



# DÉBRIS ORBITAUX: PÉRENNITÉ DES OPÉRATIONS DANS L'ESPACE

COLLOQUE DECHETS OU RESSOURCES  
PARIS, 5 Février 2015

Christophe BONNAL

*Président – Comité Débris Spatiaux  
Académie Internationale Astronautique*



# CONTENU

- NOMBRE D'OBJETS DANS L'ESPACE
- RENTRÉES ALÉATOIRES
- RISQUES DE COLLISION
- SOURCES DE DÉBRIS ORBITAUX
- SOLUTIONS POTENTIELLES
- ✓ PRÉVENTION - RÉGLEMENTATION
- ✓ PROTECTION - BLINDAGE
- ✓ EVITEMENT DE COLLISIONS
- ✓ NETTOYAGE ORBITAL
- ✓ RECYCLAGE
- CONCLUSIONS



# AUGMENTATION DE LA POPULATION ORBITALE

Planches NASA présentant le catalogue des objets orbitaux

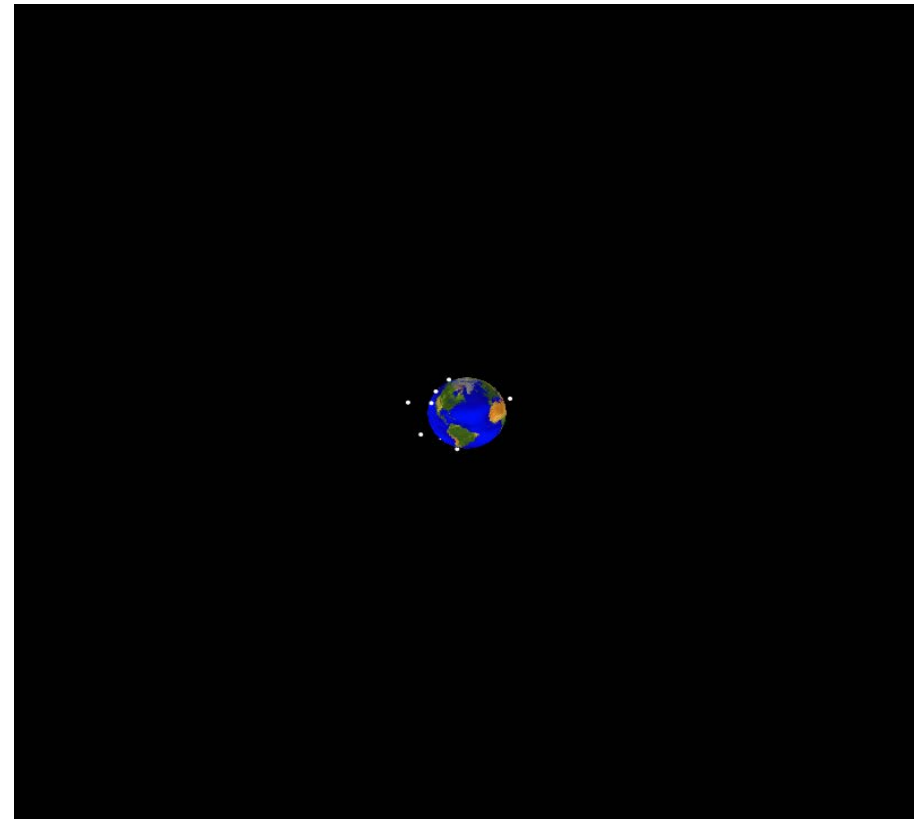
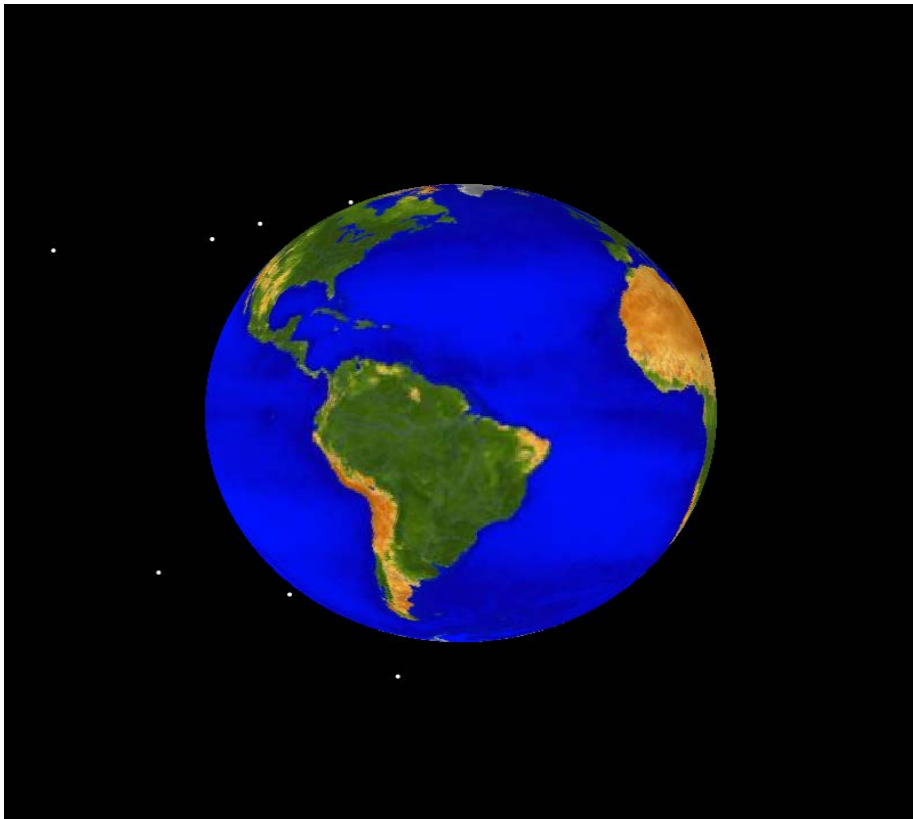
≥ 10 cm en Orbite Basse

1 m en Orbite Géostationnaire

⚠ Attention à la taille exagérée des points



1960

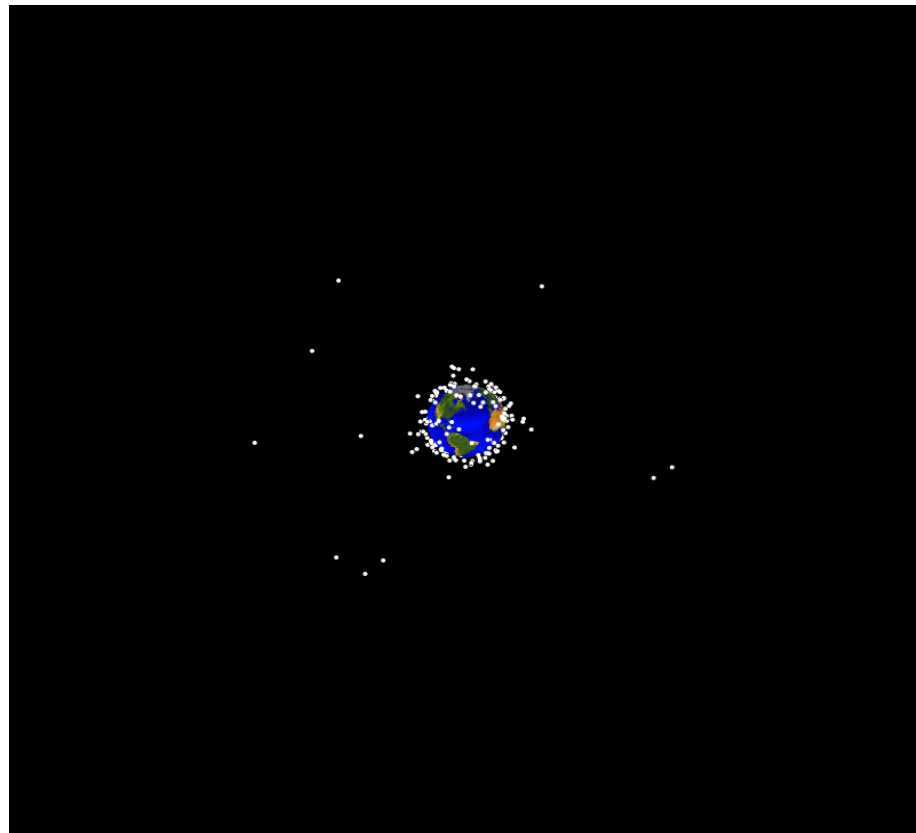
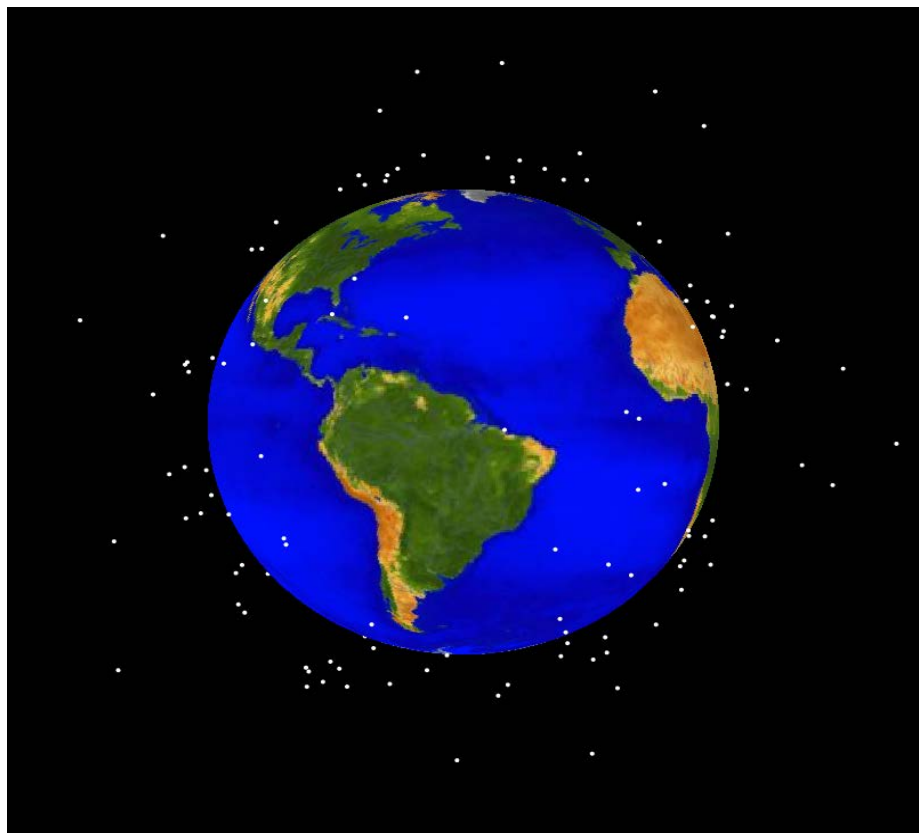


