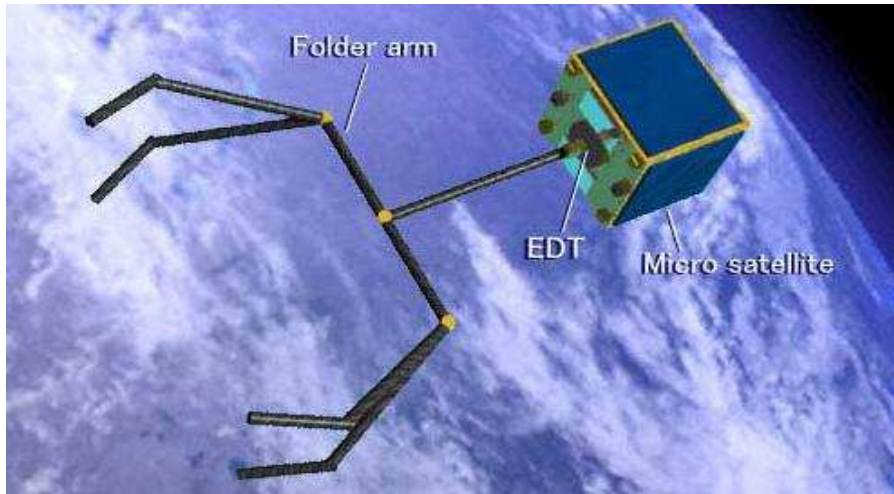




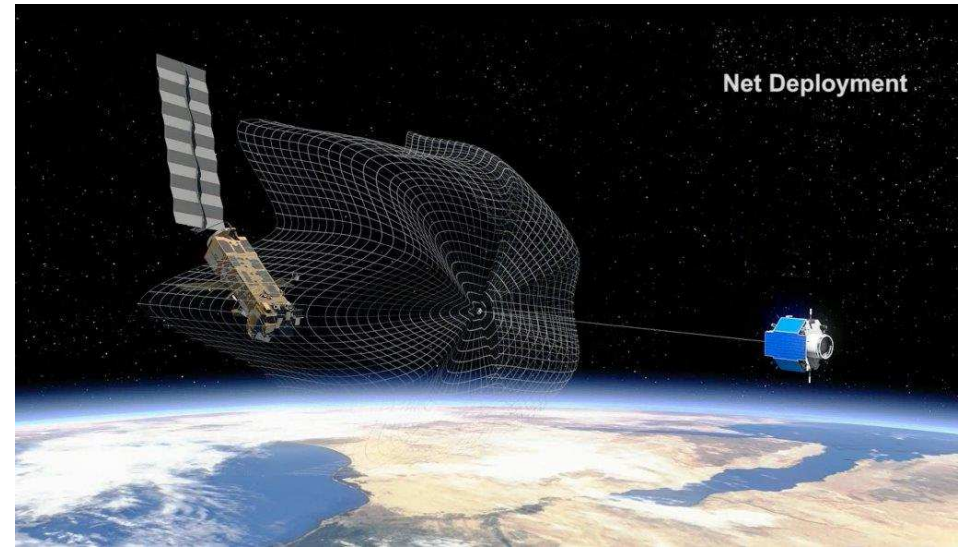
Retrait Actif de Débris Orbitaux



Capture & Désorbitation

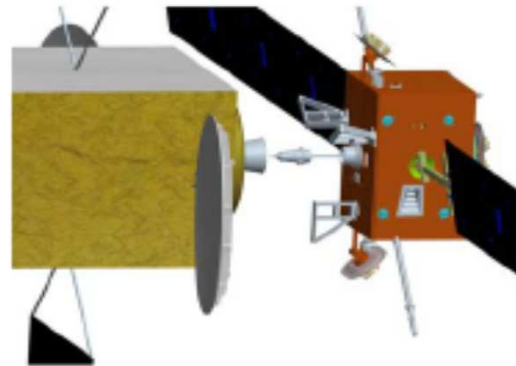


JAXA



Airbus Defence & Space

MDA

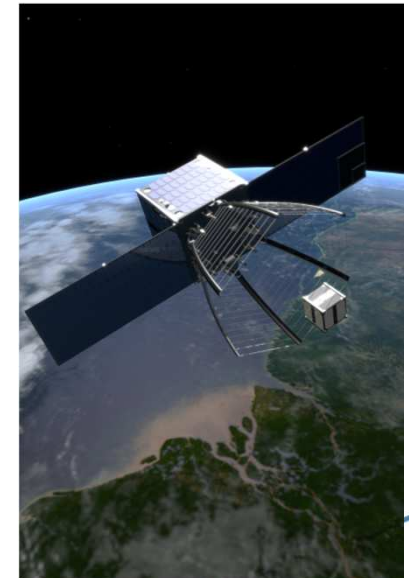


OSS

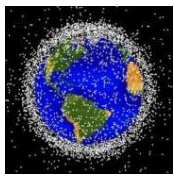
ESA-Astrium



EPFL



Complexe pour des débris en rotation – Très bien adapté à GEO 

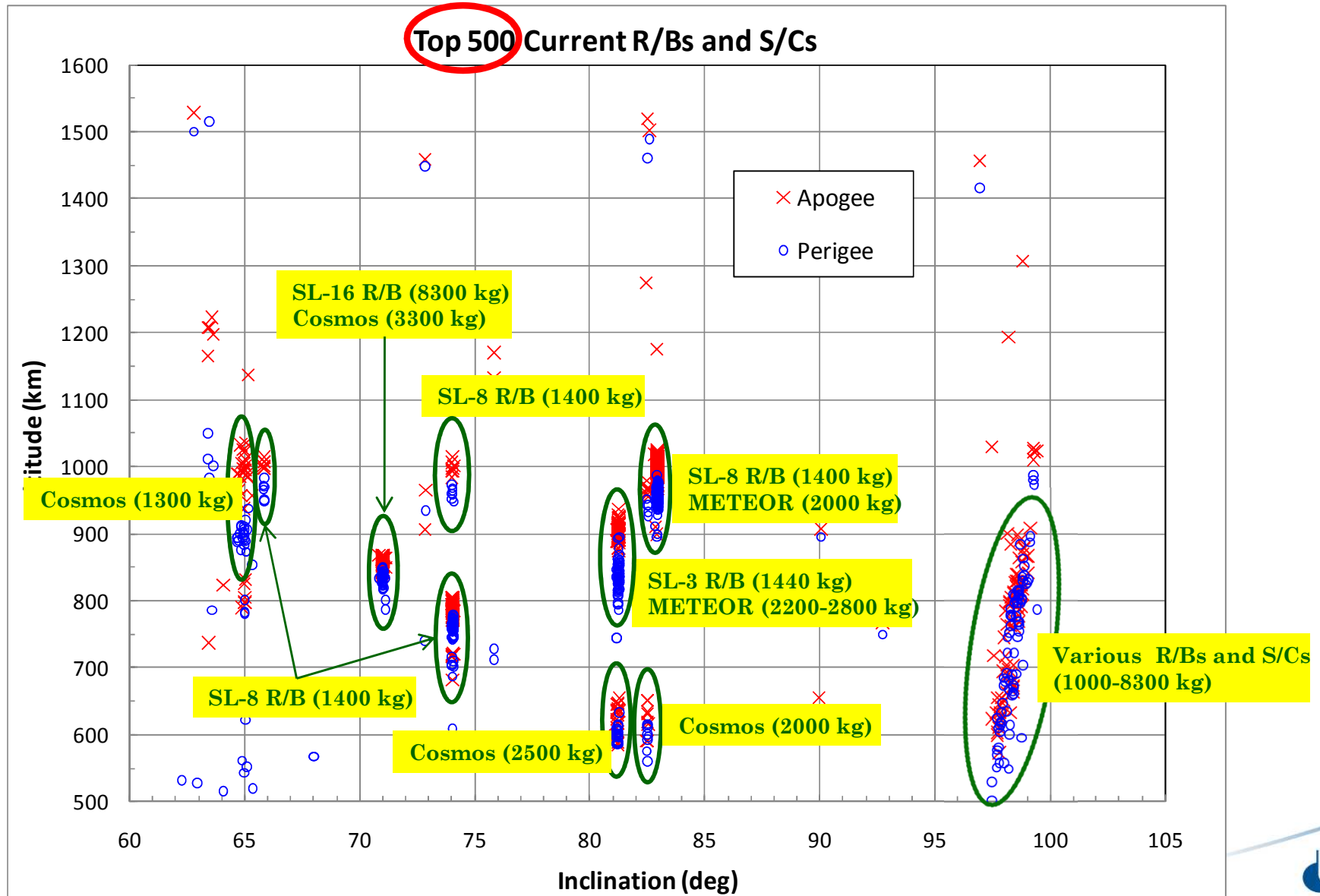


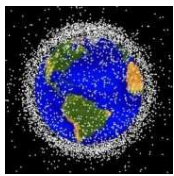
