

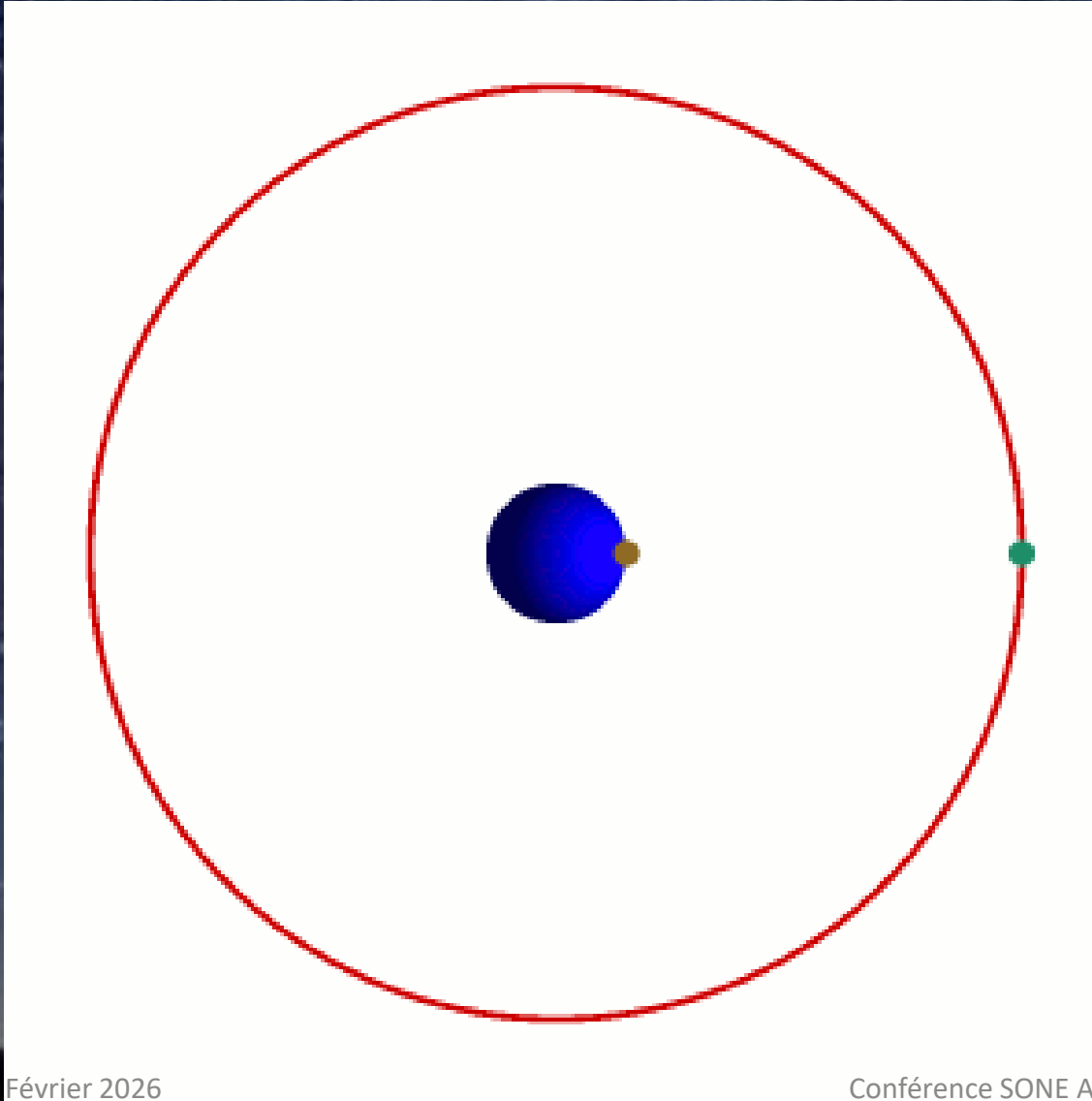
CONSTELLATIONS DE SATELLITES ET POLLUTION SPATIALE



Un Satellite : qu'est-ce c'est ?



Les différents types d'orbites

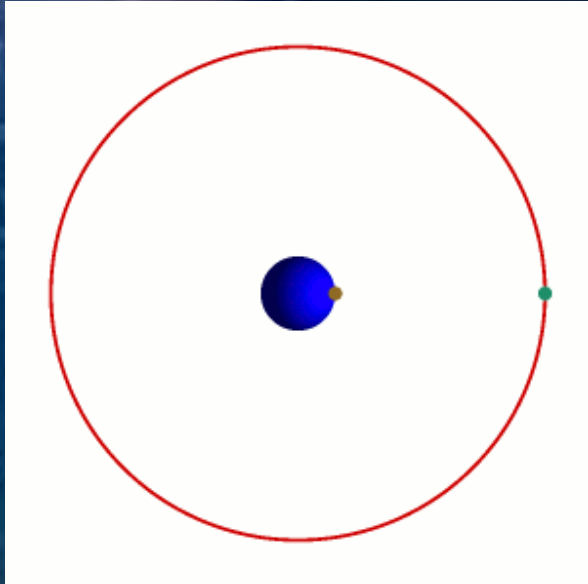


L'orbite géostationnaire

À 36 000 km de la Terre.

Plus de 5 fois de rayon
de la Terre (6400 km)

3 satellites Géo couvrent la Terre.



Mais :

- Temps de latence
- Robustesse
- Coût



Rapprochons le satellite !

