



Pérennité des opérations spatiales

Surveillance et suivi des débris spatiaux

Christophe Bonnal

CNES – Direction des Lanceurs
Président du Comité Débris Orbitaux de l'IAA et de l'IAF
Délégué Français à l'IADC – ECSS – ISO

Louvenciennes, le 3 octobre 2020



Contenu

Introduction

Nombre d'objets en orbite

Evènements redoutés

- - Risque à la rentrée dans l'atmosphère
- - Risques de collisions
- - Evolution future

Actions potentielles :

- - Réglementer
- - Eviter les collisions
- - Nettoyer

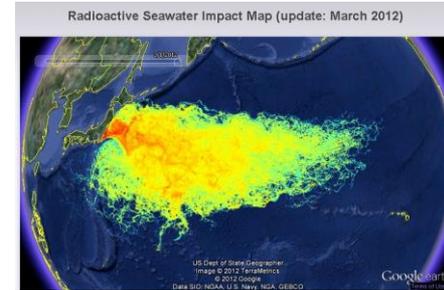
Surveillance de l'Espace et suivi des objets spatiaux

Conclusions

Le spatial est indispensable à notre vie quotidienne, et stratégique

Trois domaines d'application principaux :

- **Développement durable – Support à la décision sur les enjeux majeurs :**
 - Ressources en eau – Changements climatiques – Traitement des pollutions
Prévision et gestion des crises et des risques naturels
- **Science – Contribution fondamentale aux recherches sur :**
 - Connaissance de la Terre – Exploration de l'univers – Origine de la vie – Physique fondamentale
- **Information et Mobilité – Préparation et utilisation des technologies du futur**
 - Télécommunication – Positionnement, Navigation – Observation de la Terre – Défense



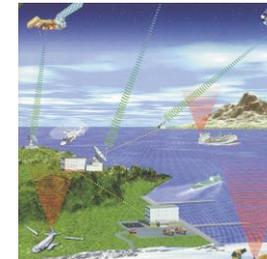
Pollution maritime Fukushima [Image NOAA]



Nébuleuse Eskimo

Utilisation de l'espace omniprésente et vitale

↪ Mais pérennité menacée, même à court terme,
par la prolifération des débris spatiaux



COSPAS-SARSAT





C'était il y a 60 ans, le 4 octobre 1957...

Lancement du Spoutnik 1 :

- Charge utile = 84 kg
- Etage central Semioroka R7 = 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



© StThomas Productions

Emission de Spoutnik 1 pendant 21 jours :

- Rentrée atmosphérique après 92 jours

⇒ Spoutnik 1 a été un débris orbital pendant les $\frac{3}{4}$ de sa vie...

Aujourd'hui encore :

- Les opérations spatiales entraînent de nombreux débris en orbite

Un débris spatial est un objet orbital artificiel non fonctionnel



Nombre d'objets artificiels en orbite

Environ 34.000 gros objets de plus de 10 cm dans l'Espace

- 21.443 objets catalogués (00.10.20)
- Seulement 10% de satellites actifs (environ 2.200) :
 - 550 en orbite géostationnaire
 - 1.480 en orbite basse (< 2.000 km)
 - 125 en orbites GNSS (Galileo, GPS...)
 - 45 ailleurs

Beaucoup plus de plus petits :

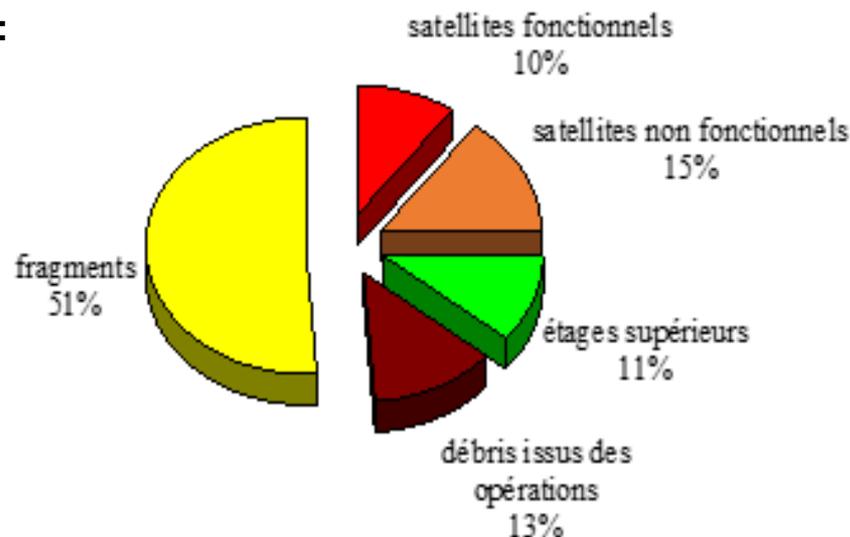
- 900.000 débris de plus de 1 cm
- 130 millions de débris de plus de 1 mm

Masse totale en orbite \cong 8.800 tonnes



Mais l'Espace est immensément grand :

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



Evolution de la population orbitale

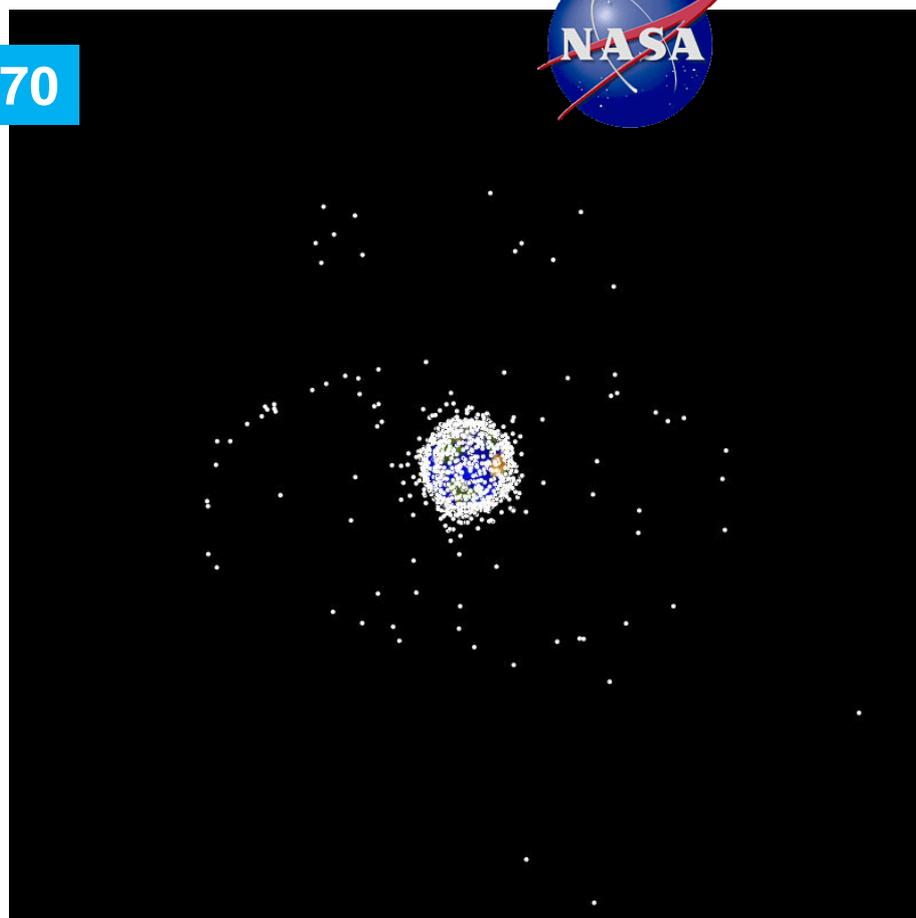
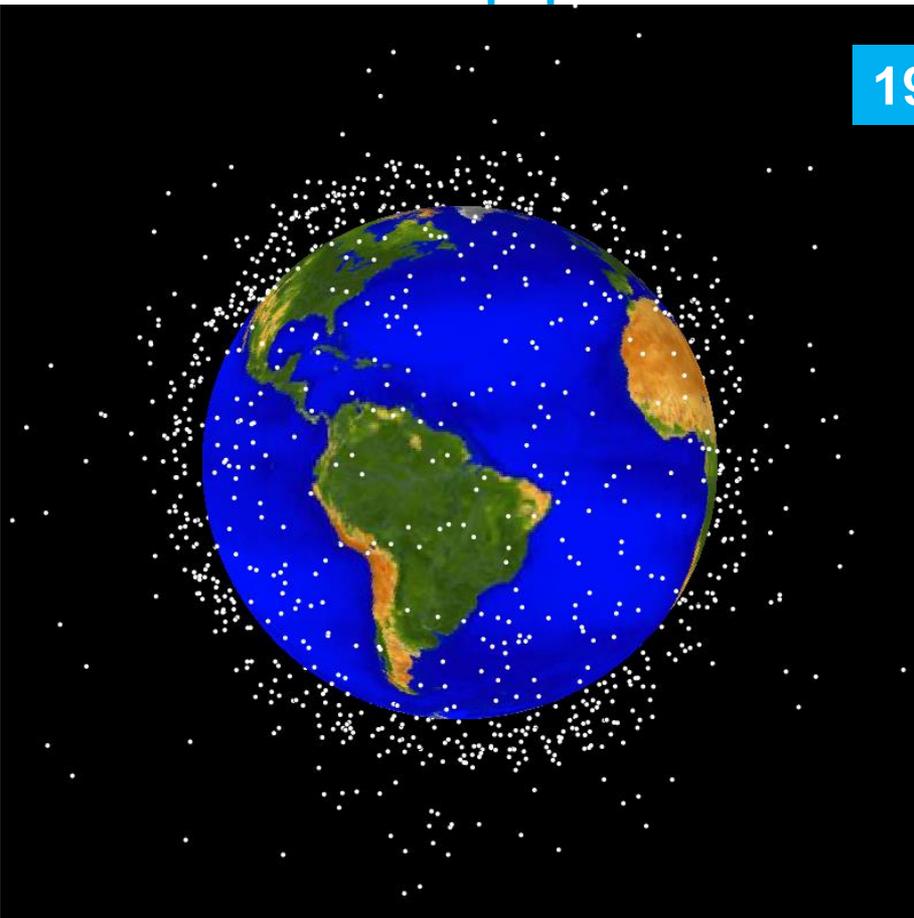
1960



Objets catalogués >10 cm diamètre en orbite basse, >1 m en Géostationnaire

Evolution de la population orbitale

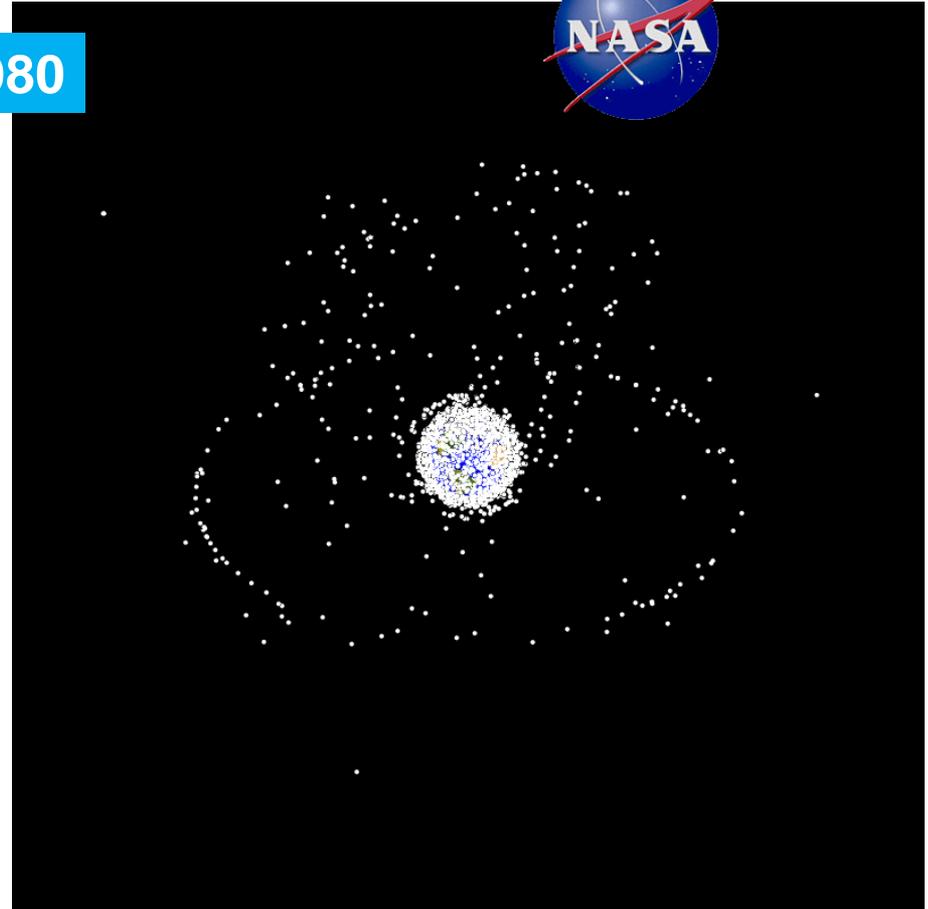
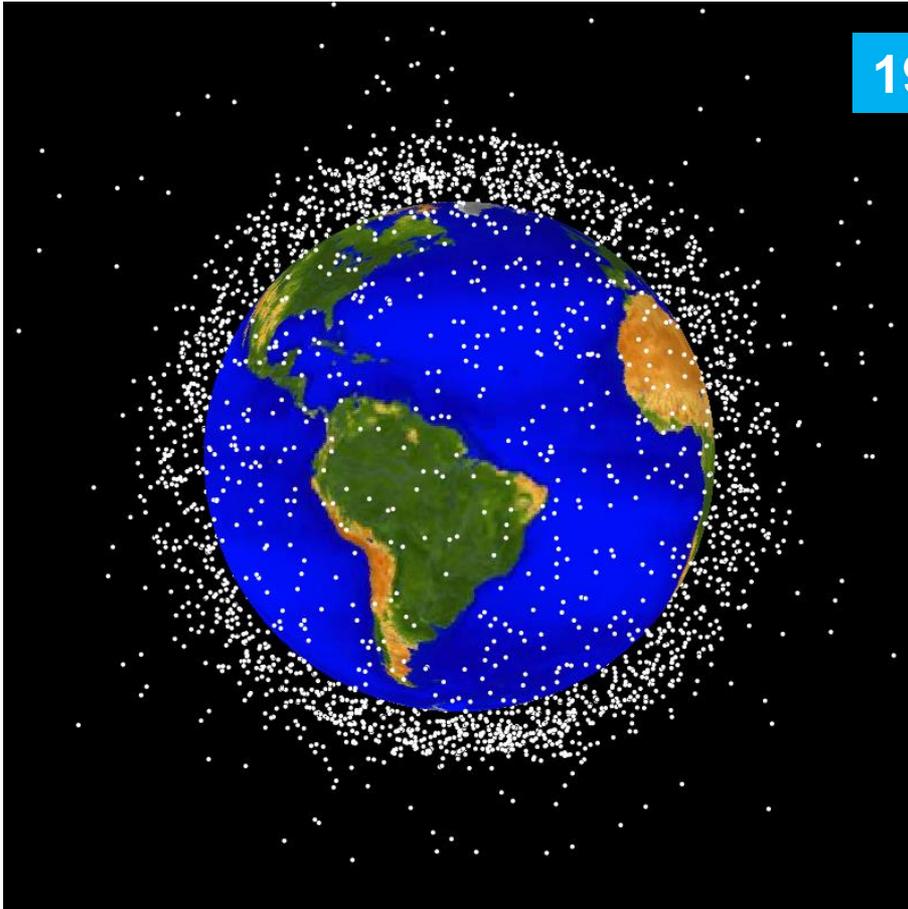
1970



