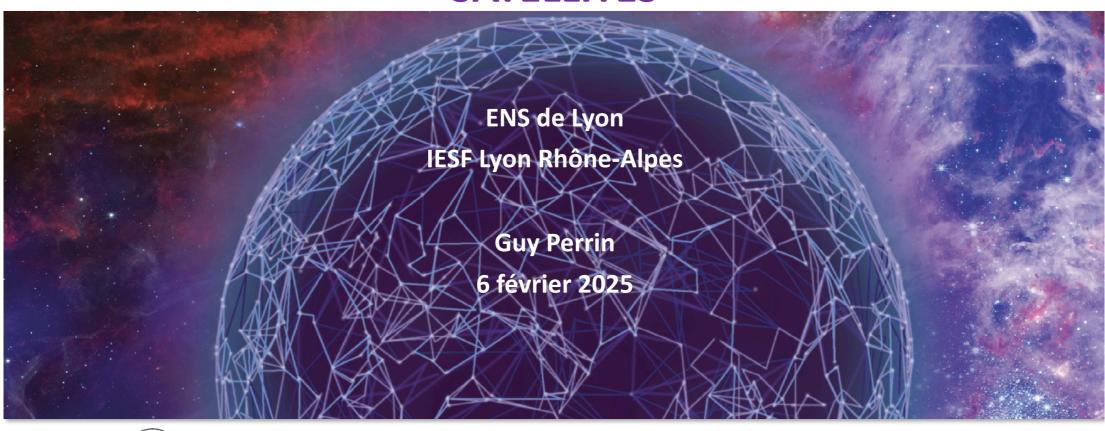
LES GRANDES CONSTELLATIONS DE **SATELLITES**







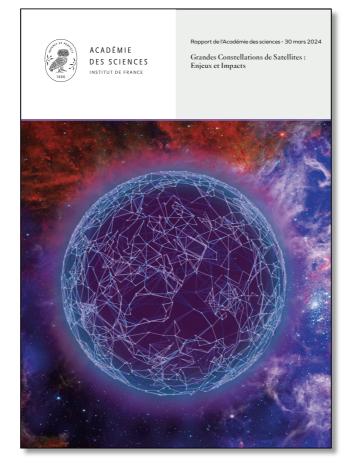




Rapport de l'Académie des sciences paru le 30 mars 2024









Audition par l'OPECST le 23 janvier 2025

https://www.academie-sciences.fr/

https://www.canalacademies.com/
Gare à la prolifération des satellites!
(émission du 3 avril 2024)



Méthodologie



Groupe de travail interdisciplinaire :

- Académie des sciences : Physique, Sciences de l'Univers, Sciences Mécaniques et Informatiques
- Académie des sciences morales et politiques
- Présidence : François Baccelli et Jean-Loup Puget

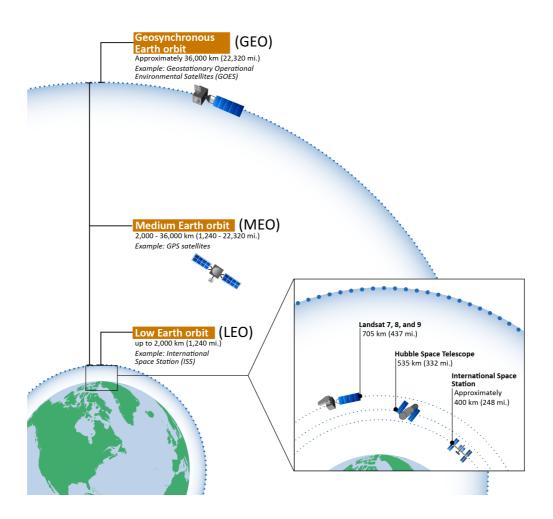


Auditions de 18 experts : CNES, ONERA, CDE, ESA, Thalès, DGE, Orange, ANSSI, Airbus, Greenerwave, UAI, ENAC, CNRS, OCA, IRAM



Terminologie des orbites







Contexte du NewSpace



Transition entre spatial étatique et spatial hybride mélangeant intérêts étatiques et entrepreneuriaux au début du XXIème siècle

Caractéristiques et conséquences :

