

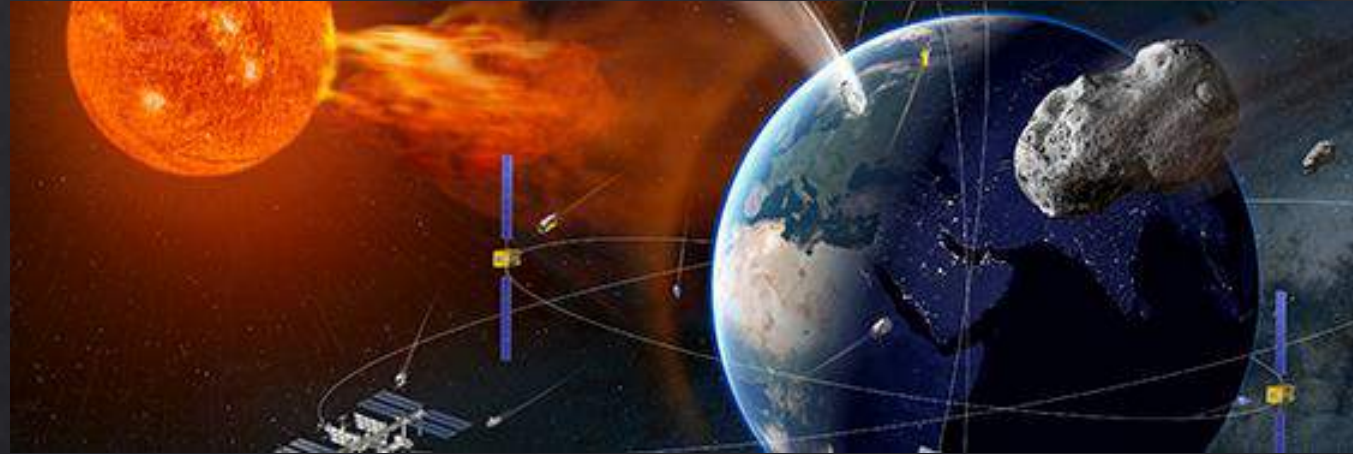
Lionel BIREE
Ingénierie Conseil et Formation en SSA
Email : elios-space@outlook.fr
Internet : <http://elios.space>



SOMMAIRE

- 1 – Définition de la SSA
- 2 – Accès à l'espace
- 3 – Surveillance de l'espace et caractérisation des objets spatiaux

DÉFINITION DE LA SSA



Space Situational Awareness

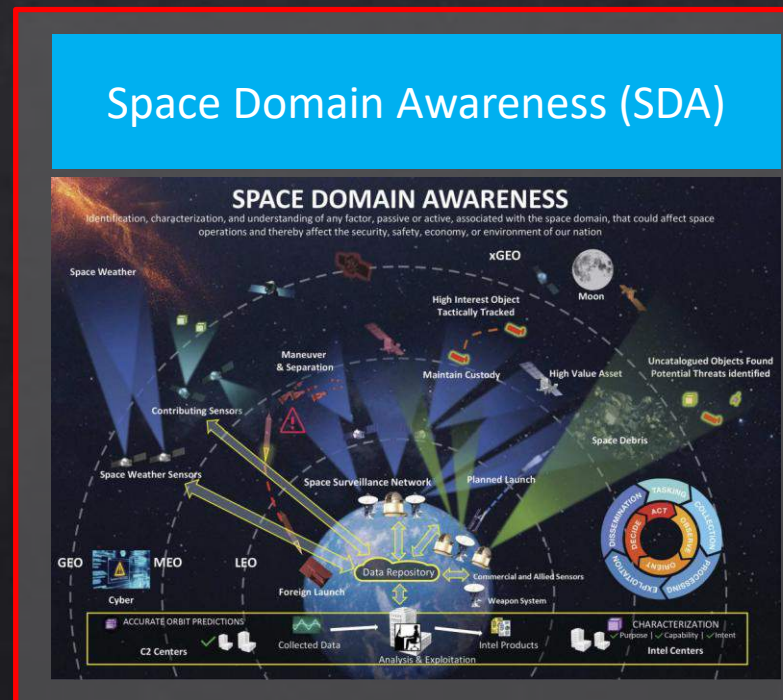
- ◇ « Programme de l'Agence spatiale européenne (ESA) créé en 2009 dont le but est de maintenir un accès indépendant pour l'Europe à l'espace et son utilisation grâce à une veille spatiale en particulier sur les risques pour les infrastructures tant orbitales que terrestres. »

Définition de l'ESA



Space Situational Awareness

- ◇ Un domaine pour les opérations spatiales (hors cadre SSA Europe)



ACCÈS À L'ESPACE



Définitions



- ◇ Un satellite artificiel : appareil construit par l'Homme et mis en orbite autour d'un astre,
- ◇ Un lanceur : un véhicule, qui se déplace dans l'espace grâce à un moteur-fusée, en emportant à la fois le combustible et le comburant nécessaires à son fonctionnement. Il emporte le ou les satellites.



Architecture d'un satellite



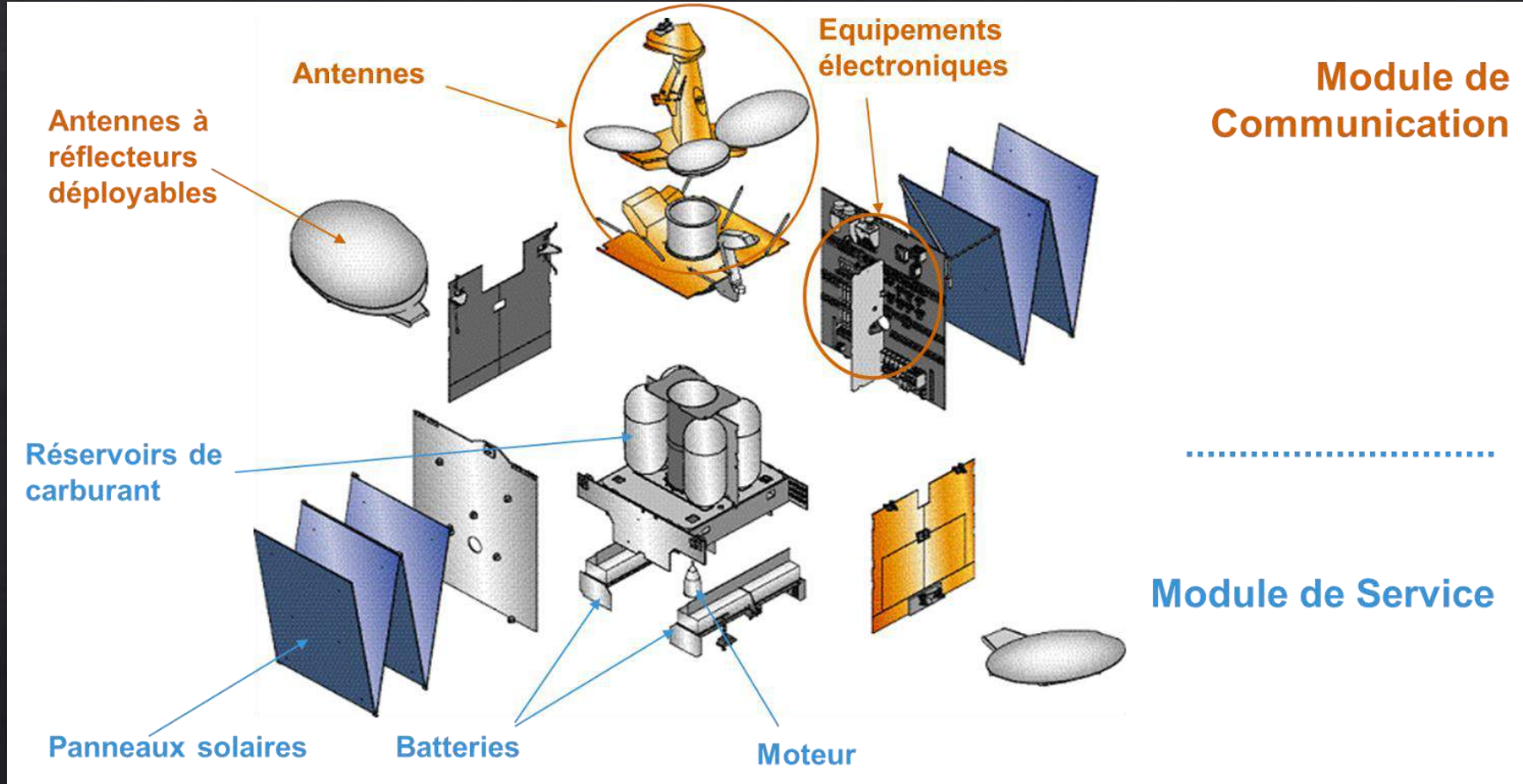
Charge utile (CU)

- Instruments nécessaires pour assurer la mission :
 - Instruments d'optique ou radar pour l'observation de la Terre,
 - Antennes et amplificateurs pour les télécommunications,
 - Equipements spécifiques en fonction des missions scientifiques (spectroscopie, capteur IR, Xray ...)

Plateforme (bus) ou module de service

- Equipements nécessaires pour le bon fonctionnement de la CU, le maintien du satellite en orbite et assure la liaison radio avec les stations sols.

Architecture d'un satellite



Architecture d'un lanceur

◇ Partie supérieure :

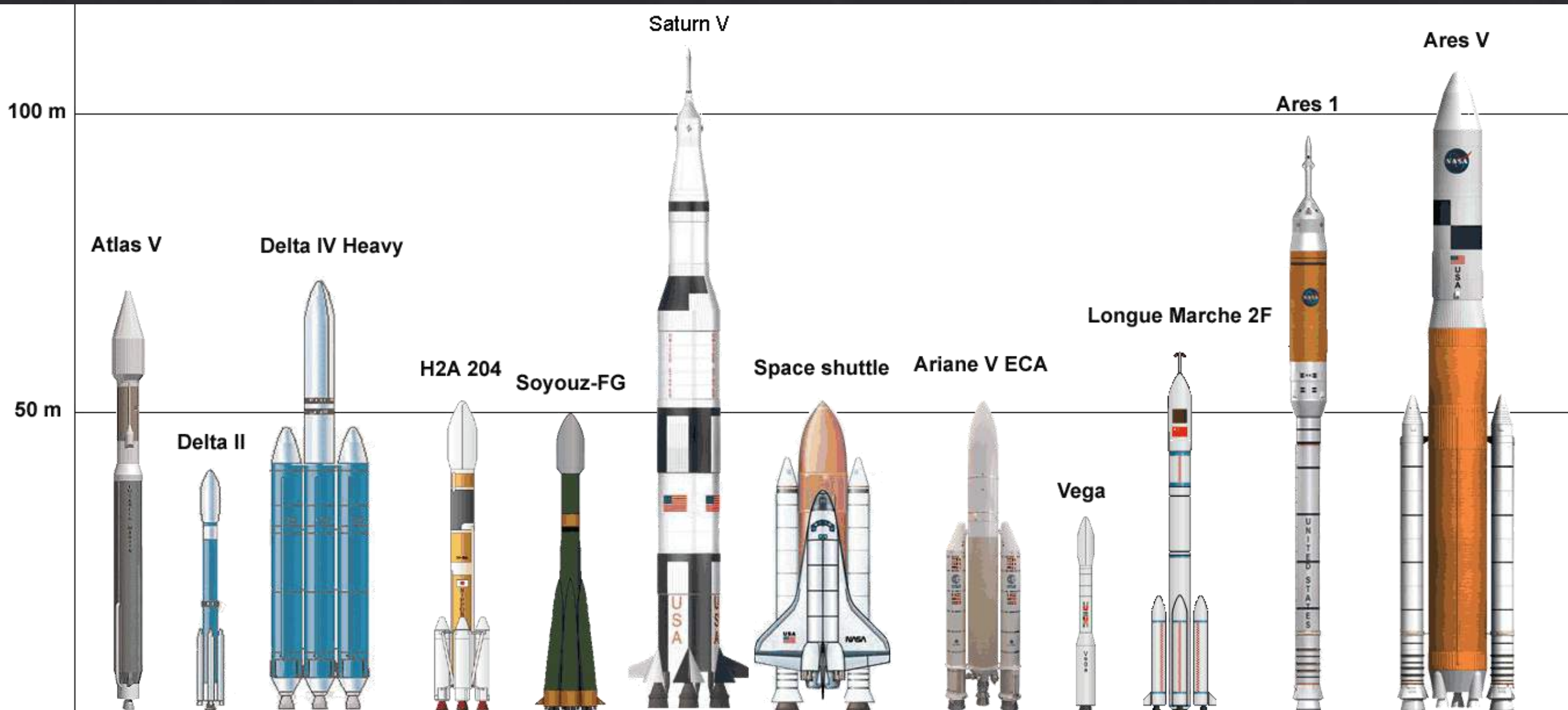
- Charge utile (satellites),
- Coiffe de protection,
- Moteur fusée de l'étage,
- Case à équipements composée :
 - système de contrôle de vol,
 - Système de télémessure,
 - Système électrique,
 - Système pyrotechnique,
 - Système de sauvegarde.