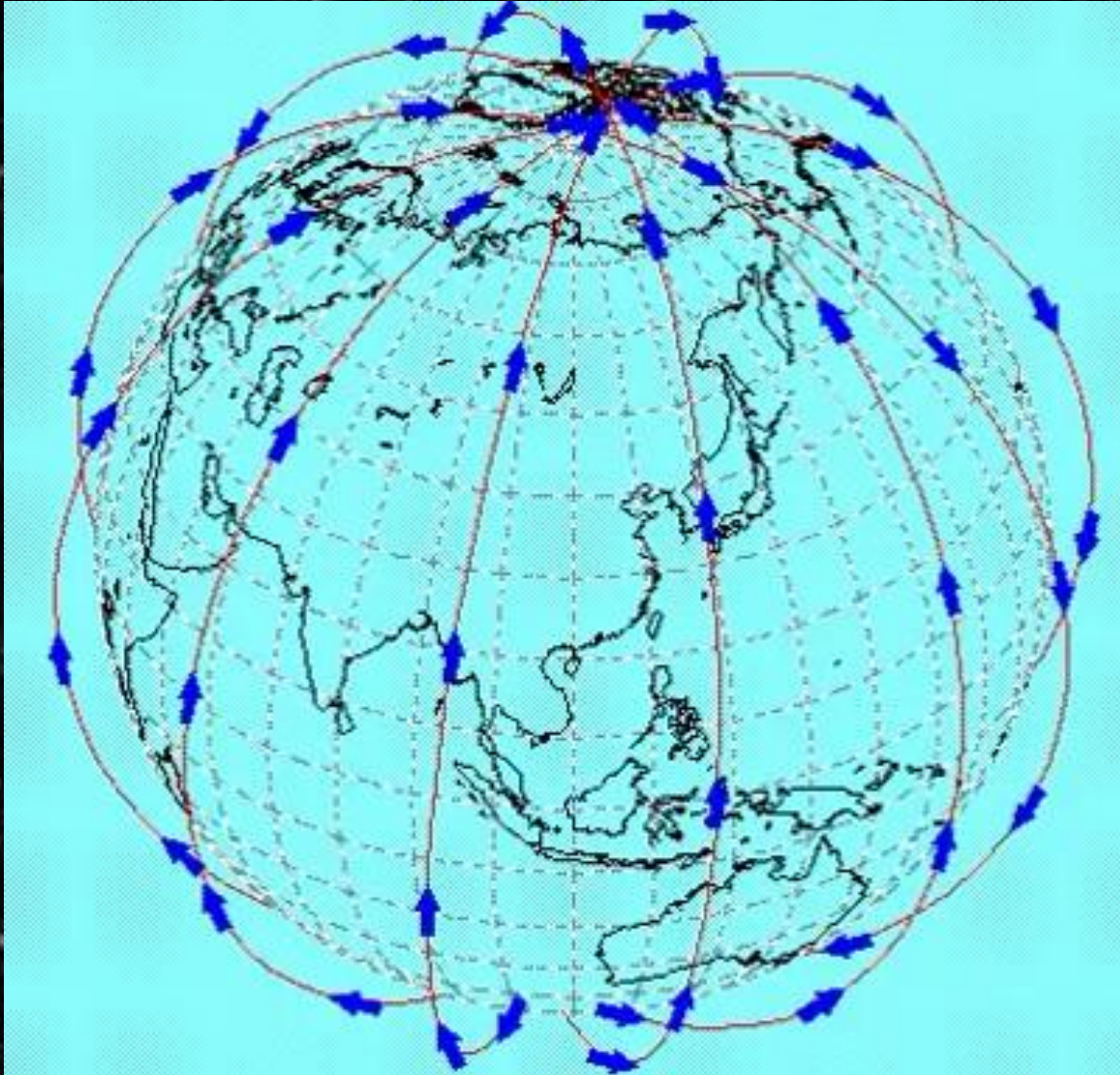
Le problème du défilement



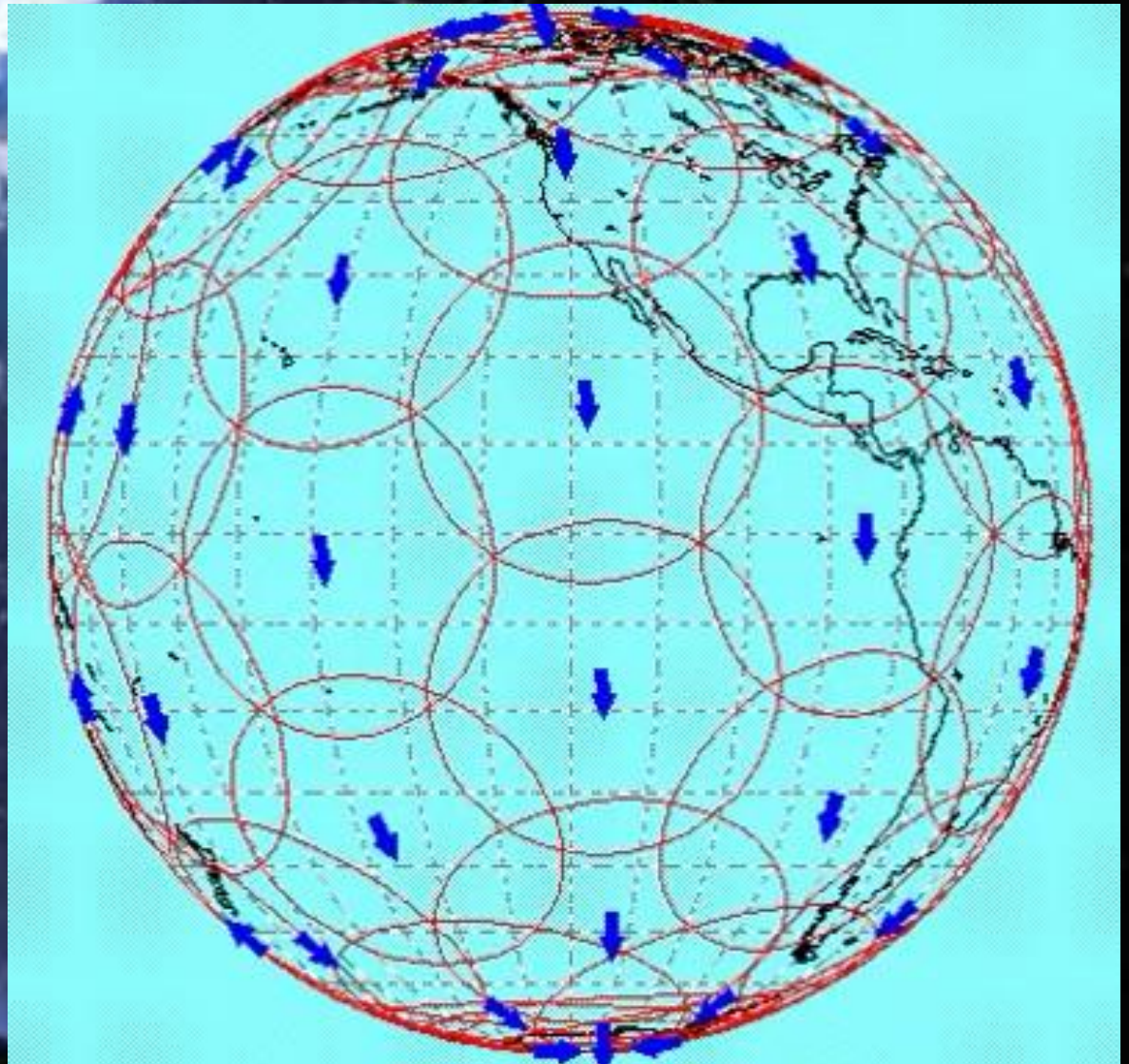
Il faut plusieurs satellites !

Les constellations de satellites

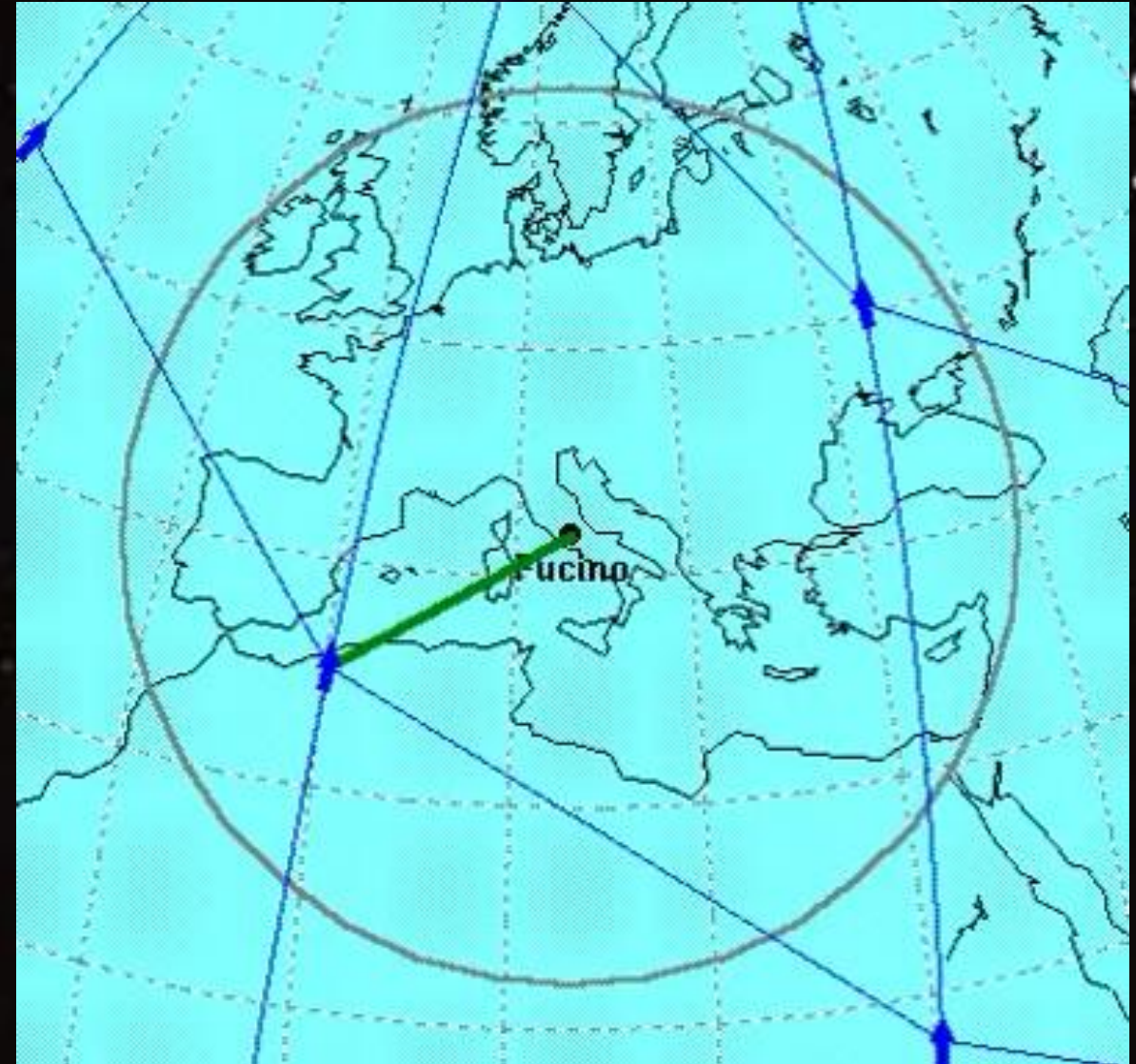
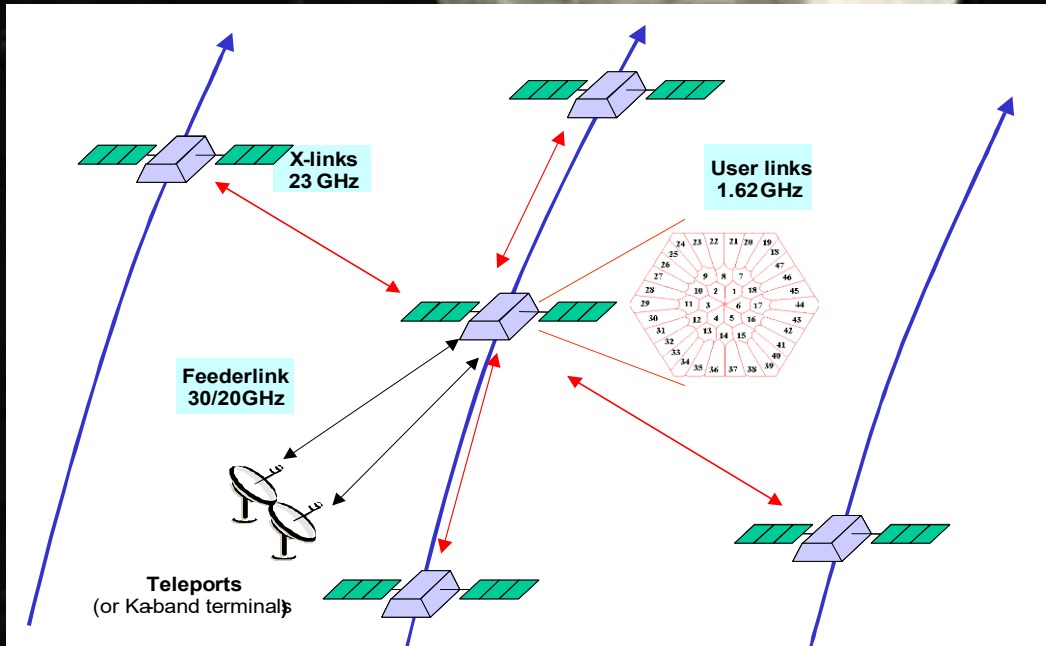
Comment ça marche ?



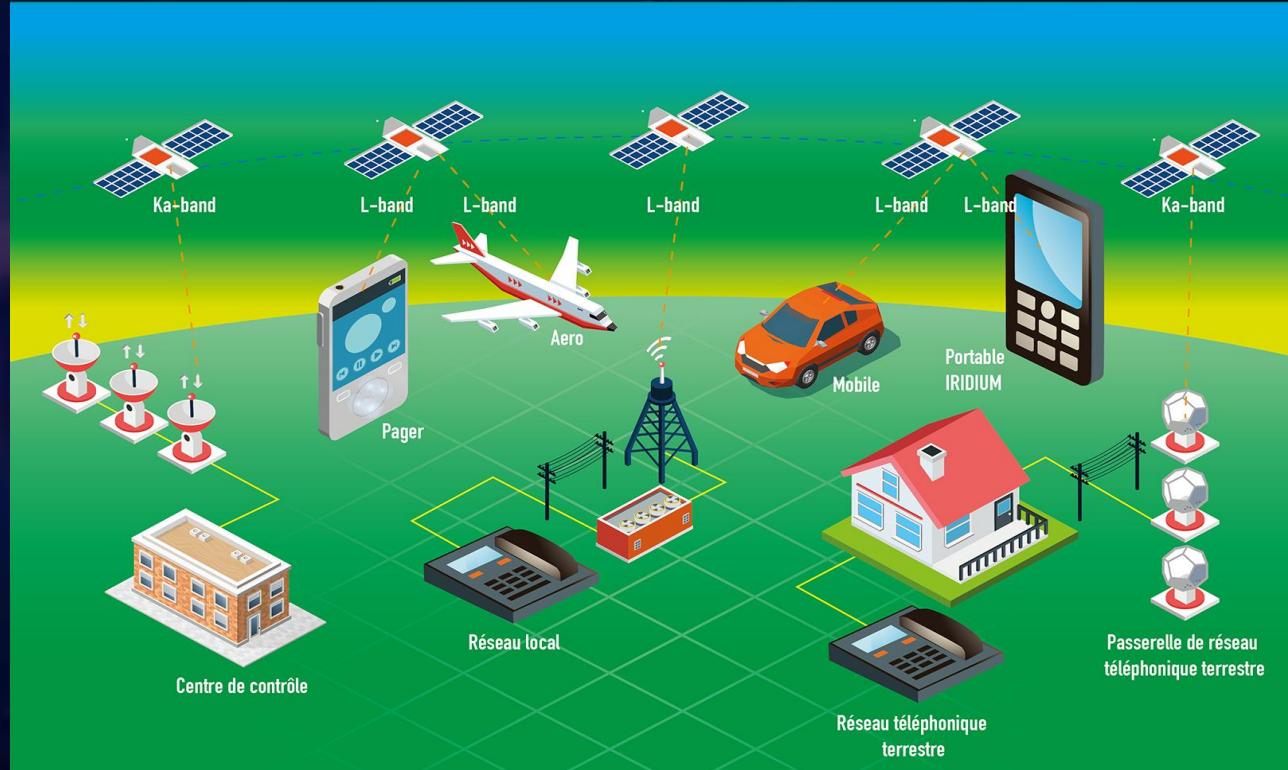
Comment ça marche ?