Objets catalogués >10 cm diamètre en orbite basse, >1 m en Géostationnaire

Evolution de la population orbitale

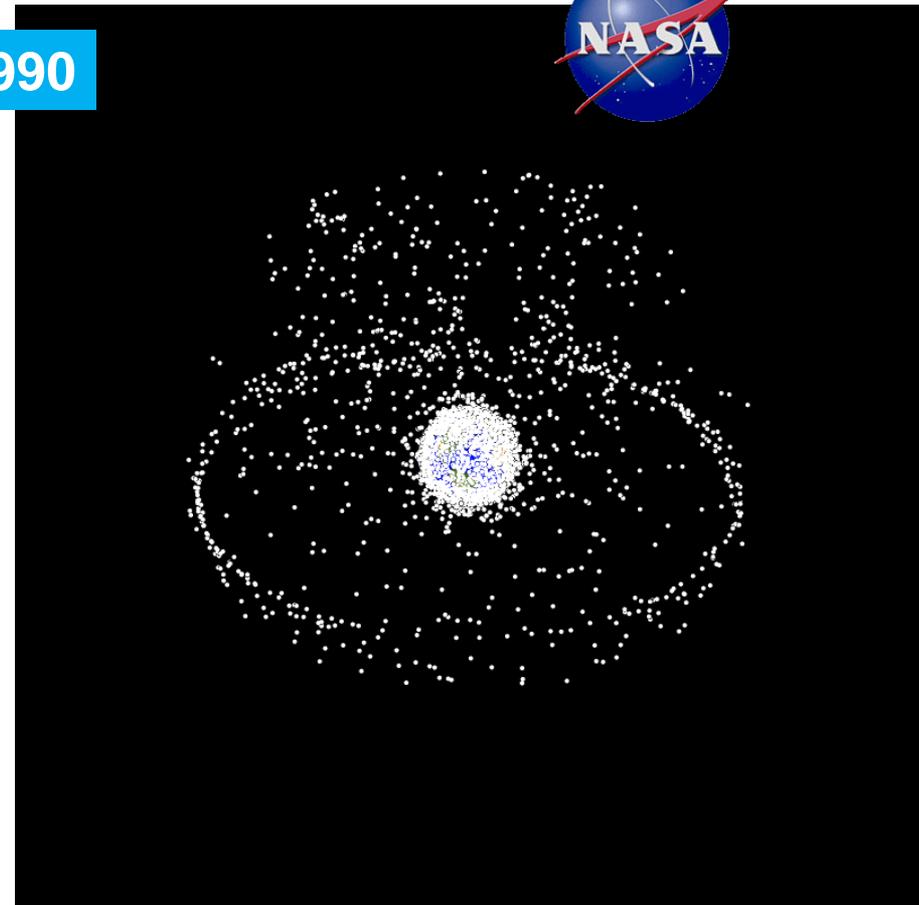
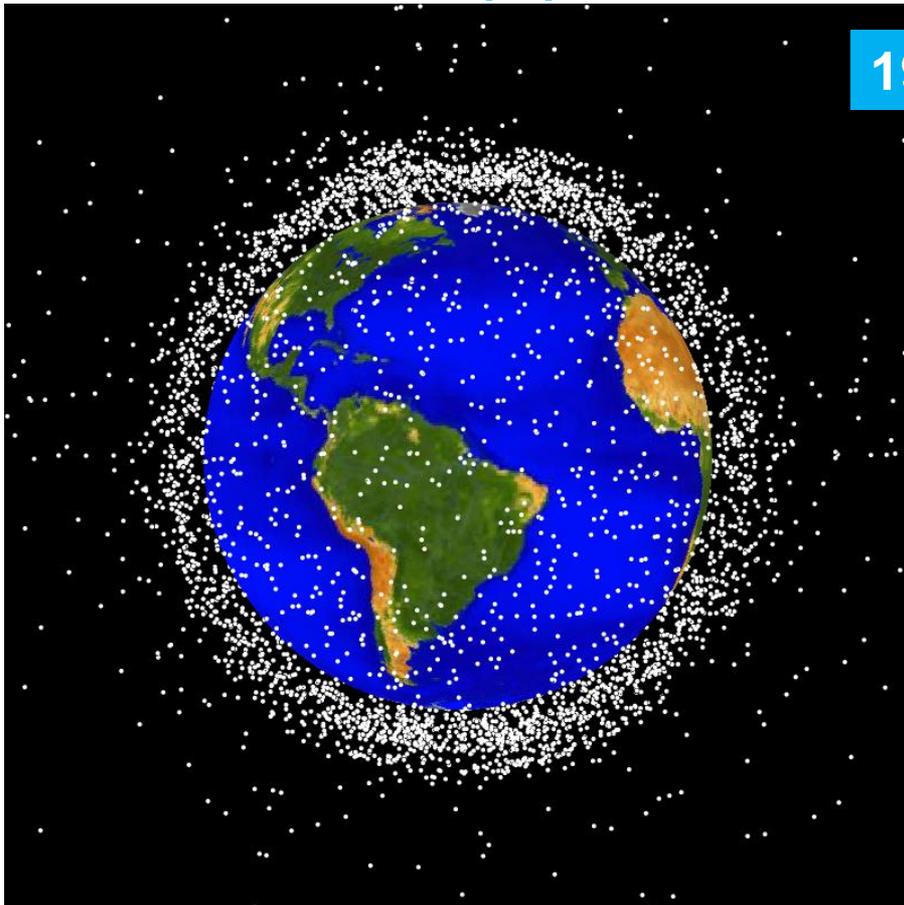
1980



Objets catalogués >10 cm diamètre en orbite basse, >1 m en Géostationnaire

Evolution de la population orbitale

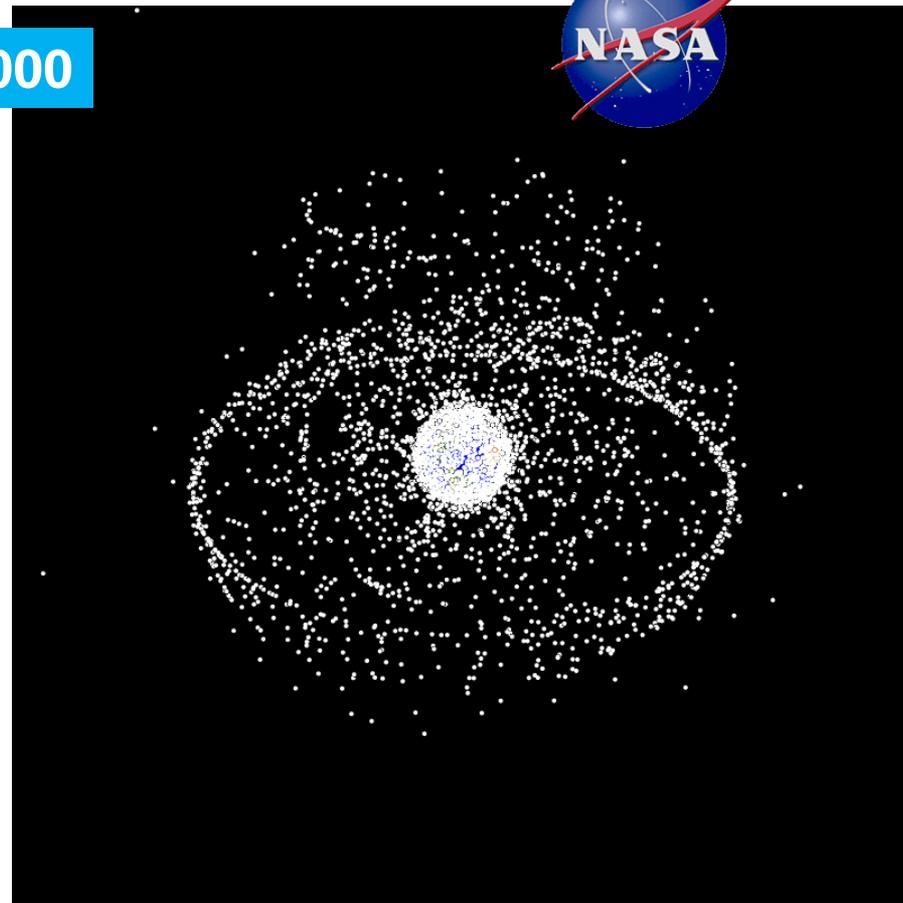
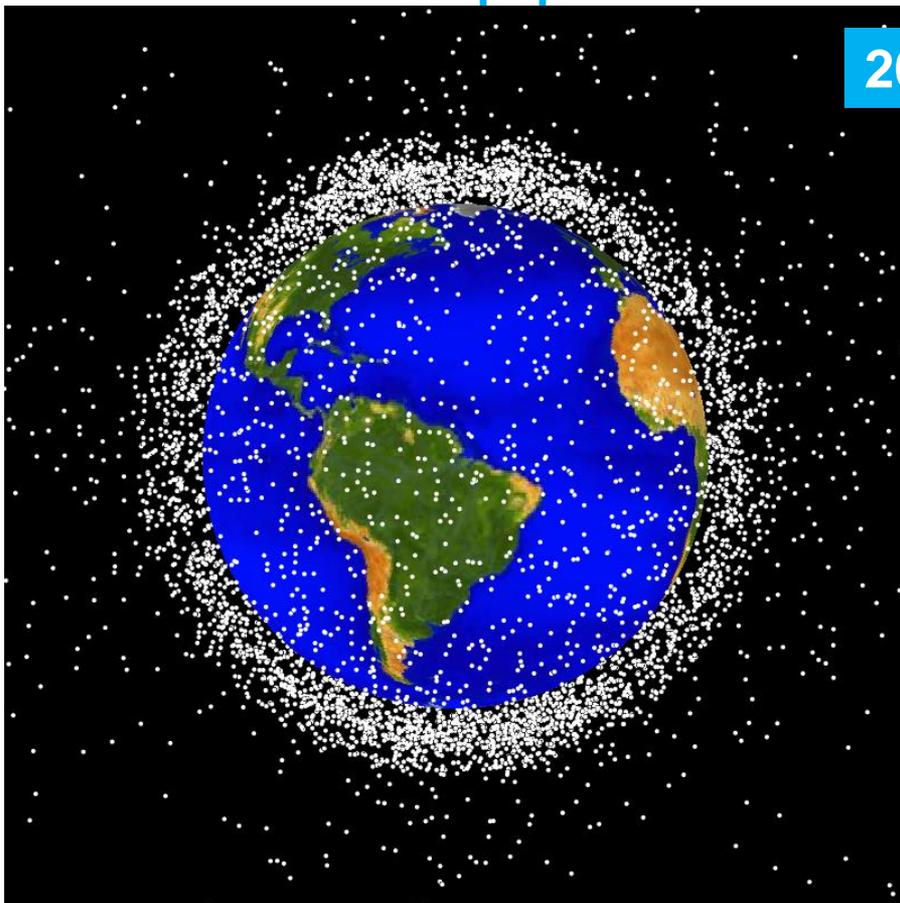
1990