Cataloged objects > 10 cm diameter

# AUGMENTATION DE LA POPULATION ORBITALE



1965

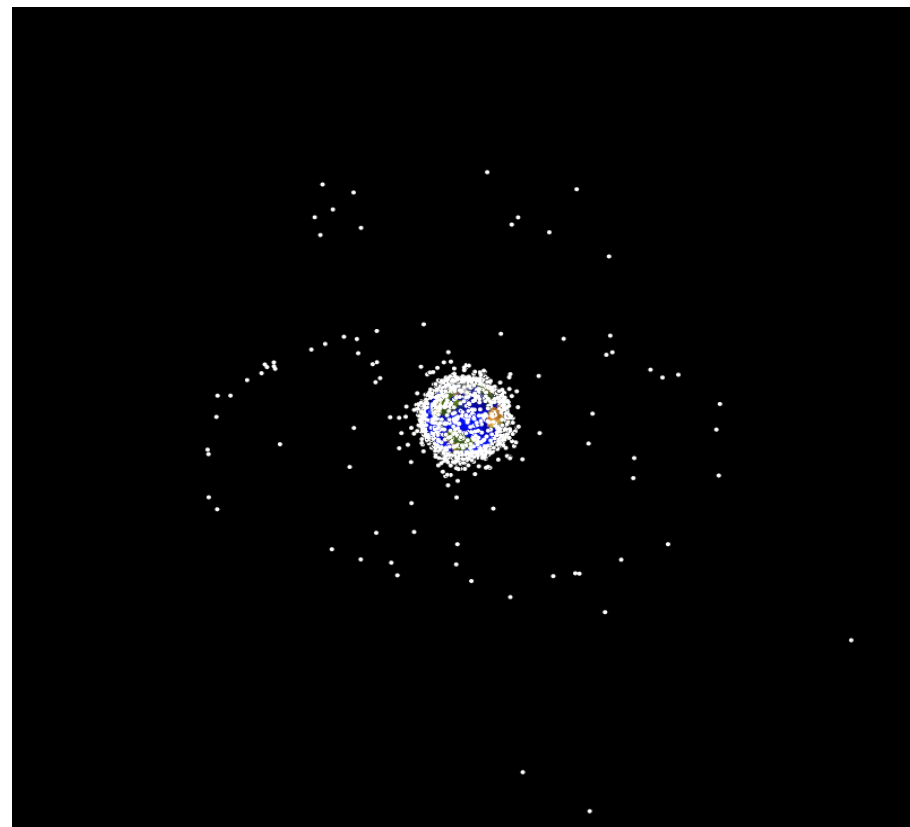
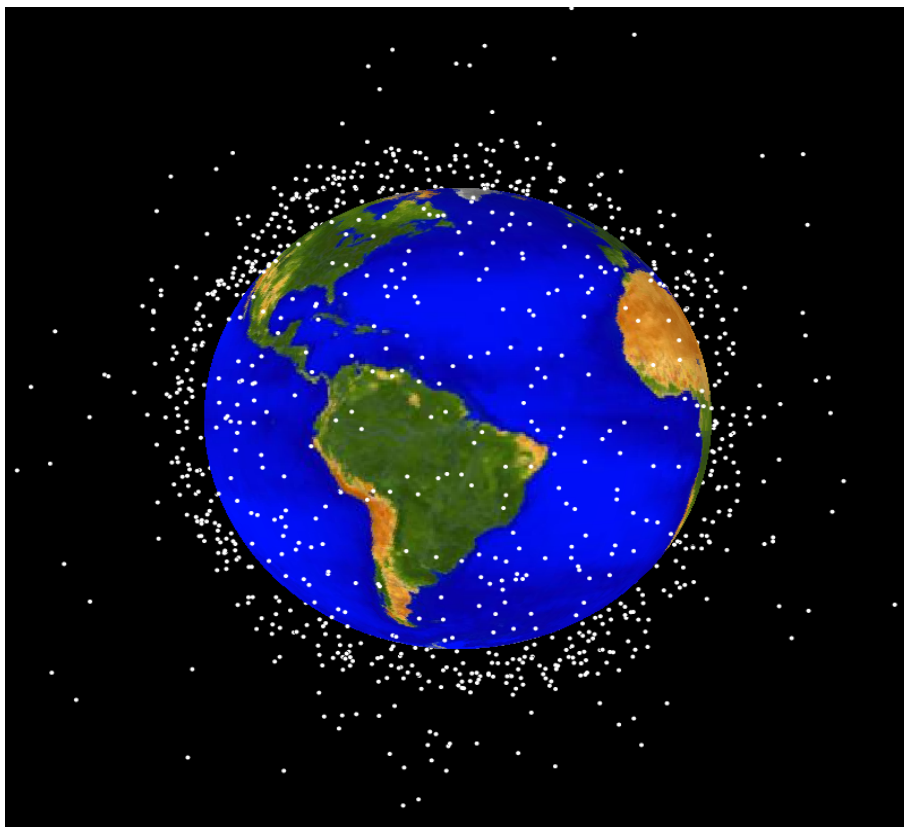


Cataloged objects  $> 10$  cm diameter

# AUGMENTATION DE LA POPULATION ORBITALE



1970

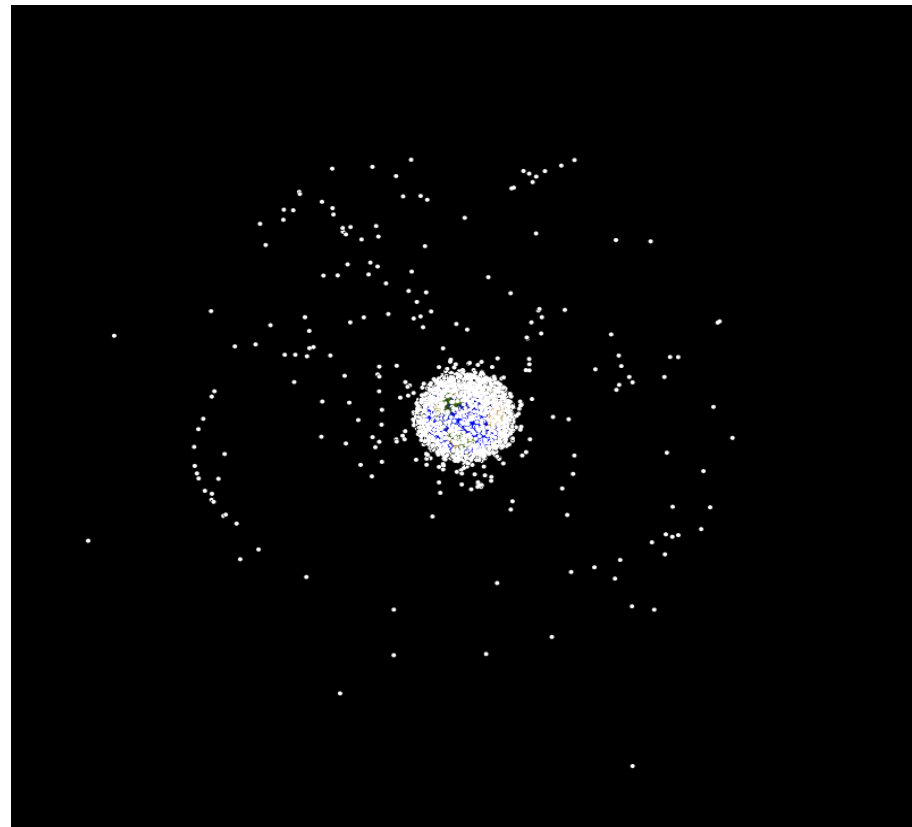
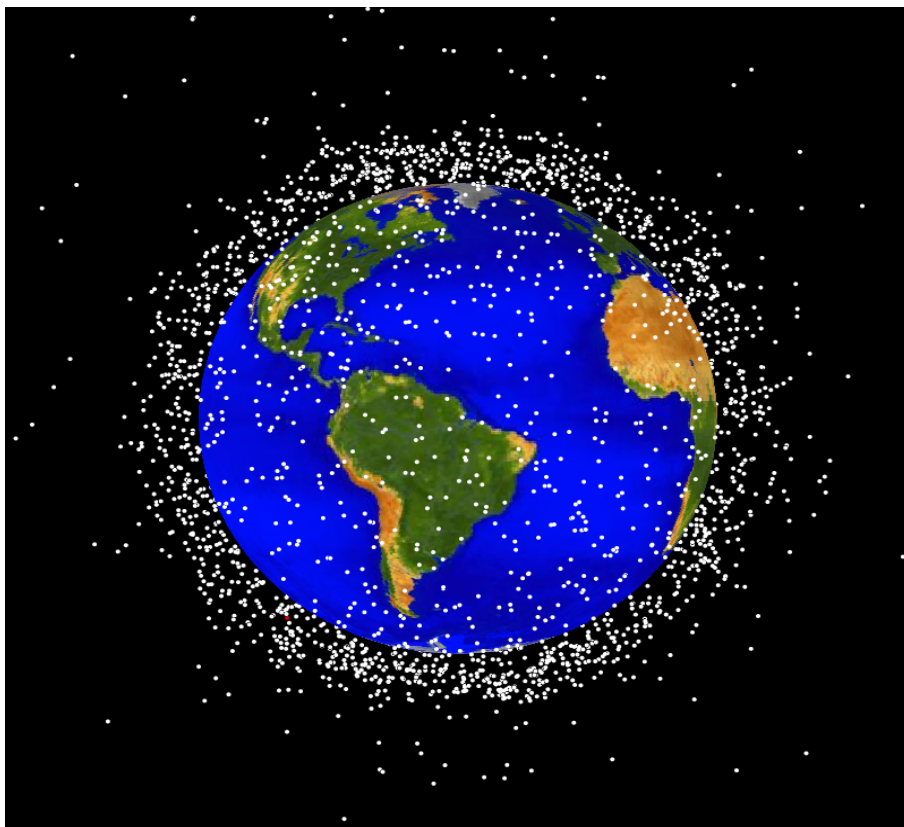