Comment ça marche ?



A quoi ça sert ?



**Données
(Internet)**

**Liaisons
Mobiles**



Catastrophes



Maritime



Aéronautique



Gouvernemental



Voix



**Suivi de flottes et
objets connectés (IoT)**

Les constellations

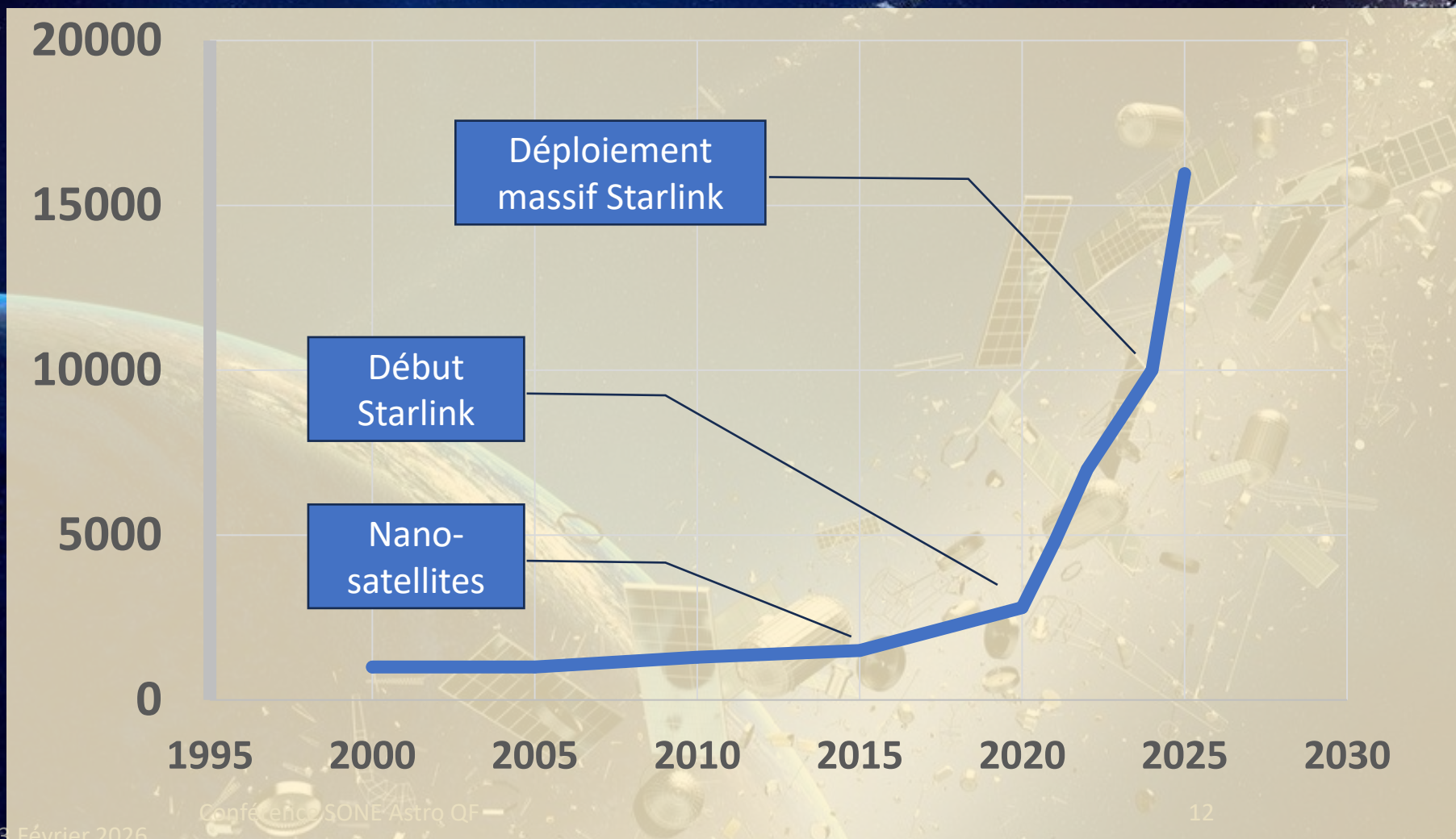
Satellite	Qté	Altitude	Lancement
GLOBALSTAR (US)	48 + 4	1414 km	1998 - 2000 2010 - 2013
IRIDIUM (US)	77+4	780 km	1997 - 1998 2017 - 2019
O3B (EU)	8 puis 20	8000 km	2013 - 2014 2022 - ?
KINEIS (France)	25	650 km	2020 -2025
SPOT (France)	2	700 km	1986 - 2014

Satellite	Qté	Altitude	Lancement
GPS Navstar (US)	32	20200 km	1978 - 1995
GLONASS (Russie)	24	19100 km	1982 - 1995 1995 - 2003 2003 - 2011
BEIDOU 3 (Chine)	6 24	36 000 km 21528 km	2015 - 2020
GALILEO (EU)	24 + 6	23222 km	2011 -2024

Les méga - constellations

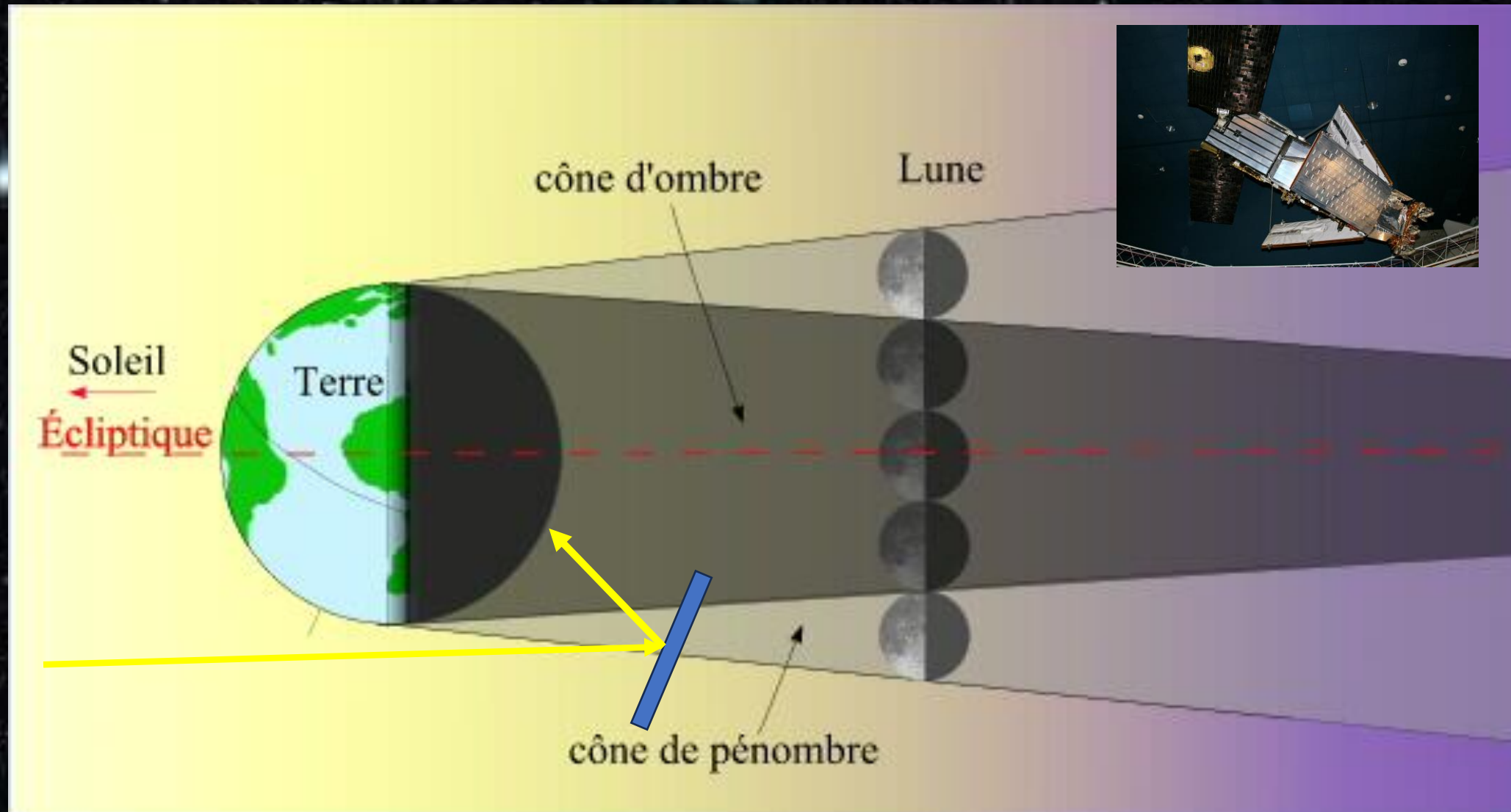
Constellation	Satellites	Altitude	Lancement	Satellites lancés
Starlink (US)	12 000	350 km 480-550 km	2018 -	> 10 000
Oneweb (EU)	720	1200 km	2019 -	660
Amazon Leo (US)	3 236	590 km 630 km	2023 -	175
Lightspeed (Canada)	298	1015 km 1325 km	2026 - 2027	3 prototypes
IRIS2 (EU)	300	750 km 1200 km 8000 km	2029 2031	0
GUOWANG (Chine)	13 000	1 145 km	2023 - 2030	154
HONGYAN (Chine)	320	1 100 km	2018 - ?	127
QIANFAN (Chine)	15 000	800 km	2024 - ?	90

Une croissance exponentielle des satellites en orbite.