Objets catalogués >10 cm diamètre en orbite basse, >1 m en Géostationnaire

Evolution de la population orbitale

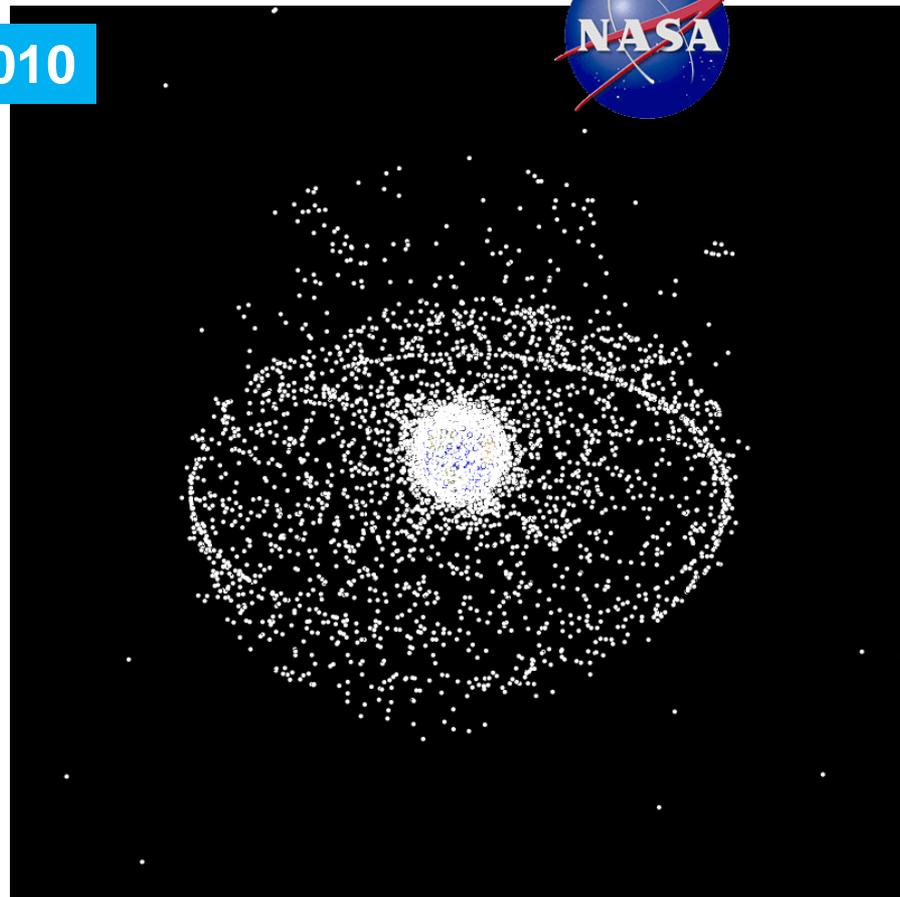
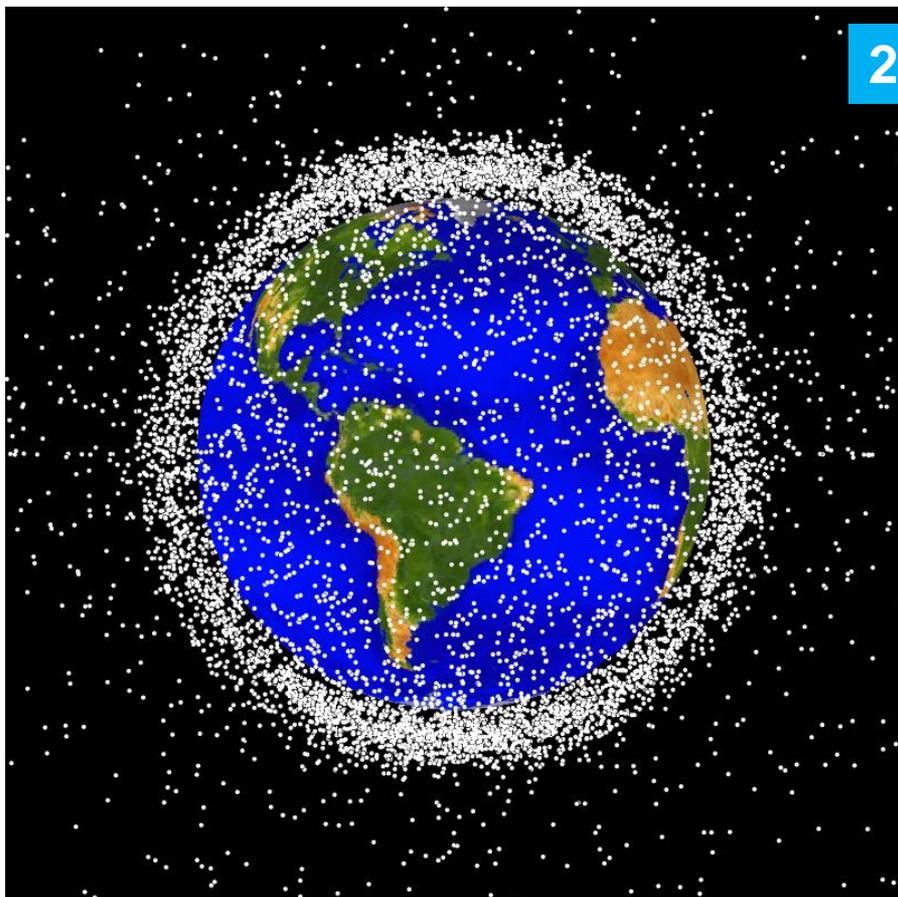
2000



Objets catalogués >10 cm diamètre en orbite basse, >1 m en Géostationnaire

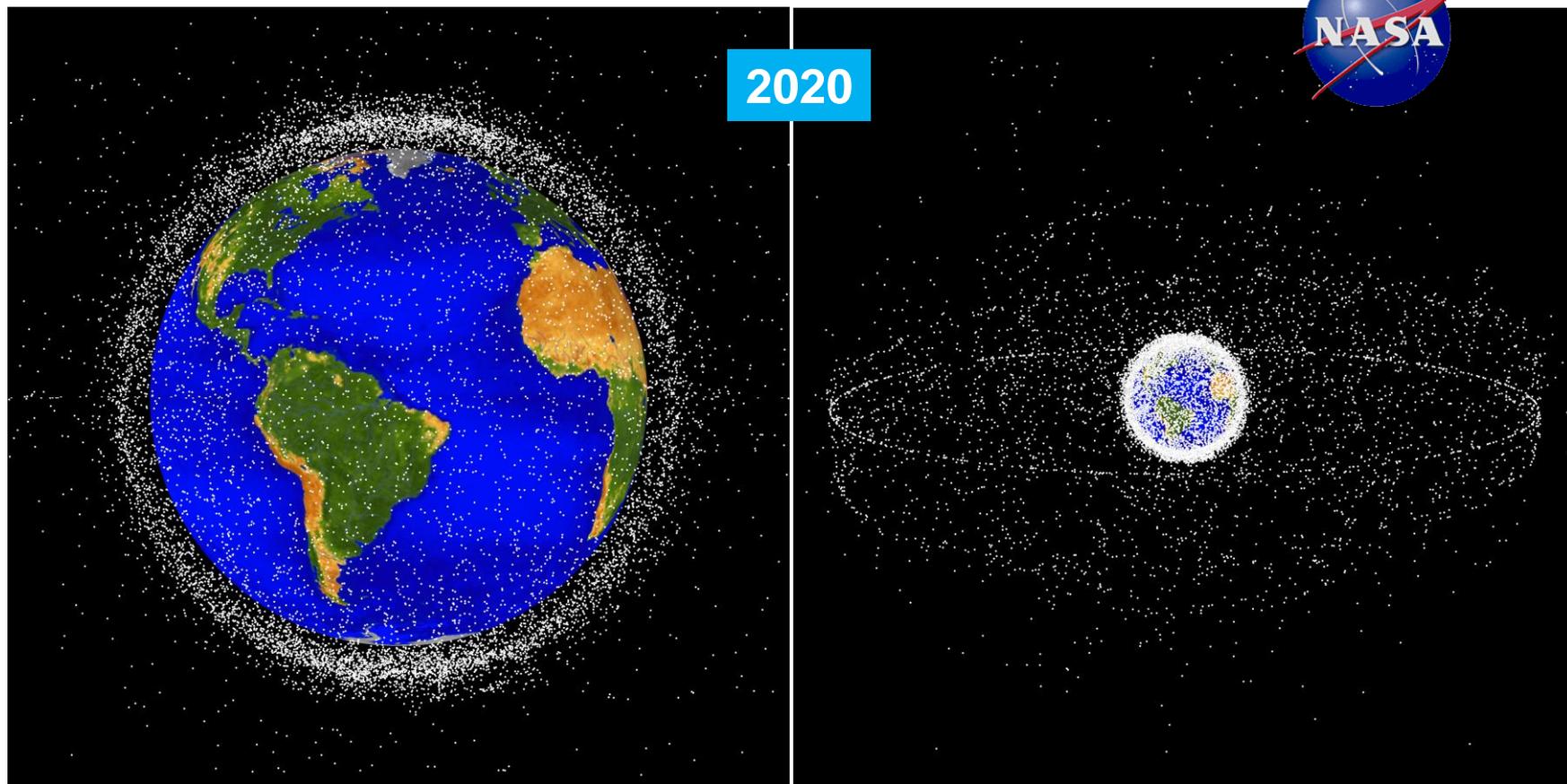
Evolution de la population orbitale

2010



Objets catalogués >10 cm diamètre en orbite basse, >1 m en Géostationnaire

Evolution de la population orbitale



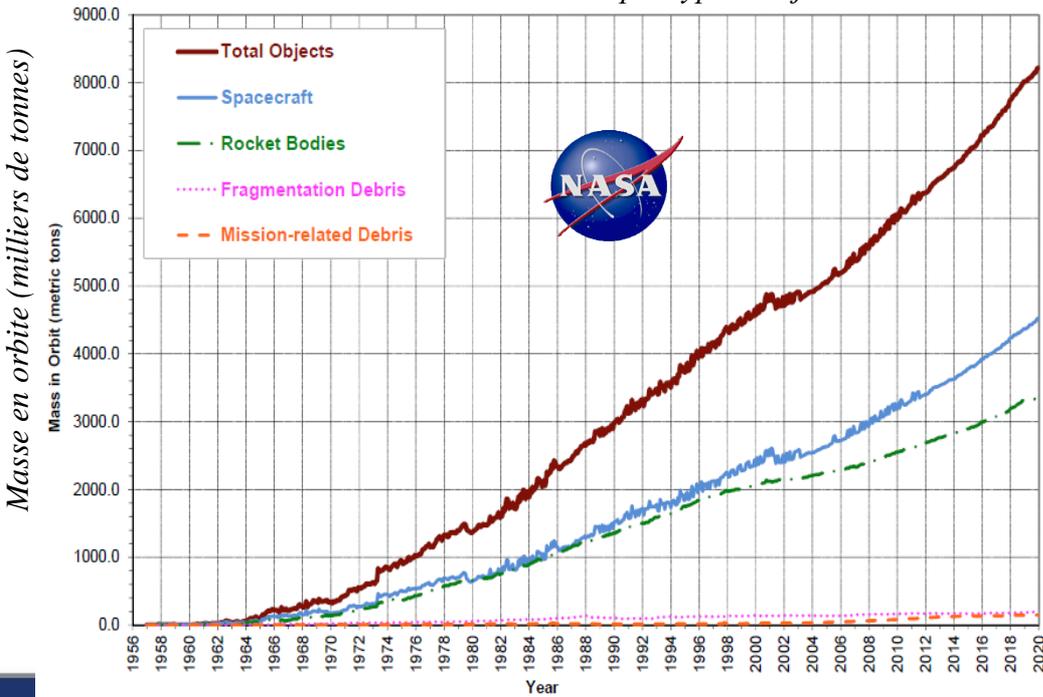
Objets catalogués >10 cm diamètre en orbite basse, >1 m en Géostationnaire

Nota : la taille des points a diminué, sinon on n'y verrait plus rien...☺

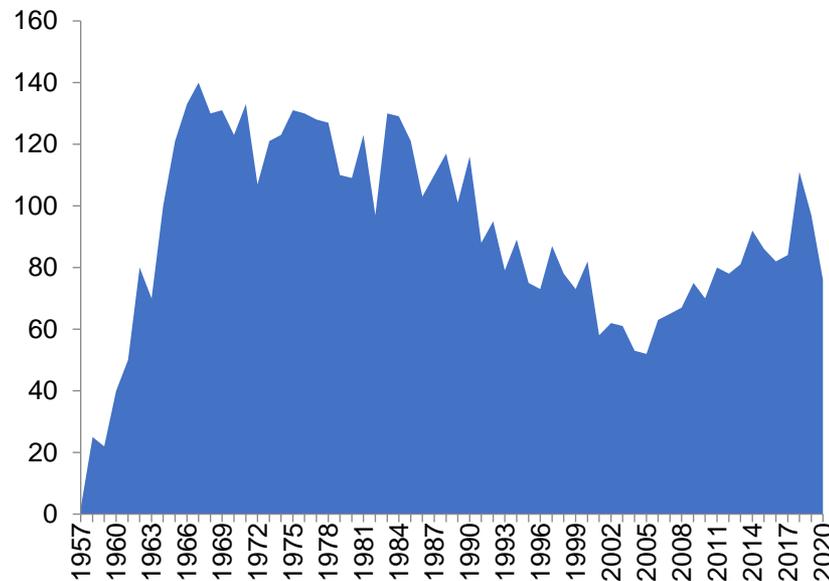
La masse des objets en orbite augmente continûment depuis 1957

- Principalement en orbite basse (Région A = ≤ 2000 km, $\forall i$)
- De façon significative en orbite géostationnaire (Région B = GEO ± 200 km $\pm 15^\circ$)
- Malgré la diminution du nombre de vols orbitaux par rapport aux années 70-80
- Malgré la réglementation depuis 1995 - 2002

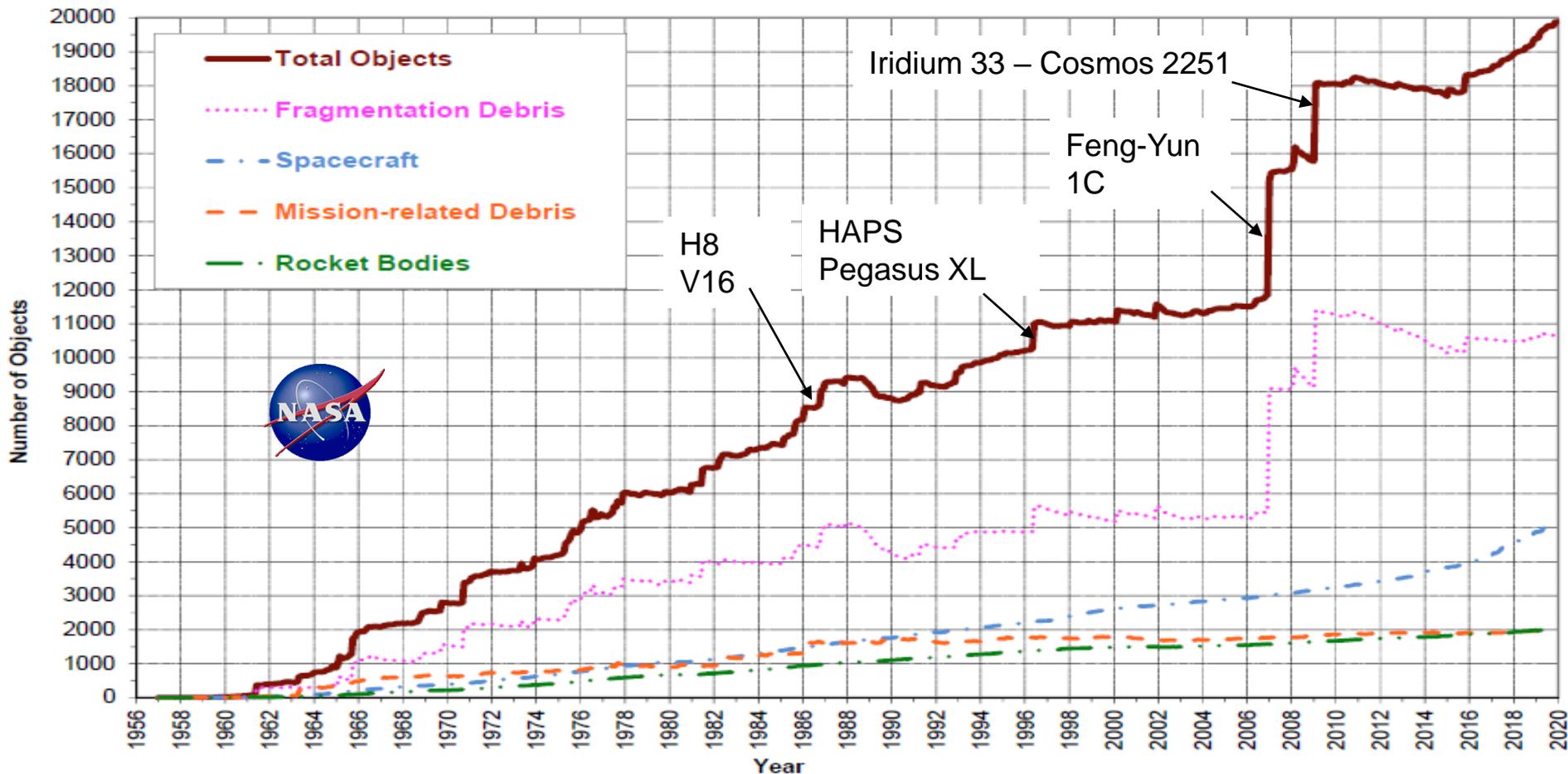
Evolution de la masse en orbite par type d'objet