- Fin du monopole des États
- Injection de fonds privés pour du spatial commercial (tourisme spatial, télécoms, télédétection)
- Baisse des coûts de lancement et de fabrication des satellites (constellations orbites LEO et MEO), apparition de nouvelles plateformes (cubes sats, nanosats)
- Nouveaux entrants avec des géants comme Starlink, des jeunes pousses et des PME en très grand nombre (12000 entreprises)
- Nouveau paradigme incitant les États à l'investissement (France 2030 ...), course à l'occupation des orbites LEO et MEO (en parallèle d'une ruée vers l'espace avec de nouveaux États)
- Nouveaux services offerts par les constellations (achat de services y compris par les États)



SpaceX L'entreprise emblématique du NewSpace





Fusée Falcon 9



Amerrissage de propulseur Falcon 9 sur une barge



Coiffe avec 60 satellites Starlink



NewSpace Évolution des coûts de mise en orbite









NewSpace Évolution des coûts de mise en orbite





LEO : 7500 €/kg GEO : 15000 €/kg LEO : 3300-11500 €/kg GEO : 5800-23000 €/kg

https://www.ladepeche.fr/2024/07/06/ariane-6-le-lanceur-lourd-fait-il-le-poids-face-a-spacex-12058048.php

GEO: 5000-7500€/kg





Retour sur terre premier étage Falcon 9 (SpaceX)

Et la France/l'Europe?





- ☐ Moteur Prometheus LOx/LCH₄, I_{sp} =360 s
- ☐ Poussée 100 t
- □ Poussée modulable de 30 à 110 %





- Terre
- \Box Echelle réduite L=15m, d=1 m
- ☐ CNES, DLR, JAXA



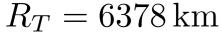
- □ Démonstrateur de 1^{er} étage réutilisable
- **□** *L*=30 m, d=3.5 m
- ☐ Trois moteurs Prometheus LOx/LCH4

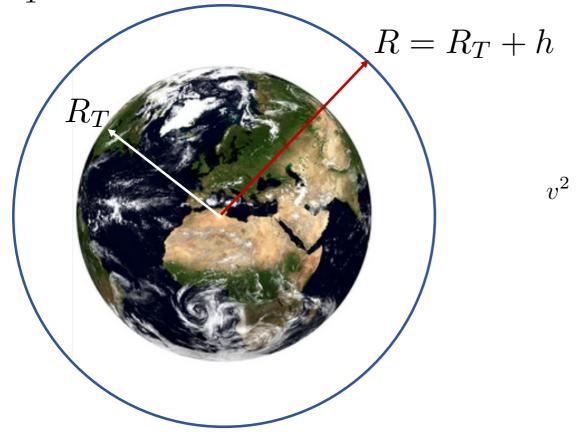




Vitesses de défilement et orbites







$$m\frac{v^2}{R} = mg\left(\frac{R_T}{R}\right)^2$$
 Force centrifuge Poids

$$v^2 = gR_T \frac{R_T}{R_T + h} \qquad T = \frac{2\pi(R_T + h)}{v}$$

Altitude h (km)	Vitesse v (km/s)	Période <i>T</i> (h)	Orbite
0	7,9	1h24	
500	7,6	1h34	Basse (LEO)
2000	6,9	2h07	Moyenne (MEO)
35875	3,1	24h	Géostationnaire (GEO)



Vitesses de défilement et orbites

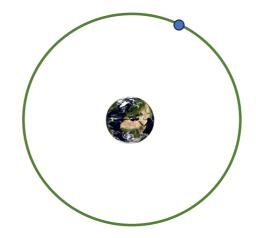


Satellite très bas
Temps de latence très faible (≥20 ms)
Mais défilement très rapide
Besoin d'un très grand nombre
de satellites



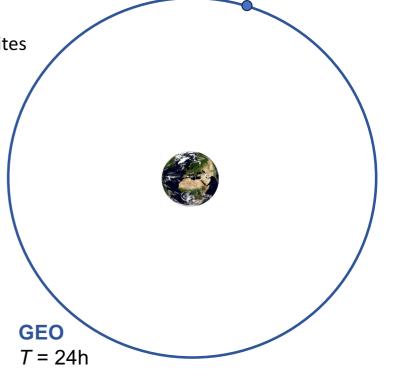
LEO (Starlink) $1h30 \le T \le 2h$

Satellite bas Temps de latence faible (50-500 ms) Mais défilement rapide Besoin d'un grand nombre de satellites