Cataloged objects > 10 cm diameter

# AUGMENTATION DE LA POPULATION ORBITALE



1975

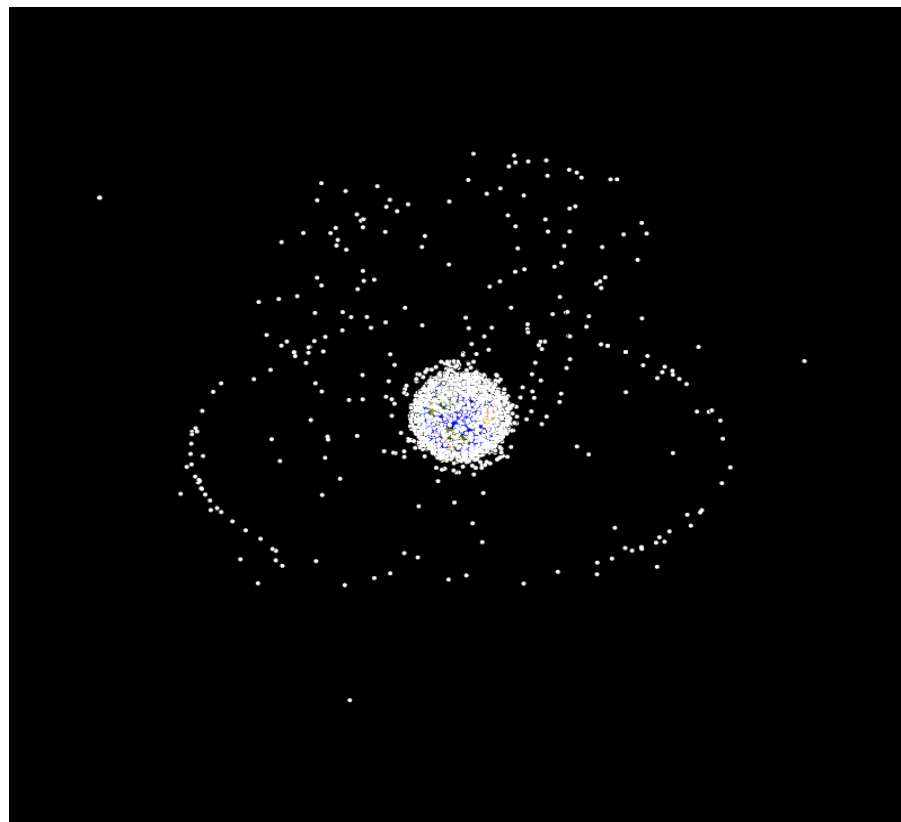
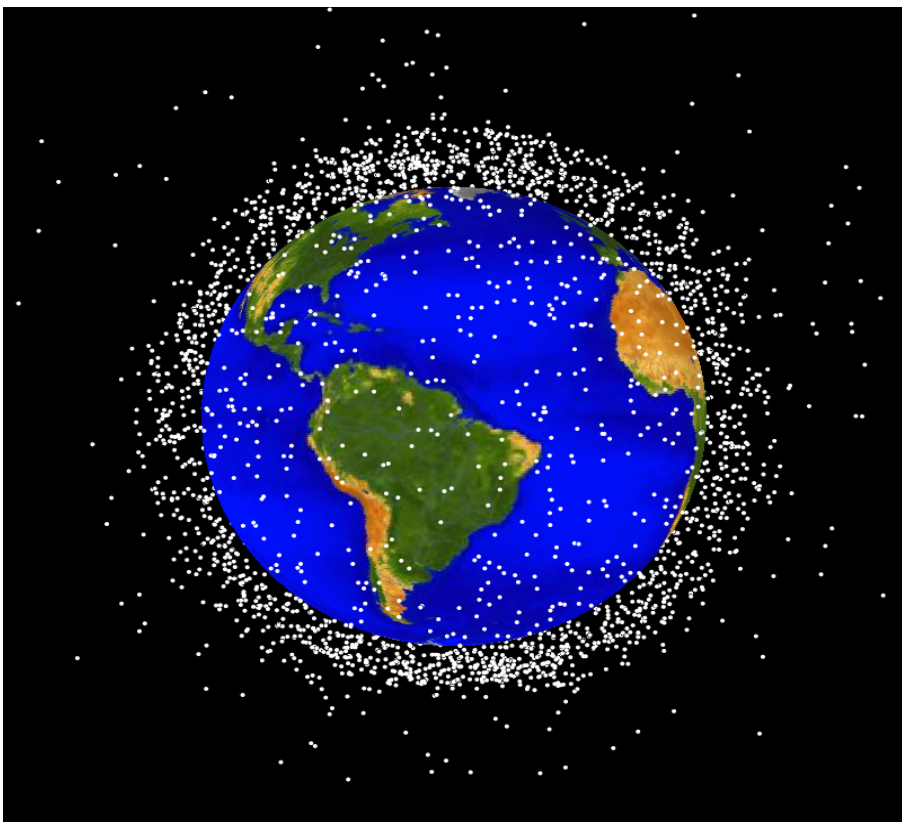


Cataloged objects > 10 cm diameter

# AUGMENTATION DE LA POPULATION ORBITALE



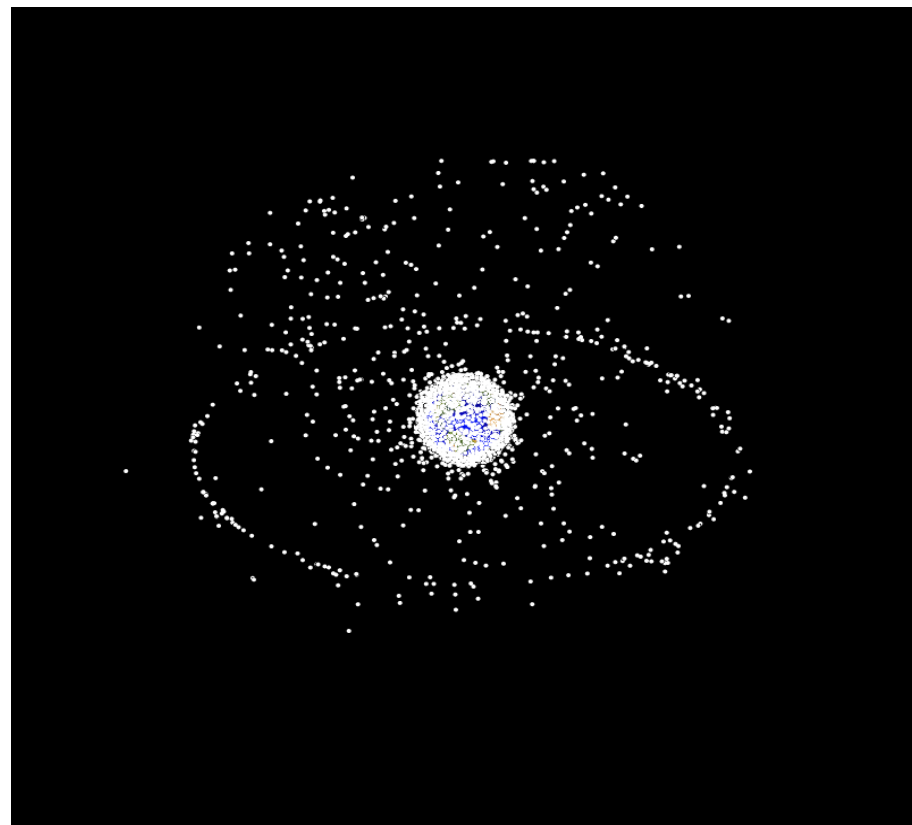
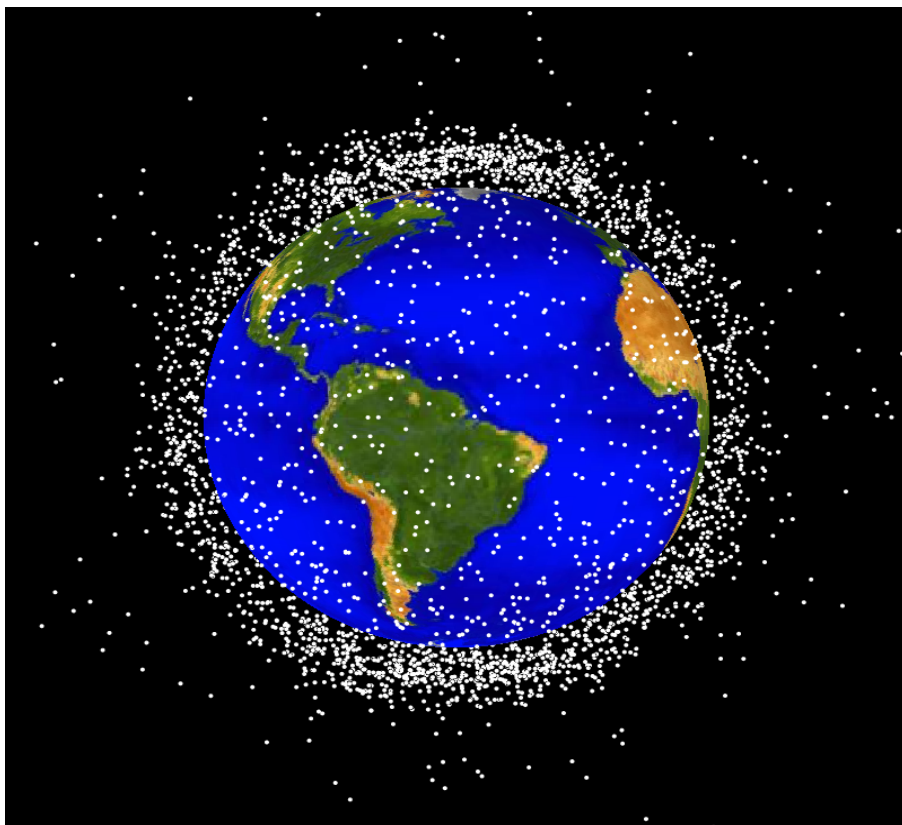
1980



Cataloged objects > 10 cm diameter

# AUGMENTATION DE LA POPULATION ORBITALE

1985

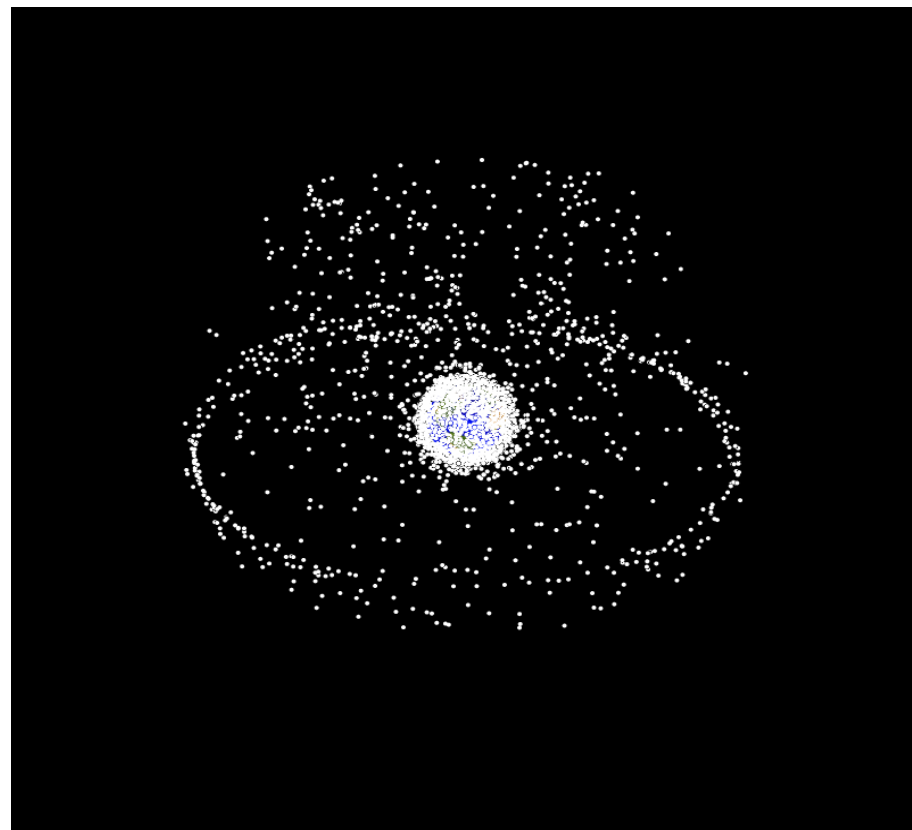
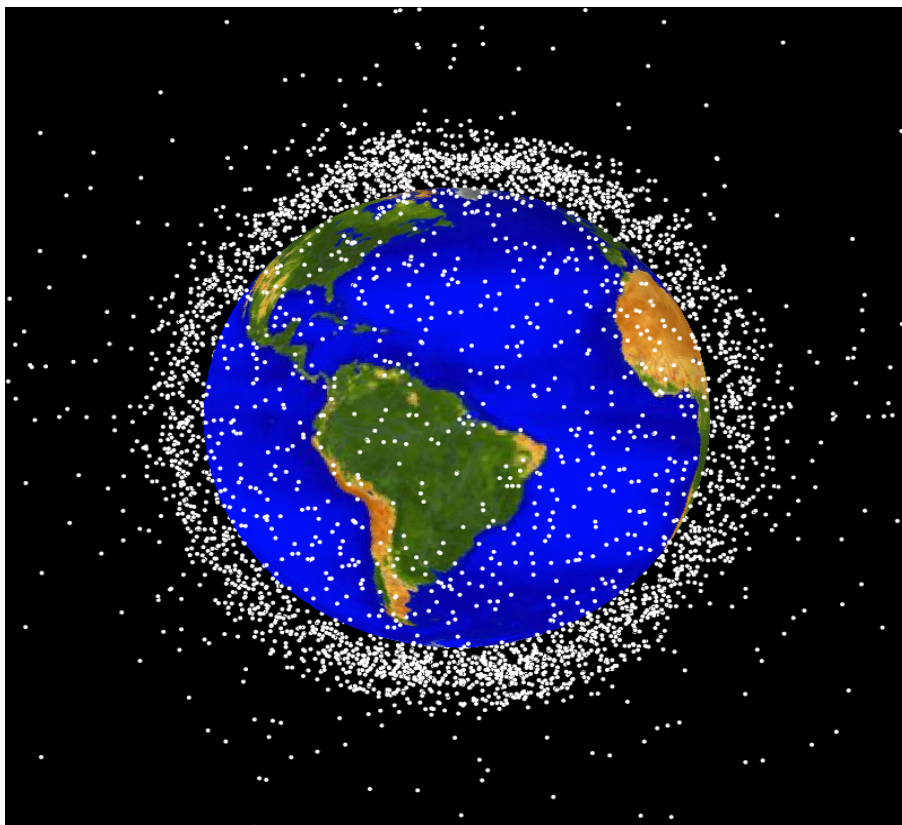