◇ Partie inférieure :

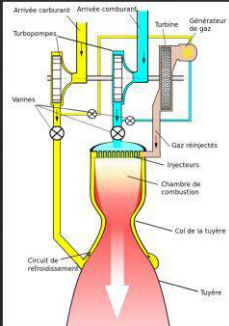
- Un ou plusieurs étages contenant des réservoirs,
- Propulseurs à poudre,
- Moteur(s) fusée(s).

Architecture d'un lanceur

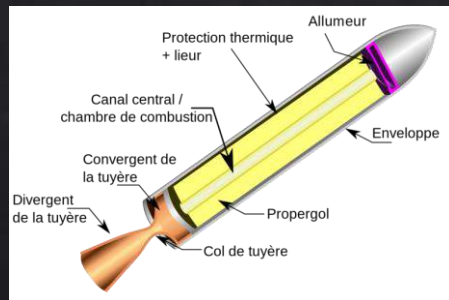


La propulsion

❖ Principe de fonctionnement d'un moteur-fusée :



- Moteur à ergol : ergol correspondant aux liquides réducteurs ou oxydants servant à alimenter les moteurs-fusées,



- Moteur à propergol : propergol pour désigner un mélange oxydant/réducteur autonome de ce type de moteur.



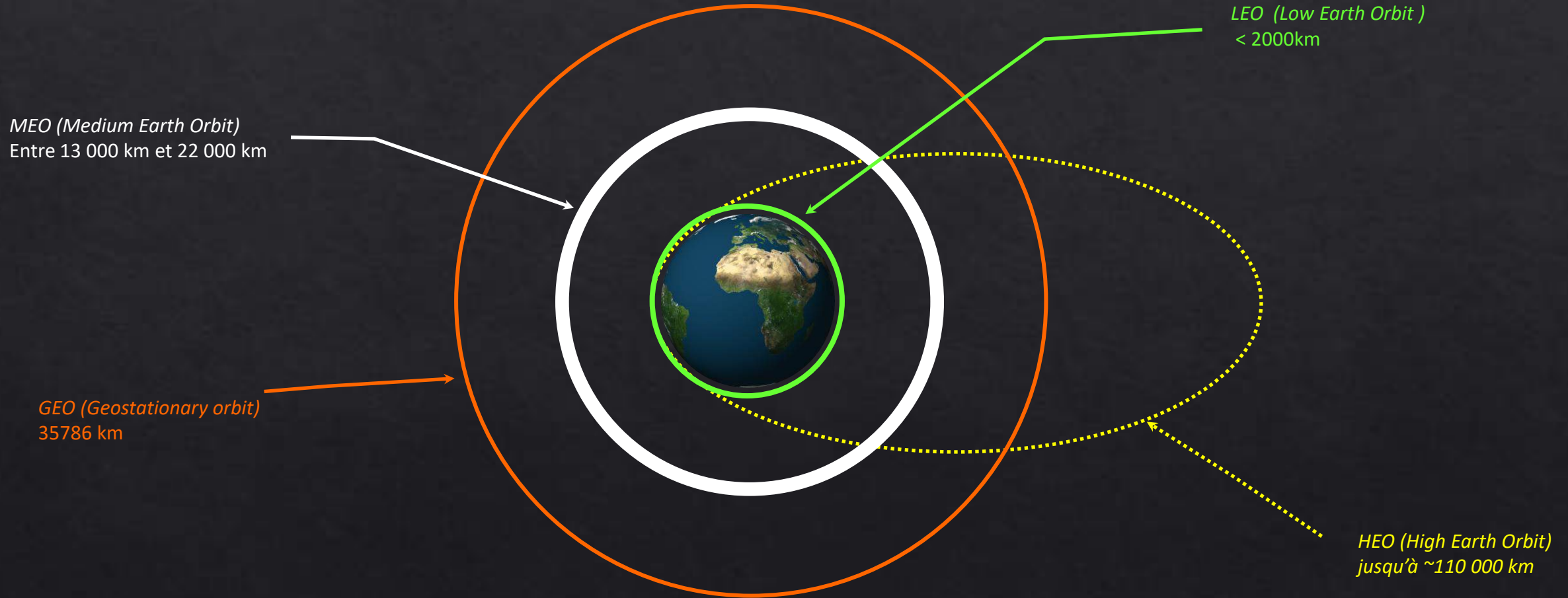
Prêt pour aller dans l'espace ...



Prêt pour aller dans l'espace ...