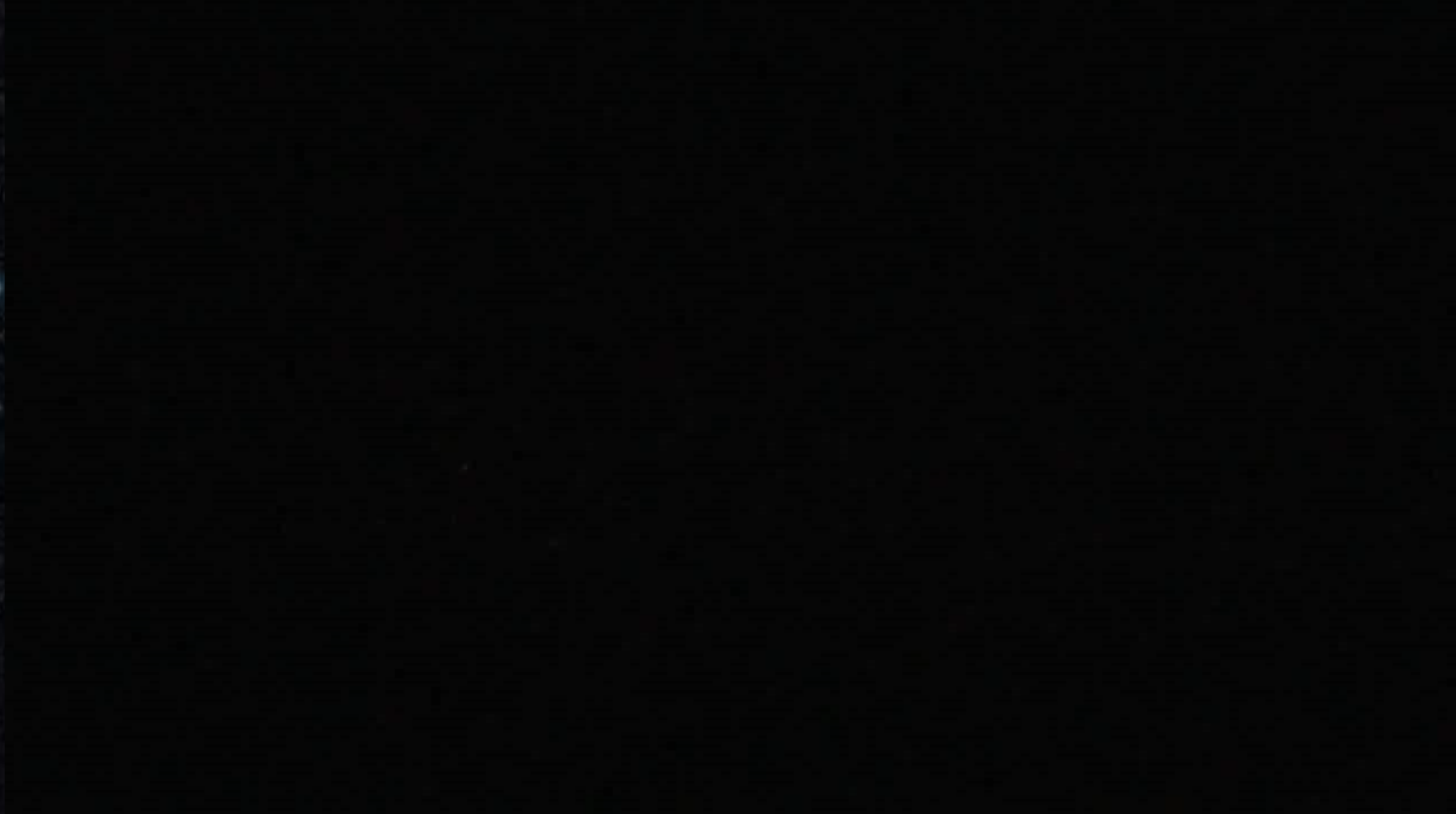




Pourquoi voit-on les satellites ?



Le « Flare » IRIDIUM





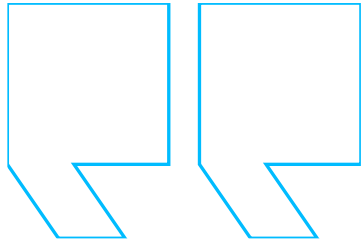
Les satellites Starlink

LA POLLUTION SPATIALE

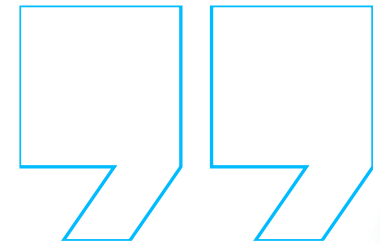
FRÉDÉRIC PAILLER

SOMMAIRE

- 01 Impacts des activités humaines dans l'espace
- 02 Les pollutions spatiales
- 03 Les débris spatiaux
- 04 Que faire face aux débris ?
- 05 Questions ?



COMBIEN D'OBJETS DE PLUS DE
10 CM SE TROUVENT DANS
L'ESPACE ACTUELLEMENT ?



36000

objets en orbite (> 10 cm)
dont 16000 satellites actifs (fin 2025)

CONSÉQUENCES DES ACTIVITÉS HUMAINES DANS L'ESPACE

- Pollution écologique
- Pollution lumineuse
- Pollution biologique
- Pollution physique : **débris spatiaux**

POLLUTION ÉCOLOGIQUE

Fabrication des satellites (métaux rares des électroniques, solvants...)

Carburants très polluants

Rejets chimiques dans la haute atmosphère

- Pendant le lancement (combustion)
- Pendant les rentrées atmosphériques (aluminium...)

Morceaux de lanceurs non réutilisables

- Coiffe, boosters...
- Retombent dans l'océan



POLLUTION LUMINEUSE

Une catastrophe
pour les
astronomes

« Trains de
Starlink »

- 6% des images de Hubble dégradées (2021)
- 20% des images de ZTF (2021)
- Pire aujourd'hui



POLLUTION BIOLOGIQUE

Engins humains
sur les autres
planètes
Peuvent
apporter des
bactéries
terrestres => un
problème quand
on cherche des
traces de vie !



Perseverance selfie with
Ingenuity (Wikipedia)

UN NOUVEL ASTÉROÏDE ?

Minor Planet Electronic Circulars (M.P.E.C.) 2025-A49 Issued 2025 January 3, 16:13 UT

<https://minorplanetcenter.net/mpec/K25/K25A49.html>

EDITORIAL NOTICE: DELETION OF 2018 CN41

The designation 2018 CN41, announced in MPEC 2025-A38 on Jan 2, 2025 UT, is being deleted. The object was reported through the identifications pipeline as a 3-nighter linkage found in the isolated tracklet file and more tracklets were linked in the ITF, leading to a small object on a heliocentric NEO orbit.

The next day it was pointed out the orbit matches **an artificial object 2018-017A, Falcon Heavy Upper stage with the Tesla roadster**. The designation 2018 CN41 is being deleted and will be listed as omitted.

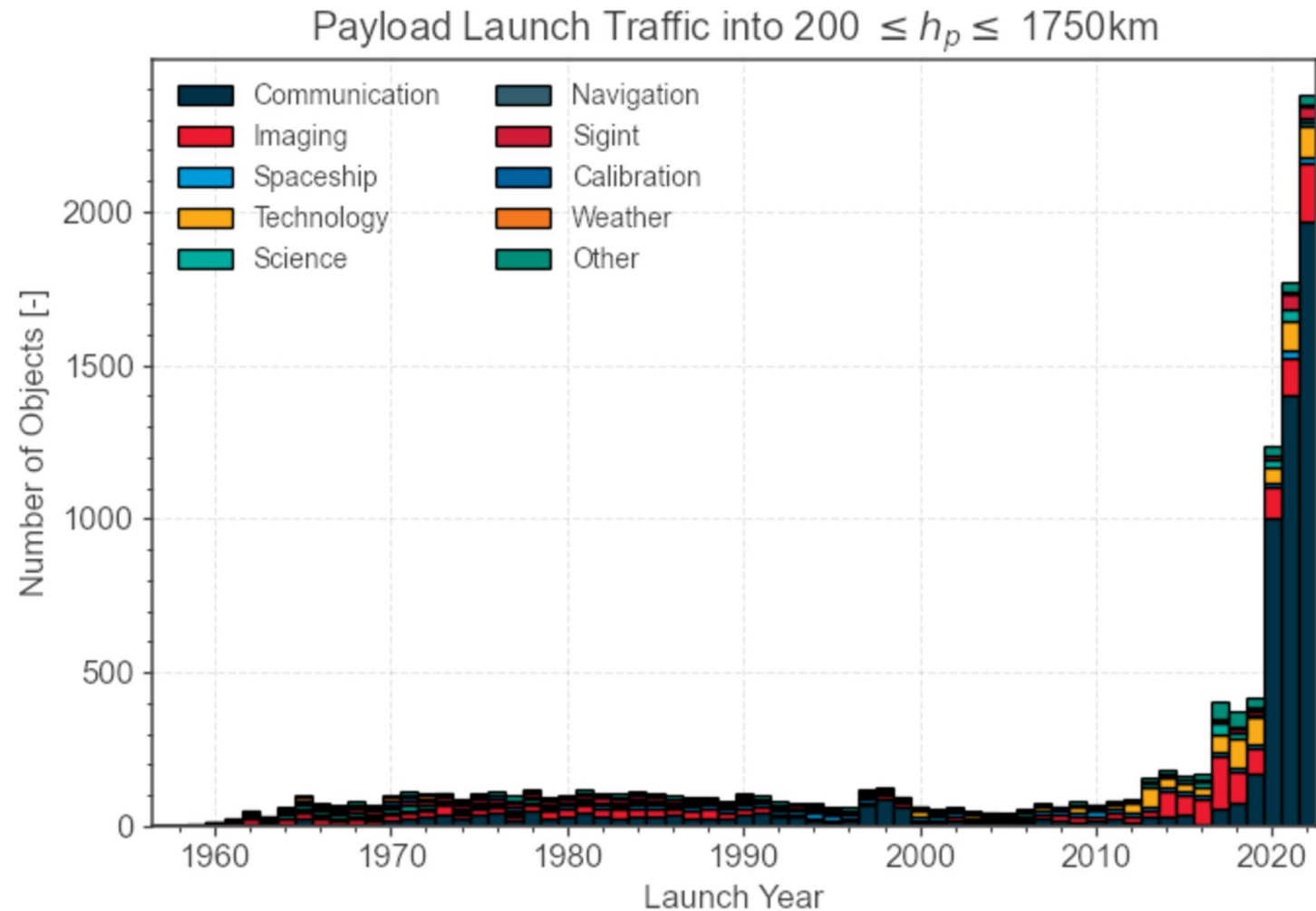
POLLUTION PHYSIQUE : LES DEBRIS SPATIAUX