Cataloged objects > 10 cm diameter

# AUGMENTATION DE LA POPULATION ORBITALE



1990

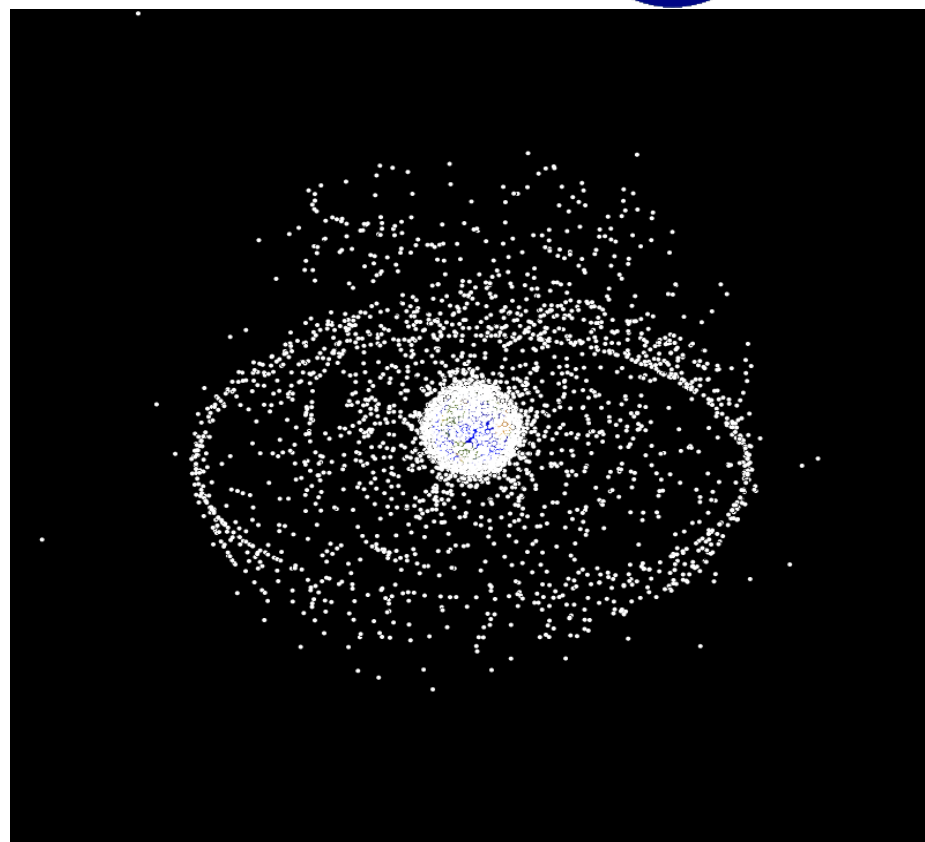
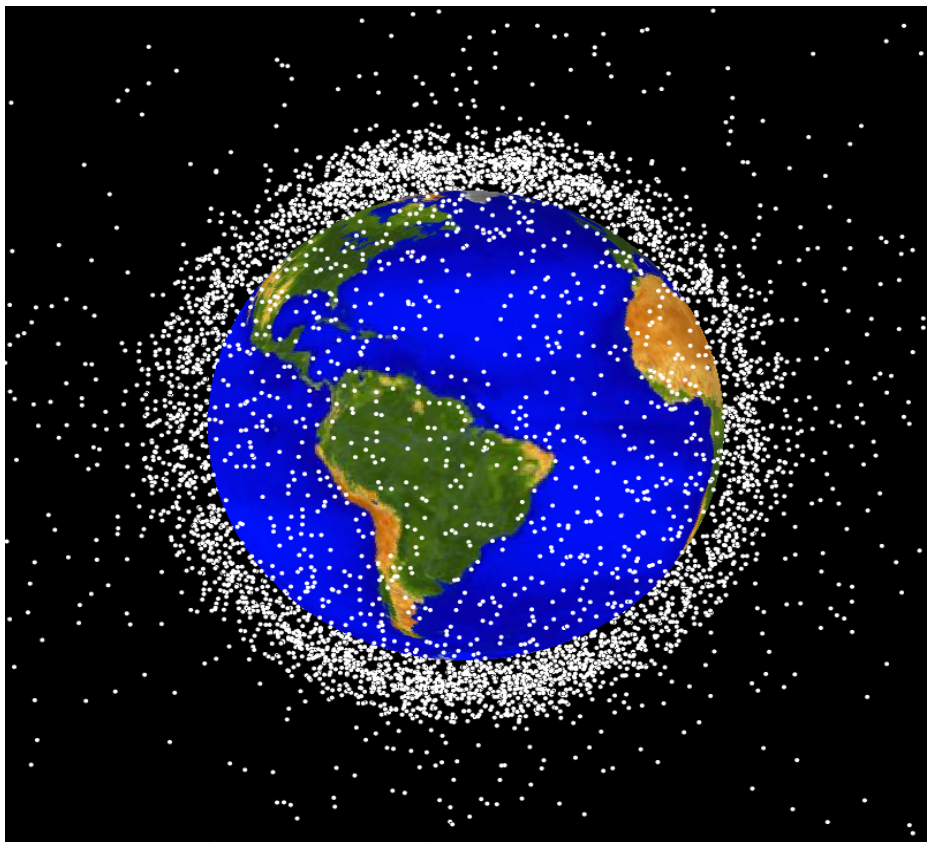


Cataloged objects > 10 cm diameter

# AUGMENTATION DE LA POPULATION ORBITALE



1995

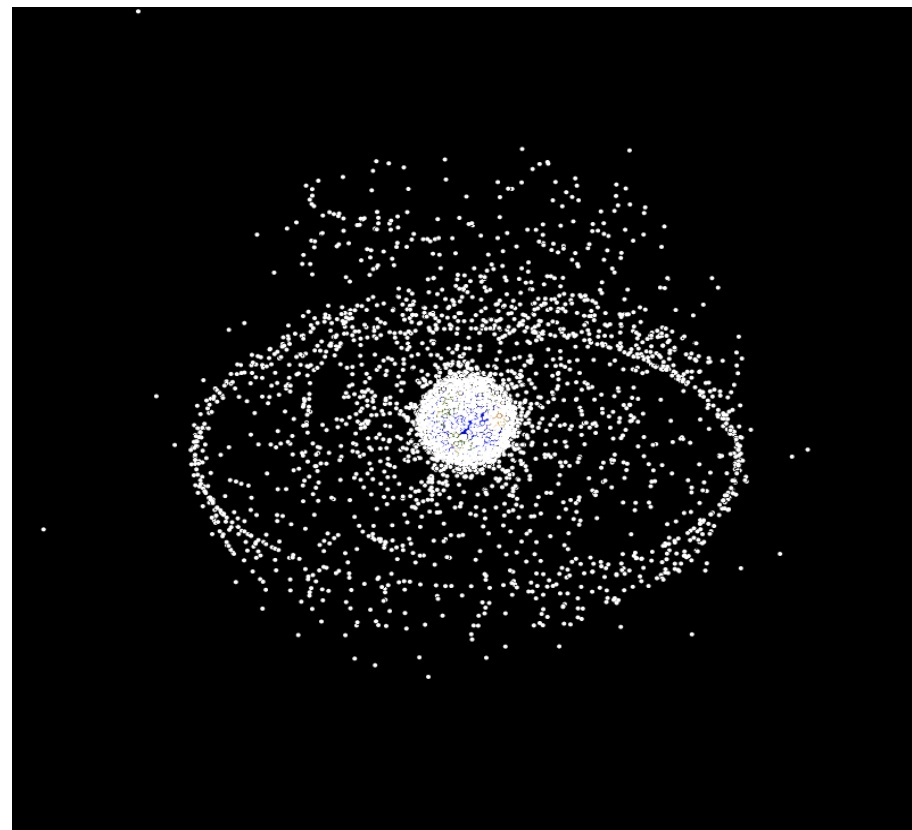
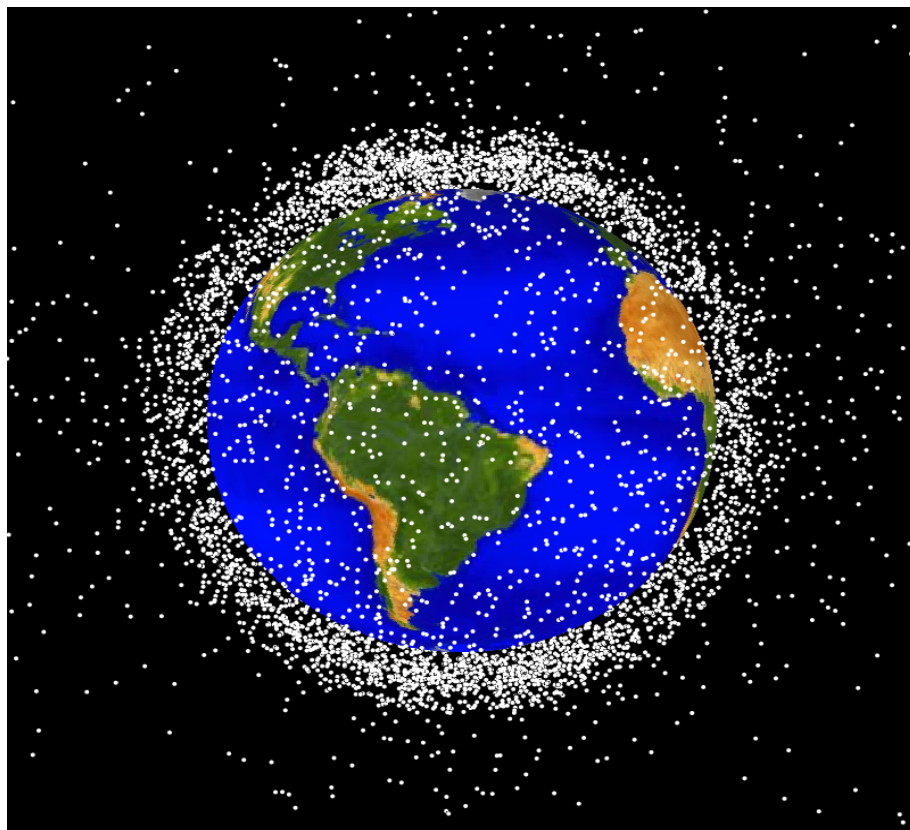