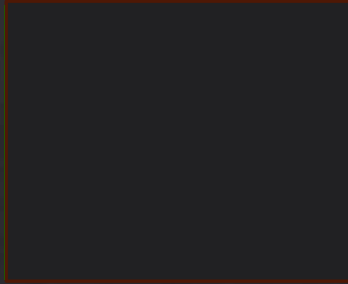


Les orbites des satellites

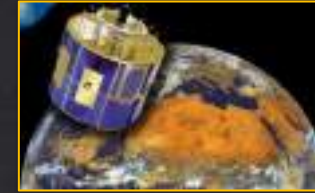


Les applications

◆ Observation / écoute



◆ La météorologie



METEOSAT



GOES - R

◆ Télécommunications



◆ Exploration de l'Univers



VOYAGER 2



GAIA



JAMES WEBB
TELESCOPE



JUICE

◆ Localisation

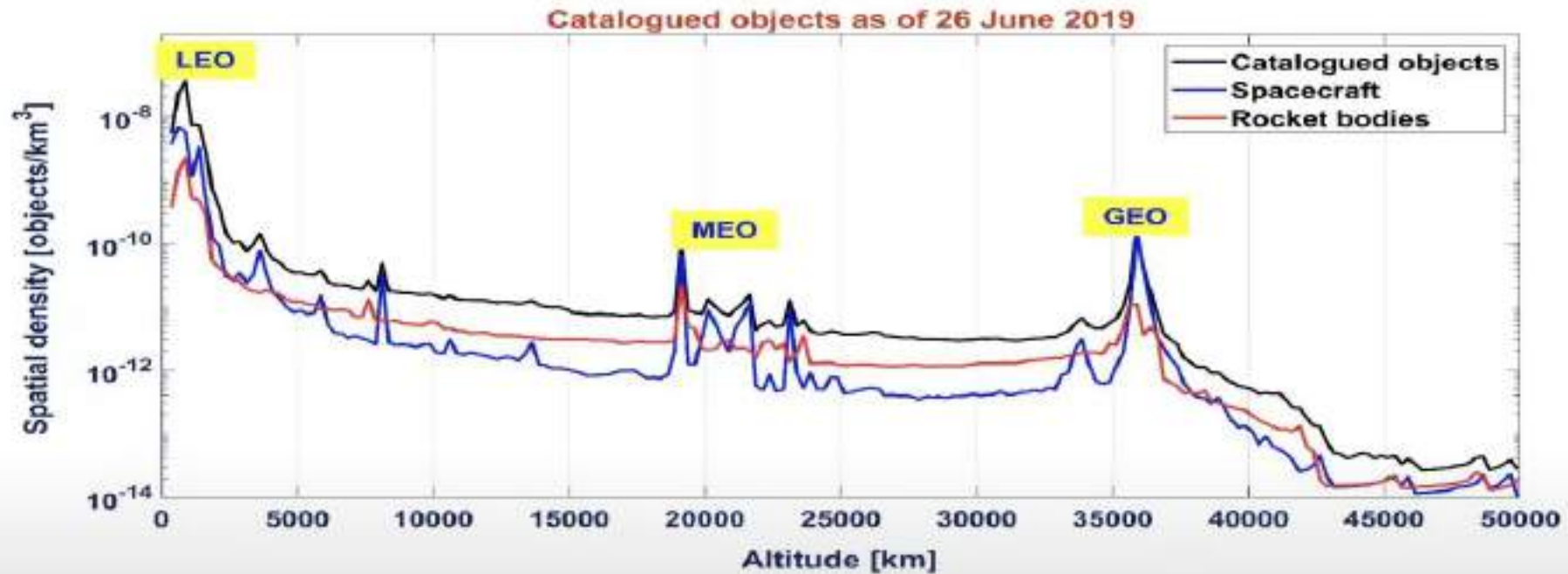


◆ Vols habités



Population spatiale

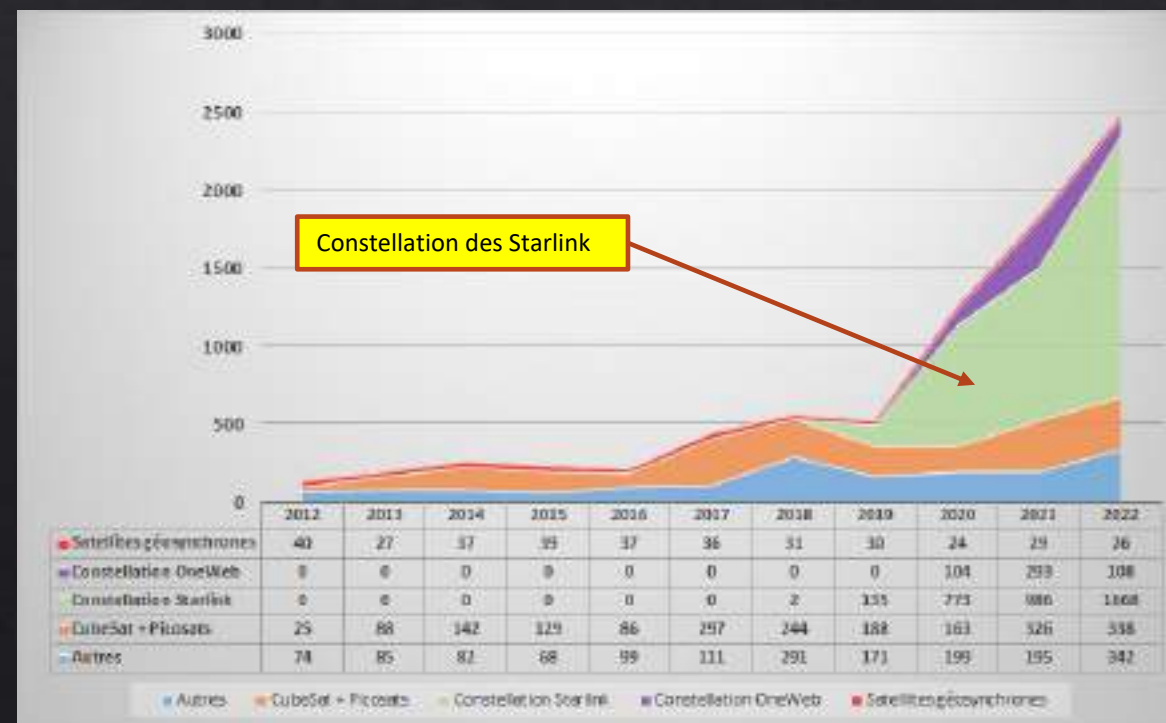
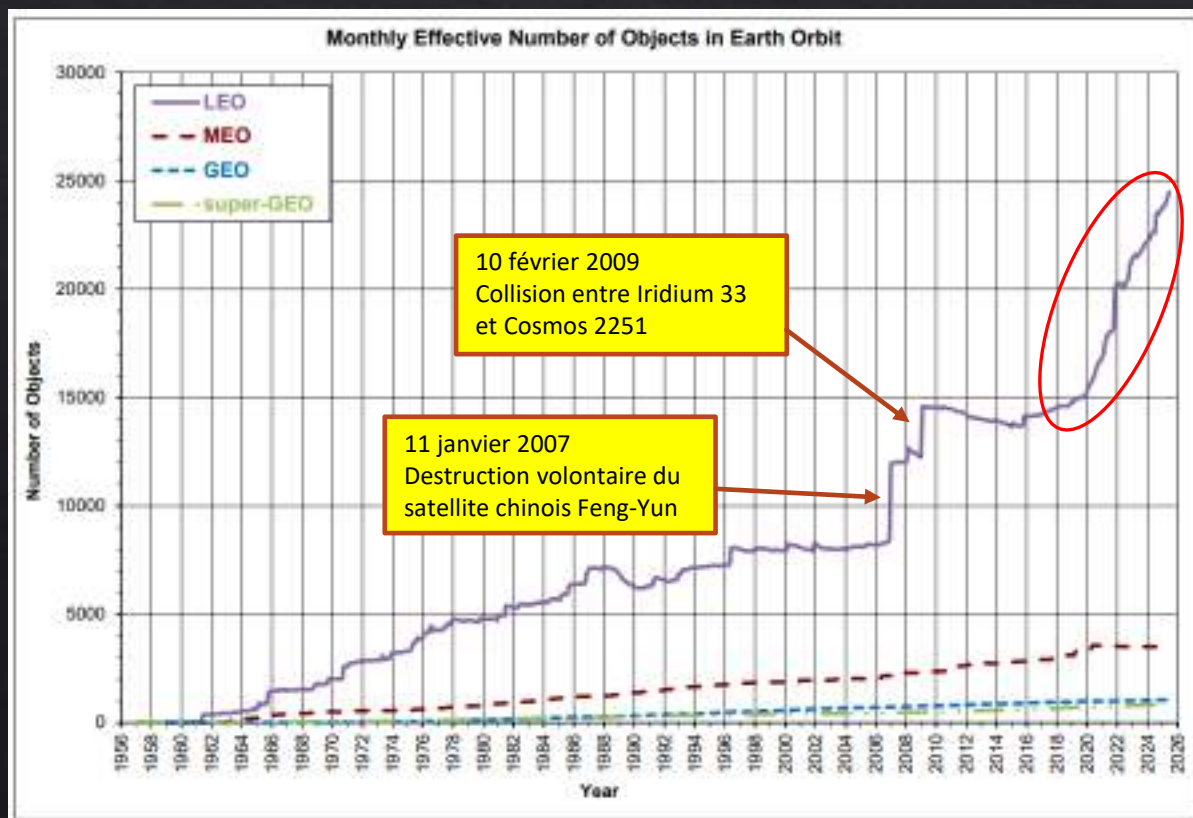
Distribution orbitale au 26 juin 2019



Population spatiale

Nombre d'objets suivis:

◇ ~ 45 000 objets dont 12 900 actifs (source : ESA)



Population spatiale

Les NEO

- ◆ Astéroïdes géocroiseurs avec une orbite proche de l'orbite terrestre ($p < 1.3$ UA),

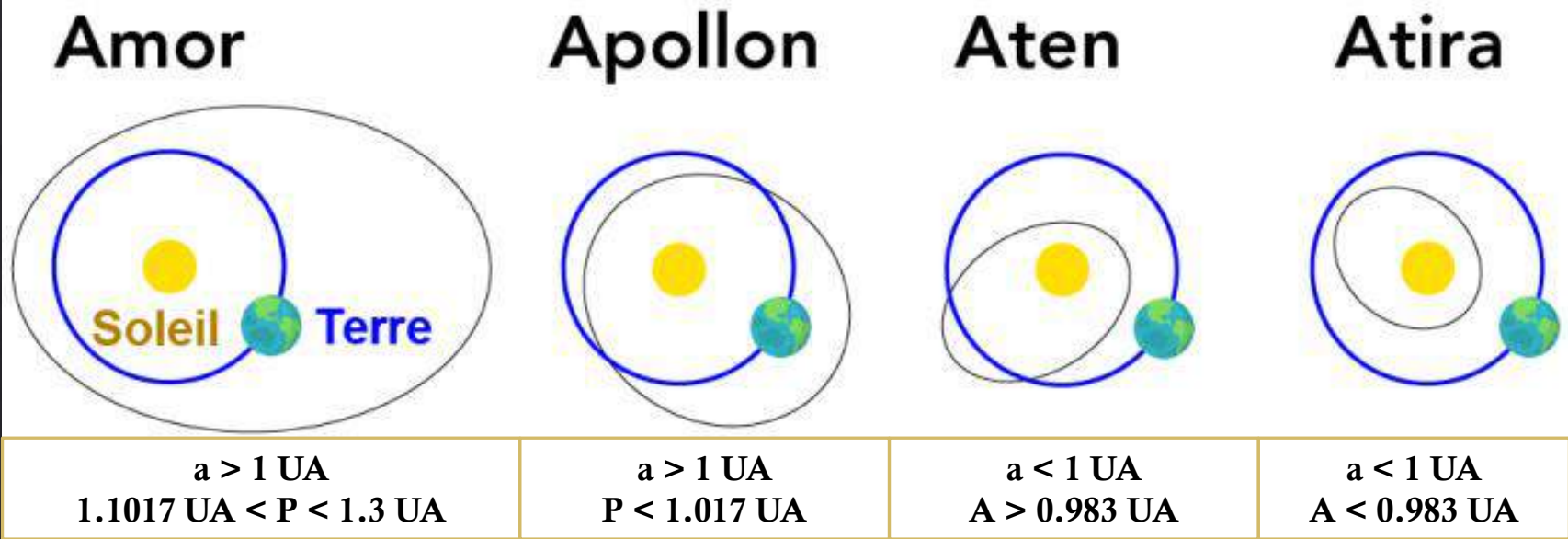


Population spatiale

Les NEO

◆ Groupes :

Nombre : 30 500



Population spatiale

Les NEO

Nombre : 2300

- ◆ Les PHA (Potentially Hazardous Asteroids) ont des distances minimales d'intersection avec la Terre $< 0,05$ UA. Ils ont un diamètre >140 m et une magnitude absolue < 22 .



Les risques

Les NEO

- ◇ Jusqu'à \emptyset 50 mètres : destruction dans l'atmosphère terrestre (explosion d'une bombe de 5 mégatonnes ¹),
- ◇ $\emptyset >$ à 50 m, l'objet atteindrait la Terre en provoquant des dégâts :
 - \emptyset 1 Km de diamètre \approx explosion d'une bombe 750 mégatonnes,
 - \emptyset 2 Km de diamètre \approx explosion d'une bombe d'un million de mégatonnes,
 - \emptyset 15 Km de diamètre \approx explosion d'une bombe de 100 millions de mégatonnes.



¹ Puissance de la bombe HIROSHIMA \approx 12 kilotonnes, soit \approx 15 000 tonnes de TNT

Les risques



Chute de Tcheliabinsk, le 15 février 2013

Taille : 15 m

Masse : 13 000 kg

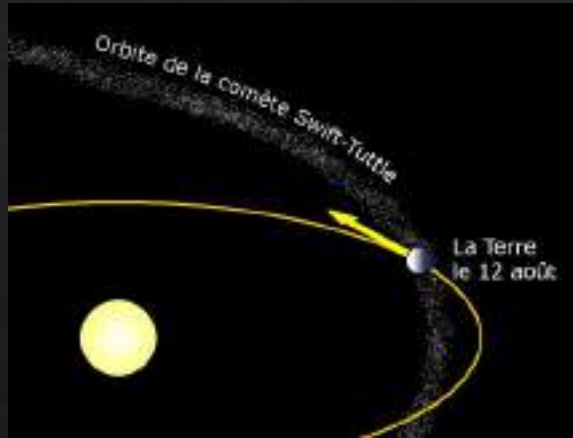
*Explosion équivalente à 440 kilotonnes
(~30 x la bombe Hiroshima)*

Les risques



Météoroïdes :

- ◇ Petits corps issus de la formation du système solaire,
- ◇ Vitesses élevées ~ 20 km/s et 72 km/s.

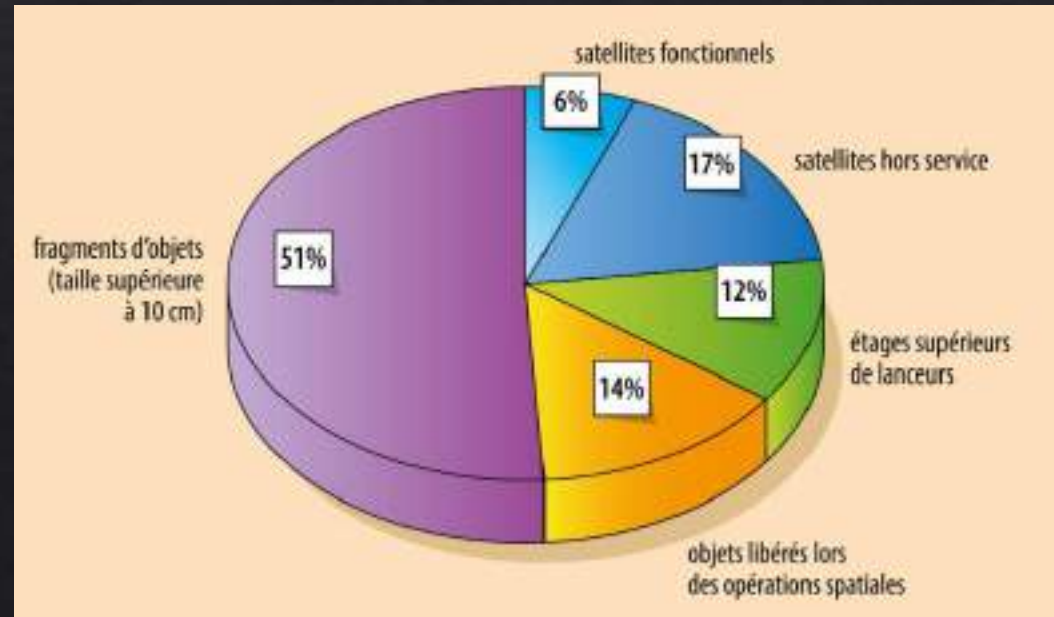




Les risques

Débris spatiaux :

- ◇ Satellites en fin de vie,
- ◇ Objets mis en orbite en même temps que le satellite,
- ◇ Fragmentation,
- ◇ Vieillesse des matériaux.