Nombre de vols orbitaux réussis par an
(2020 : 76 à ce jour)



Nombre d'objets catalogués en orbite

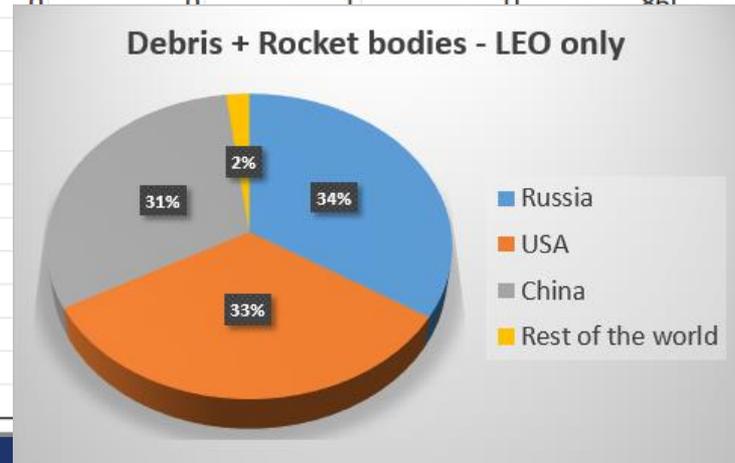


Contribution de la France

Attention : Tous satellites, dont vieux (débris)

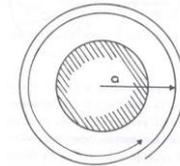
- 4^{ème} contributeur après Russie, USA, Chine, sur 85 pays ou organisations
- Mais contribution globalement très faible : 3% des objets en orbite

01.10.20 Pays	En Orbite				Rentrés				Total par pays
	Satellite	Lanceur	Débris	Total	Satellite	Lanceur	Debris	Total	
Total	6053	2246	12964	21419	3539	3938	17585	25062	46481
USA	2490	714	4191	7409	1170	700	4615	6485	13894
CIS (ex USSR)	1542	1047	4510	7103	2053	2873	10368	15294	22397
Chine	431	174	3574	4211	96	173	1157	1426	5637
France	69	164	347	580	10	79	652	741	1321
Japon	187	61	122	370	65	66	184	315	685
Inde	100	37	86	223	12	25	436	473	696
ESA	92	7	50	149	12	7	21	40	189
Royaume Uni	124	1	1	126	12	0	4	16	142
Intelsat	91	0	1	92	1	0	0	1	93
Globalstar	84	0	1	85	0	0	1	1	86
Globalstar Orb	58	0	10	68					
Allemagne	66	0	1	67					
SES	61	0	0	61					
Canada	56	0	5	61					
Eutelsat	56	0	0	56					
Chine-Brésil	4	0	49	53					
Sea Launch	1	30	3	34					
Italie	30	2	0	32					
Espagne	28	0	0	28					
Corée du Sud	25	1	0	26					
Argentine	24	0	1	25					
Australie	21	2	0	23					



Les objets en orbite basse finissent par retomber sur Terre

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



- **L'atmosphère, même très faible à haute altitude, freine et fait descendre en spirale :**

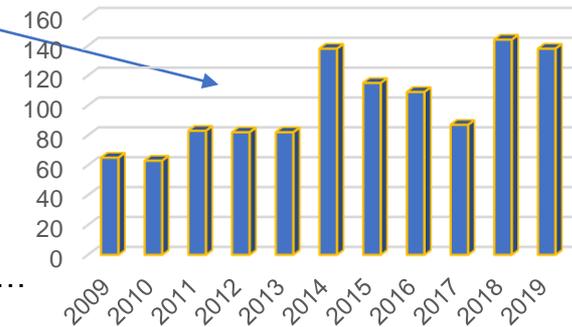
- ⇒ 1 objet de plus de 10 cm rentre chaque jour (426 par an en moyenne depuis 2008)
- ⇒ 2+ objets intègres (satellite ou étage supérieur) rentrent chaque semaine

- **Ces objets brûlent dans l'atmosphère, mais pas complètement :**

- ⇒ 10 à 40% de la masse survit à la rentrée et impacte la surface du globe

- **Pas moyen de prédire avec précision le point d'impact :**

- ⇒ . 10 jours avant la rentrée : précision de ± 1 jour ≡ 28 orbites ≡ 1.120.000 km
- . 1 jour avant la rentrée : précision de ± 2.4 heures ≡ 3 orbites ≡ 120.000 km...

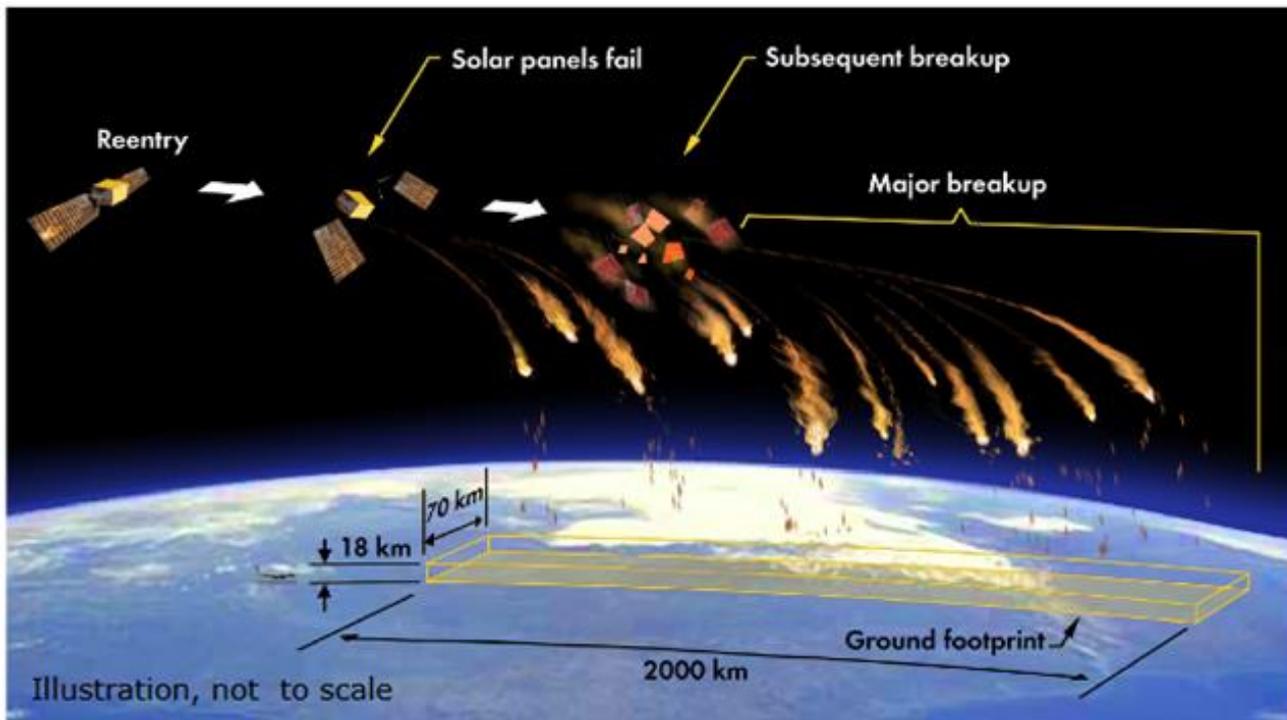
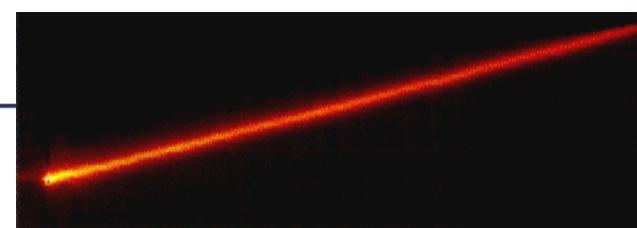


- **Heureusement : pas de victime recensée à ce jour !**



Rentrée atmosphérique incontrôlée

- Fragmentation par l'effet de la pression dynamique $\propto V^2$
- Fusion partielle par l'effet de flux thermique $\propto V^{3,15}$
- Séquence typique de rentrée :



© The Aerospace (USA)



RE-ENTRY OF RUSSIAN SATELLITE
COMOS 1315

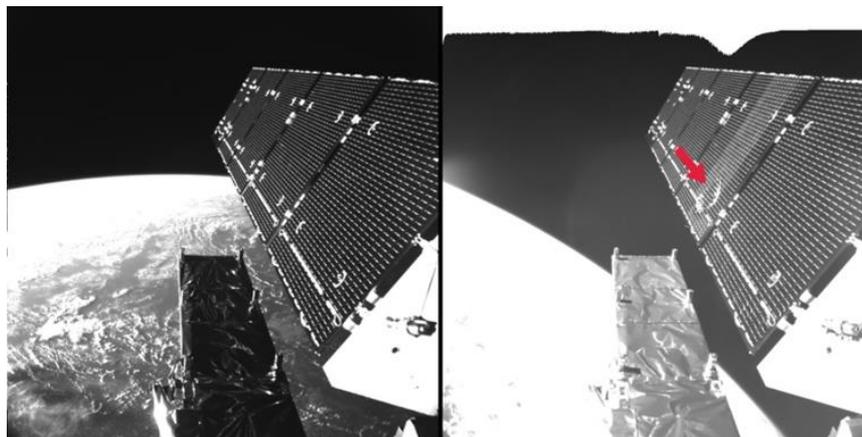
KAILUA KONA, HAWAII , AUGUST 30TH, 2015



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

Une collision en orbite peut détruire un satellite actif

- **L'énergie de l'impact est très élevée, en raison de la vitesse orbitale ($\cong 30.000$ km/h)**
 - ⇒ un débris en aluminium de 1 mm de rayon = 1 kJ = boule de bowling à 100 km/h
 - ⇒ un débris en acier de 1 cm de rayon = 1 MJ = Laguna à 130 km/h
- **Un petit débris peut faire perturber le fonctionnement d'un satellite**
 - ⇒ la probabilité de perte d'un satellite est environ 5 à 8% sur sa durée de vie
- **Un gros débris peut exploser littéralement un satellite et générer un nuage de nouveaux débris**



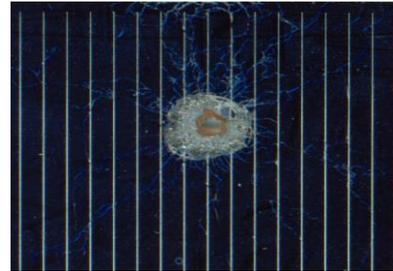
Impact sur un panneau solaire de Sentinel 1A (23.08.2016)

Exemples de petits impacts

Protection thermique FGB
6 cm de long

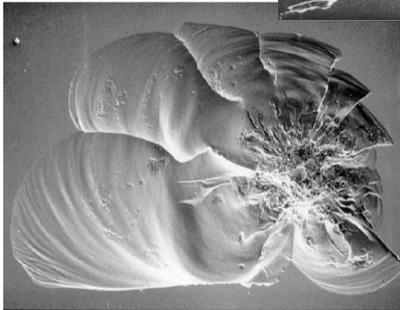
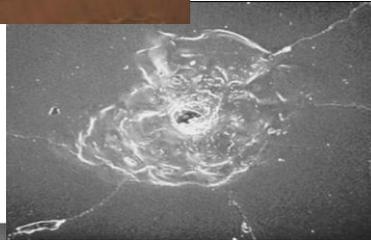


Panneau solaire de Hubble
Φ 10 mm

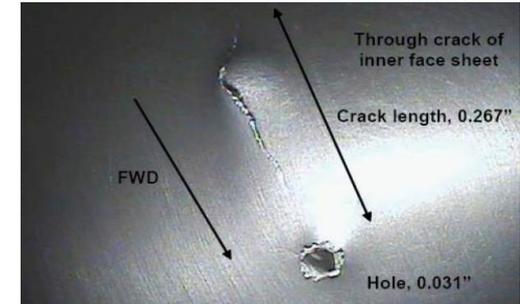
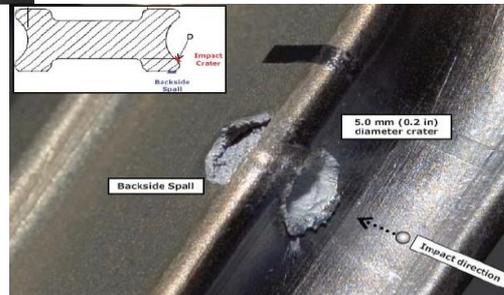