Retrait Actif de Débris Orbitaux



Nombreux travaux en cours

1. Sélection des zones orbitales à nettoyer





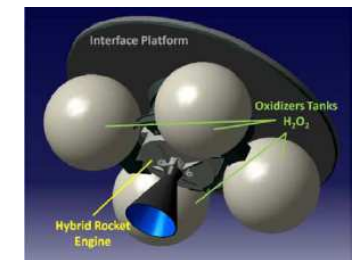
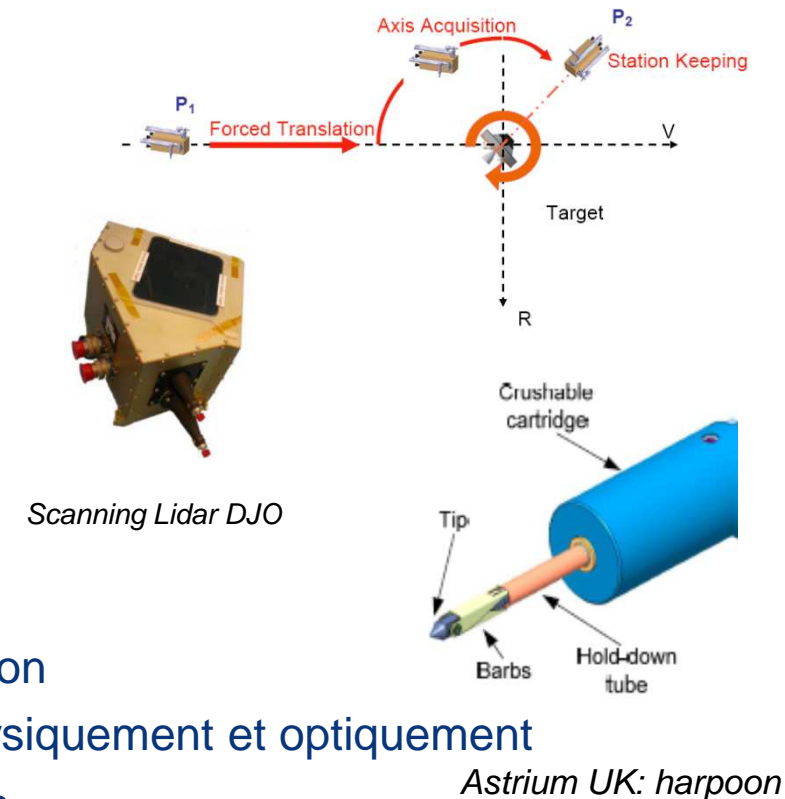
Retrait Actif de Débris Orbitaux



Nombreux travaux en cours

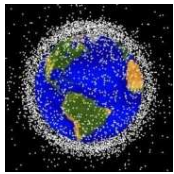
2. Fonctions principales à réaliser

- 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



DeLuca et al. IAC-12-A6.5.8





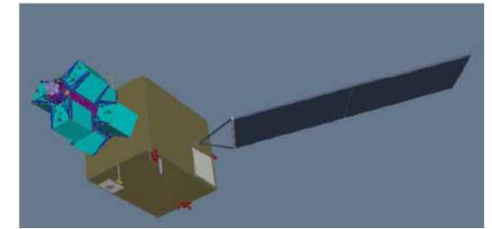
Retrait Actif de Débris Orbitaux



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
 - 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



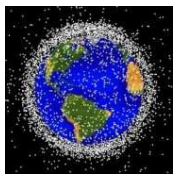
Debritor (Astrium)



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

(Aviospace)





Retrait Actif de Débris Orbitaux

■ 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 (H₂O₂-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
- Videometres
- Telegoniometres
- Flash Lidar
- Cameras