Les risques



Débris spatiaux :

◆ Quelques chiffres :

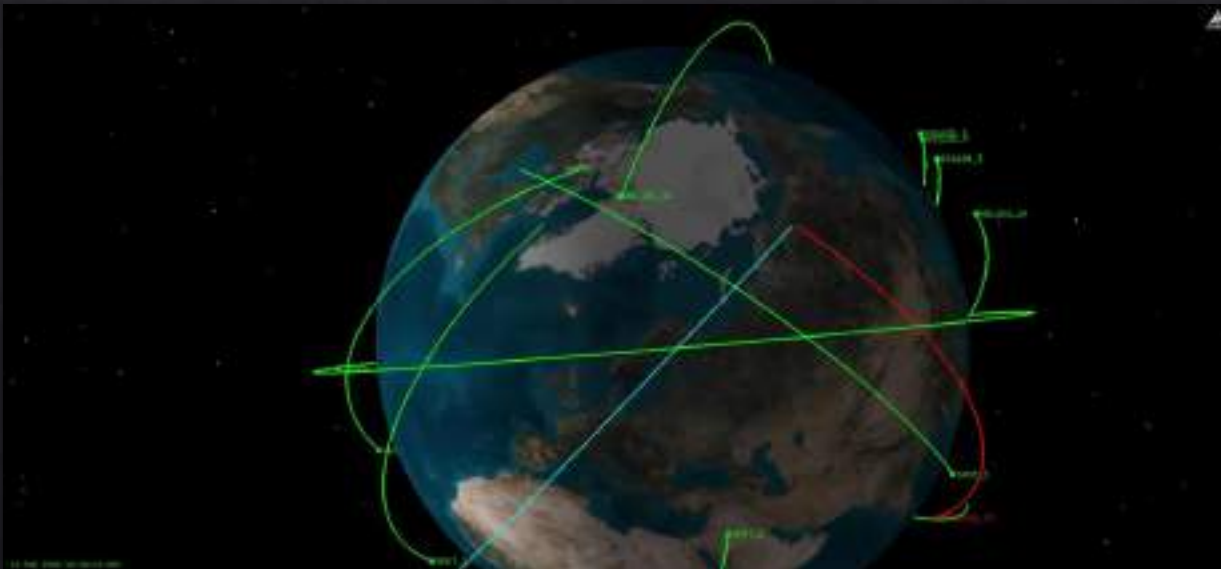
- 1 m : ~ 6000 objets,
- 10 cm : ~ 45 000 objets,
- 1 cm : ~ 750 000 objets,
- 1 mm : ~ 170 millions objets,
- 0,1 mm : ~ 360 milliards objets,



Les risques

Les collisions :

- ◇ Risques sur les orbites les plus fréquentées,
- ◇ Risques entre les objets actifs et non actifs,
- ◇ Débris spatiaux générés,
- ◇ Vitesses élevées entre 7 et 20 km/s.



Attention au syndrome de Kessler



Les risques

Dégâts des débris spatiaux :

Taille des débris	Conséquences
< 0.01 cm	Érosion des surfaces
Entre 0.01 cm et 1 cm	Dommages significatifs Perforations Conséquences variables suivant l'équipement atteint
Entre 1 et 10 cm	Dommages très importants Risque de perte de la mission Aucun blindage ne résiste à des particules > 2 cm
> 10 cm	Conséquences catastrophiques Destruction du satellite Production de nombreux débris



Impacts sur les panneaux solaires du télescope spatial Hubble

Épaisseur d'aluminium perforée par un bille d'aluminium à une vitesse de 10 km/s

Diamètre du projectile	0,01 mm	0,1 mm	1 mm	10 mm
Épaisseur perforée	0,03 mm	0,4 mm	4 mm	50 mm



Les risques

Les rentrées atmosphériques à risque :

- ◆ En 70 ans de vols spatiaux, environ 10 000 objets sont retombés !
- ◆ 4 % de risques que la RAR tombe sur une zone habitée,
- ◆ 10% des aérosols dans l'atmosphère proviennent des retombées de débris spatiaux.



Enveloppe en titane (70 kg) du moteur du troisième étage de la fusée Delta 2 après son impact au sol en Arabie Saoudite le 21 janvier 2001 (source Nasa)



Réservoirs et tuyère du deuxième étage d'une fusée Delta II retrouvé en Afrique du Sud en 2000.



Panneau de la station spatiale soviétique Saliout 7 retrouvés en Argentine à la suite de sa rentrée atmosphérique en 1991.

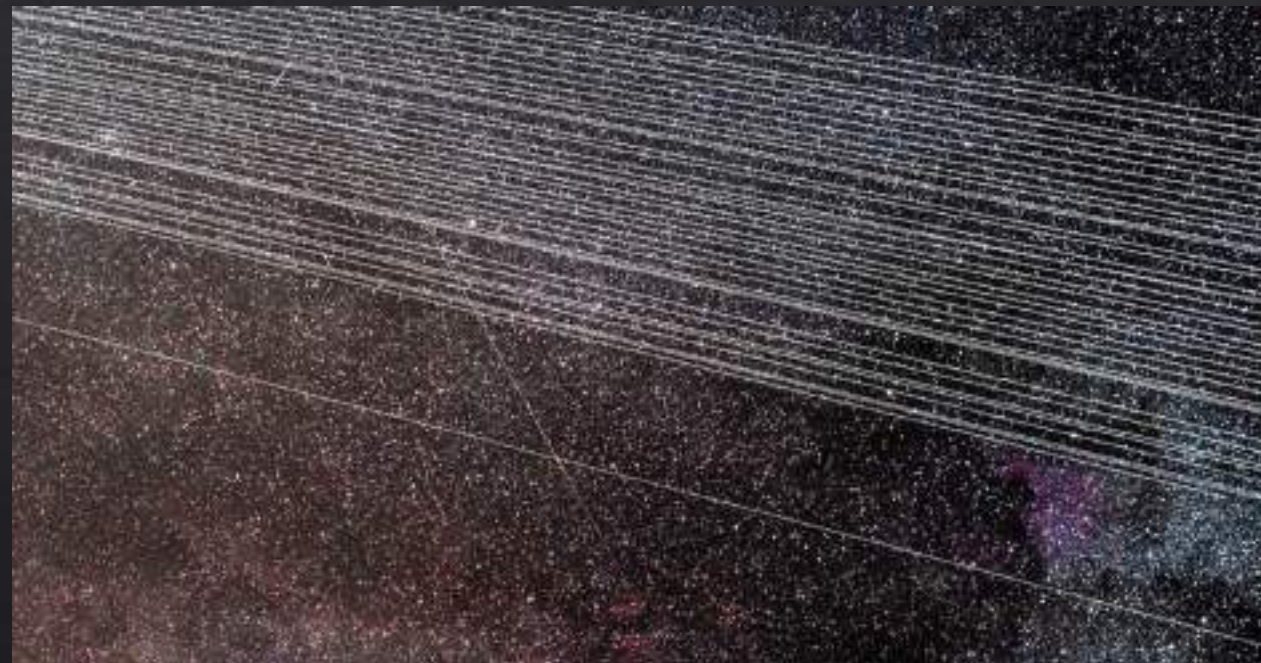
Les risques

Les rentrées atmosphériques à risque :



Les risques

Pollution lumineuse :



Passage des Starlink et dégradation des images scientifiques

Les risques

Pollution lumineuse :



Une image à longue exposition de la nébuleuse d'Orion, avec un temps d'exposition total de 208 minutes, montre des traînées de satellites à la mi-décembre 2019, alors que seulement environ 180 satellites Starlink avaient été lancés.

Photo : A. H. ABOLFATH/NOIRLAB/NSF/AURA



Image de la comète C/2023 A3 (Tsuchinshan-ATLAS) le 1er août depuis l'Italie. L'image montre des dizaines de satellites traversant le cadre sur un total de 20 minutes de temps d'exposition.

Photo : Rolando Ligustri.

3- SURVEILLANCE ET CARACTÉRISATION DES OBJETS SPATIAUX



Surveillance et caractérisation des objets spatiaux

Moyens au sol et en orbite :

◆ Optiques :



TAROT



◆ Radar :



Systeme GRAVES



BEM Le Monge

◆ Satellites :



SURVEILLANCE ET CARACTÉRISATION DES OBJETS SPATIAUX

Objets à surveiller

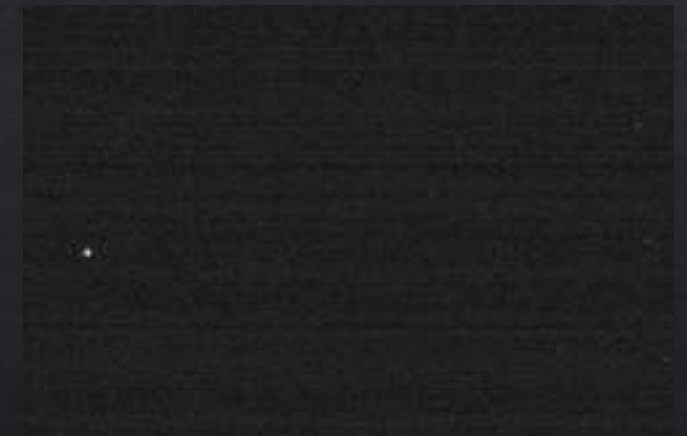
- Objets défilants (LEO – MEO)



Mise en orbite des Starlink



*Suivi de l'ISS
Crédit : Emmanuel RIECH*



*Suivi du SL-16 R/B #22803
Crédit : Alcor System*

SURVEILLANCE ET CARACTÉRISATION DES OBJETS SPATIAUX

Objets à surveiller

- Objets « immobiles » (GEO)



*Ballet des satellites HISPASAT et SPAINSAT
Crédit : Lionel BIREE*



*« Circulation spatiale »
Crédit : Lionel BIREE*

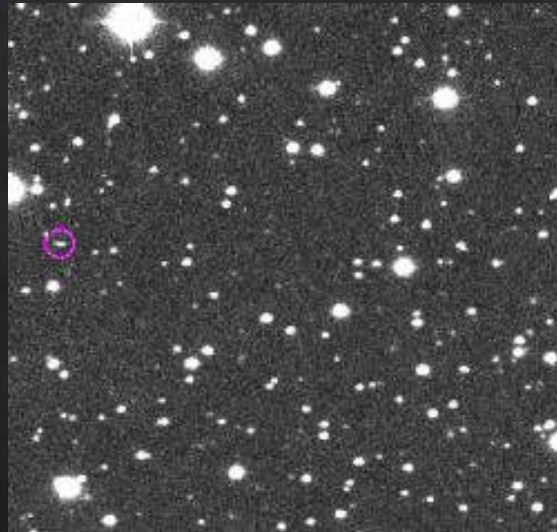


*Transit d'INMARSAT – GX5
Crédit : Lionel BIREE*

SURVEILLANCE ET CARACTÉRISATION DES OBJETS SPATIAUX

Objets à surveiller

- Géocroiseurs (NEO)



SURVEILLANCE ET CARACTÉRISATION DES OBJETS SPATIAUX

Définition de la caractérisation :

Désigne l'ensemble des actions et des mesures entreprises pour identifier, analyser et comprendre les propriétés physiques, dynamiques et fonctionnelles d'un objet en orbite ou dans l'espace lointain.

➤ 1. Caractérisation physique

- Taille et forme : estimée par l'analyse du mouvement ou les effets gravitationnels.
- Matériaux : déduits de la signature spectrale (analyse de la lumière réfléchie ou émise).
- État de surface : rugosité, réflectivité (albédo), couleur.