36000

objets en orbite (> 10 cm)
dont 16000 satellites actifs (fin
2025), surtout starlink et
oneweb

Augmentation exponentielle
du nombre de satellites en
orbite

Surtout pour accès internet
2409 satellites lancés en 2022
On en prévoit 100 000 en 2030



PRINCIPAL RISQUE : LES COLLISIONS

Beaucoup d'objets en orbite

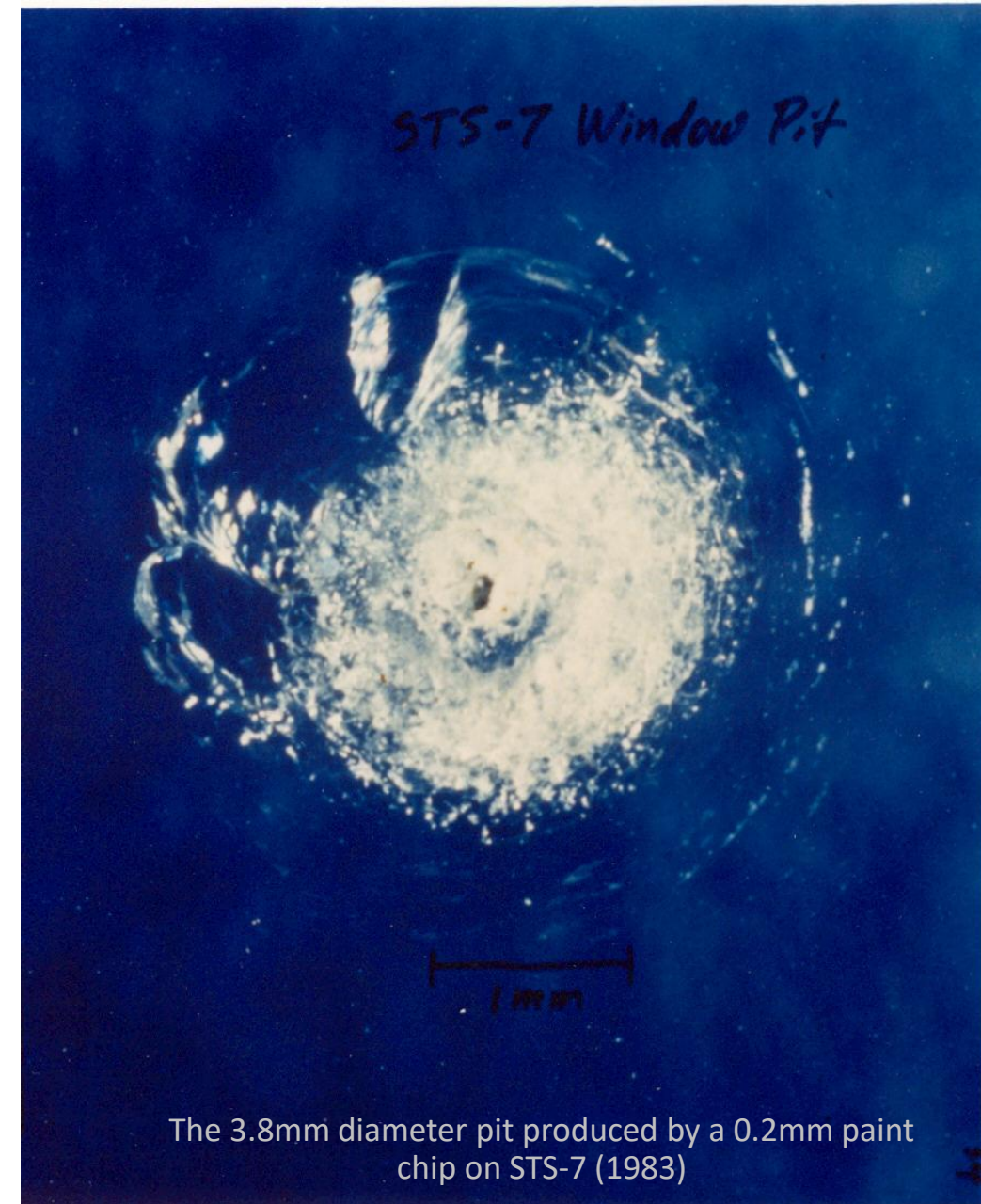
Collisions

- Créent d'autres débris => le risque augmente
- Mettent des satellites hors service

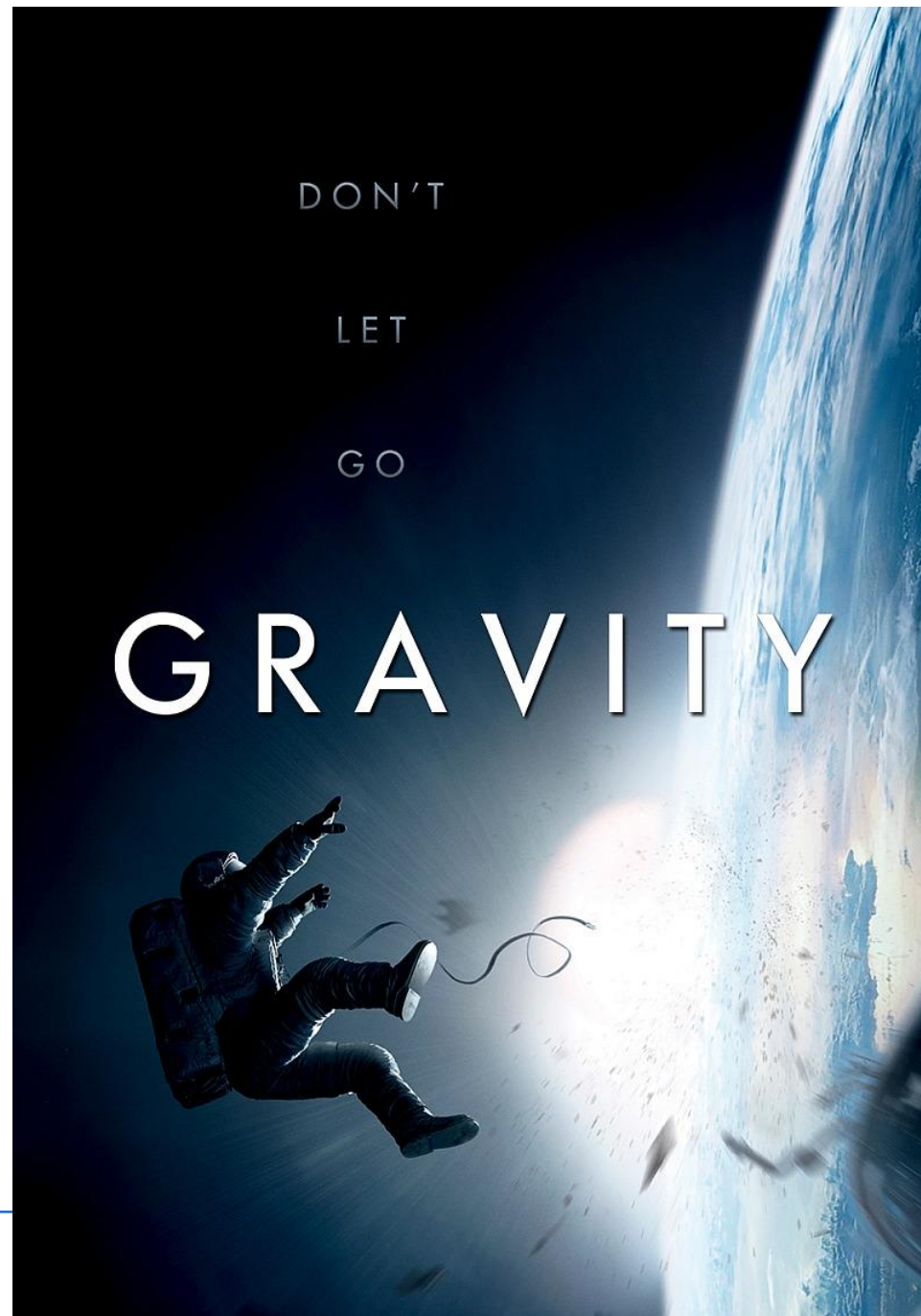
Effet d'avalanche : Syndrome de Kessler (1978)

Certaines orbites pourraient devenir inutilisables

Cas le plus préoccupant : orbites basses (<2000 km)



Gravity (2013)



EXEMPLES DE DÉBRIS

- Satellites hors service
- Derniers étages de lanceurs
- Restes de vols habités
 - Gants, outils...
- Morceaux de satellites après collision ou explosion...