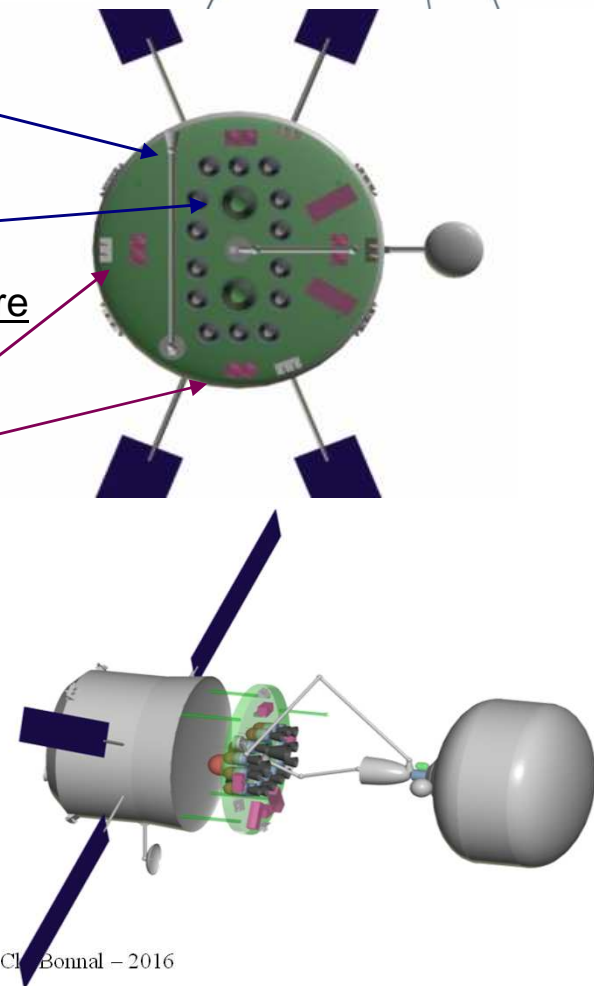
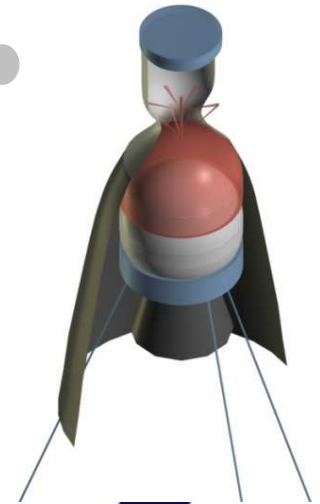
Baie avionique

Communications

Avec l'OTV-CC via stations TM ou DRS

Génération de Puissance Solaire

- Envergure 22 m
- 4,5 kW





Retrait Actif de Débris Orbitaux



▪ 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, grappin
- 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 :

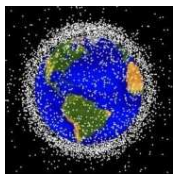
▲ Amarrage sur un interface robuste du débris - Phase d'arrimage relativement facile :

- ⇒ Pour un grappin de 20 cm de rayon et un débris de 4 m tournant à $10^\circ / s$
- ↳ 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