Cataloged objects > 10 cm diameter

# AUGMENTATION DE LA POPULATION ORBITALE



2000

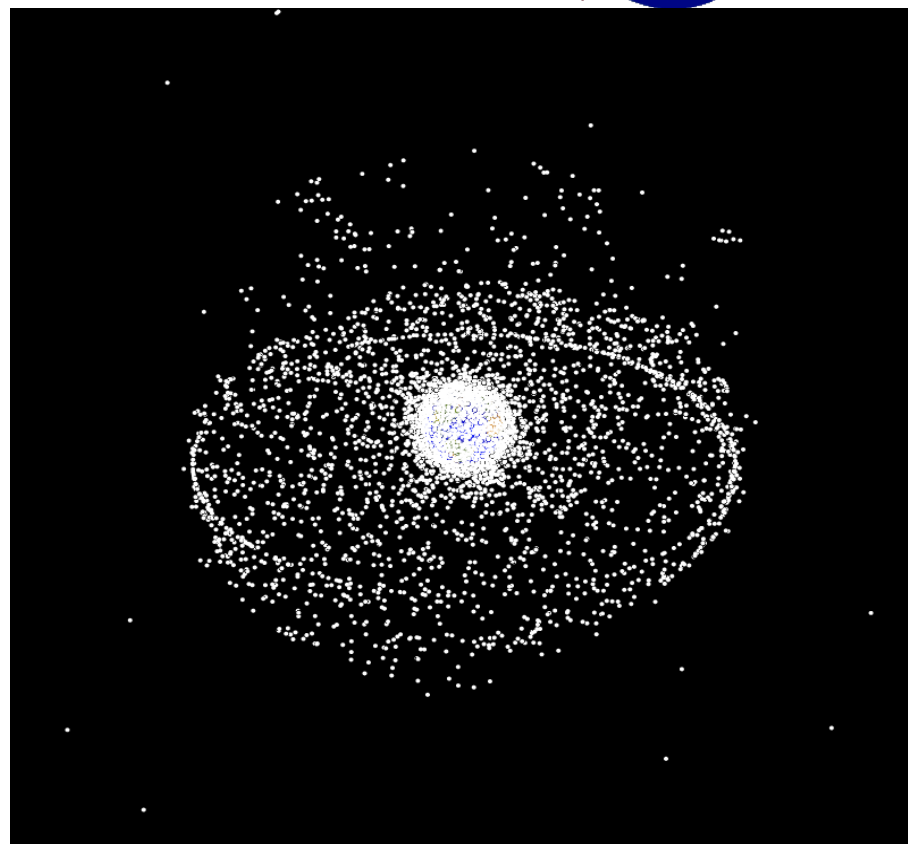
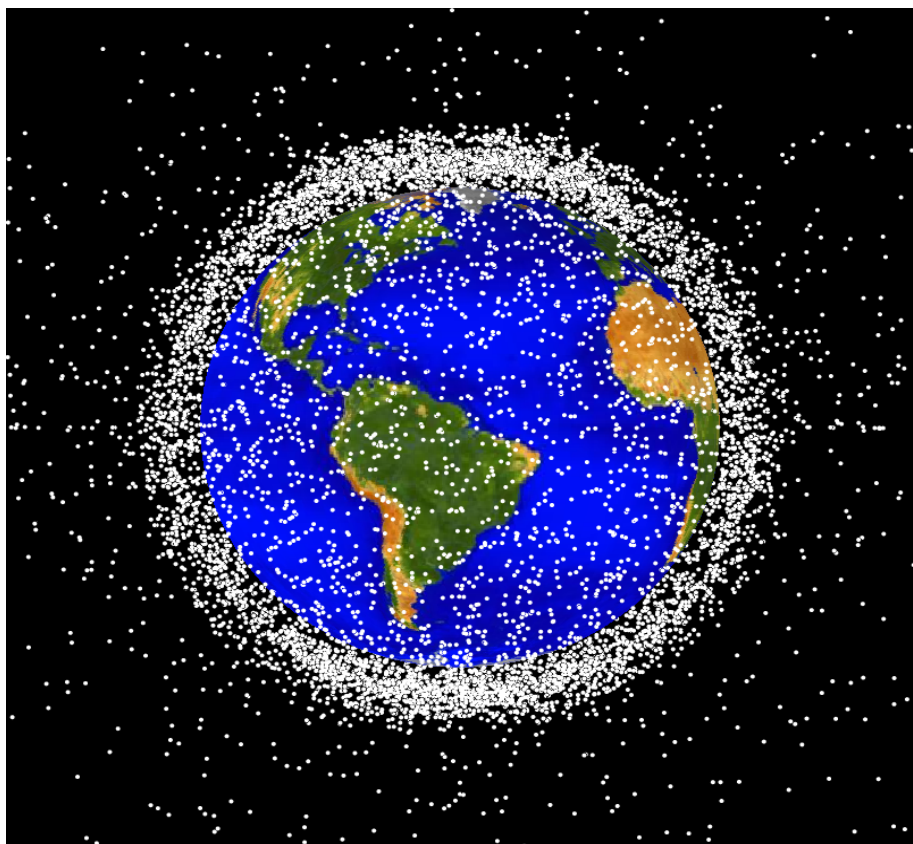


Cataloged objects > 10 cm diameter

# AUGMENTATION DE LA POPULATION ORBITALE



2005

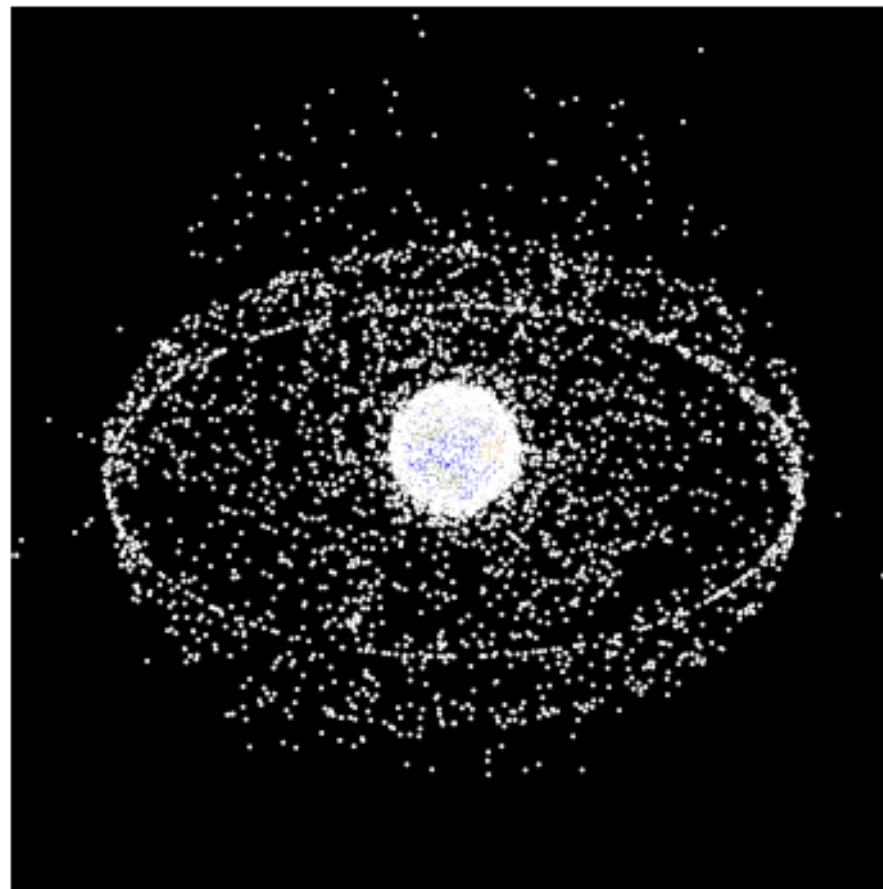
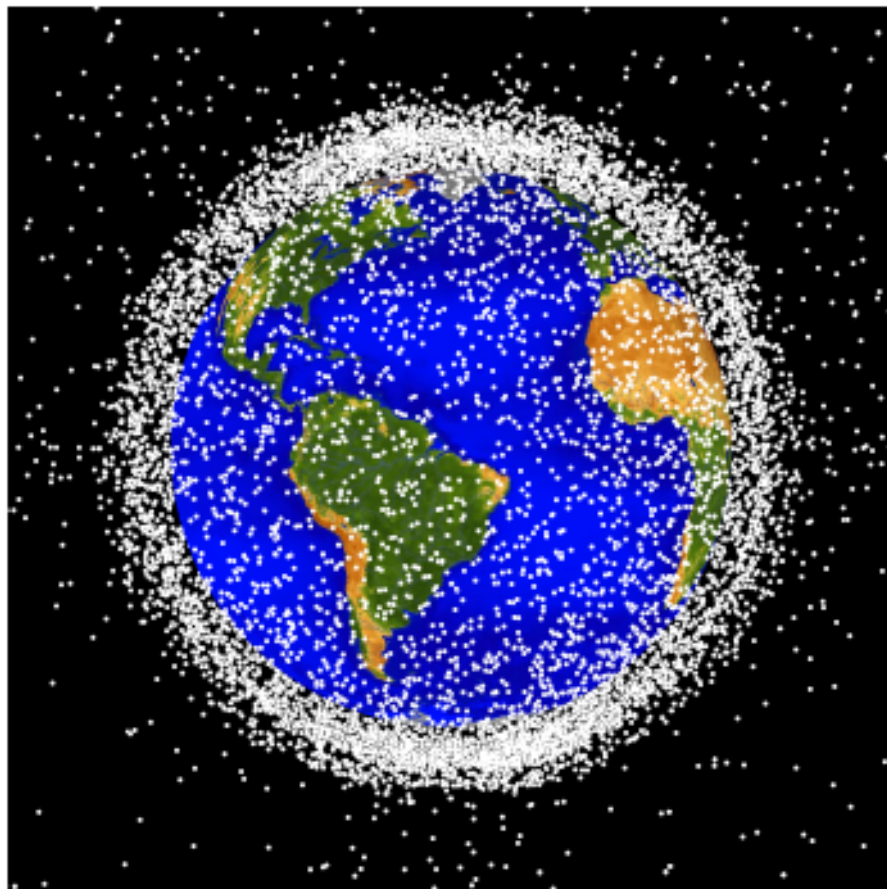