Gant de Ed White, première EVA américaine, GEMINI 4, 1965

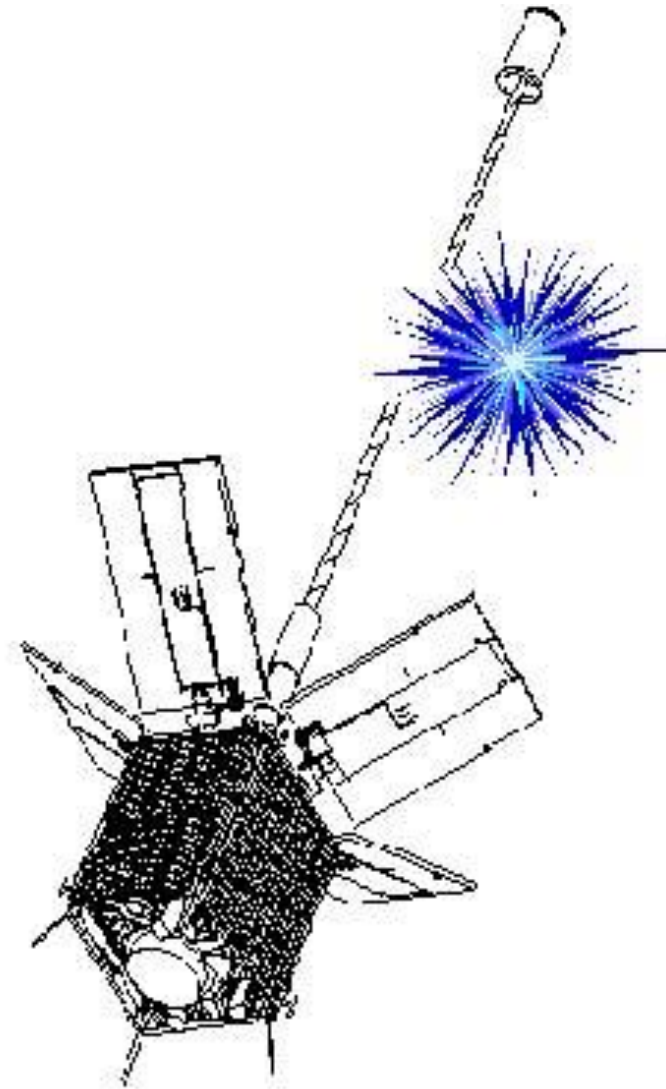
LA PREMIÈRE COLLISION SPATIALE

1996

100 % française

Vitesse relative 14,6 km/s

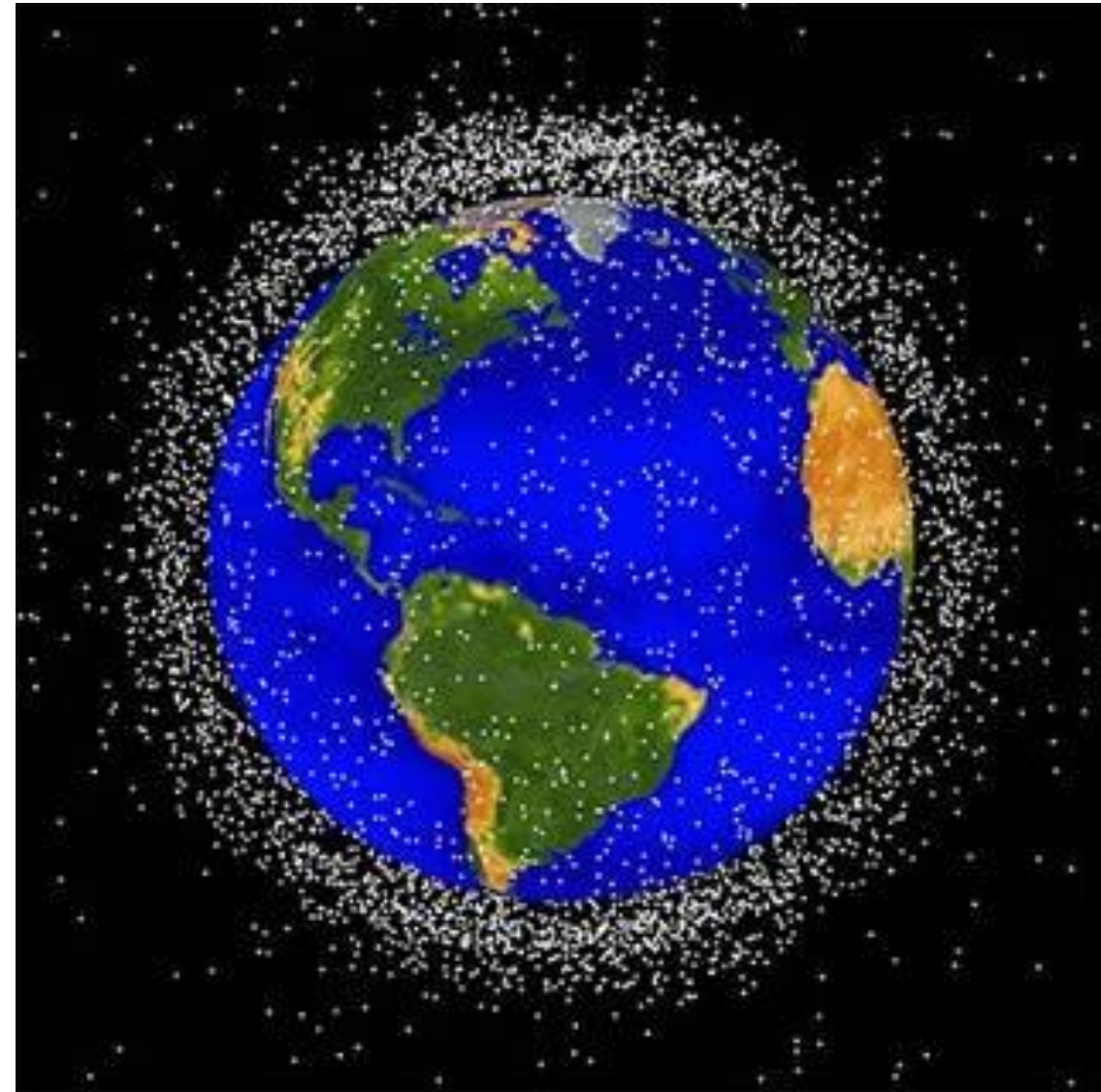
Cerise (satellite
militaire français
lancé en 1995)



3e étage d'une Ariane 1
(lanceur de Spot 1 en
1986)

200 millions

de débris de moins de 1 mm (estimation ESA)



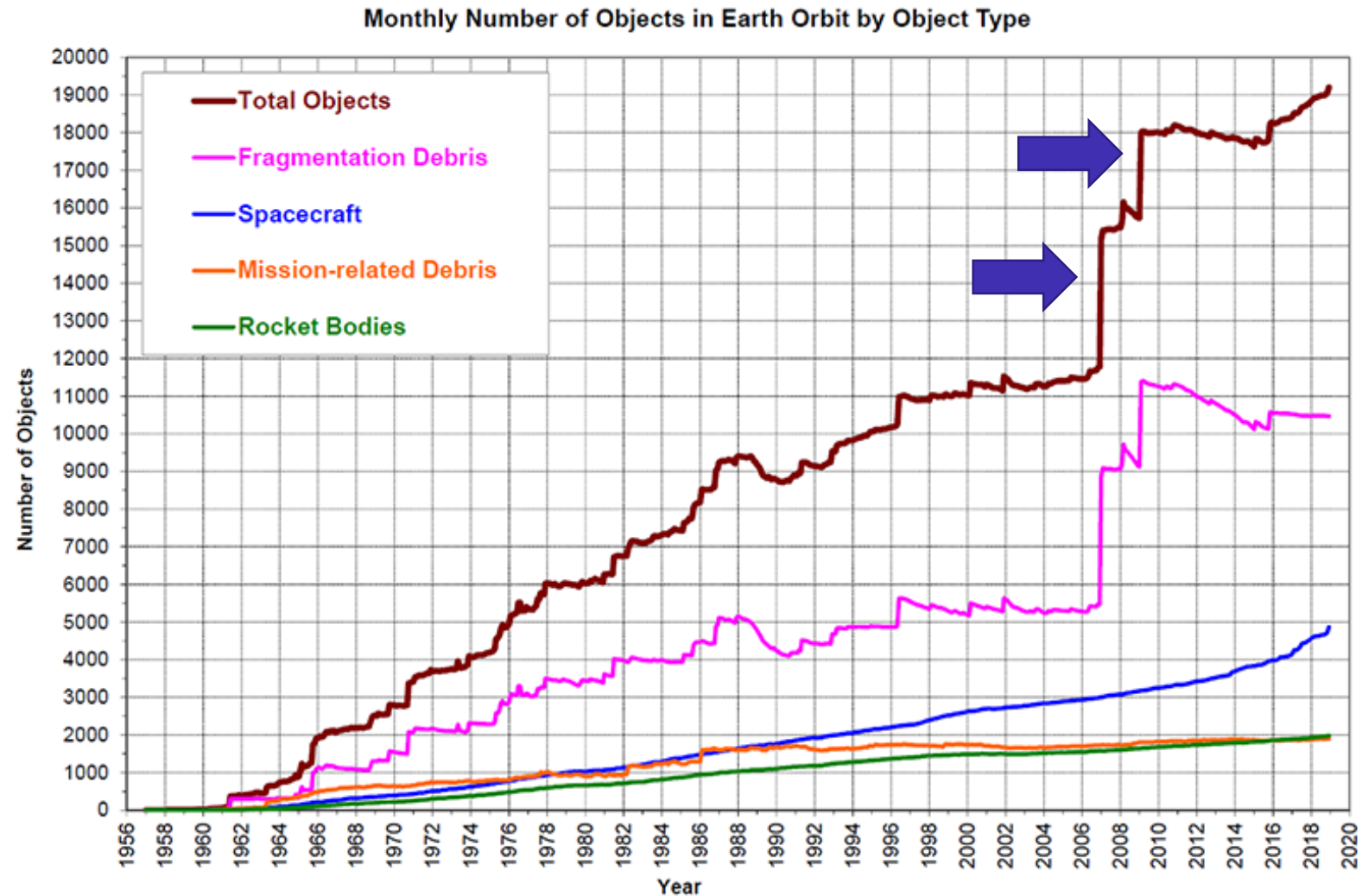
EVOLUTION DU NOMBRE DE DÉBRIS

2007 : la Chine détruit un de ses satellites avec un missile (démonstration de force)

2009 : collision à 12 km/s entre

- Kosmos 2251 un satellite russe hors service
- et Iridium 33 (américain) en service

Presque 2 fois plus de débris après ces 2 événements



LA VITESSE EN ORBITE BASSE

28000

km/h (soit 7 km/s)

14 fois plus qu'un avion de chasse en vitesse max
2 mn 40 pour traverser la France

Si la vitesse est trop faible, le satellite retombe
Si elle est trop forte, il quitte la Terre