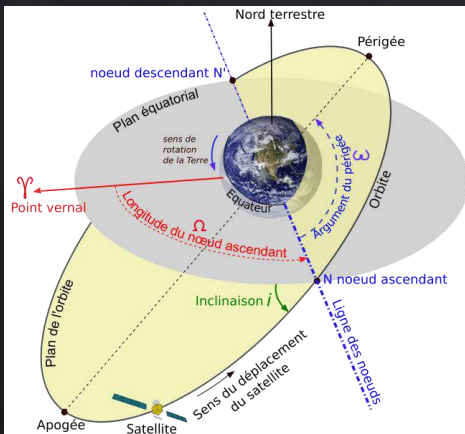


SURVEILLANCE ET CARACTÉRISATION DES OBJETS SPATIAUX

Définition de la caractérisation :

Désigne l'ensemble des actions et des mesures entreprises pour identifier, analyser et comprendre les propriétés physiques, dynamiques et fonctionnelles d'un objet en orbite ou dans l'espace lointain.

➤ 2. Caractérisation dynamique



- Orbitales :
 - Paramètres orbitaux (altitude, inclinaison, excentricité...)
 - Type d'orbite (LEO, MEO, GEO, HEO, etc.)
- Rotation : vitesse de rotation, axe de rotation (attitude).
- Évolution orbitale : dérive, instabilités, interactions gravitationnelles.

SURVEILLANCE ET CARACTÉRISATION DES OBJETS SPATIAUX

Définition de la caractérisation :

Désigne l'ensemble des actions et des mesures entreprises pour identifier, analyser et comprendre les propriétés physiques, dynamiques et fonctionnelles d'un objet en orbite ou dans l'espace lointain.

- 3. Caractérisation fonctionnelle (s'il s'agit d'un satellite actif)
 - État de fonctionnement : actif, inactif, hors de contrôle.
 - Émissions électromagnétiques : radios, transmissions, signatures radar.
 - Usage ou mission : télécommunications, observation, espionnage, recherche...



SURVEILLANCE ET CARACTÉRISATION DES OBJETS SPATIAUX

Définition de la caractérisation :

Désigne l'ensemble des actions et des mesures entreprises pour identifier, analyser et comprendre les propriétés physiques, dynamiques et fonctionnelles d'un objet en orbite ou dans l'espace lointain.

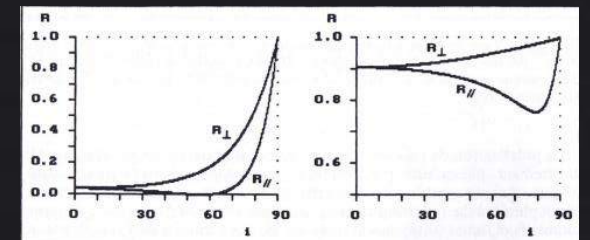
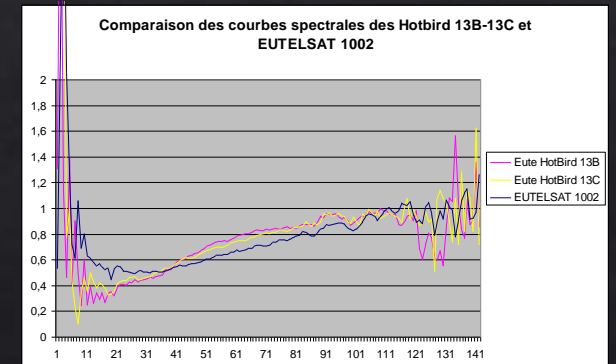
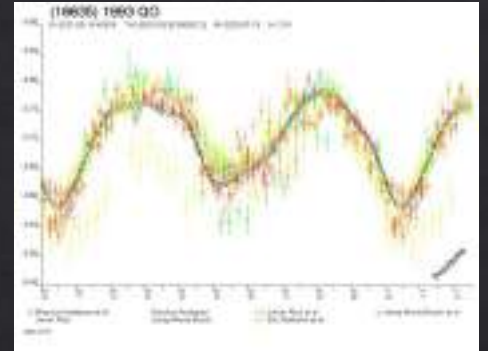
- 4. Caractérisation comportementale (dans le contexte de la surveillance spatiale)
 - Manœuvres détectées : changements orbitaux intentionnels.
 - Interactions avec d'autres objets : approche, collision, remorquage.



SURVEILLANCE ET CARACTÉRISATION DES OBJETS SPATIAUX

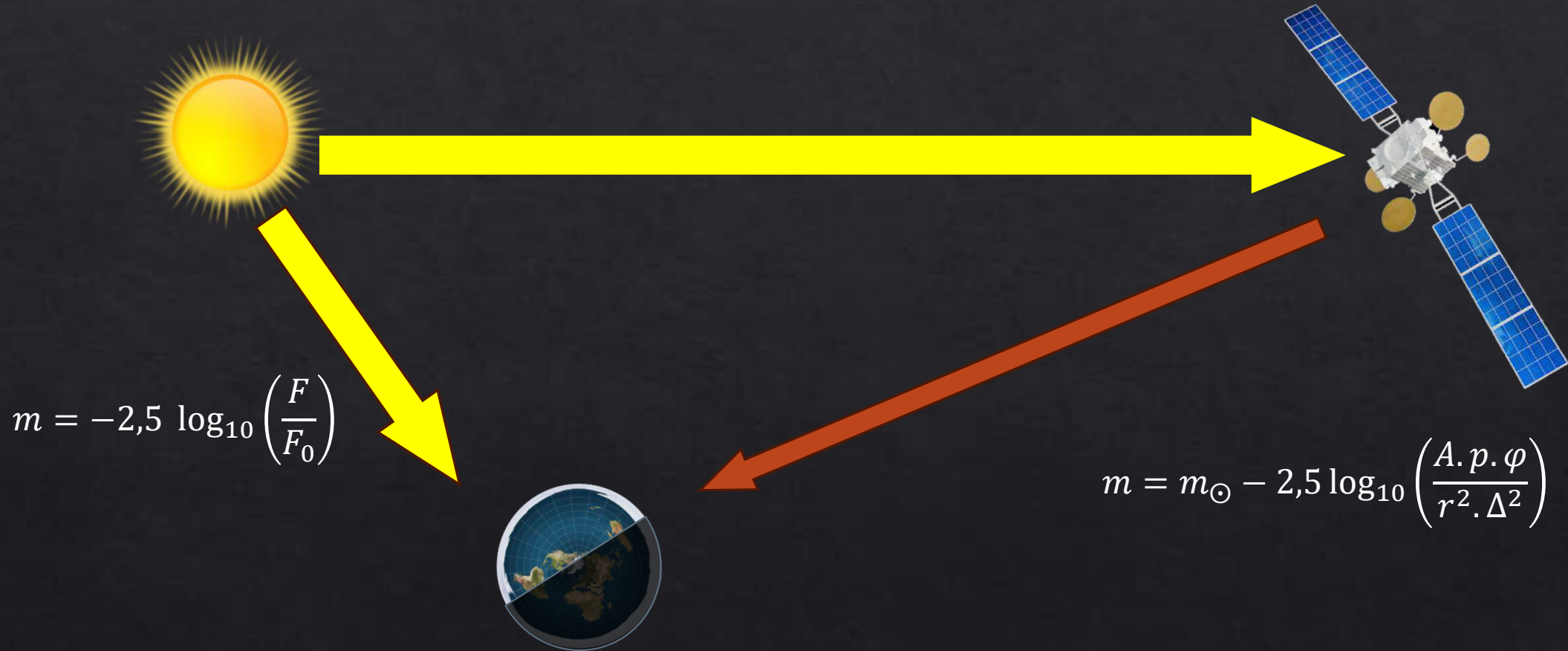
Méthodes de caractérisation

- Par photométrie : La photométrie consiste à mesurer l'intensité lumineuse (flux lumineux) d'un objet astronomique à différentes longueurs d'onde ou dans différentes bandes spectrales.
- Par spectroscopie : La spectroscopie consiste à décomposer la lumière d'un objet céleste en un spectre de longueurs d'onde, révélant la composition chimique, la température, la vitesse radiale et d'autres propriétés physiques.
- Par polarimétrie : mesure le degré et l'angle de polarisation de la lumière, c'est-à-dire la direction préférentielle d'oscillation des ondes lumineuses.



SURVEILLANCE ET CARACTÉRISATION DES OBJETS SPATIAUX

Mesure du flux lumineux



SURVEILLANCE ET CARACTÉRISATION DES OBJETS SPATIAUX

Mesure du flux lumineux

- Dépend :
 - De la surface réfléchissante,

$$A_{refl} = \frac{r^2 \cdot F \cdot \Delta^2}{p \cdot \varphi \cdot F_{\odot}}$$



SURVEILLANCE ET CARACTÉRISATION DES OBJETS SPATIAUX

Mesure du flux lumineux

- Dépend :
 - De la surface réfléchissante,
 - De l'albédo

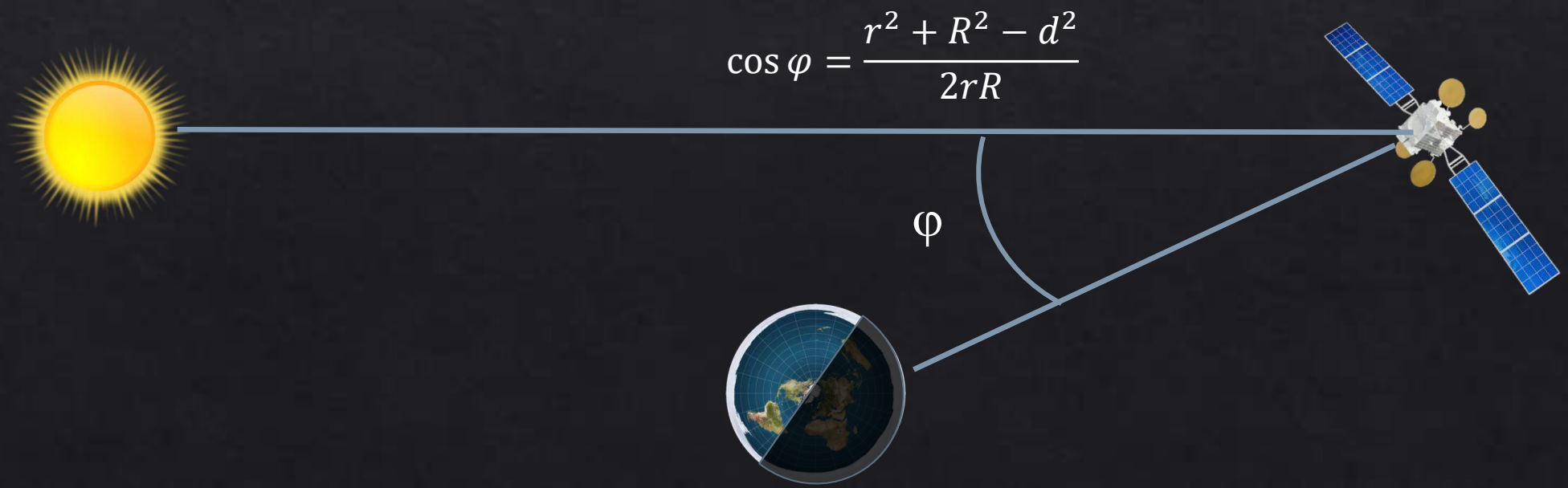
$$p = \frac{r^2 \Delta^2}{A \varphi} 10^{-0,4(m_{\odot} - m)}$$