MEO (GPS, Galileo) $2h \le T \le 24h$

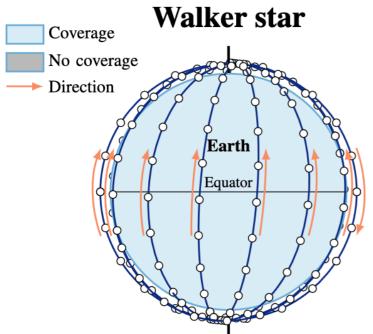
Satellite très haut Satellite fixe Peu de satellites Mais temps de latence long (500 ms)





Classification des orbites de Walker



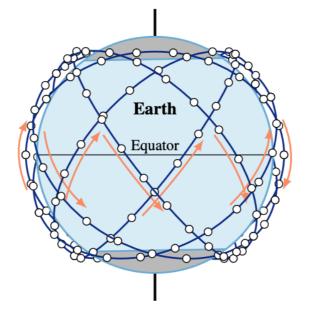


Walker Star

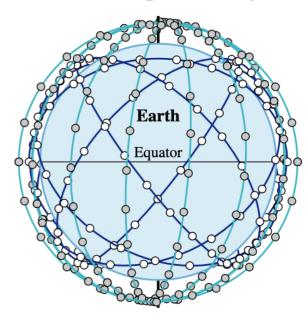
(base de OneWeb)

- orbites (quasi) polaires
- distribution périodique des plans orbitaux sur l'équateur

Walker delta



Mixed geometry



Walker Delta

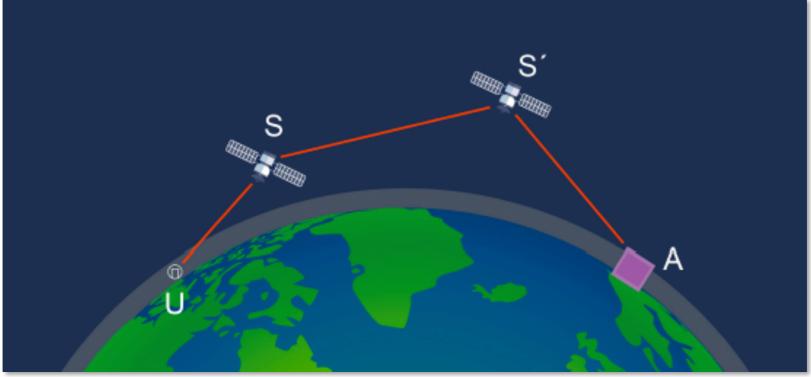
(base de Starlink et Galileo)

- inclinaisons des plans orbitaux identiques
- distribution périodique des points ascendants sur l'équateur



L'accès au haut débit avec des satellites en orbite basse





U: utilisateur, S, S': satellites, A: station d'ancrage

Exemples de lien S-U et S-A:

Bandes Ku (10.7-14.5 GHz), Ka (17.3-30 GHz) et V (37-50.4 GHz) et 5G

Exemple de liens entre satellites : laser



L'accès au haut débit avec des satellites en orbite basse



- Bande passante : capacité d'un réseau à transférer des données. Plus la bande passante est élevée et plus le volume d'informations transféré est important.
- Débit : la quantité d'informations transférée par seconde mesurée en megabits par seconde Mbit/s (10⁶ bits/s) ou en gigagbits par seconde Gbit/s (10⁹ bits/s)

Fonction du temps de latence et de la bande passante

- On distingue débit descendant (flux reçu par l'utilisateur) et débit montant (flux émis par l'utilisateur)
- Il y a partage de la bande passante par le nombre d'utilisateurs

Réseau	Débit	Latence	Observations
Terrestre ADSL	1 à 20 Mbit/s		
Terrestre Fibre optique	100 Mbit/s à 8 Gbit/s	10 ms	La fibre est 50 à 200 fois plus rapide que l'ADSL
Starlink	25 à 150 Mb/s	20 ms	Le débit dépend du nombre de satellites, de la bande passante de chaque satellite et du nombre d'utilisateurs



Exemples de types de constellations



(anciennes, nouvelles, futures)