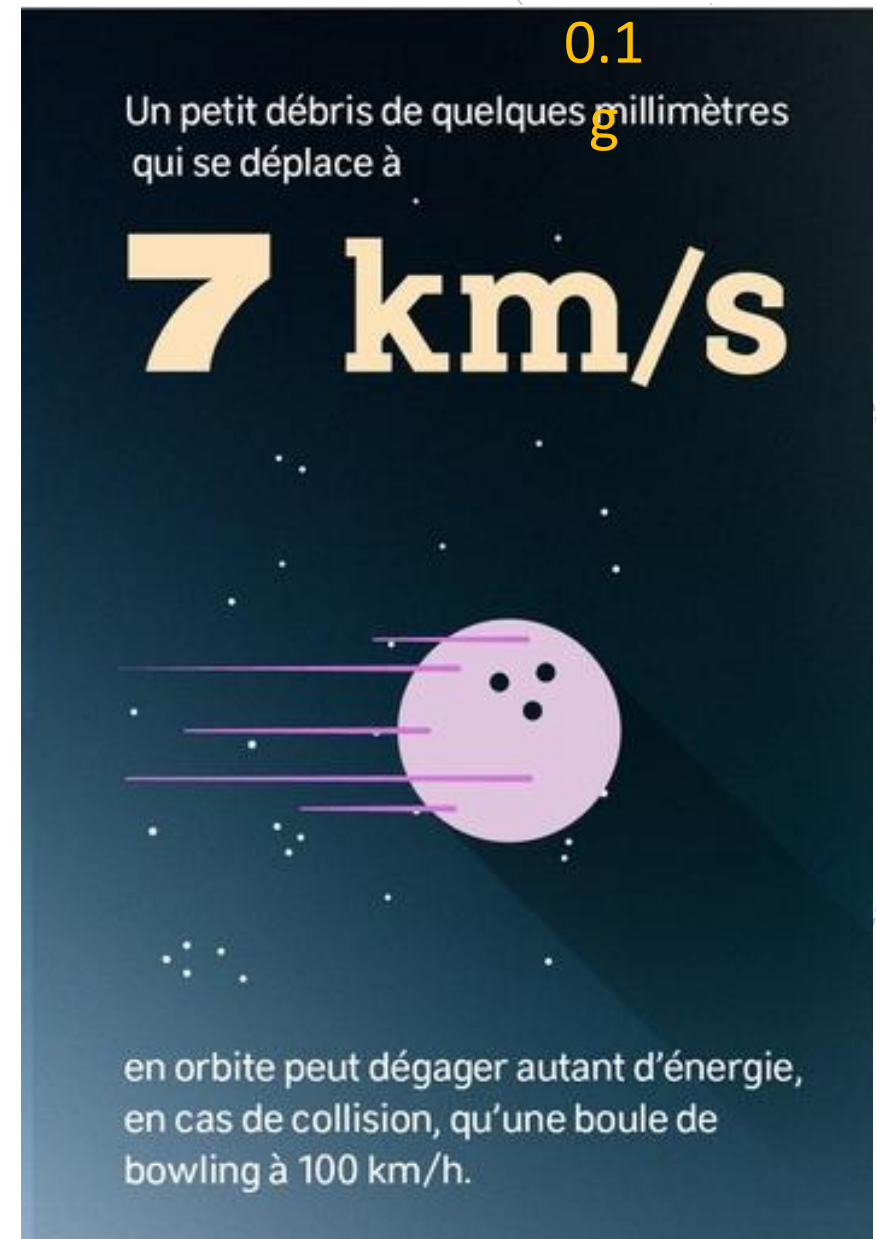
Ellen Ochoa, STS-110, Unity module 2002

LES 2 PROBLÈMES DES DÉBRIS SPATIAUX

- 1) **Grandes vitesses** => collisions très dangereuses
 - Ecaille de peinture => peut percer la combinaison spatiale d'un astronaute
 - Ecrou => peut traverser l'ISS
- 2) **Orbites stables** : au delà de 400 km d'altitude, retomber naturellement prend des dizaines d'années voire des siècles

Les débris s'accumulent

Et impossible de vider la poubelle...



QUOI FAIRE FACE AUX DÉBRIS ?

Protéger les satellites des collisions ?

Nettoyer l'espace ?

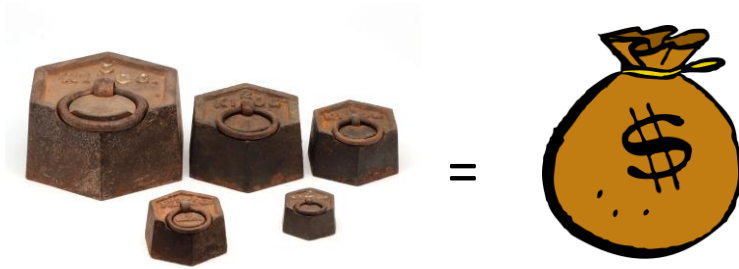
Eviter les collisions ?



A drifting thermal blanket, STS-88 Endeavour , 1998

PROTÉGER LES SATELLITES ?

Blindage =



Coût de lancement d'un kilogramme en orbite : 5 000 à 10 000 €

En plus du coût de fabrication du satellite

Des projets existent :

- Structures en impression 3D
- Très chères, et ne réduisent pas totalement le risque à zéro
 - A réserver au cœur du satellite

NETTOYER L'ESPACE ?

Des satellites « nettoyeurs » pour attraper les débris ?

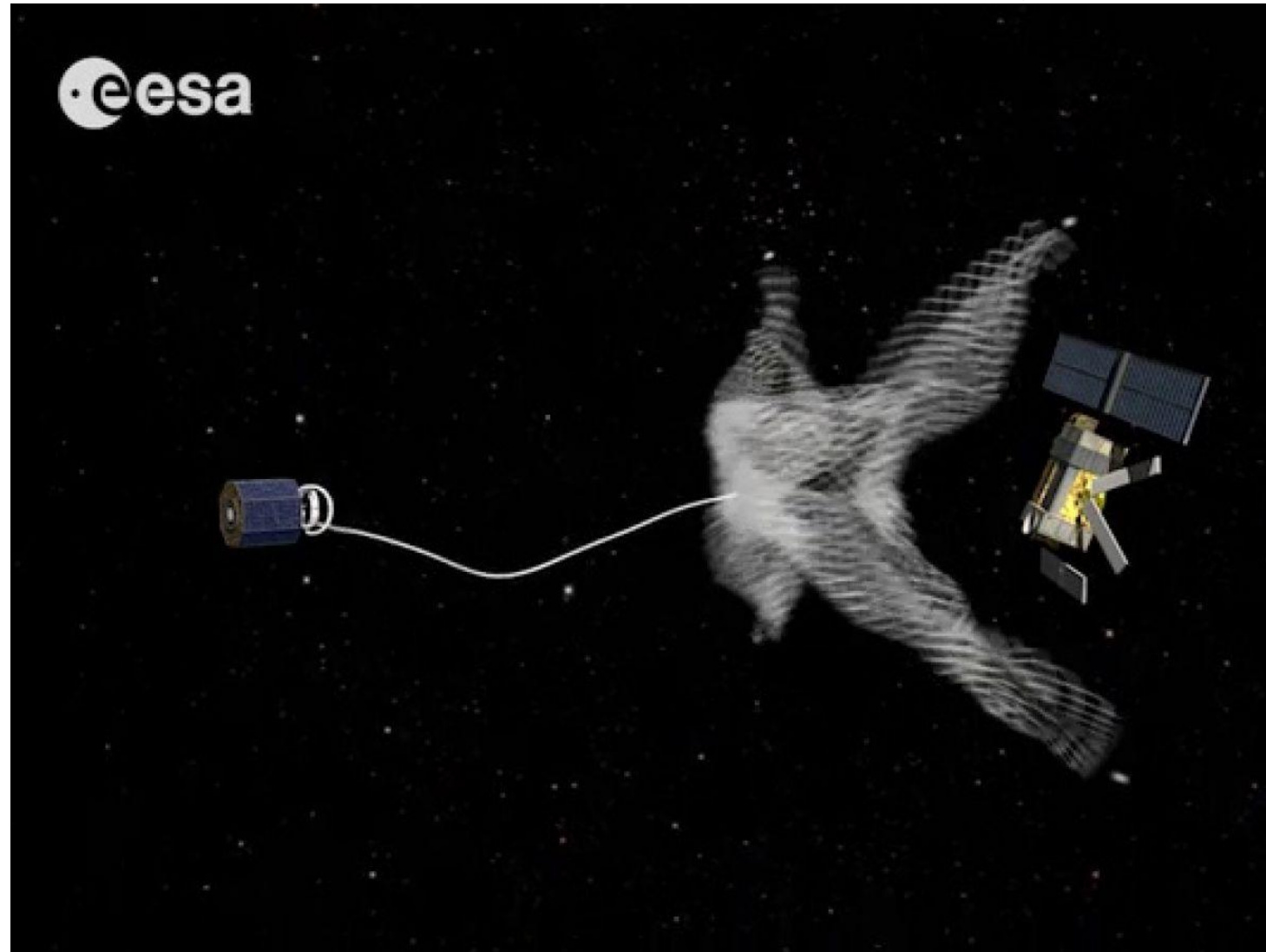
Beaucoup d'inconvénients...

- Risque de créer de nouveaux débris
- Complicé et coûteux
- Personne ne veut payer...



Pourquoi c'est compliqué ?