SURVEILLANCE ET CARACTÉRISATION DES OBJETS SPATIAUX

Mesure du flux lumineux

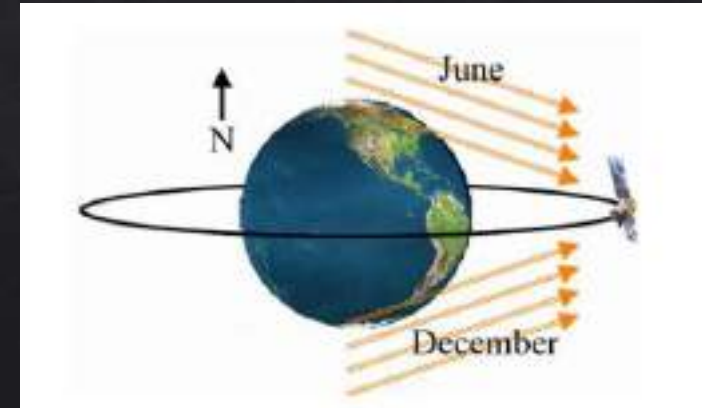
- Dépend :
 - De la surface réfléchissante,
 - De l'albédo
 - De l'angle de phase
 - Fonction du type d'orbite



SURVEILLANCE ET CARACTÉRISATION DES OBJETS SPATIAUX

Mesure du flux lumineux

- Dépend :
 - De la surface réfléchissante,
 - De l'albédo
 - De l'angle de phase
 - Fonction du type d'orbite
 - Fonction des saisons pour les GEO



SURVEILLANCE ET CARACTÉRISATION DES OBJETS SPATIAUX

Mesure du flux lumineux

- Dépend :
 - De la surface réfléchissante,
 - De l'albédo
 - De l'angle de phase
 - Fonction du type d'orbite
 - Fonction des saisons pour les GEO
 - De la météo



SURVEILLANCE ET CARACTÉRISATION DES OBJETS SPATIAUX

Mesure du flux lumineux

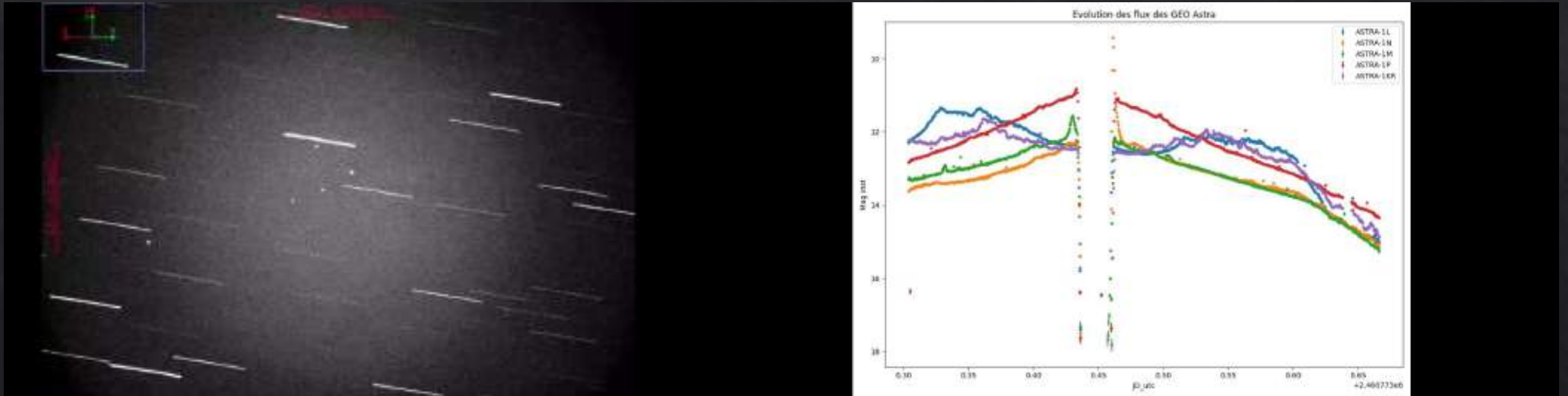
- Dépend :
 - De la surface réfléchissante,
 - De l'albédo
 - De l'angle de phase
 - Fonction du type d'orbite
 - Fonction des saisons pour les GEO
 - De la météo
 - De la Lune



SURVEILLANCE ET CARACTÉRISATION DES OBJETS SPATIAUX

Caractérisation par photométrie :

- Mesure du flux en fonction de ϕ ,
- Emploi de filtres BVRI.



Suivi et mesures photométriques des satellites ASTRA 1L – 1M – 1N – 1P et 1 KR le 6 avril 2025.

Crédit : Observatoire des Baronnies Provençales

SURVEILLANCE ET CARACTÉRISATION DES OBJETS SPATIAUX

Caractérisation par photométrie :

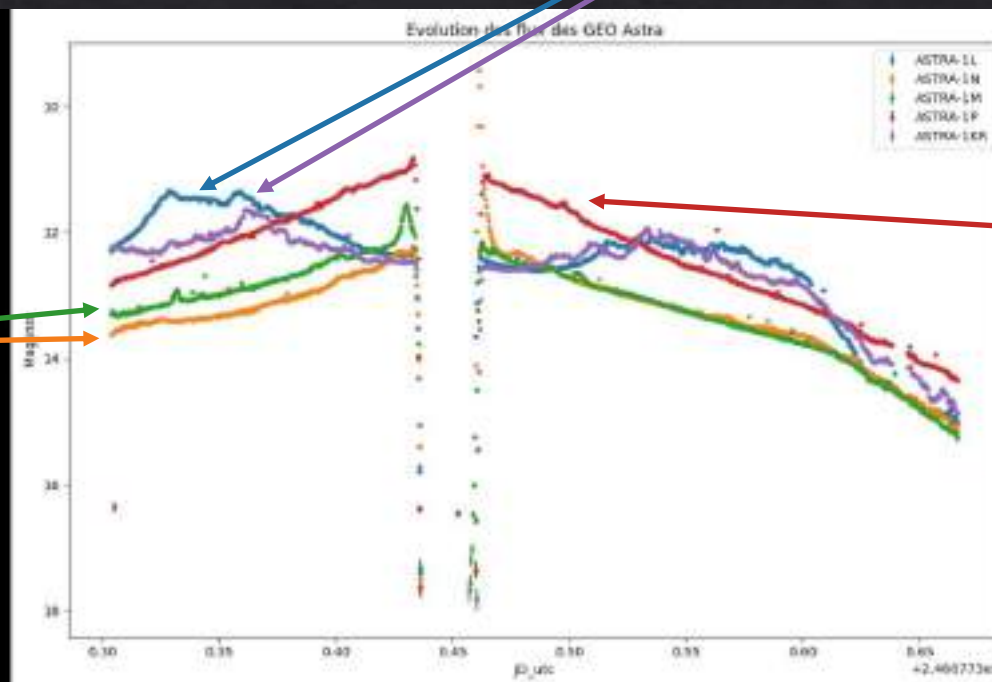
- Résultats :
 - Courbes de lumières,
 - Variations de surface (albédo),
 - Signature photométrique du bus,



ASTRA 1L et ASTRA 1KR
Bus : A210AXS



ASTRA 1N et ASTRA 1M
Bus : EUROSTAR-3000



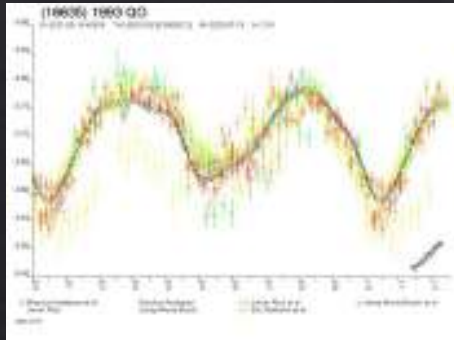
ASTRA 1P
Bus : SPACEBUS NEO

SURVEILLANCE ET CARACTÉRISATION DES OBJETS SPATIAUX

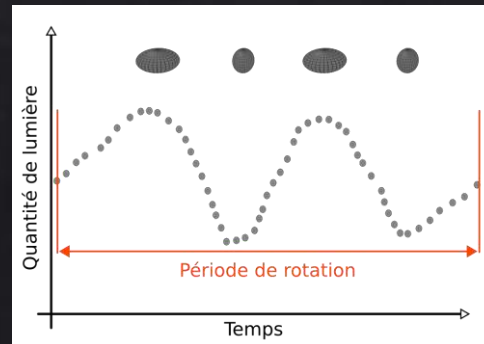
Caractérisation par photométrie :

➤ Résultats :

- Courbes de lumières,
- Variations de surface (albédo),
- Signature photométrique du bus,
- Période de rotation,
- Forme et attitude,



Courbe de lumière photométrique sur un astéroïde



*Désorbitation de THAICOM 5 en 2020
Crédit : Lionel BIREE*

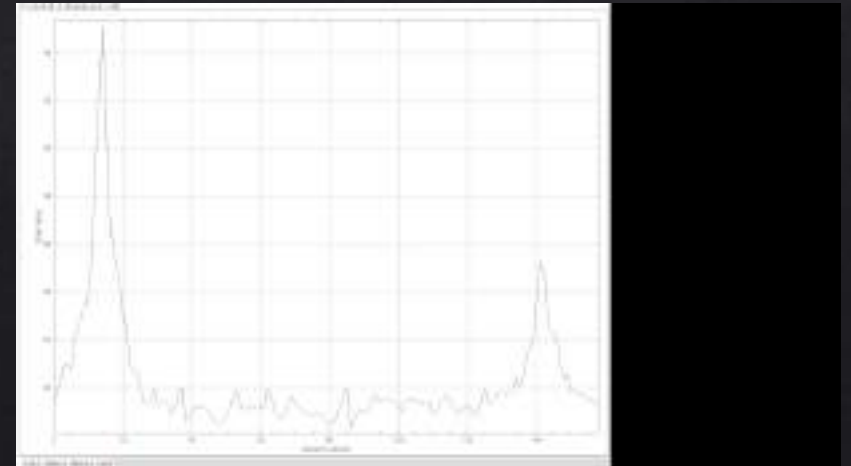
SURVEILLANCE ET CARACTÉRISATION DES OBJETS SPATIAUX

Caractérisation par photométrie :

- Résultats :
 - Courbes de lumières,
 - Variations de surface (albédo),
 - Signature photométrique du bus,
 - Période de rotation,
 - Forme et attitude,



Surbrillance du LUCH/OLYMP le 4 avril 2020
Crédit : Lionel BIREE



Analyse de la variation lumineuse des satellites Eutelsat 21B et LUCH/OLYMP
Crédit : Lionel BIREE

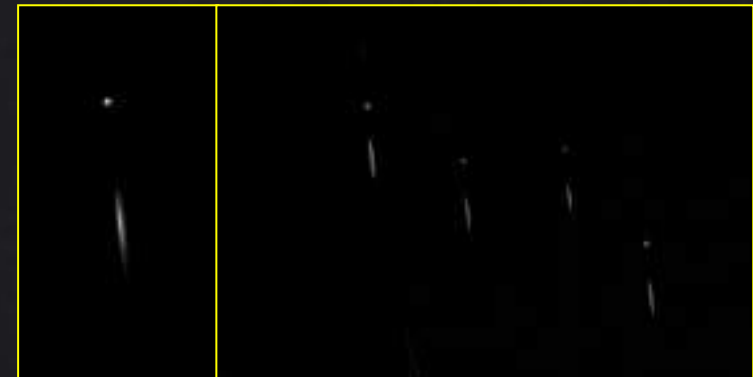
SURVEILLANCE ET CARACTÉRISATION DES OBJETS SPATIAUX

Caractérisation par photométrie :

- Résultats :
 - Courbes de lumières,
 - Variations de surface (albédo),
 - Signature photométrique du bus,
 - Période de rotation,
 - Forme et attitude,
 - Surface estimée par photométrie comparative.

$$S^2 = \frac{d^2 \cdot 10^{(Mv+8,3/-2,5)}}{A}$$

Image de référence



SURVEILLANCE ET CARACTÉRISATION DES OBJETS SPATIAUX

Caractérisation par photométrie :

- Résultats :
 - Surface estimée par photométrie comparative.