Géolocalisation

- GPS (USA), delta [24]
- Galileo (UE), delta [24]
- Beidou (Chine), mixte [27]

Internet des objets

- KINEIS (F), polaire [25]
- ASTROCAST (F) [80]
- SWARM (USA) [150]

Observation de la Terre

- Copernicus(UE), environnement [170]
- METOP (UE), polaire, météorologie [3]
- CO3D (F) imagerie 3D [4]
- SCARBO (F) environnement [26]
- Défense (USA) [13]

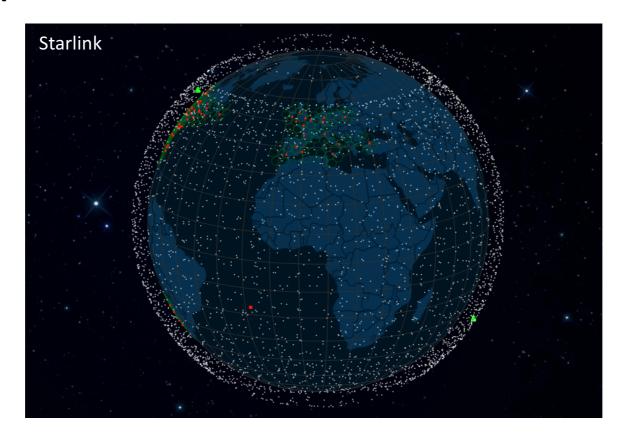
Communications Haut Débit

- Iridium (USA), star [<100]
- Globalstar (USA), star [48]
- Oneweb (GB, F), star [624]
- O3B (USA), équatoriale [~30]
- Starlink (USA) delta [48000]
- Kuiper (USA) mixte delta [10000]
- IRIS² (UE) multi-orbites [170]
- Guowang (Chine) [13000]
- Défense (USA) [13]
- IRIDE défense (Italie) [61]





SpaceX et la constellation Starlink



Nombre de satellites : 6300 en septembre 2024, 8000 en 2025, autorisation pour 42000, objectif 48000

Altitudes des satellites : entre 340 et 600 kilomètres



Pourquoi cet engouement pour les grandes constellations ?



Solution naturelle pour une couverture :

- à faible latence (20-30 ms en orbite basse contre 500 ms en orbite géostationnaire)
- universelle (contraintes en latitude pour certaines configurations)
- sans interruptions (mais il faut beaucoup de satellites)
- à haut débit (contraintes sur le nombre d'utilisateurs par satellite) (50 Tb/s au total contre 300 Tb/s pour la 5G FR)
- résiliente aux agressions et aux catastrophes naturelles (systèmes distribués)

Autres caractéristiques:

- débits comparables à ceux de la fibre optique
- fonctionnement avec des appareils mobiles non modifiés (BlueWalker 3)
- potentiel futur Internet spatial (indépendance vis-à-vis de l'internet terrestre et résilience)
- calcul embarqué (traitement du signal et services temps réel en réseau pour réduire la latence)
- combinaison des fonctions d'observation et de communication

Exemples d'applications : communications en Ukraine, hôpital isolé en Guyane, ...

The state of the s

Enjeux économiques haut débit



Nombreuses questions sur le modèle économique

- ☐ Les constellations initiales n'offraient pas vraiment le haut débit, exigeaient des antennes de grande taille et ont échoué d'un point de vue économique avant de se réorienter
- ☐ Les constellations actuelles ne peuvent pas remplacer les réseaux 5G terrestres mais seulement les compléter pour la couverture (1) des zones blanches et des territoires enclavés (2) des zones urbaines en ondes millimétriques

Starlink peut être vue comme la seule constellation offrant le haut débit qui fonctionne

Modèle économique :

- des satellites peu coûteux, fabriqués de façon disruptive en utilisant des technologies grand public,
- une approche client efficace avec notamment des terminaux à quelques centaines d'Euros faciles à installer et un abonnement à 50 €