Radiateur ISS
Déchirure sur 7 mm

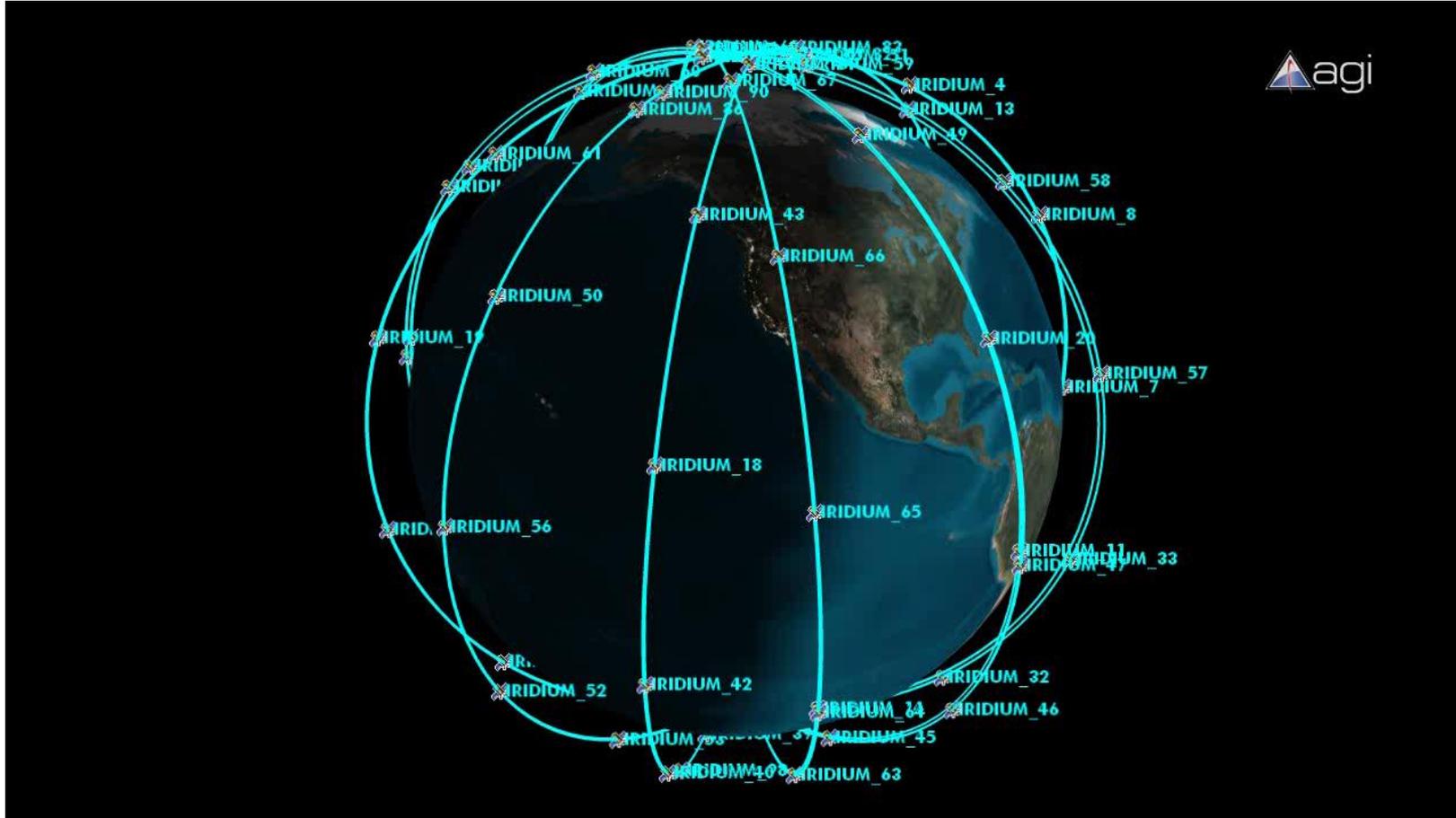
Fenêtre Navette
Φ 12 mm



Poignée sur l'ISS



Exemple de gros impact : Iridium 33 – Cosmos 2251



© AGI

Une augmentation incontrôlable du nombre de débris est redoutée en orbite basse

- **Deux phénomènes antagonistes :**

1. Génération de nouveaux objets orbitaux (lancement, explosions, collisions...) : 698 en 2019
 2. Nettoyage dû à l'atmosphère qui fait retomber les objets et retraits actifs : 321 en 2019
- ↪ Augmentation de la population quand $1 > 2$



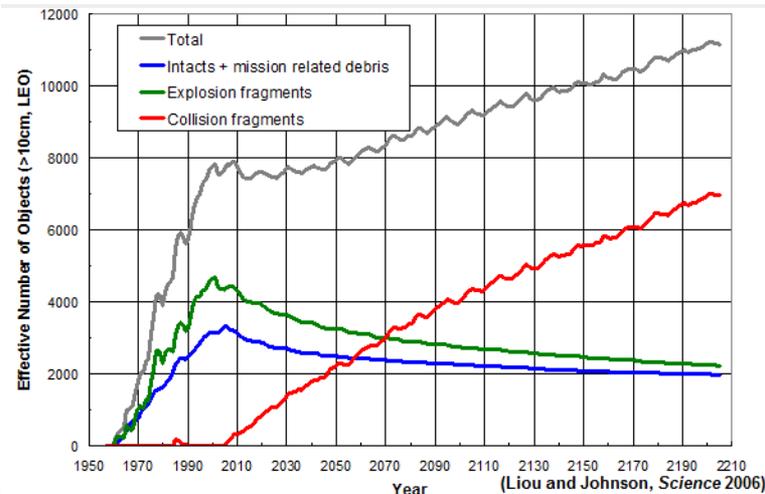
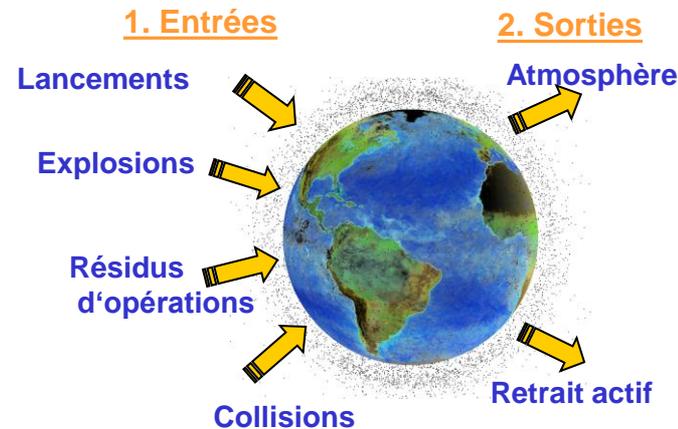
- **Si on ne considère que la part collision entre objets déjà en orbite**

- ↪ Si $1 > 2$ alors réaction en chaîne (Effet « Gravity »)
- ↪ Phénomène connu sous le nom de “Syndrome de Kessler” (identifié en 1979, quantifié en 1992)

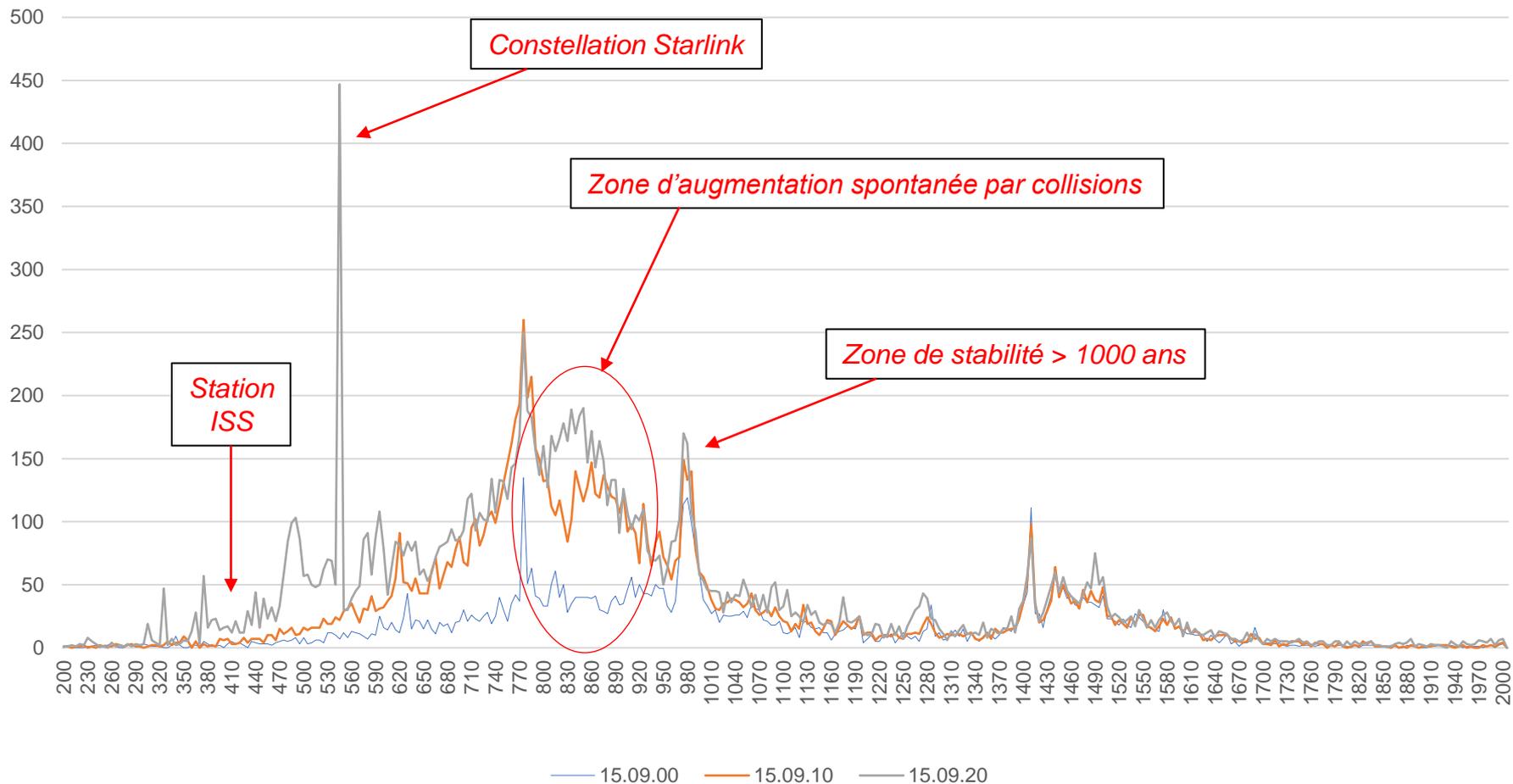
- **Actuellement observé entre 700 et 1.100 km d'altitude**

- **Exemple de simulation NASA**

Plus de lancement à partir de 2006
 Les collisions prennent le dessus vers 2008
 Augmentation exponentielle à long terme



Nombre d'objets catalogués fonction de l'altitude



Il est fondamental de respecter la réglementation en vigueur

1. Court terme

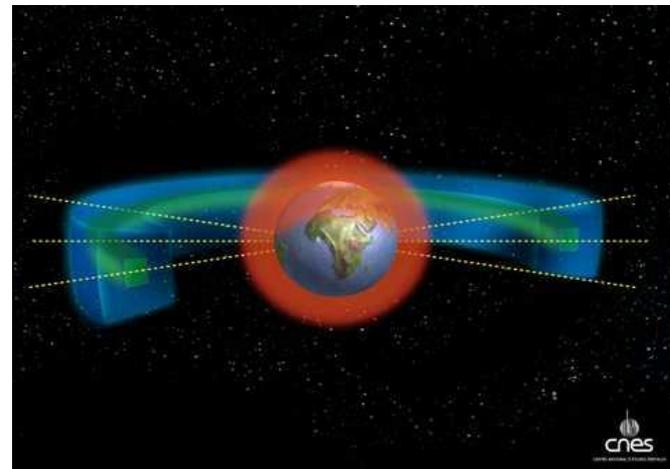
- Pas de génération de débris en connaissance de cause : pas de destruction volontaire en orbite
- Éviter les explosions en orbite : passiver en fin de mission
- Deux zones protégées (LEO, GEO) : règle des 25 ans
- Éviter les collisions quand c'est possible
- Minimiser le risque de victimes au sol

2. Long terme

- Désorbitation systématique ou libération

Très grand nombre de documents applicables :

- Standards Nationaux (NASA 1995, CNES 1999),
- IADC Guidelines (2002),
- UN Guidelines (2007),
- European Code of Conduct (approuvé ASI-BNSC-CNES-DLR-ESA 2004),
- Standard ISO 24113 et documents associés (2010),
- Loi spatiale Française LOS (approuvée 2008, applicable depuis Dec.2010).



↪ **Réglementation malheureusement très mal respectée**

Eviter les collisions quand cela est faisable

- **Possibilité d'évitement de collision si l'un des deux objets est actif et manœuvrant :**

- Propagation dans le temps des orbites des objets catalogués

- Identification des risques de rapprochements

- Messages d'alerte provenant du JSpOC (USA) ou de nos radars

- Décision de manœuvre si le risque est avéré

- ↳ Permet d'éviter la perte d'un satellite opérationnel

- **Activité fondamentale du Centre d'Orbitographie Opérationnelle du CNES à Toulouse**

- Nombreux moyens radars et télescopes en appui de nos décisions

- Service anticollision CAESAR du CNES : 1^{er} du genre en Europe !

- **Analyse du risque de collisions à chaque vol depuis Kourou**

- **Mais protection partielle seulement (catalogués), et activité très chronophage**

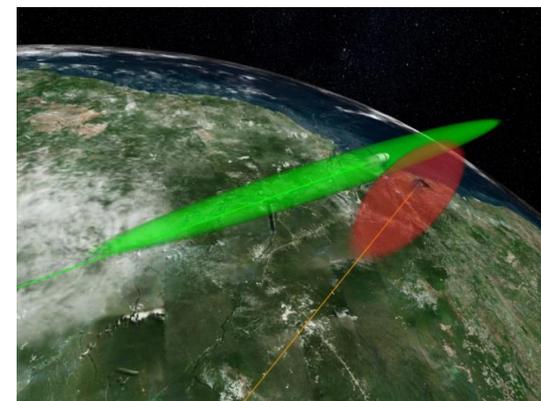
- 14% seulement de collisions mettent en œuvre un satellite manœuvrant

- Exemples en 2019 :

- CNES : 3 millions de « conjonctions » traitées en LEO, 17 manœuvres

- Station Spatiale Internationale : 5 manœuvres depuis le début de l'année !