Satellite	Mv mesurée	Surface calculée (m ²)	Surface réelle (m ²)
NSS 10	9.8	16.7	18
Hot Bird 13A	10.4	9	12.2
Hot Bird 13B	9.8	16.7	15.5
Hot Bird 13C	9.03	33.9	34
COMSATBW-2	11.1	6	6.31

SURVEILLANCE ET CARACTÉRISATION DES OBJETS SPATIAUX

Caractérisation par spectroscopie :

- Spectre de réflectance,
- Spectre dans le VIS et le NIR.

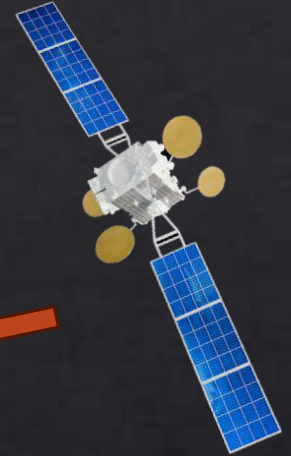
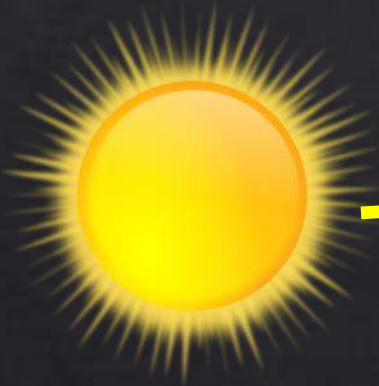
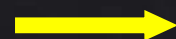


Image brute



Images 2D



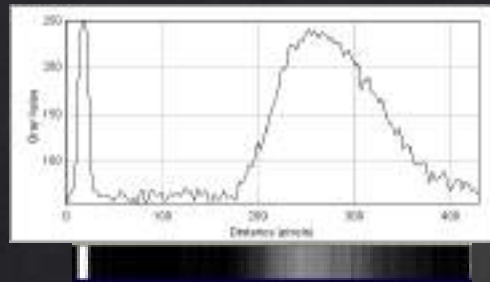
Images 1D

SURVEILLANCE ET CARACTÉRISATION DES OBJETS SPATIAUX

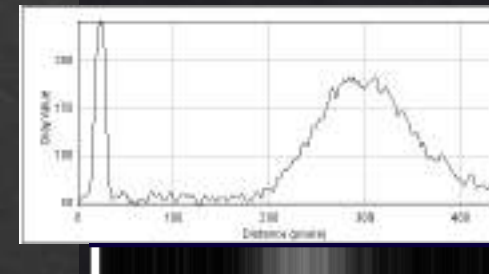
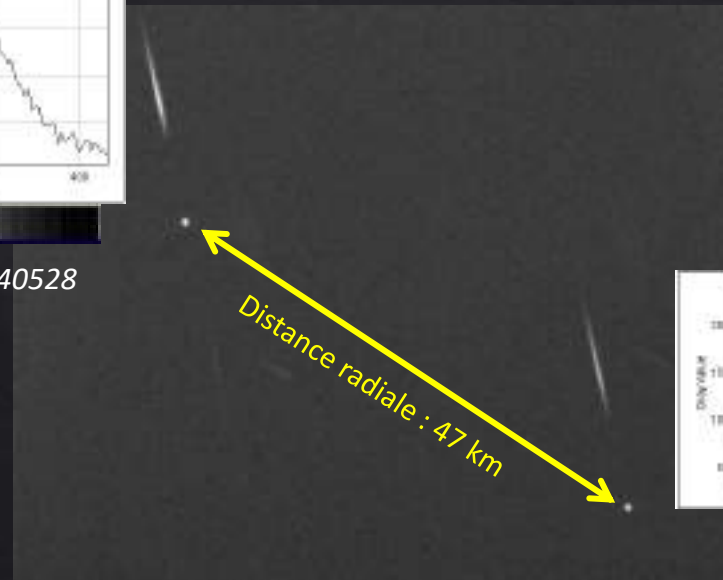


Caractérisation par spectroscopie :

- Résultats :
 - Signature et caractérisation des satellites en fonction des bus;



Profil brut Luch (Olymp) # 40528



Profil brut Nigcomsat 1R # 38014

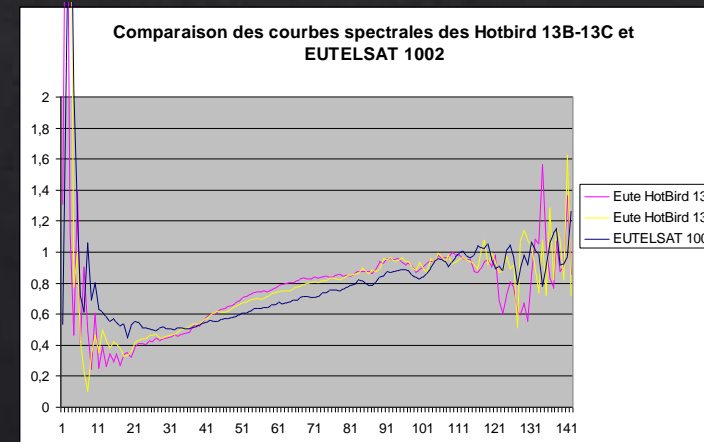
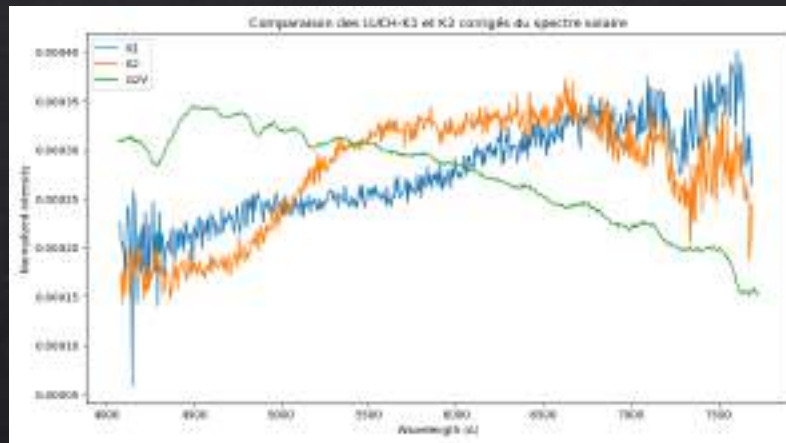
SURVEILLANCE ET CARACTÉRISATION DES OBJETS SPATIAUX



Caractérisation par spectroscopie :

➤ Résultats :

- Signature et caractérisation des satellites en fonction des bus;



- Caractérisation des panneaux solaires (obs en NIR/IR);
- Caractérisation du vieillissement des matériaux de l'objet lié à l'environnement spatial;
- Surveillance des rapprochements.





69 Km

52 Km

ASTRA 3A



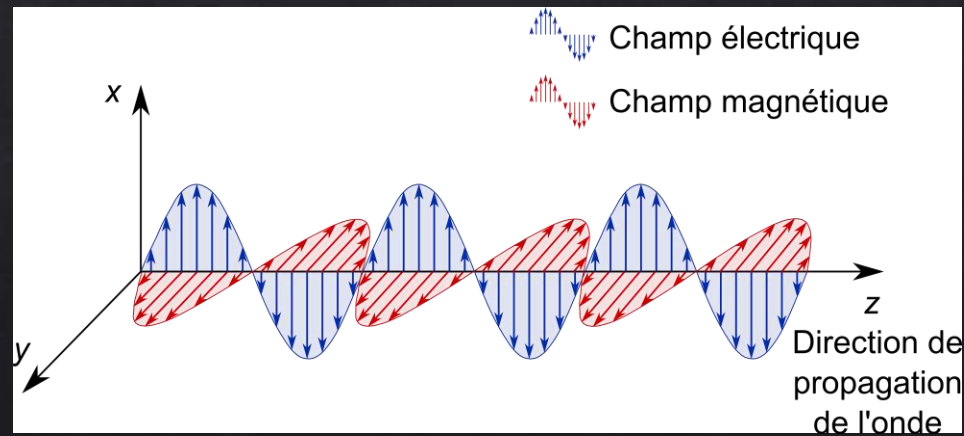
Spectre



SURVEILLANCE ET CARACTÉRISATION DES OBJETS SPATIAUX

Caractérisation par polarimétrie :

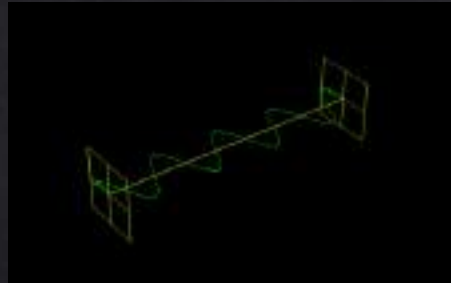
- La polarisation est une propriété de la lumière,
- Une onde électromagnétique plane se définit par sa direction de propagation et est composée d'un champ électrique (E) et d'un champ magnétique (B) orthogonaux.



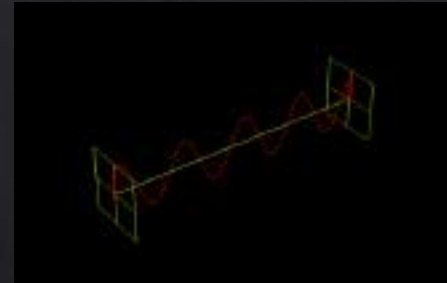
SURVEILLANCE ET CARACTÉRISATION DES OBJETS SPATIAUX

Caractérisation par polarimétrie :

- Le plan perpendiculaire à la direction de propagation est appelé le plan d'onde. C'est dans le plan d'onde qu'évolue le champ E,
- Si l'onde se propage en direction de l'observateur, il verra le champ E former différents motifs dans le plan d'onde pendant son évolution temporelle. C'est cela qui va définir la polarisation de l'onde.

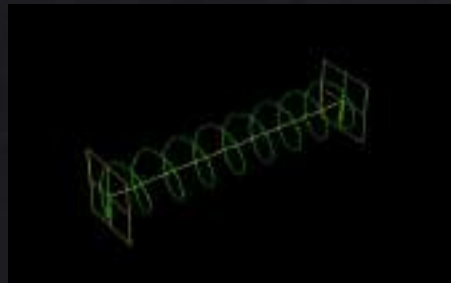


Polarisation horizontale.

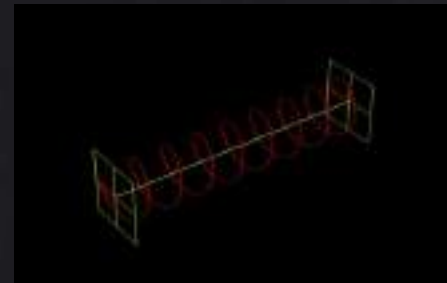


Polarisation verticale.

$$p = \frac{I_{\perp} - I_{\parallel}}{I_{\perp} + I_{\parallel}}$$



Polarisation circulaire gauche.



Polarisation circulaire droite.