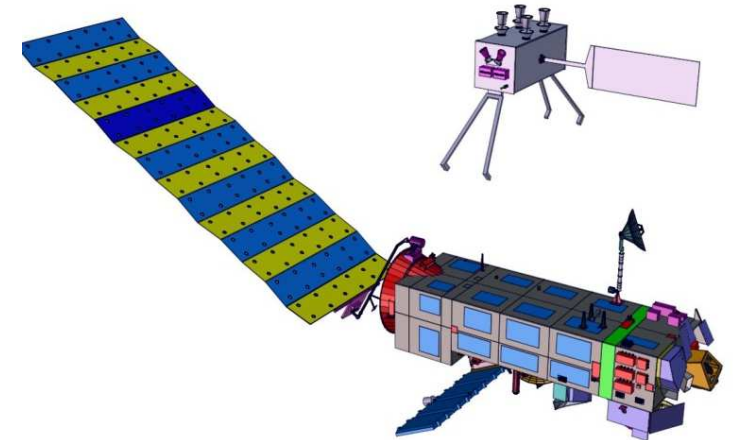


Retrait Actif de Débris Orbitaux

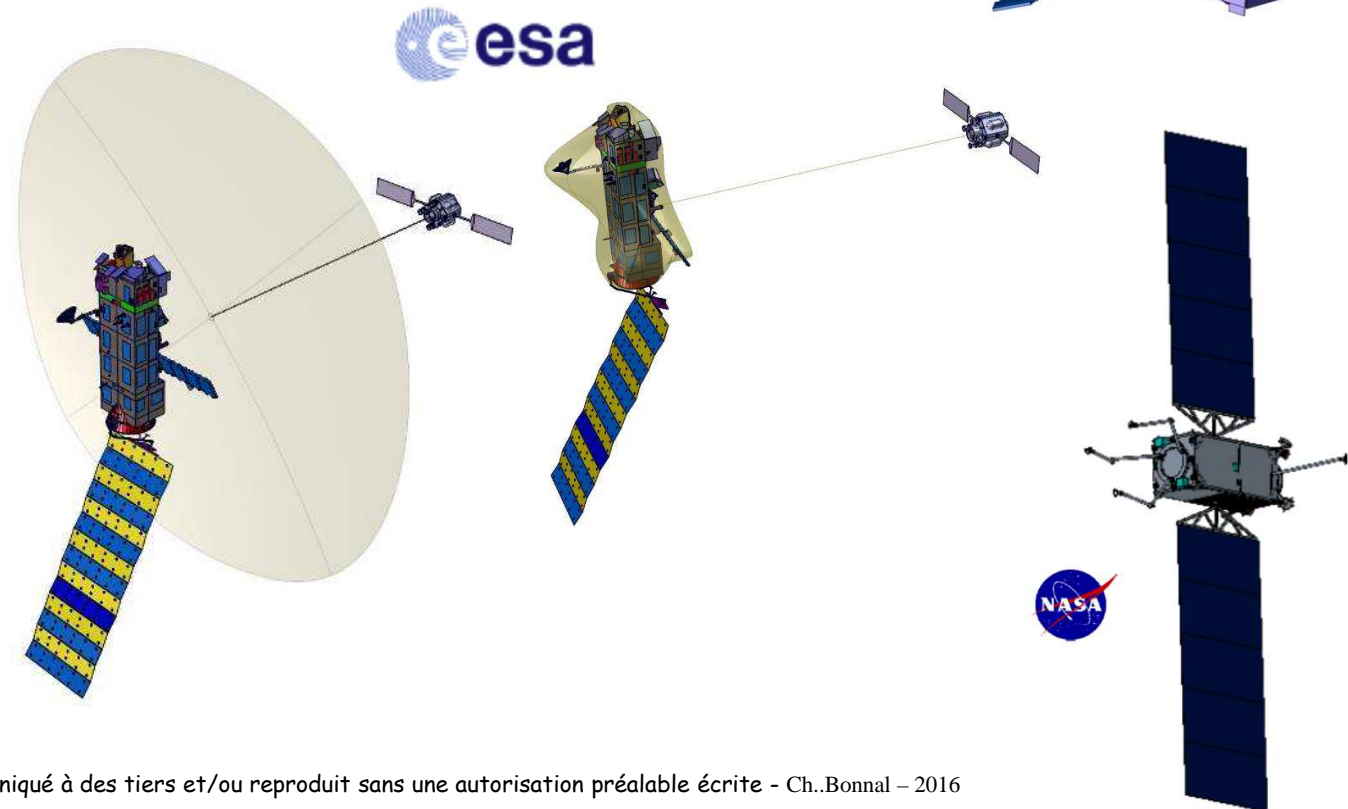


■ Priorité actuelle en Europe : Envisat

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



Debris Capture





Retrait Actif de Débris Orbitaux



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, ΔV adapté
- Stockable . Besoin d'ergols « verts »
- Propulsion électrique, dans sa grande variété

▪ **Nettoyage laser :**

- Sol ou en orbite

▪ **Augmentation de traînée :**

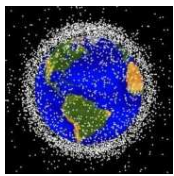
- Air-bags, voiles, extensions gonflables...
- Stabilité dans le temps ? Comportement avec débris non stabilisé ?

▪ **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



Retrait Actif de Débris Orbitaux



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

- **Evaluation très grossière des coûts de désorbitation**
 - ↪ 20 M€ par débris pour les solutions conventionnelles
 - 10 M€ par débris pour les solutions très innovantes

- **Quatre 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, couplage avec On Orbit Servicing ⇒ potentiellement limité, crédible en GEO
 - Écotaxe vers chaque opérateur ne respectant pas la réglementation internationale ⇒ rôle de « police » à définir, peut être avec assureurs
 - Démonstration de la rentabilité de l'investissement en considérant la perte de revenus suite à des collisions ⇒ complexe car évènements rares

- **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**



Synthèse

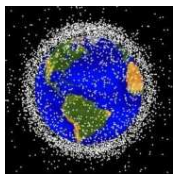


Conclusion concernant l'évolution des débris orbitaux

⇒ 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 Recherche & Technologie 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