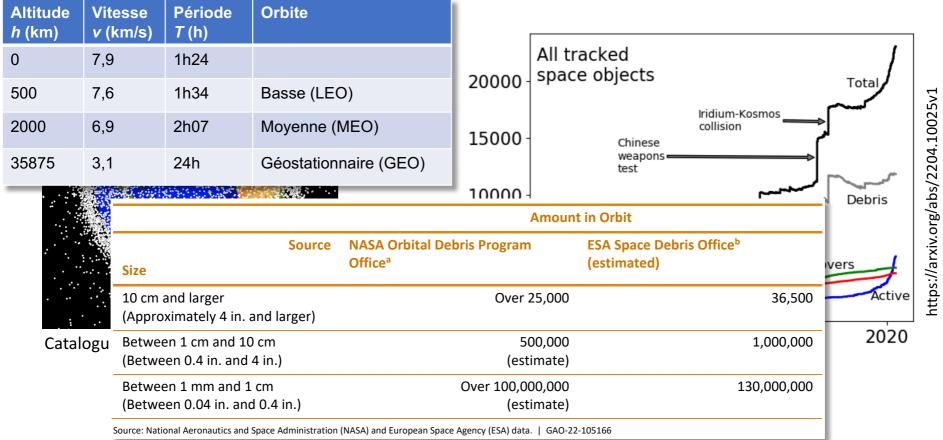
Le succès économique relatif de Starlink est aussi lié :

- ☐ au nouveau modèle de lanceur réutilisable
- au fait qu'une partie des satellites est lancée quasigratuitement en "passager" de vols commerciaux



Débris et surpopulation





https://www.youtube.com/watch?v=BiHY5dR5Jsg



Nombre de satellites

Evolution dans le ter

VOL. 83, NO. A6

JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH

JUNE 1, 1978



024

Collision Frequency of Artificial Satellites: The Creation of a Debris Belt

DONALD J. KESSLER AND BURTON G. COUR-PALAIS

NASA Johnson Space Center, Houston, Texas 77058

As the number of artificial satellites in earth orbit increases, the probability of collisions between satellites also increases. Satellite collisions would produce orbiting fragments, each of which would increase the probability of further collisions, leading to the growth of a belt of debris around the earth. This process parallels certain theories concerning the growth of the asteroid belt. The debris flux in such an earth-orbiting belt could exceed the natural meteoroid flux, affecting future spacecraft designs. A mathematical model was used to predict the rate at which such a belt might form. Under certain conditions the belt could begin to form within this century and could be a significant problem during the next century. The possibility that numerous unobserved fragments already exist from spacecraft explosions would decrease this time interval. However, early implementation of specialized launch constraints and operational procedures could significantly delay the formation of the belt.

INTRODUCTION

Since the beginning of the space age, thousands of satellites have been placed in earth orbit by various nations. These reached by this study that over the next few decades a significant amount of debris could be generated by collisions, affecting future spacecraft designs.

Syndrôme de Kessler :

Augmentation du nombre des satellites et de débris => risque de réaction en chaîne avec augmentation
catastrophique du nombre des satellites et de débris => risque de réaction en chaîne avec augmentation
pomique, fond important pour l'astronomie)

Région directement conce

Publication récente (Liang, Fanto & Signoracci, 2024) : déclenchement vers 2050 !

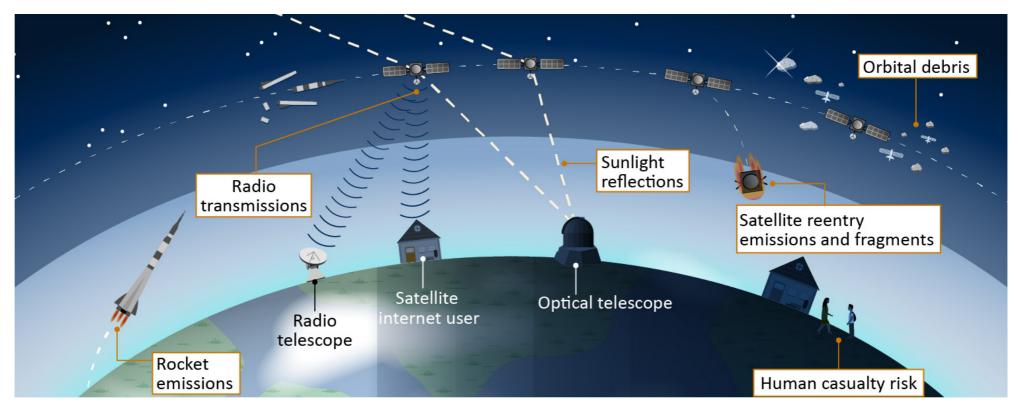
Facteurs de déclencheme

- trop grand nombre de nouveaux satellites
- difficultés de prédiction des collisions
- utilisation d armes anti-satellites
- difficultés de mise en œuvre des procédures d'évitement