SURVEILLANCE ET CARACTÉRISATION DES OBJETS SPATIAUX

Caractérisation par polarimétrie :

- Les paramètres de Stokes :
 - I : intensité de la lumière
 - Q et U : polarisation linéaire

$$Q = I_{\parallel} - I_{\perp}$$

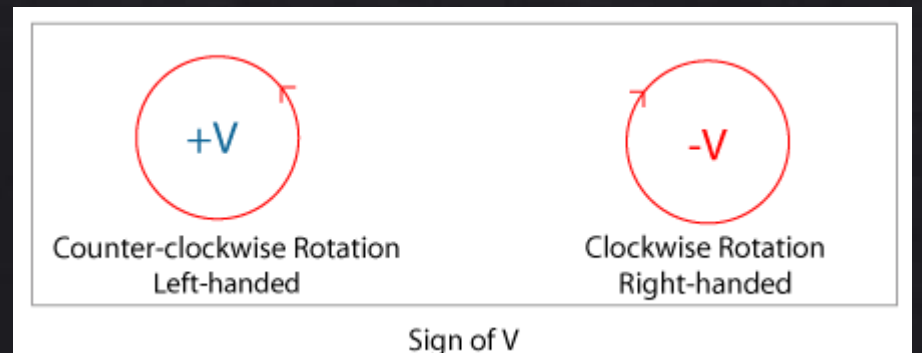
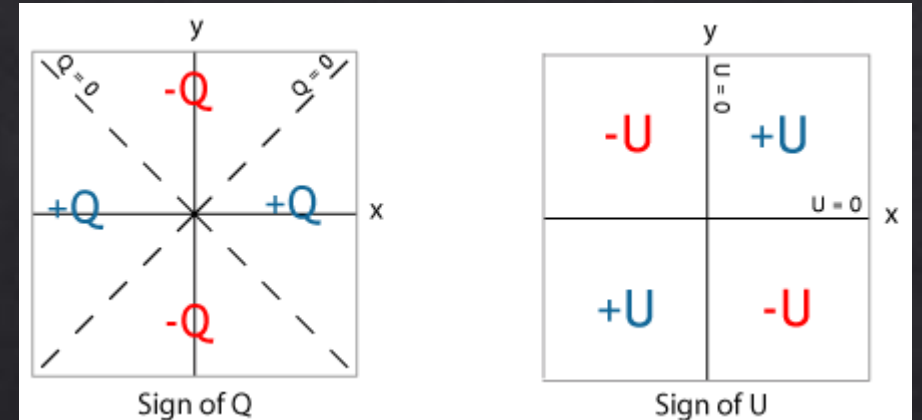
$$U = I(45^{\circ}) - I(135^{\circ})$$

Le degré de polarisation linéaire se mesure

$$P_l = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I}$$

- V : polarisation circulaire qui se mesure

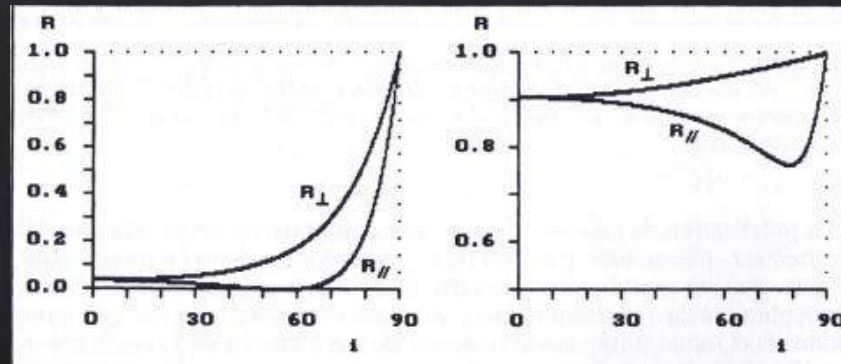
$$P_c = \frac{V}{I}$$



SURVEILLANCE ET CARACTÉRISATION DES OBJETS SPATIAUX

Caractérisation par polarimétrie :

- Résultat :
 - Identification de la nature du satellite,



*Coefficients de réflexion, en intensité, pour deux directions de polarisation de la lumière incidente,
A gauche, réflexion sur une surface diélectrique, à droite sur une surface métallique.*

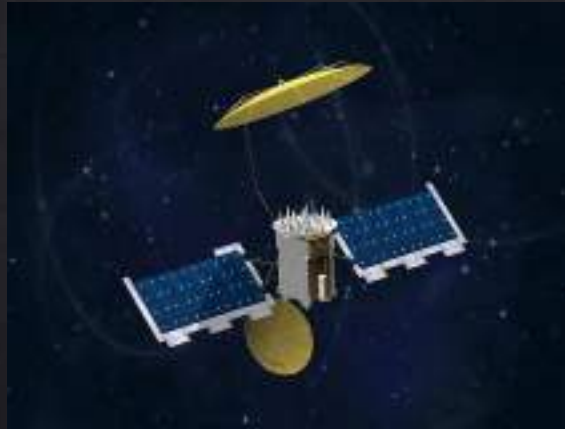
Crédit : « La polarisation de la lumière et l'observation astronomique »

Jean-Louis LEROY, Editions des archives contemporaines

SURVEILLANCE ET CARACTÉRISATION DES OBJETS SPATIAUX

Caractérisation par polarimétrie :

- Résultat :
 - Identification de la nature du satellite,
 - Détermination de la forme, de la dimension et de l'orientation,



SURVEILLANCE ET CARACTÉRISATION DES OBJETS SPATIAUX

Caractérisation par polarimétrie :

- Résultat :
 - Identification de la nature du satellite,
 - Analyse de la forme et de l'orientation,
 - Détection d'anomalies et suivre la dégradation des matériaux,

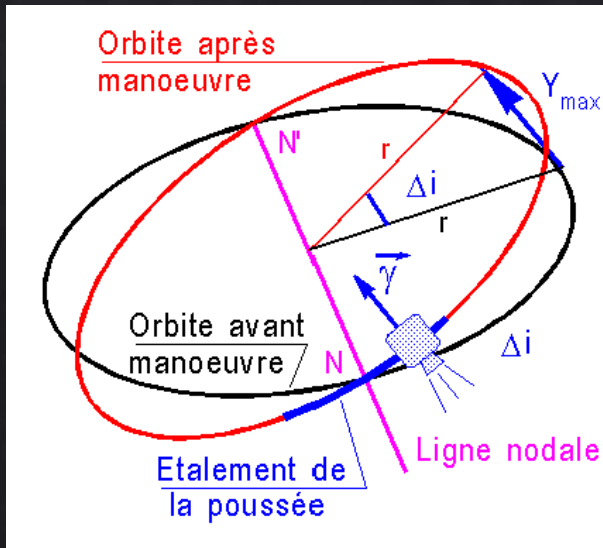


SURVEILLANCE ET CARACTÉRISATION DES OBJETS SPATIAUX

Caractérisation par polarimétrie :

➤ Résultat :

- Identification de la nature du satellite,
- Analyse de la forme et de l'orientation,
- Détection d'anomalies et suivre la dégradation des matériaux,
- Vérifier l'attitude de l'objet sur son orbite,

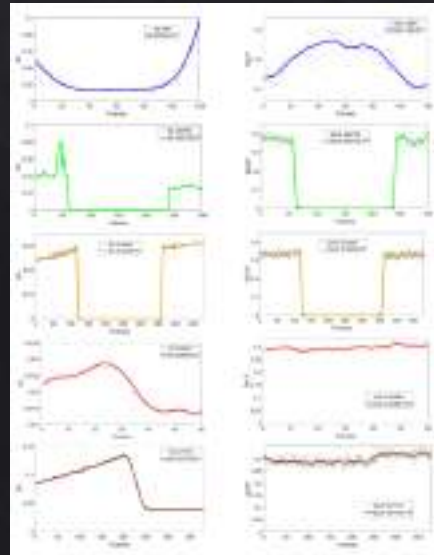


SURVEILLANCE ET CARACTÉRISATION DES OBJETS SPATIAUX

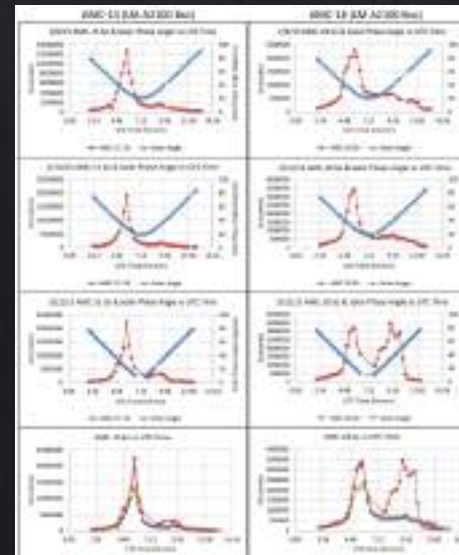
Caractérisation par polarimétrie :

➤ Résultat :

- Identification de la nature du satellite,
- Analyse de la forme et de l'orientation,
- Détection d'anomalies et suivre la dégradation des matériaux,
- Vérifier l'attitude de l'objet sur son orbite,
- Détermination du statut actif ou débris.



Extrait du document : "On-Sky Evaluation of Passive Polarimetry as a Technique to Characterise Space Debris"

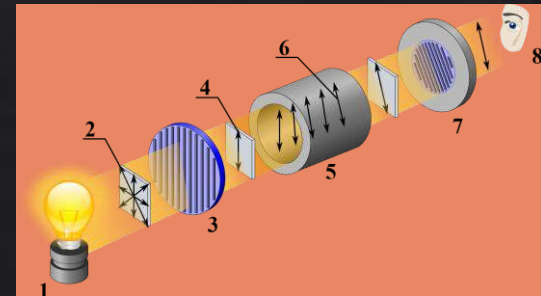
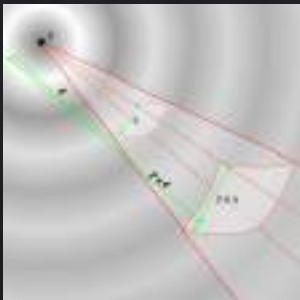


Extrait du document : "Identification of Geostationary Satellites Using Polarization Data from Unresolved Images"

SURVEILLANCE ET CARACTÉRISATION DES OBJETS SPATIAUX

Synthèse des avantages combinés des différentes techniques:

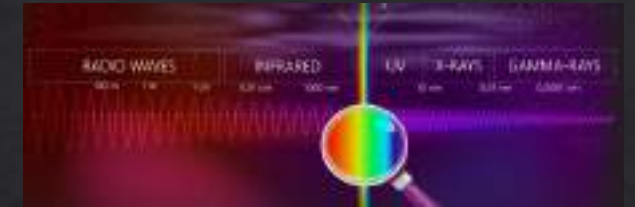
- Approche non intrusive, ne nécessitant pas d'équipement embarqué,
- Possibilité de surveillance régulière des objets en orbite, notamment les satellites non-coopératifs,
- Amélioration de la connaissance de la situation spatiale (SSA : Space Situational Awareness),
- Contribution à la lutte contre les débris spatiaux, en caractérisant les objets inactifs,
- Aide à l'identification des satellites et à la vérification des activités orbitales (renseignement, sécurité).



Projet « NIRSat » - Near Infra Red Satellite monitoring



- ◆ NIRSat est un projet de science participative mené au Planétarium de Vaulx-en-Velin, qui invite le public à vivre une aventure scientifique originale : observer des satellites en plein jour en proche infrarouge.
- ◆ À la différence de la lumière visible, l'infrarouge révèle ce que nos yeux ne peuvent pas voir, même avec la lumière du Soleil.
- ◆ Le projet vise à :
 - Localiser avec précision les satellites en orbite.
 - Étudier leurs caractéristiques (forme, comportement ...), en utilisant « une autre lumière ».



Ouvert à tous, NIRSat permet de découvrir l'espace autrement, en mêlant science, observation et curiosité !

**SURVEILLANCE DE L'ESPACE ET
CARACTÉRISATION DES OBJETS SPATIAUX**

**CLUB D'ASTRONOMIE COPERNIC
Saint-Raphaël
le 09 mai 2026**



Lionel BIREE
Ingénierie Conseil et Formation en SSA
Email : lionel.biree@elios.space
Internet : <http://elios.space>

*MERCI DE VOTRE ATTENTION,
À TRÈS BIENTÔT...*