- En moyenne, 1 manœuvre par an par satellite dans le Monde



© AGI



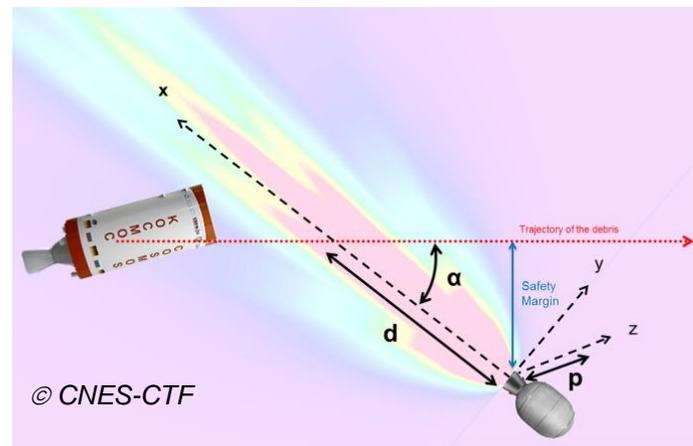
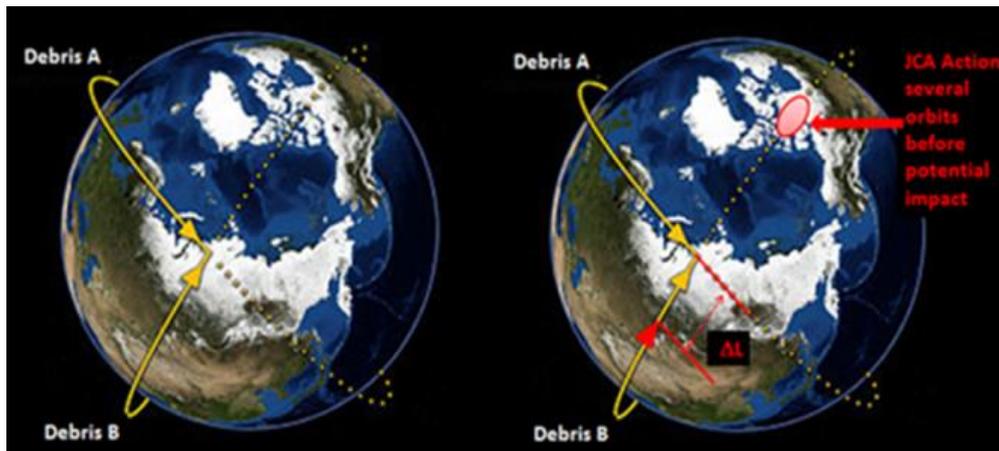
Évitement « Juste à Temps » de Collisions JCA

- Action “tactique” pour éviter une collision entre gros débris non-manoeuvrants

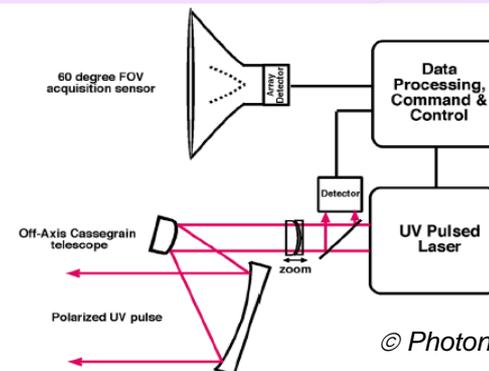
Légère modification de la trajectoire d'un des débris
 ($\Delta V = 4 \text{ mm/s}$, 24 h avant collision, induit une Marge = 1 km)

Plusieurs solutions prometteuses à l'étude aujourd'hui :
 Atmosphère artificielle devant le débris pour le freiner
 Nuage de particules devant le débris
 Laser orbital
 Concept de LDTM (Large Debris Traffic Management)

© CNES-CTF



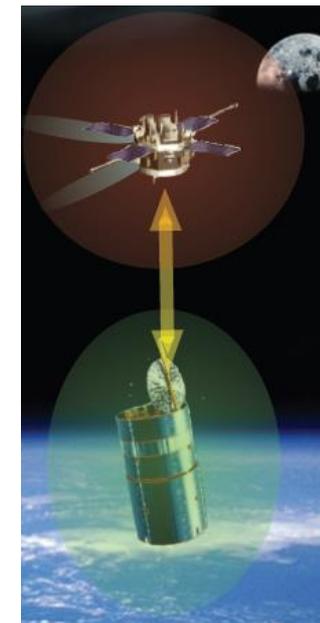
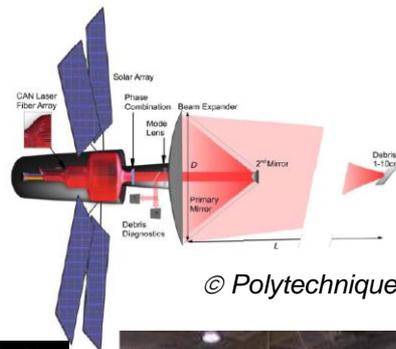
© CNES-CTF



© Photonics-CNES

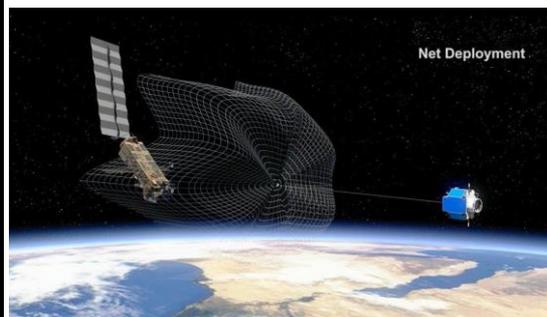
Retrait Actif de Débris ADR

- Mesure efficace pour limiter la prolifération des débris :**
 Si on respecte par ailleurs la réglementation en vigueur !
- Retrait de 5 à 10 gros débris par an**
 Très nombreuses solutions techniques (bras robotiques, harpons, filets, câbles, lasers...)
 - A l'étude depuis plus de 10 ans
 - Démonstrateurs orbitaux en cours
 - Forte synergie avec les remorqueurs spatiaux
- Nombreux problèmes...**
 Financiers, juridiques, militaires...
 Nombreuses études et start-ups !



© Uni Colorado

© MDA



© Airbus DS



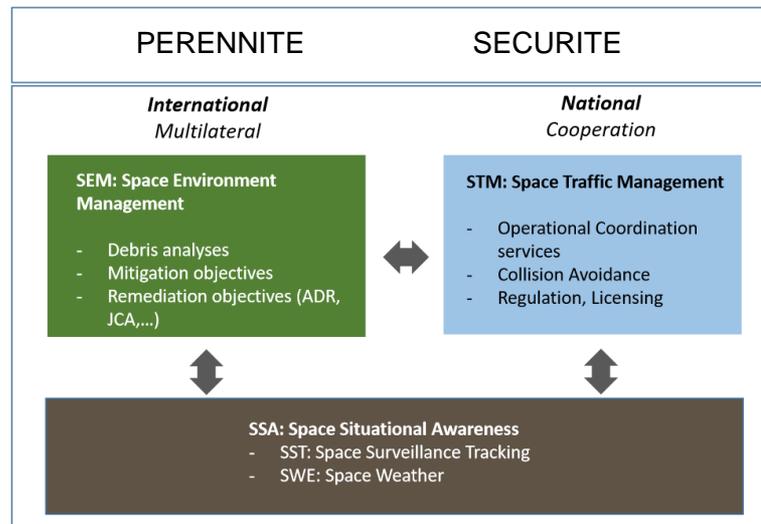
© GlobalAerospace

© ClearSpace - EPFL



Principal problème rencontré aujourd'hui : Précision des orbites

- Logique générale au niveau international :

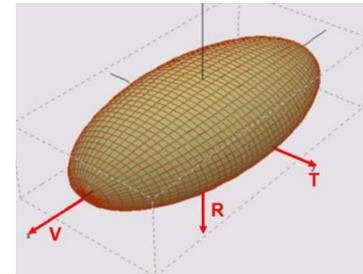


- On travaille sur la **Gestion du Trafic Spatial STM** et sur la **Gestion de l'Environnement Spatial SEM**

- Pour cela, il est indispensable d'avoir une très Connaissance de l'Etat de l'Espace SSA
- La brique de base est la Surveillance de l'Espace et le Suivi des Objets Spatiaux SST

- **Double action :**

- Améliorer la détection et le suivi des objets spatiaux (actuellement taille > 10 cm en orbite basse)
- Améliorer la précision de leurs orbites (actuellement $\approx \pm 1$ km sur V, ± 300 m sur R et T, à 1σ)



Radars

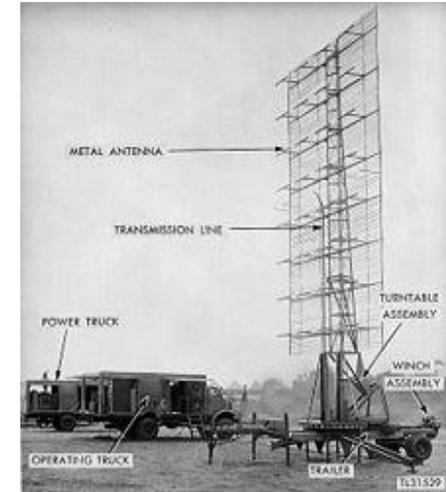
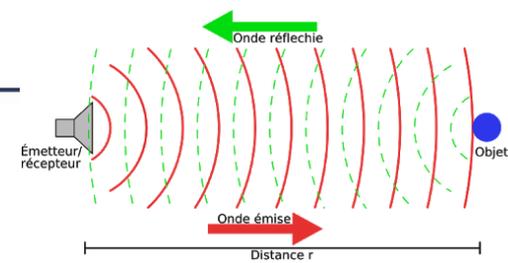
- Principe connu depuis la 2nde guerre mondiale : émission d'une onde électromagnétique, réflexion sur une cible, réception

- Gamme très variée de radars

- Conventionnels sur une monture Azimut - Elévation, ou Radar à Synthèse d'Ouverture SAR
- Monostatique (émetteur et récepteur identiques) ou Bistatique (deux sites distincts)
- Très large gamme de longueurs d'onde utilisables
- Emission continue ou pulsée
- Distance ($\equiv \Delta$ temps) et/ou Vitesse ($\equiv \Delta$ fréquence)

- Très bien adaptés aux Orbites Basses

- Performance varie en $\frac{1}{D^4}$ \Rightarrow Hautes performances à basse altitude
- Réflexion de l'onde quelle que soit la vitesse \Rightarrow Adapté aux objets rapides

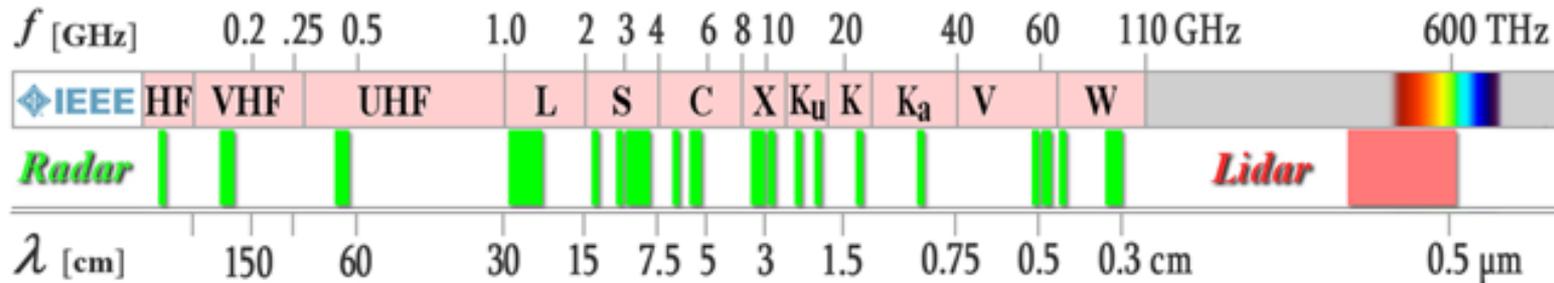


Radar SCR-270 de l'USArmy 1939



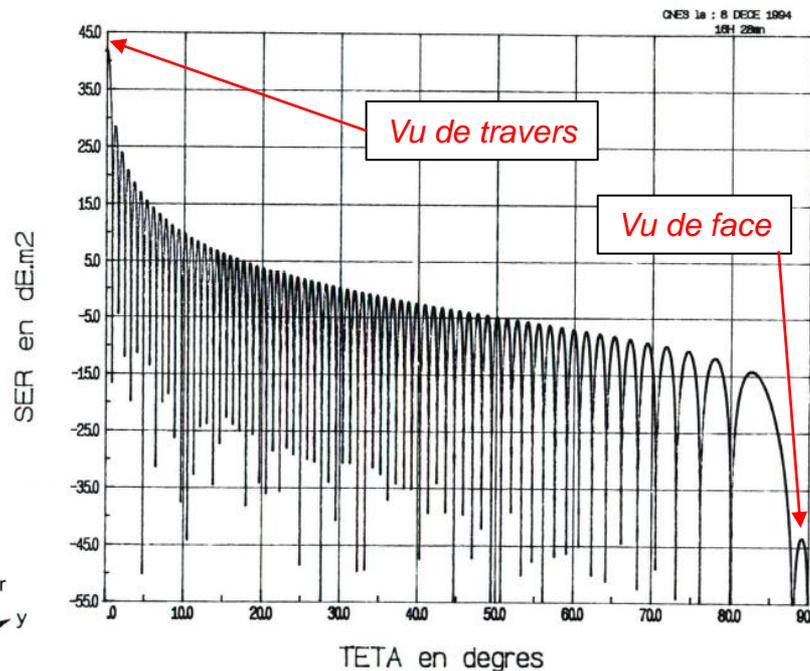
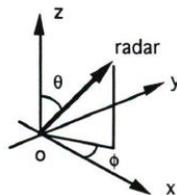
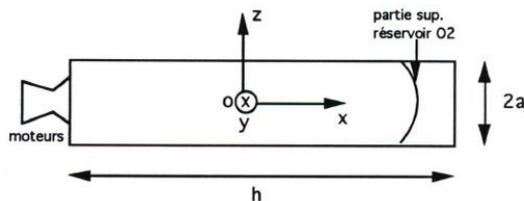
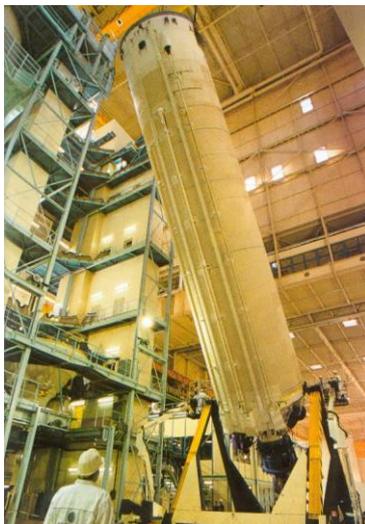
Radars

- Performance fonction de la SER, Surface Equivalent Radar
- Fonction de la taille de l'objet, matériaux, forme, orientation
 - Très forte SER pour les objets métalliques
 - Faible pour les matériaux amorphes (protection thermique, mousses, ...)
- Fonction de la longueur d'onde
 - La longueur d'onde doit être inférieure à la taille de l'objet à observer



Radars

Exemple : observation de l'étage principal EPC d'Ariane 5 à l'aide d'un radar UHF
(Diamètre étage 5,4 m, longueur 25 m – 50 MHz – Longueur d'onde 6 m)



SER fonction de l'angle d'aspect

Radars

Exemple : grand radar conventionnel



Radars Haystack (droite) et HAX (gauche), Millstone Hill, Westford (USA) opéré par le MIT pour la NASA