Cataloged objects > 10 cm diameter

# AUGMENTATION DE LA POPULATION ORBITALE



2010



Cataloged objects >10 cm diameter

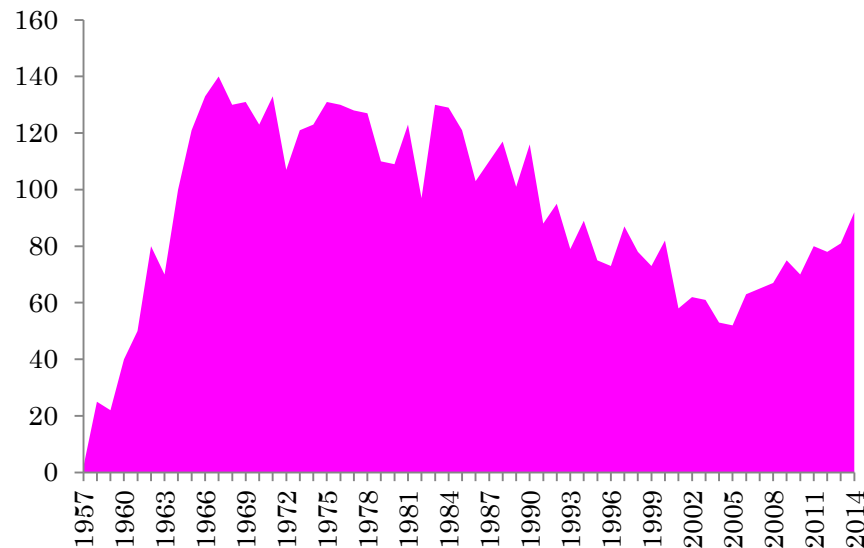
# NOMBRE D'OBJETS EN ORBITE



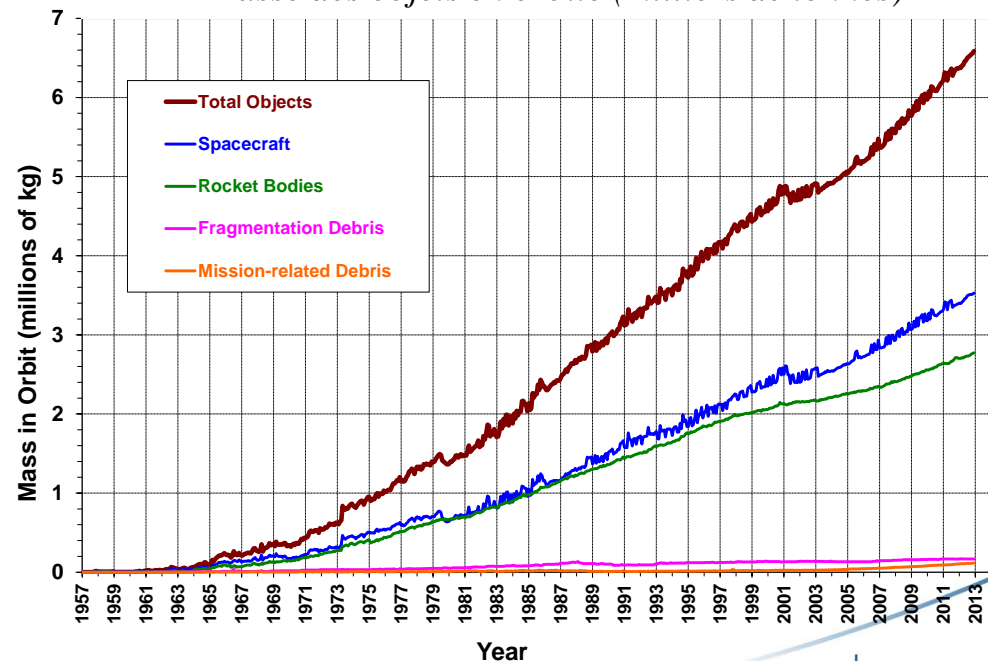
## ① Le nombre d'objets en orbite augmente fortement dans le temps :

- Principalement dans les orbites basses (Région A =  $\leq 2000$  km,  $\forall i$ )
- Significativement en orbite Géostationnaire (Région B =  $36.000$  km  $\pm 200$  km  $\pm 15^\circ$ )
- Malgré la réduction du nombre de lancements par rapport aux années 70-80
- Malgré la réglementation en place depuis 1995 - 2002

*Nombre de lancements orbitaux réussis par an*



*Masse des objets en orbite (milliers de tonnes)*



# NOMBRE D'OBJETS EN ORBITE



**Environ 23.000 gros objets dans l'espace :**

♦ **17.200 objets catalogués (> 10 cm)**

↳ environ 6.000 objets en plus non catalogués mais identifiés

♦ **720.000 débris de plus de 1 cm**

♦ **135 million de débris de plus de 1 mm**

⚠ **Mais l'espace est très étendu**

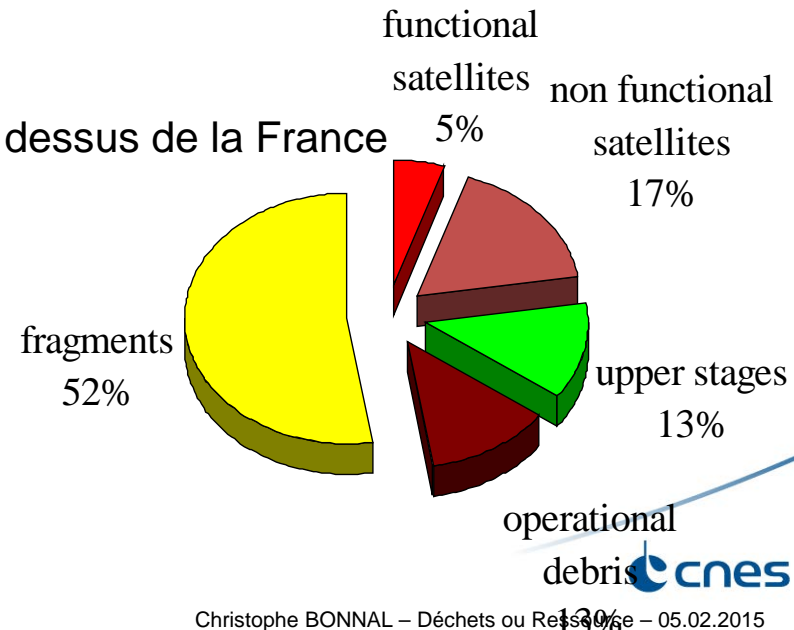
↳ A un instant donné, seulement 18 objets au dessus de la France

♦ **Environ 1.000 satellites actifs (5 %) :**

450 en Géostationnaire

450 en Orbite Basse

100 ailleurs

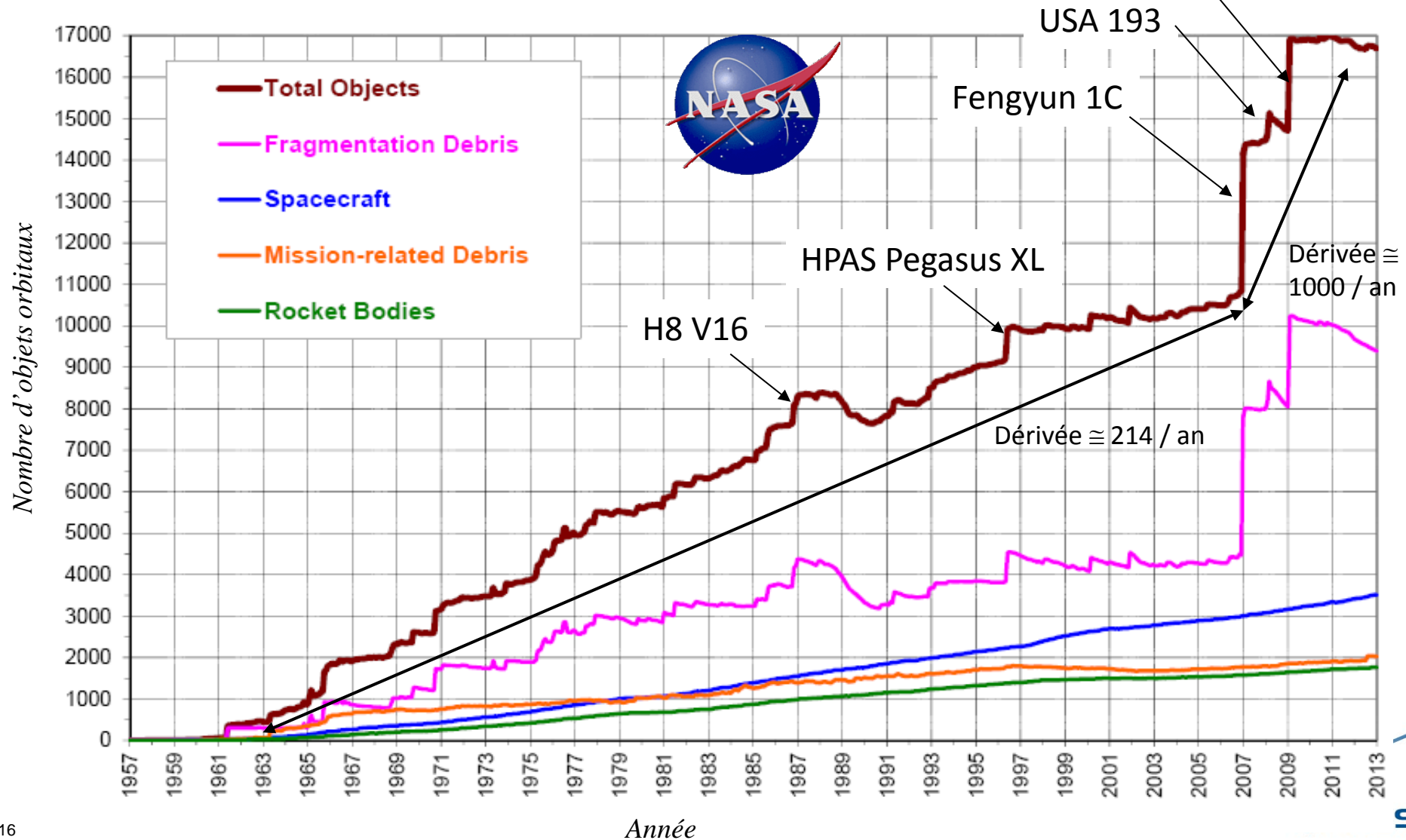




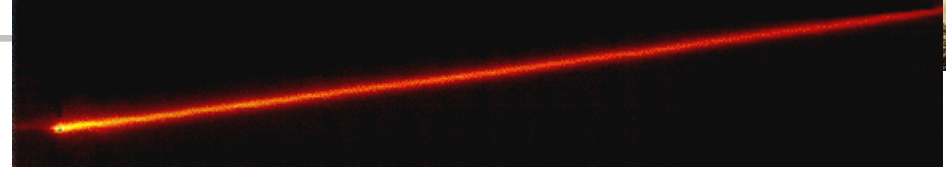
# SITUATION EN ORBITE : NOMBRE D'OBJETS CATALOGUÉS (NASA)