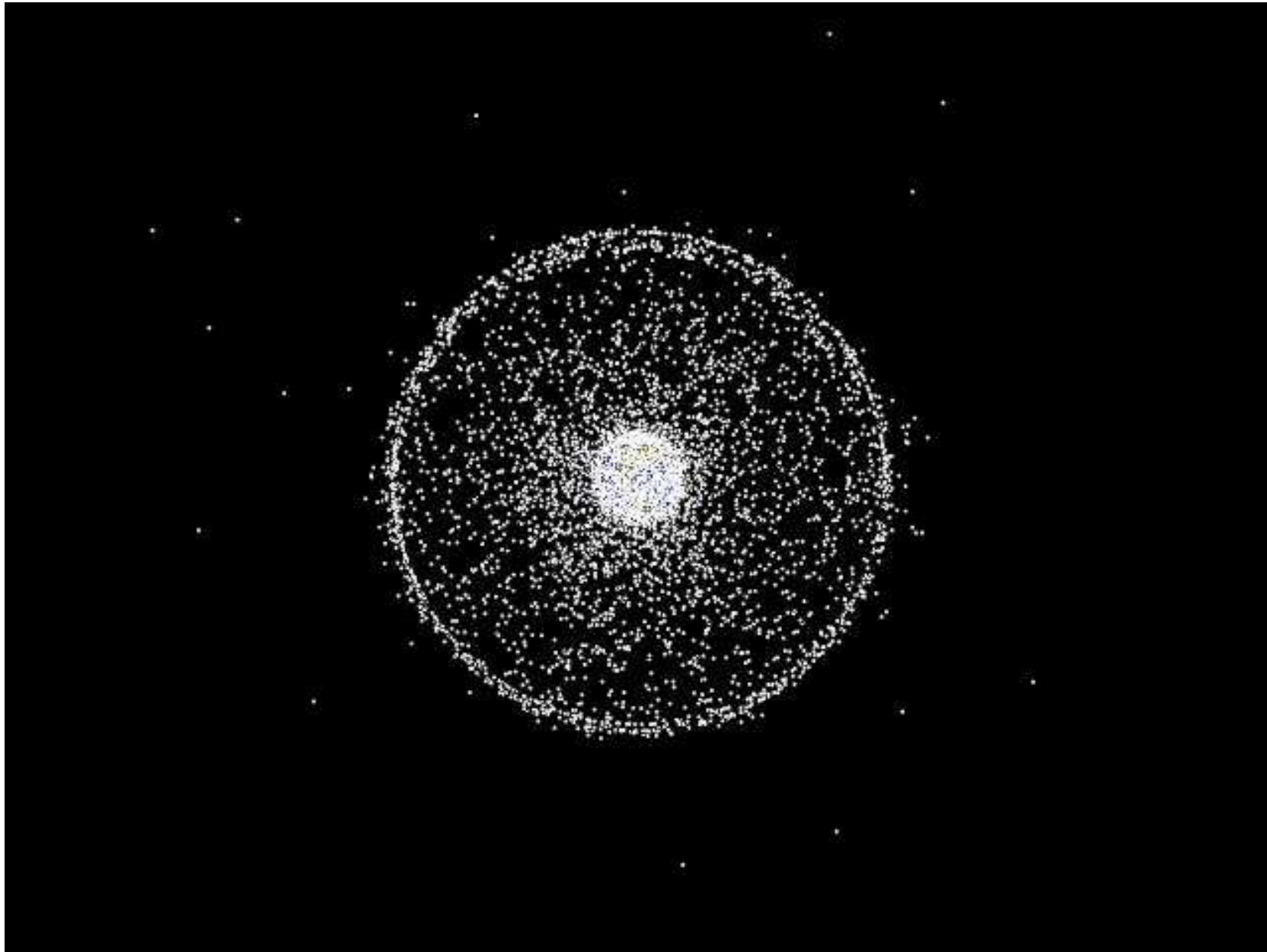
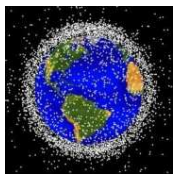
Et pendant ce temps, nos débris font des petits...

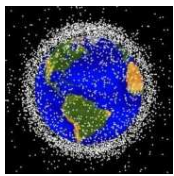


Merci de votre attention

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

christophe.bonnal@cnes.fr





Acronymes



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