*Coupe du radar Haystack
Parabole de 37 m de diamètre
Bandes X et W (3 et 0.3 cm)*

Haystack et HAX sont les sources principales d'informations de la NASA pour les débris de plus de 1 cm

Radars

Exemple : grand radar à synthèse d'ouverture SAR



*Radar SAR de Thule (USA)
Bande UHF (60 cm) – Portée 5000 km*



*Radar SAR Don-2N (Russie)
Bande S (7,5 cm)*

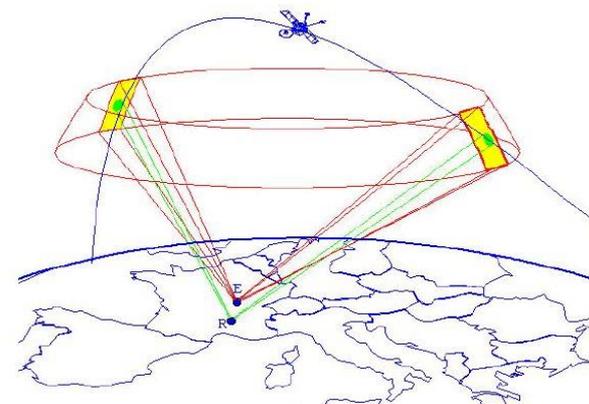
Ces radars sont essentiellement dédiés aux gros objets et utilisés pour le Catalogue

Radars

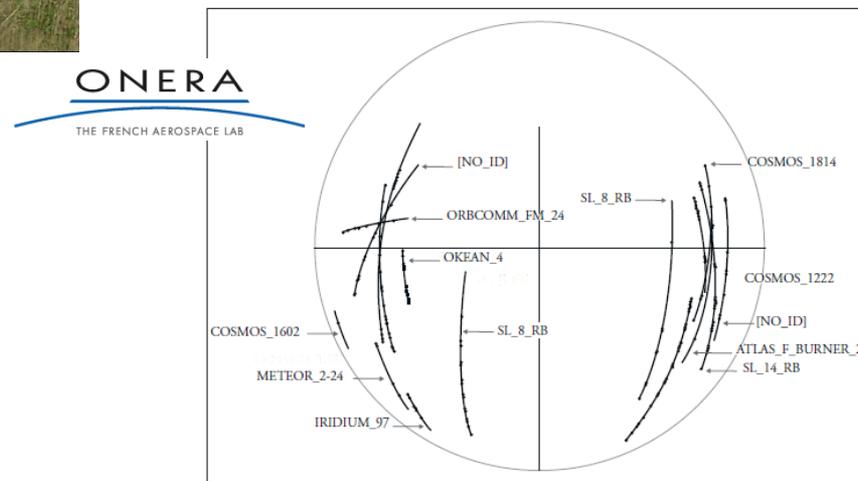
Exemple : grand radar bistatique à synthèse d'ouverture SAR
GRAVES = Grand Réseau Adapté à la Veille Spatiale (France)
143 MHz – 2 m



Sites d'émission (haut) et de réception (bas)

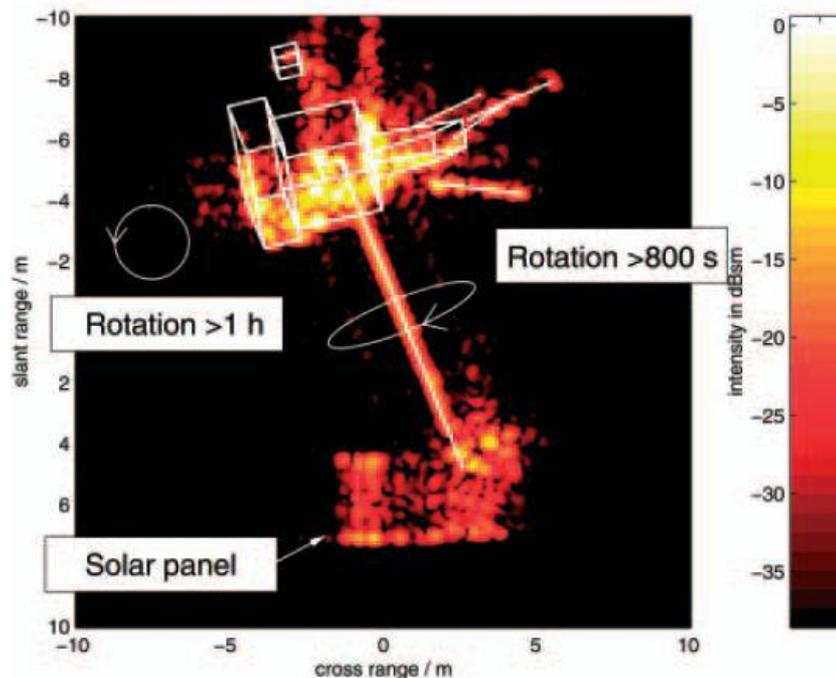


Principe d'observation (haut)
Résultat post-traitement typique (bas)



Radars

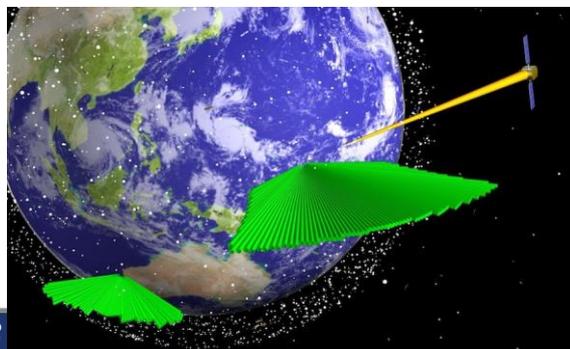
Exemple : grand radar imageur TIRA = Tracking and Imaging Radar, FGAN (Wachtberg, Allemagne)



TIRA : Parabole de 34 m de diamètre (radôme de 47 m !) – Bandes L et Ku (20 et 2 cm)
Exemple de l'observation du mouvement du satellite japonais ADEOS

Radars

Exemple : Nouveau grand radar bande S (?) à synthèse d'ouverture Space Fence
Déployé à Kwajalein (mi-Pacifique) – 1,6 milliards...
Potentiellement capable de suivre des objets de > 3-4-5 cm, (encore à confirmer)
Second radar en Australie ?



Radars

Exemple : radars privés - LeoLabs

Nouveau business : radars privés, vente des informations comme entrées pour le catalogue

LeoLabs pionniers en la matière

KSR Kiwi Space Radar (à gauche) bande S installé en Nouvelle-Zélande

MSR Midland Space Radar (à droite) bande UHF, au Texas



Télescopes

- Principe connu depuis le début du XVII^{ème} siècle

→ Lunettes, ou télescopes (en pratique télescopes...)

- Collecte la lumière du soleil réfléchi par la cible

→ Performance fonction de l'Angle d'Aspect Solaire

Peut nécessiter de longues périodes d'observation

Adapté aux cibles à basse vitesse

→ Performance fonction de l'ouverture (diamètre) de l'optique

→ Performance fonction de la réflectivité optique (albedo) de l'objet

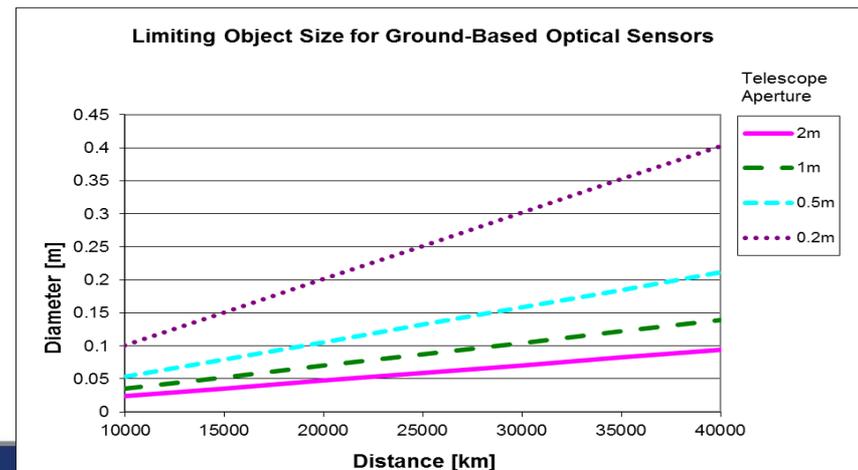
→ Montures Azimut - Elévation ou Nœud Ascendant - Déclinaison

- Très bien adapté aux orbites élevées, particulièrement Géostationnaire

→ Performance varie en $\frac{1}{D^2}$

⇒ Hautes performances aux altitudes élevées

→ Fonctionne bien en orbite basse également
mais nécessite une monture rapide ($1^\circ/s$)



Télescopes

Exemples de télescopes dédiés au suivi d'objets spatiaux



1,8m PanSTARRS, Maui, USA



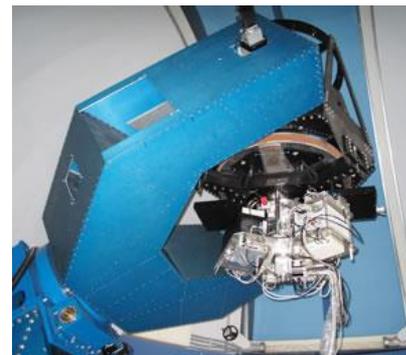
ESA 1m Space-Debris telescope, Tenerife



Zimmerwald Small Aperture Robotic
Télescope, Suisse



OKNO optical complex – 10 télescopes, Russie

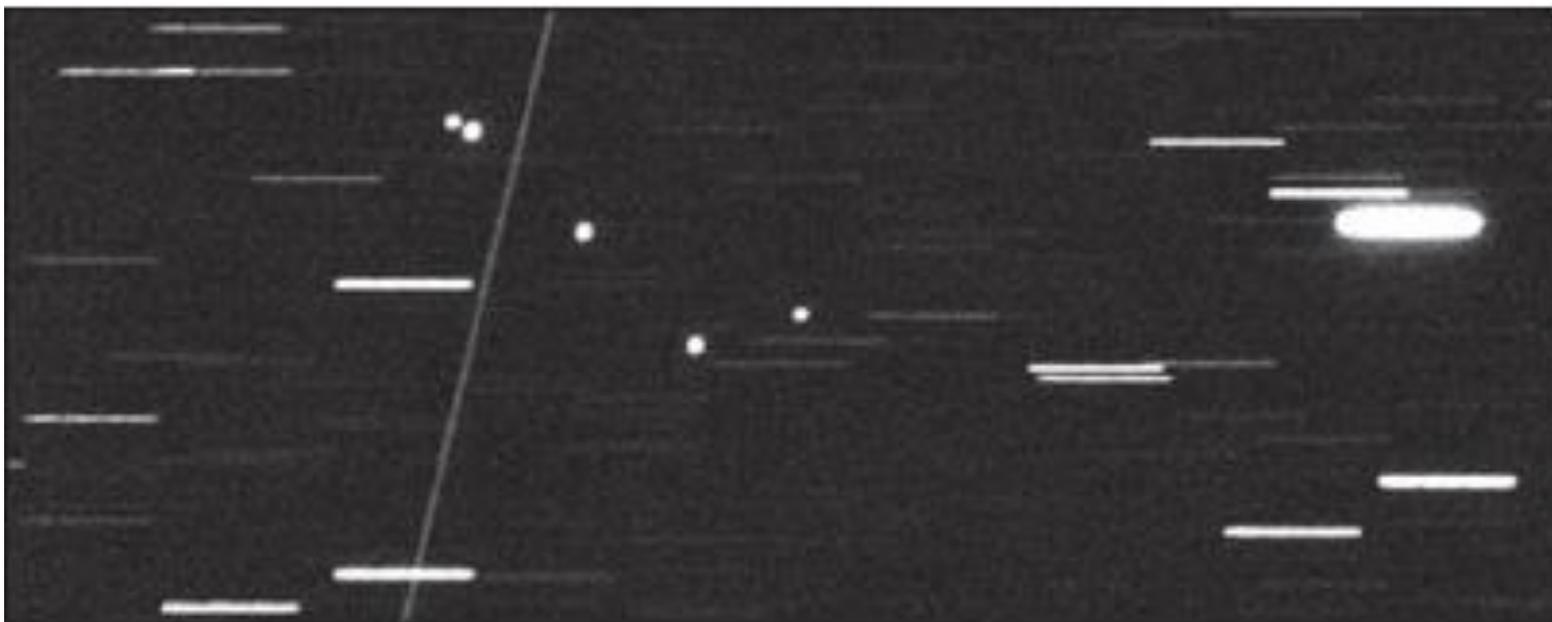


BSCG 1m télescope, Japon

Télescopes

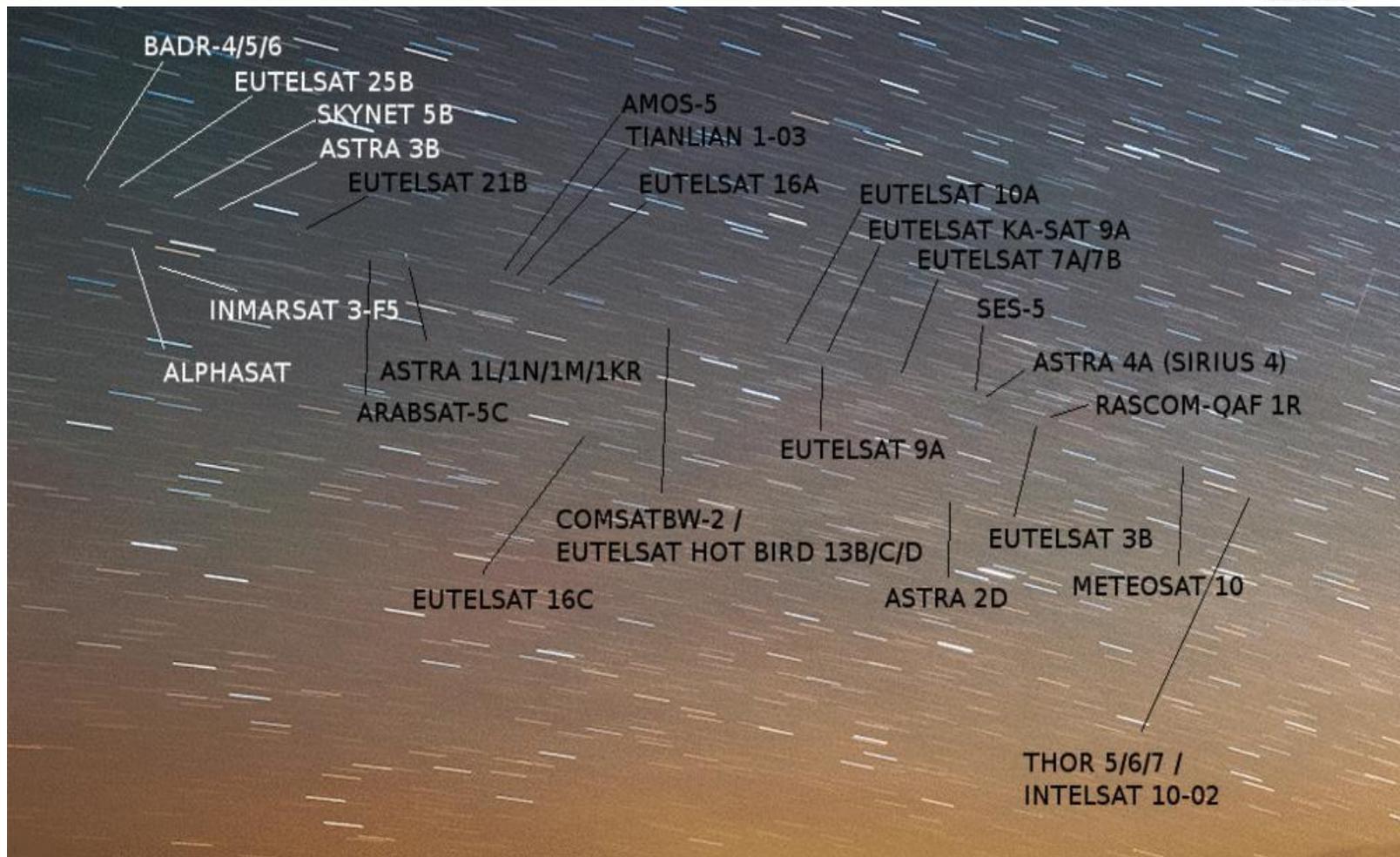
Exemple de télescopes dédiés au Géostationnaire