Iridium 33 – Cosmos 2251

*Nombre d'objets catalogués en orbite*



# RENTRÉES ATMOSPHÉRIQUES ALÉATOIRES



## ② Tout ce qui monte descendra...:

- ✦ **Les objets orbitaux en Orbites Basses rentrent dans l'atmosphère au bout d'un temps fonction de leur altitude**
  - ⇒ L'atmosphère résiduelle génère une traînée qui abaisse progressivement l'orbite
- ✦ **La rentrée atmosphérique entraîne une vaporisation de la majorité des matériaux**
  - ⇒ Combinaison des flux thermiques et des efforts mécaniques
  - ⇒ Mais environ 10 à 20% de la masse survit à la rentrée
- ✦ **Aucun moyen de savoir avec précision où et quand un impact va avoir lieu**
- ✦ **Grand nombre de rentrées aléatoires :**
  - ⇒ 1 ou 2 objets catalogués par jour
  - ⇒ 1 ou 2 gros objets intègres (satellite ou étage) par semaine
- ✦ **Risque potentiel de victime au sol**



# RISQUES DE COLLISIONS



## ③ Le risque de collision en orbite devient significatif :

- ✦ Collisions entre débris et satellites opérationnels
- ✦ Principalement dans la bande 700 – 1100 km fortement inclinée
- ✦ Peut entraîner la perte de fonction d'un satellite opérationnel
- ✦ Modélisation très complexe :
  - ⇒ débris en acier de 1 cm = 1 MJ = grosse voiture à 130 km/h
  - débris en aluminium de 1 mm radius = 1 kJ = boule de bowling à 100 km/h
  - ⇒ Critère de collision catastrophique : impact > 40 J/g
- ✦ Exemples :
  - ↪ Probabilité de perte mission Spot 5 :  
   ≅ 3 to 5% sur la durée de vie (CNES)
  - ↪ Probabilité de panne Sentinel-1 sur sa durée de vie :  
   Perte composant = 53 %,  
   Perte mission > 3,2 % (TAS-I)



# ORIGINE DES DÉBRIS ORBITAUX



## ④ 4 sources principales :

### ♦ Lancements

⇒ Exemple de 2014 : 92 lancements ⇒ 334 objets catalogués

### ♦ Vieillessement des matériaux (Protections Thermique, peintures, mylars, ...)

⇒ Principalement de très petits débris,

### ♦ Fragmentations, volontaires ou non

⇒ 280 enregistrées fin 2013

#### ⇒ Exemples de fragmentations accidentelles (154) :

Etage supérieur Ariane V16 (Spot 1) : 796 débris catalogués en 1986

Etage supérieur Pegasus XL : 601 débris catalogués en 1996

#### ⇒ Exemples de fragmentations délibérées (59) :

Feng-Yun 1C : 3000 débris catalogués en 2007

USA-193 : 500 débris catalogués en 2008, tous rentrés aujourd'hui

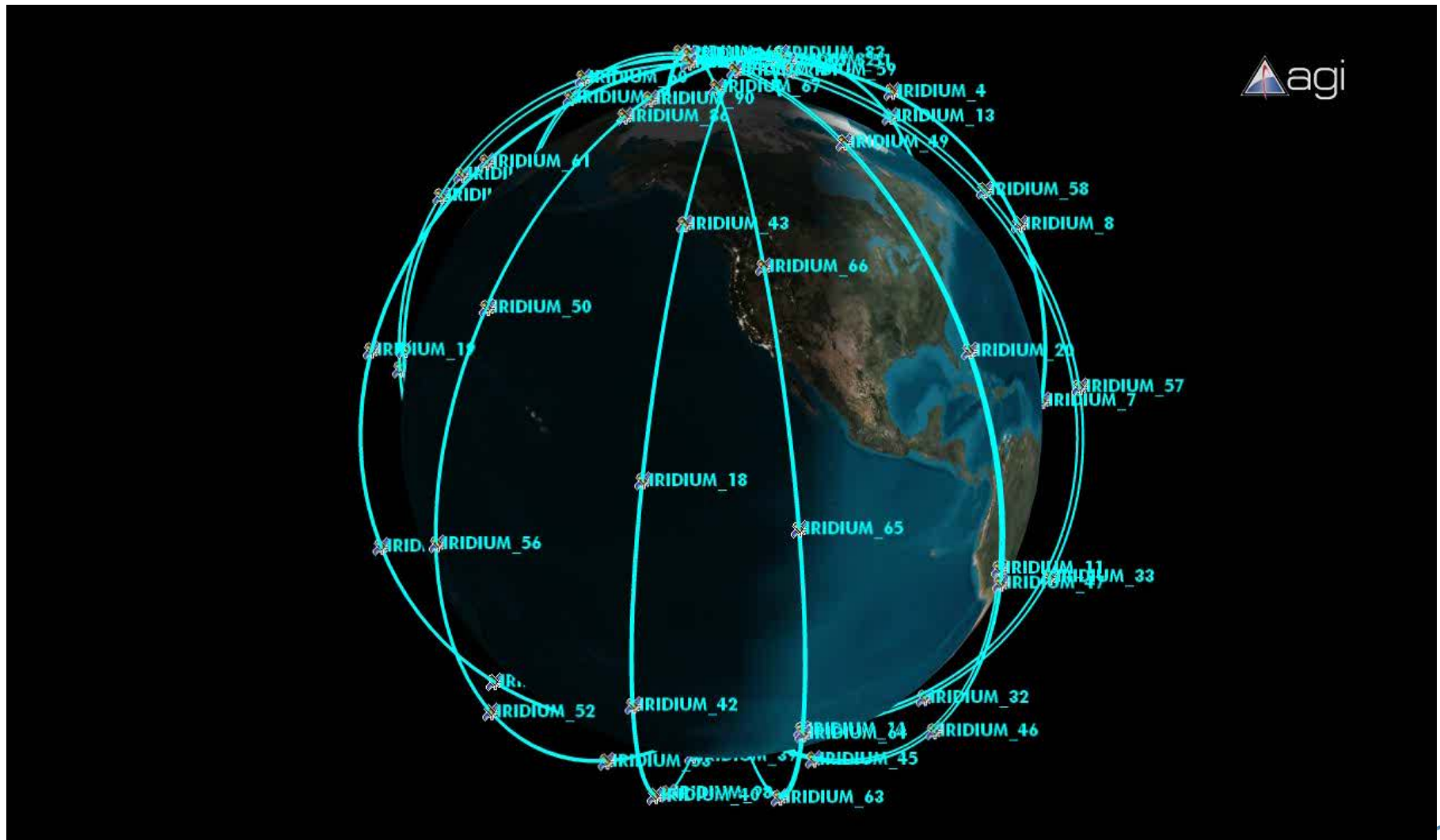
#### ⇒ Le nombre de fragmentations diminue grâce aux règles de passivation

### ♦ Collisions

⇒ 5 collisions officielles, 64 suspectées avec de plus petits débris

⇒ Exemple : Iridium 33 – Cosmos 2251 en 2009 → 2269 débris catalogués aujourd'hui

# COLLISION IRIIDIUM 33 – COSMOS 2251 (AGI)



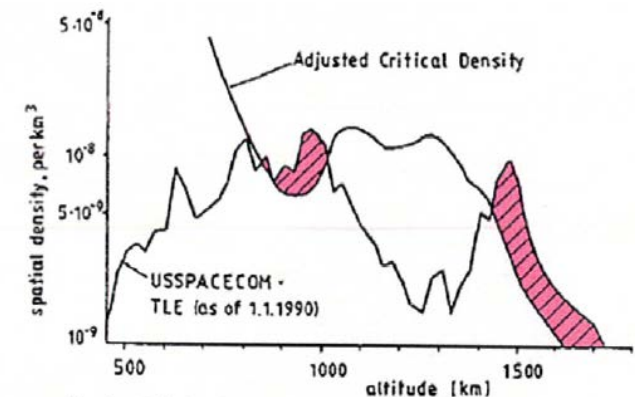
# SYNDROME DE KESSLER



## ⑤ Une réaction en chaîne est redoutée en orbite basse :

### ♦ Deux phénomènes antagonistes :

1. Génération permanente de nouveaux débris
  2. Nettoyage naturel par traînée atmosphérique
- ⇒ Augmentation de la population quand 1 > 2  
⇒ Plus l'altitude est élevée,  
plus la traînée est faible  
mais plus le nombre de débris est faible  
et vice versa...



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

### ♦ Augmentation incontrôlée quand la source par « collision » devient à elle seule supérieure à la part « nettoyage atmosphérique »

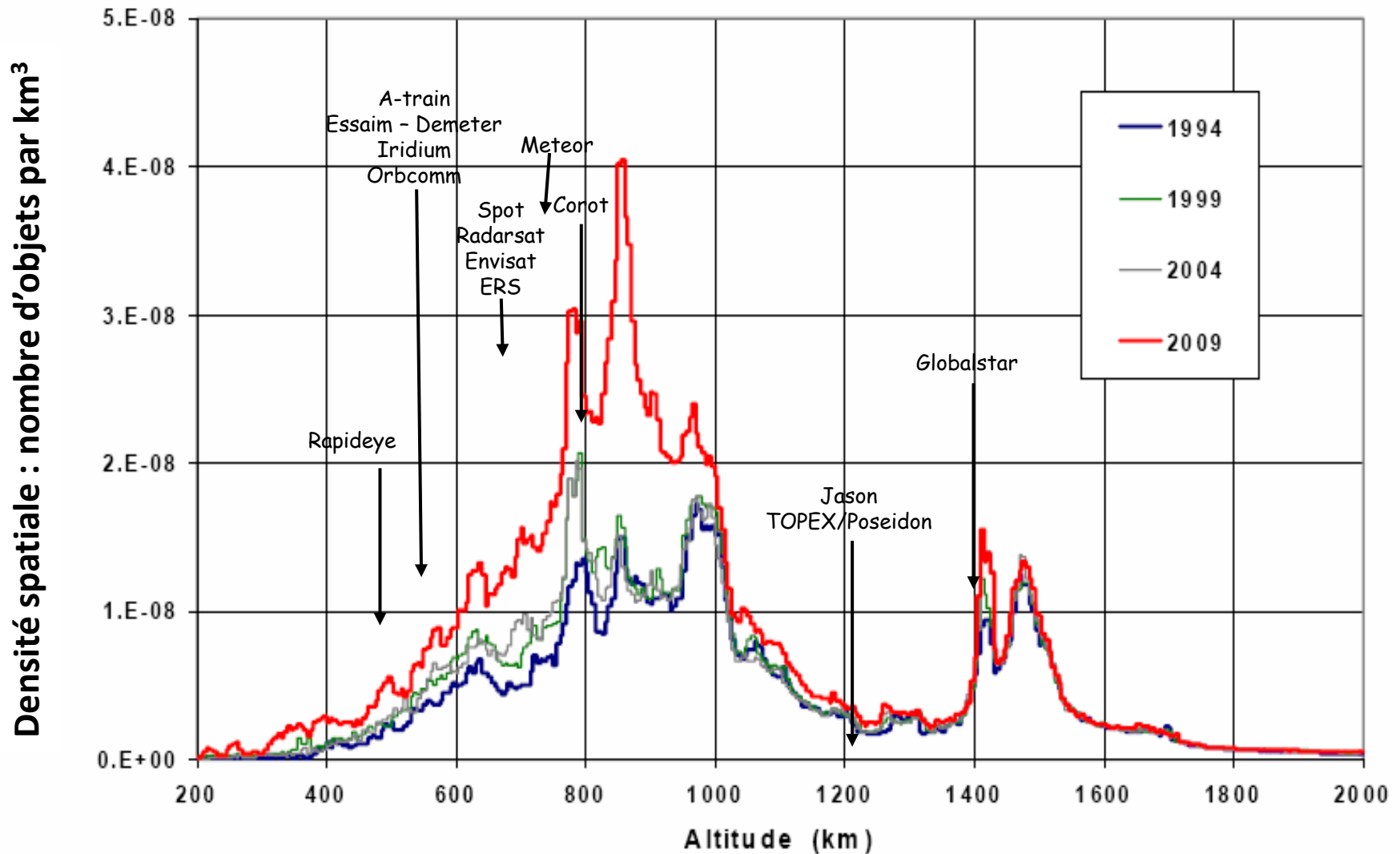
⇒ Réaction connue sous le nom de Syndrome de Kessler