Conséquences pour l'astronomie et l'environnement





Source: GAO. | GAO-22-105166



Impact sur l'astronomie optique (UV-visible-infrarouge)





Traces de satellites artificiels sur la nébuleuse d'Orion mi-décembre 2019 (crédit : A. H. Abolfath)

- Principal problème : réflexion de la la lumière solaire par les satellites
- **Pollution au crépuscule et à l'aube** tout particulièrement pour les instruments à grand champ de vue
- Le plus emblématique : Vera Rubin Observatory : 30% des images affectées pour 42 000 satellites Starlink, perte d'événements transitoires
- Actions de la communauté astronomique :
 - Conférences Dark & Quiet Skies 1&2 (2020 et 2021)
 - Fondation par l'UAI du Center for the Protection of Skies (2022)
 - Appel à limiter l'altitude à 600 km et l'éclat des satellites à la magnitude V=7 (10% du niveau de saturation des poses VRO)
- => Point inscrit à l'ordre du jour du CUPEEA (COPUOS) pendant 5 ans
- Coopération de Starlink et Kuiper avec le CPS et mise à jour des caractéristiques techniques des satellites (V>7 pour Starlink 2)
- Problème en cas de déclenchement du syndrome de Kessler : augmentation de la brillance du ciel nocturne

Coopération et grande vigilance plus que jamais nécessaires !

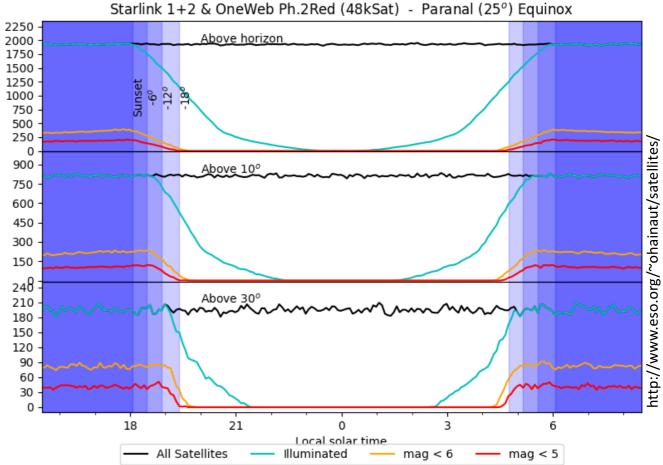


Impact sur l'astronomie optique (UV-visible-infrarouge)





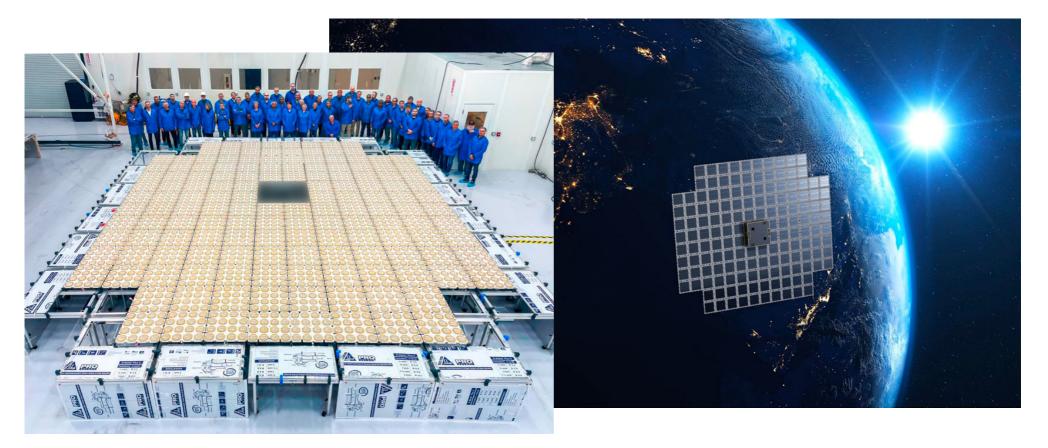
Traces de satellites artificiels sur la nébuleuse d'Orion mi-décembre 2019 (crédit : A. H. Abolfath)