- . 3 (bientôt 4) télescopes TAROT = Télioscope à Action Rapide pour les Objets Transitoires (France)
- . Distribués géographiquement pour couvrir 270° (360°) de l'arc géostationnaire



© Pascal Richard - CNES

Les objets Spatiaux en GEO apparaissent fixes, avec les étoiles qui se présentent comme des segments



Télescopes

- Exemple de l'utilisation d'un télescopes pour suivre un débris

- . Suivi d'un vieil étage supérieur H10 d'Ariane 4
- . 10 x 2,6 m – 1,2 tonnes
- . Orbite Héliosynchrone @ 800 km altitude
- . Observation dédiée à la détermination du taux de rotation
- . Réalisé par © Thierry Legault

Ariane 4 H10 ERS 2 (1995-021B)
1er avril 2012 3:18 UTC
Elancourt, France

Altitude 772 km
Min. distance 896 km

Acquisition and processing: Thierry Legault
Electronic & software tracking system: Emmanuel Rietsch
Instrumental tracking system: Thierry Legault



Lasers depuis le sol

- **Réflexion d'un faisceau laser sur l'objet spatial**

Performance fonction de la réflectivité de l'objet (albedo) :

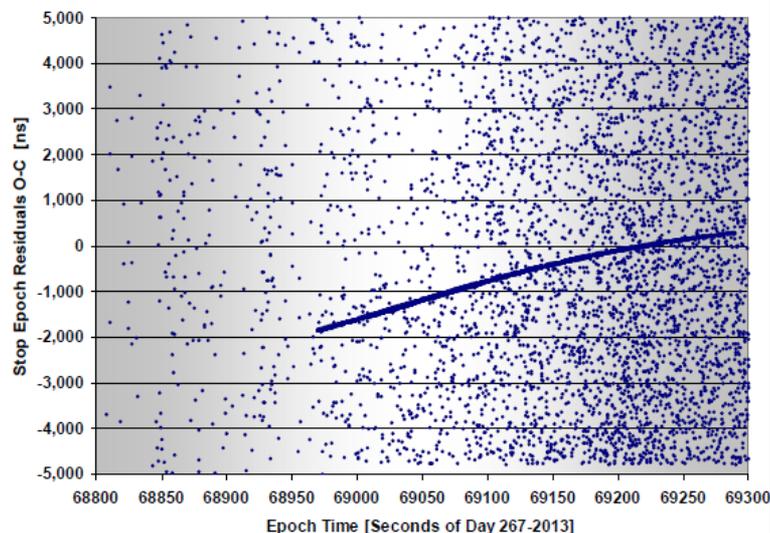
- Très bonne performance quand la cible est équipée de rétro-réflecteur !
- Sinon, beaucoup plus complexe – Nécessité de photomultiplicateurs très performants

Exemple : Wetzell, Graz, Autriche



Transmission : faisceau laser 10 cm
Récepteur : télescope de 50 cm

WETZELL detects Graz Photons 2013-09-24
007 / SL-16 R/B (23088); RCS: 11.2 m²



Suivi d'un vieil étage russe SL-16

Lasers en orbite

- Principe équivalent au système depuis le sol, mais avec des performances très supérieures

→ Pas de perturbation atmosphérique

→ Pas de besoin d'optique adaptative

Exemple :

Télescope + laser embarqué

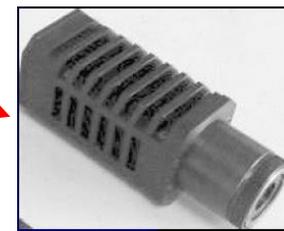
Laser pulsé 100 ps, 532 nm, 50 mJ, 50 Hz – Faisceau de 10 m de diamètre à 1000 km

1 photon unique revenant sur le détecteur suffit

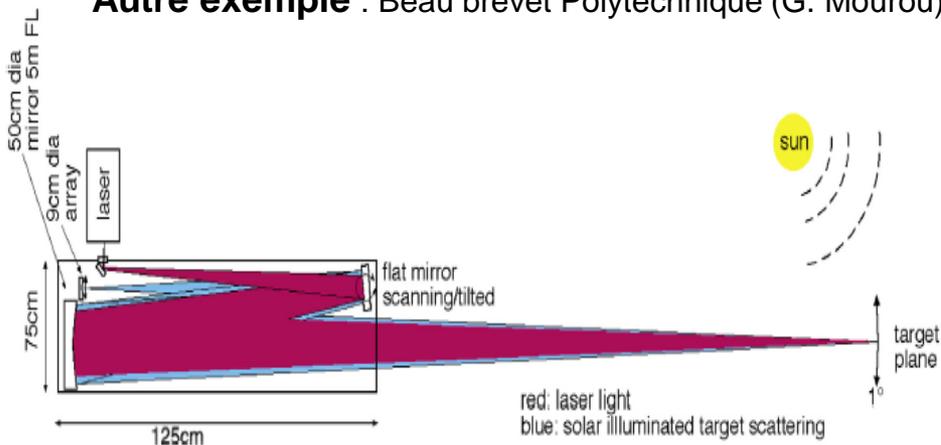
(SPAD = Single Photon Avalanche Detector – exemple, 50 x 50 x 130 mm, 300 g)

Détection et suivi d'objets > 15 cm à 1000 km de distance

Autre exemple : Beau brevet Polytechnique (G. Mourou) - CNES

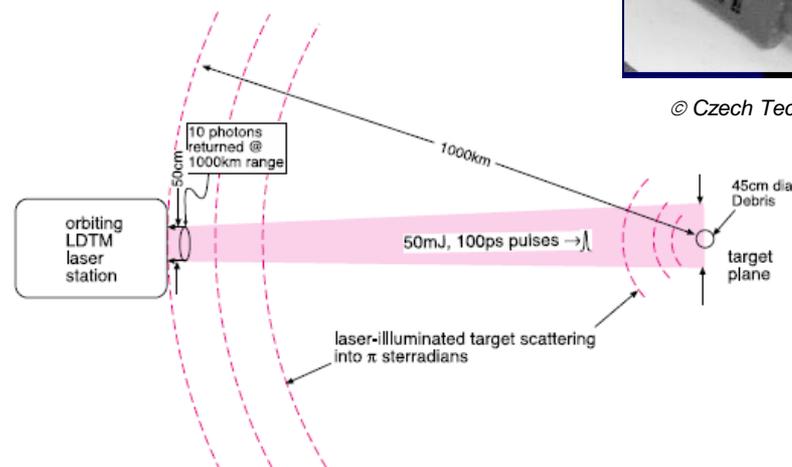


© Czech Tech Univ



Télescope + Laser

© Photonics (USA) - CNES



Principe de détection par laser orbité

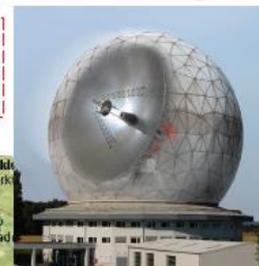
Les moyens français, radars et télescopes, de surveillance de l'espace



MONGE :
radars de
poursuite
ARMOR 1&2 et
Normandie



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



(ONERA / CDAOA)



+ 3 Télescopes TAROT
(CNES/CNRS)

Quelques inquiétudes...

- **Respect médiocre de la réglementation internationale**

Globalement 64% des missions LEO respectent les règles

Mais 17% des satellites à plus de 600 km d'altitude seulement

Et 6% des gros satellites (> 100kg) à plus de 600 km seulement !

Encore de nombreuses fragmentations en orbite (500+ à ce jour)

- **Très grand nombre de Cubesats (nano satellites)**

300 en 2017 – 450 en 2020 – 500+ par an après

Pas de propulsion à bord

- **Méga-constellations de satellites**

Milliers de satellites prévus dans les années à venir (Espace 4.0)

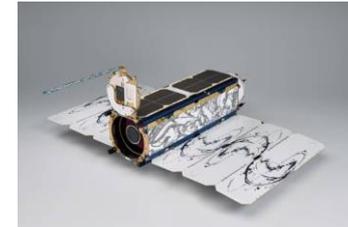
Problématiques mêmes si elles respectent la réglementation

Fiabilité ?

- **Nouveau radar Space Fence (2020)**

10 fois plus d'objets catalogués

Sans pour autant d'amélioration de précision des éphémérides



© Planet



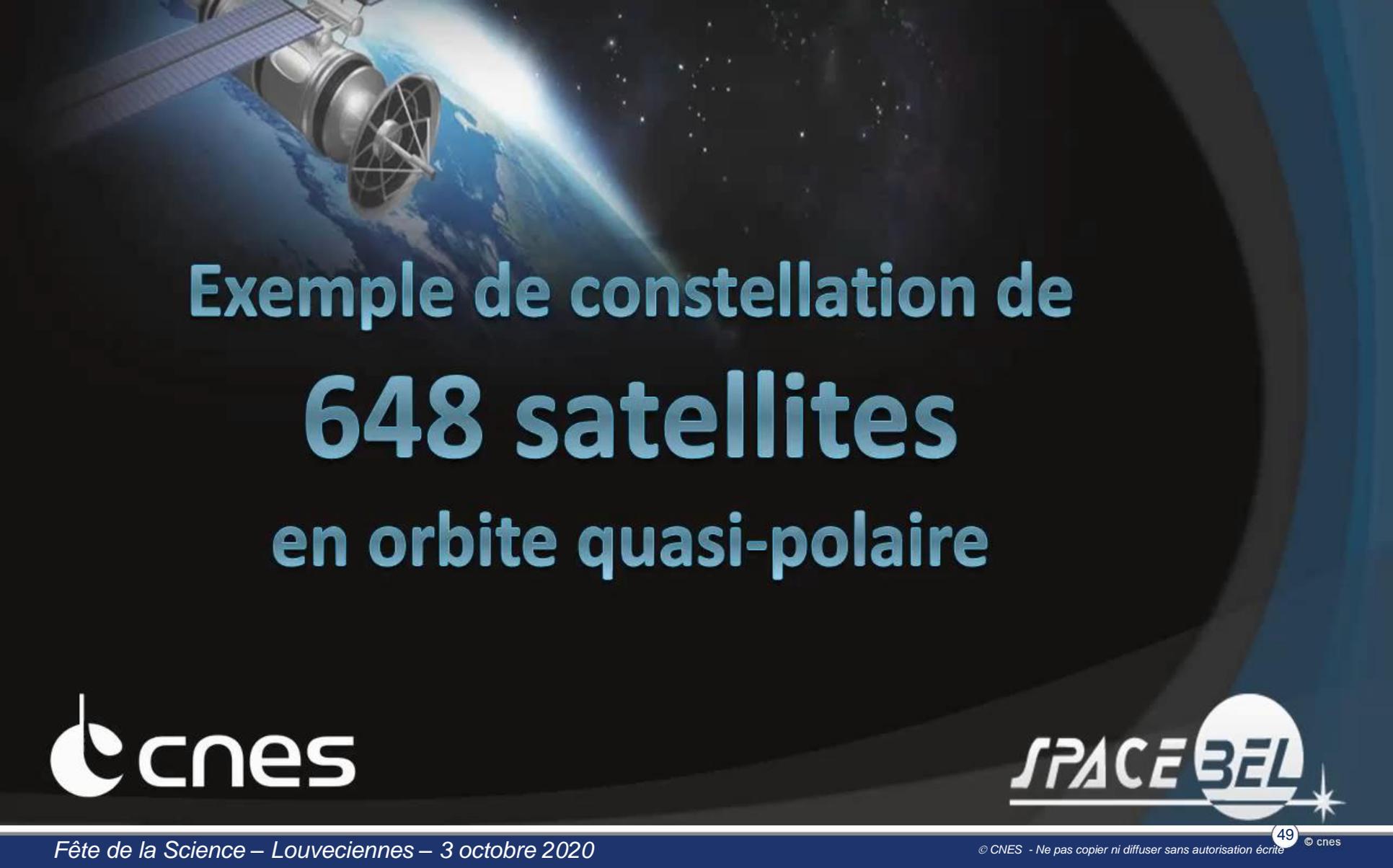
© Starlink



36 Spacecraft per Launch

© OneWeb

S'il y a une prise de conscience générale, mondiale, suivie d'actions, tout ira bien...



Exemple de constellation de 648 satellites en orbite quasi-polaire



Références :

- Spécialisée :

IAA Situation Report on Space Debris – 2016

Téléchargeable depuis le site International Academy of Astronautics

<https://iaaspace.org/wp-content/uploads/iaa/Scientific%20Activity/sg514finalreport.pdf>

- Généraliste :

Pollution spatiale – Ch. Bonnal – Belin 2016

Merci de votre attention

N'hésitez pas à m'envoyer des questions... ☺

Christophe.bonnal@cnes.fr