### ♦ Pas de consensus international à ce jour : études très complexes

### ♦ Suspectée entre 700 et 1100 km d'altitude (et peut être vers 1500 km)

# DENSITÉ DES OBJETS EN ORBITES BASSES

(Source NASA)



# ACTIONS POTENTIELLES : RÉGLEMENTATION



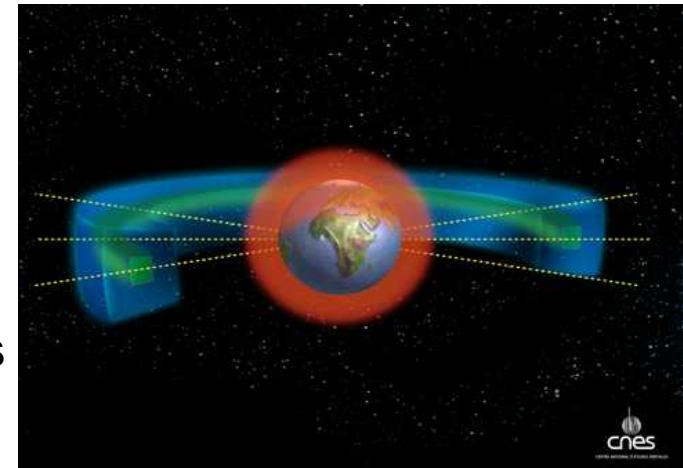
## ⑥ Il est fondamental de respecter la réglementation en vigueur :

### 1. Court terme

- Minimisation des débris opérationnels, plus de fragmentation volontaire,
- Passivation systématique, plus d'explosion accidentelle,
- Deux zones protégées (LEO, GEO) : règle des 25 ans

### 2. Long terme

- Désorbitation systématique contrôlée.



## Très grand nombre de réglementations applicables

- IADC Guidelines (2002),
- UN Guidelines (2007),
- Standards nationaux (NASA 1995, CNES 1999, ESA 2007,
- European Code of Conduct (approuvé ASI-BNSC-CNES-DLR-ESA en 2004),
- Standard ISO 24113 et documents annexes (en cours d'approbation),
- Loi Française des Opérations Spatiales LOS (approuvée en 2008).

# ACTIONS POTENTIELLES : BLINDAGE



## ⑦ Les satellites peuvent se blinder contre les petits impacts :

### ♦ Grande variété de blindages

- ⇒ Concepts multi-parois
- ⇒ Grand nombre de standards de conception



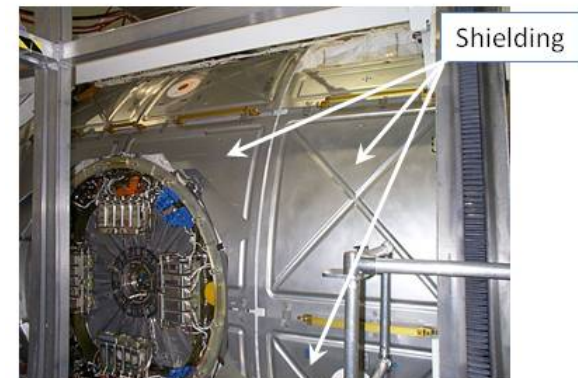
### ♦ Bien appliqué aux satellites « habitables » (ISS, ATV...)

### ♦ Limitation typique : 1 ou 2 cm

- ⇒ Au-delà, l'énergie d'impact est trop grande

### ♦ Impact très fort sur le design satellite :

- ⇒ Contrôle thermique, communications, masse, coûts...



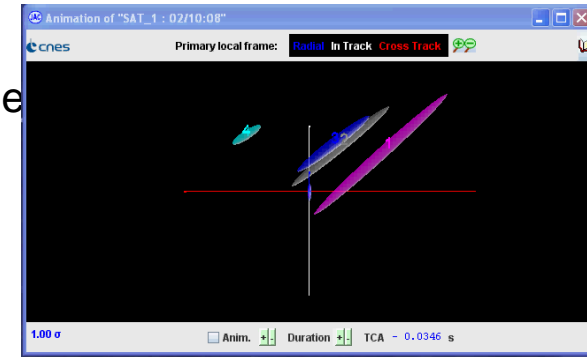


# ACTIONS POTENTIELLES : ÉVITEMENT DES COLLISIONS

## ⑧ Dans certains cas, un satellite peut éviter une collision :

### ✦ Evitement :

- ⇒ Un satellite opérationnel est (généralement) manoeuvrable
- ⇒ L'orbite des gros débris peut être prédite
- ⇒ Une collision avec un objet catalogué peut être anticipée
- ⇒ Une manœuvre peut être commandée avant collision



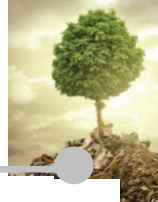
### ✦ Modélisation très complexe :

- ⇒ Besoin de disposer de paramètres orbitaux très précis
- ⇒ Des senseurs dédiés sont nécessaires (radars, télescopes, lasers)
- ⇒ Space Surveillance & Tracking SST

### ✦ CNES propose un service « anti-collision » (CAESAR) pour protéger les satellites actifs

- ⇒ Catalogue orbital issu notamment du radar GRAVES

### ✦ Protège d'une grosse collision contre un satellite opérationnel, mais ni d'une petite, ni d'une collision entre débris



# ACTIONS POTENTIELLES : ÉVITEMENT DES COLLISIONS

## Systèmes Français de Surveillance de l'Espace

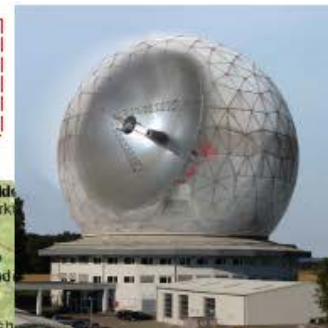


**MONGE :**  
radars de  
poursuite  
ARMOR 1&2 et  
Normandie



+

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



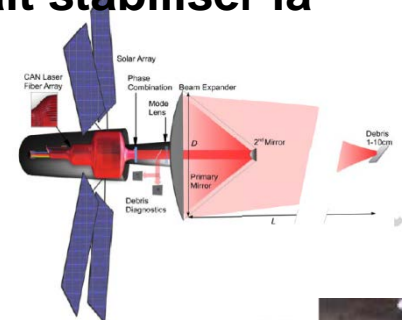
# ACTIONS POTENTIELLES : NETTOYAGE ACTIF DE L'ESPACE



## ⑨ La situation peut être améliorée si les pires débris sont retirés :

### ✦ Le retrait actif de 5 à 10 gros débris par an pourrait stabiliser la population orbitale :

- ⇒ Modélisation très complexe : pas de consensus
- ⇒ Pourrait être une solution à long terme



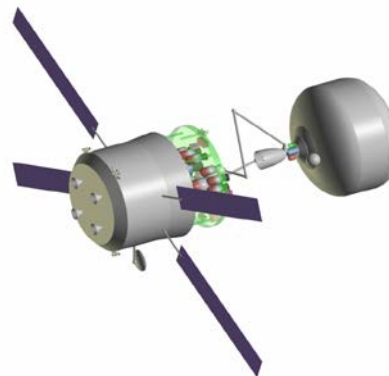
### ✦ Très nombreuses solutions de nettoyage actif :

- ⇒ Sans contact : laser, électrostatique, jet ionique...
- ⇒ Contact sans contrôle : harpon, pince, filet, câbles magnétiques...
- ⇒ Contact avec contrôle : bras robotique, tentacules...



### ✦ Nombreuses études au niveau mondial

- ⇒ Fortes synergies avec le « Servicing Orbital »



### ✦ Pas de schéma financier clair

- ⇒ Difficulté pour bâtir un Business Plan
- ⇒ Problèmes légaux, assurance, politiques, militaires





## ⑩ La possibilité de recycler les débris est étudiée :

### ♦ Recyclage au sol :

- ⇒ Extrême difficulté pour récupérer les débris au sol
- ⇒ Rentrée atmosphérique destructrice
- ⇒ Besoin de capsules de rentrées (boucliers thermiques, coûts prohibitifs)

### ♦ Recyclage en orbite :

- ⇒ Forte difficulté pour faire un rendez-vous orbital suivi d'un transfert vers le lieu d'utilisation potentielle (véhicules de transfert, robotique...)
- ⇒ Préparation des débris pour leur nouvelle utilisation (opérations mécaniques, découpes, assemblages...)

### ♦ Très faible valeur intrinsèque des débris orbitaux

- ⇒ Le plus souvent matériaux « communs » (Aluminium, Carbones...)
- ⇒ Quelques exceptions (miroir en béryllium)
- ⇒ Très fort impact du vieillissement en orbite (dégradation des surfaces, impacts, pertes fonctionnelles...)

### ♦ En pratique, peu crédible sauf niches

- ⇒ Tôles pour blindage de futures stations spatiales
- ⇒ Cannibalisme après panne d'un satellite (panneaux solaires)

# CONCLUSIONS



**Quelles que soient les solutions retenues, une action doit être entreprise :**

♦ **Respect médiocre de la réglementation actuelle :**

- ⇒ Environ 50% des objets orbitaux respectent la règle des 25 ans
- ⇒ De très nombreux objets sont abandonnés non passivés
- ⇒ Les rentrées aléatoires peuvent générer un risque vis-à-vis des populations

♦ **Mais ces mesures ont toutes un coût :**

- ⇒ Pas de bilan économique clair à ce jour
- ⇒ Désorbitation coûteuse en fin de vie
- ⇒ Impact sur le design
- ⇒ Pas de Business Plan pour le Retrait Actif des Débris ADR
- ⇒ Impacts juridiques des mesures proposées

♦ **Pas de consensus sur la situation au niveau international**

- ⇒ Actions au niveau ONU et IADC (Inter Agency Coordination Committee)

♦ **Besoin d'une révolution dans les mentalités**

- ⇒ Besoin d'une mentalité « Espace Propre »
- ⇒ La pérennité des opérations spatiales peut en dépendre



**MERCI DE VOTRE ATTENTION**

**Christophe.bonnal@cnes.fr**