- A cause des **grandes vitesses orbitales**



DELTA-V

Pour un rendez-vous orbital

- Il faut le même vecteur vitesse (sinon choc)
- Donc être dans le même plan

Budget typique d'un satellite 300 m/s

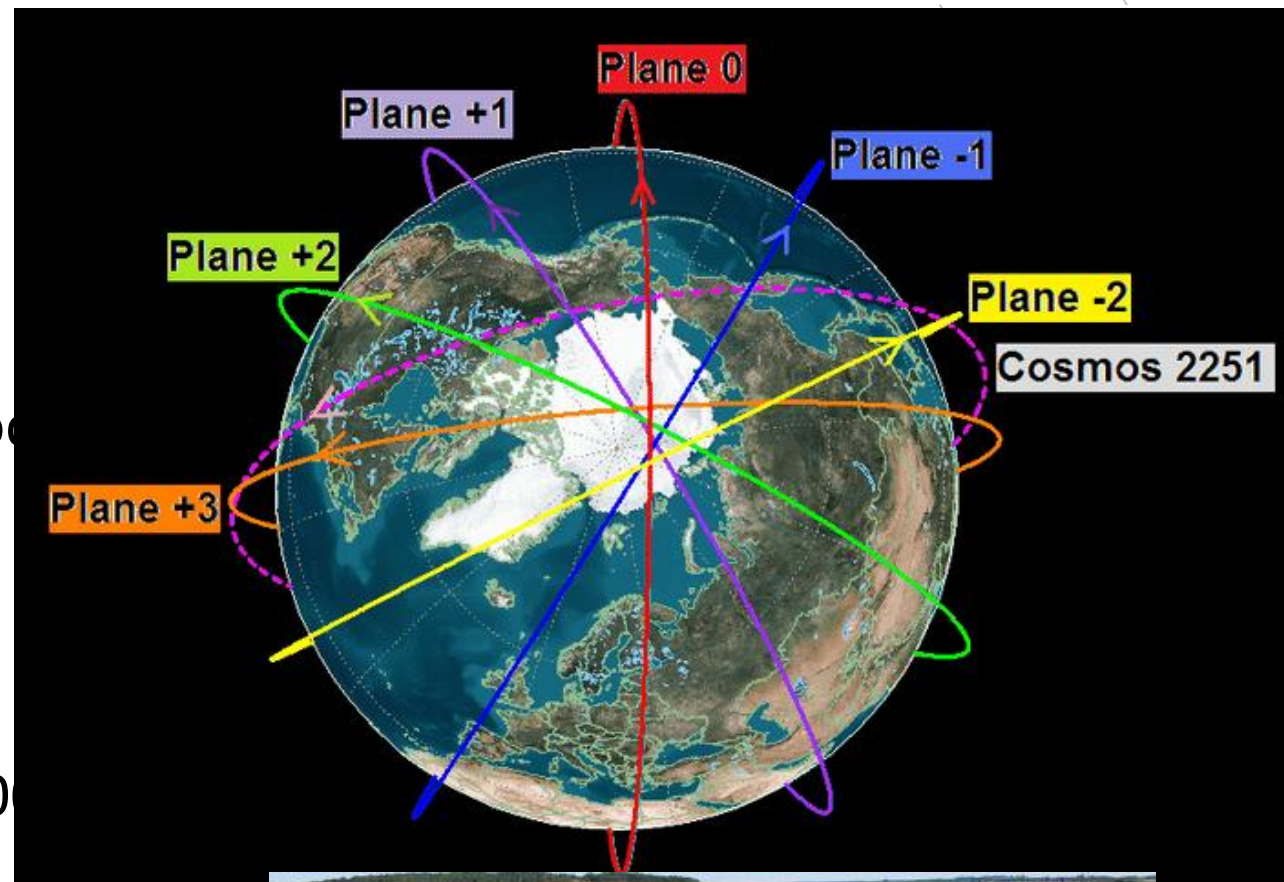
Lancement : 7000

Changement de plan (perpendiculaire) : 1400

Changer d'altitude (400 à 500 km) : 80

Donc **un nettoyeur ne pourrait capturer que des débris dans son plan de lancement**

- Et il y a une infinité de plan orbitaux



EVITER LES COLLISIONS

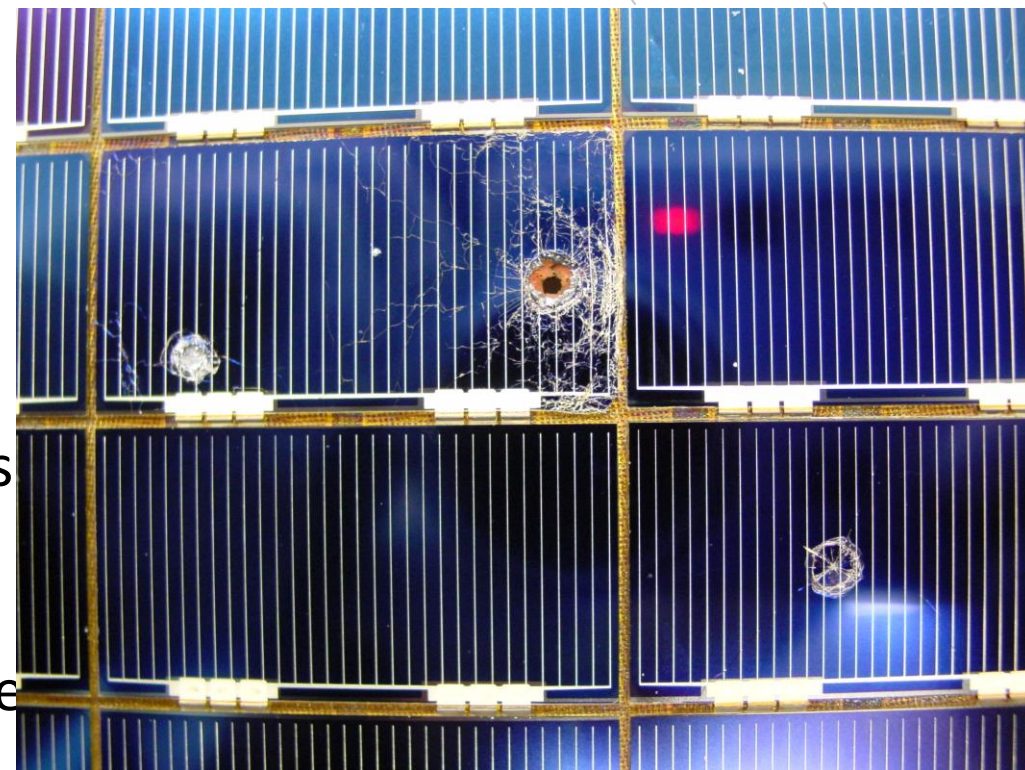
La seule solution crédible

Préférer **peu de gros débris** que **beaucoup de petits**

- Les gros (> 10 cm) sont plus faciles à surveiller depuis le sol

Pour éviter les collisions :

- **Surveiller** les trajectoires (> 10 cm, radars + télescopes)
- **Alerter** les opérateurs
- **Agir** :
 - Faire des manœuvres d'évitement
 - Pour un satellite opérationnel (l'ISS par exemple, sinon refuge dans les vaisseaux) => coordination + carburant
 - Impossible entre 2 débris non manœuvrants
 - Pour un lancement : attendre un peu => risque de perte de fenêtre



ESA built-solar cells retrieved from the Hubble Space Telescope in 2002

Quand un risque de collision est détecté Starlink fait la sourde oreille et laissent les autres changer leur orbite. Même la station chinoise a dû faire une manœuvre.



RÈGLES ANTI-PROLIFÉRATION DE L'ONU

Ne pas produire de débris **intentionnellement**

Passiver les satellites (éviter les explosions)



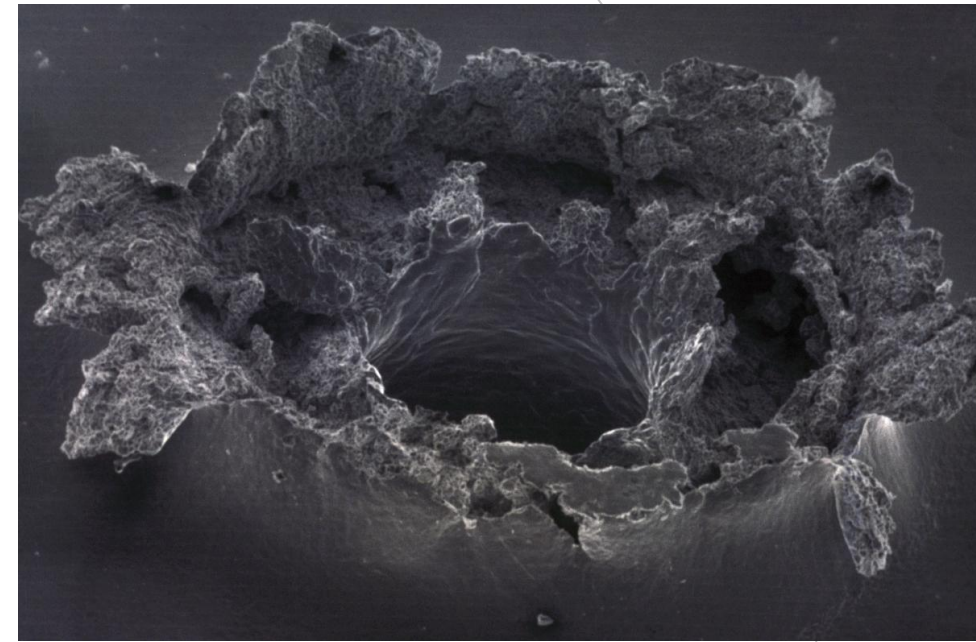
- Vider les réservoirs
- Déconnecter les batteries des panneaux solaires

Désorbiter quand c'est possible :



- Orbite basse : descendre le satellite sur une orbite qui retombe sur terre en moins de 25 ans
- Orbite géostationnaire : monter un peu le satellite (orbite cimetière, 300 km au dessus)
- Lanceur : désorbiter le dernier étage (ex Ariane 6)
- Les 3 nécessitent du carburant

Règles déclinées dans la **Loi sur les Opérations Spatiales (LOS)** en France par le CNES (2008)



Photothèque CNES

LES RENTRÉES ATMOSPHÉRIQUES

En dessous de 400 km d'altitude, l'atmosphère est rare mais freine les satellites

- L'ISS perd 100 m par jour

L'objet chauffe et se consume, vers 100 km d'altitude

Très peu de morceaux retombent au sol

Même phénomène que météores (étoiles filantes) et météorites

En cas de rentrée contrôlée, on le fait sur une zone inhabitée (Pacifique sud)

Solution pas idéale, mais c'est aujourd'hui **la seule** pour supprimer des débris spatiaux



ATV1 Jules Verne 29/9/2008
NASA/ESA/Bill Moede and Jesse Carpenter,
Public domain, via Wikimedia Commons

Merci pour votre attention

Des questions ?

SOURCES

- <https://phototheque.cnes.fr/cnes/category/2567> => 5 images intéressantes
- « Comment nettoyer l'espace des débris en orbite ? » The Conversation <https://theconversation.com/comment-nettoyer-lespace-des-debris-en-orbite-227011>
- Rapport 2023 de l'ESA sur l'environnement spatial [https://www.esa.int/Space in Member States/France/Rapport 2023 de l'ESA sur l'environnement spatial](https://www.esa.int/Space_in_Member_States/France/Rapport_2023_de_l_ESA_sur_l_environnement_spatial)
- Wikipedia Débris spatial [https://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9bris spatial](https://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9bris_spatial)
- « Satellites à gogo : un sacré Graal » The Conversation <https://theconversation.com/satellites-a-gogo-un-sacre-graal-229194>
- Le Monde https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2018/02/07/comment-spacex-s-est-fait-une-place-dans-l-aerospatial_5253404_4355770.html
- Vidéo ESA : FR <https://www.youtube.com/watch?v=8MLu6CgfTe0> EN <https://www.youtube.com/watch?v=X9aqfIAJrJo>
- CNES qui se passe n° 167 avril 2024 p 18-19 « Pollution spatiale, l'heure du grand ménage »