BlueWalker 3 d'AST SpaceMobile



Aussi brillant que Procyon (magnitude V=0,4) – 6ème étoile la plus brillante du ciel

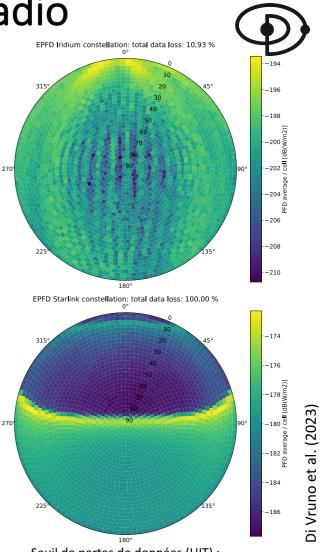


Impact sur l'astronomie radio

(50 MHz-950 GHz)

- **Principal problème :** pollution de bandes astronomiques par les émission directes télécom des satellites des basses fréquences au millimétrique
- **Différence avec l'optique :** pollution permanente (pas liée au rythme diurne)
- Solution partielle (acceptée par Starlink) :
 - Le sanctuaire radio local : cessation des émission télécom au-dessus des observatoires radio
 - Émissions cependant détectables pour tous les satellites en vision directe sur la voûte céleste (largeur de lobe, lobes secondaires, puissance d'émission) (6% pour Starlink 2 avec SKA)
 - Ne règle pas le problème pour les observations interférométriques intercontinentales
- Autre problème: émissions propres à basse fréquence des électroniques des satellites (détection LOFAR, niveau supérieur au plafond UIT →)

Coopération et grande vigilance plus que jamais nécessaires !



Seuil de pertes de données (UIT) : -194 dB (Wm⁻²)



Impact sur l'environnement



• Croissance incontrôlée :

- 14000 satellites en orbite dont environ 35% lancés dans les trois dernières années (≥ 2000 satellites placés sur orbite par an)
- 100000 autres prévus dans la prochaine décennie

Augmentation de la pollution de la haute atmosphère :

- Centaine de lancements par an : émissions de CO_2 et de vapeur d'eau bien inférieures à l'aviation civile <u>mais</u> émission de HCl, d'alumine et de particules *Black Carbon* (efficacité $x10^4$ /avions) dans la haute atmosphère
- Importants temps de séjour des molécules et des particules dans la tropopause
- Croissance des retours sur Terre de satellites en fin de vie et des débris associés

• Conséquences possibles :

- Décomposition de la couche d'ozone
- Modification du bilan radiatif et de la distribution de température

• Pas de réelle étude à ce stade



Besoin urgent de régulation/normes



Une coopération encourageante entre astronomes et industriels

Des actions qui ont un impact au CUPEEA/COPUOS (ONU) malgré le contexte international défavorable

Mais:

- Course effrénée pour l'occupation des orbites et des fréquences (premier arrivé, premier servi)
- Aucune régulation ou gouvernance internationale
- Seule instance de régulation (pour les télécommunications) : Union Internationale des Télécommunications qui veille seulement à la disponibilité des fréquences et des orbites
- Aucune réglementation internationale sur les nuisances, les bonnes pratiques de lancement, de fin de vie, de manœuvres d'évitement, etc. malgré le traité de l'espace de 1967 qui définit les responsabilités des États et malgré l'existence de la norme ISO/TS 6434:2024 (mais lois US et France)
- Aucune contrainte ne peut être exercée par un État sur un opérateur extraterritorial (confidentialité des données/conversations par exemple)

La régulation viendra-t-elle naturellement à l'approche de la catastrophe ?



Les recommandations du rapport de l'Académie des sciences



- **Recommandation 1**: besoin de soutenir la recherche et l'innovation dans les domaines concernés
- Recommandation 2 : la France et l'Europe doivent s'engager à développer une constellation (souveraineté et indépendance commerciale)
- Recommandation 3 : soutenir l'effort de développement d'un lanceur réutilisable européen
- Recommandation 4 : poursuivre les actions entreprises pour juguler l'impact négatif des constellations pour l'astronomie
- Recommandation 5 : adopter des normes internationales pour garder les constellations et leurs impacts sous contrôle et protéger l'environnement





