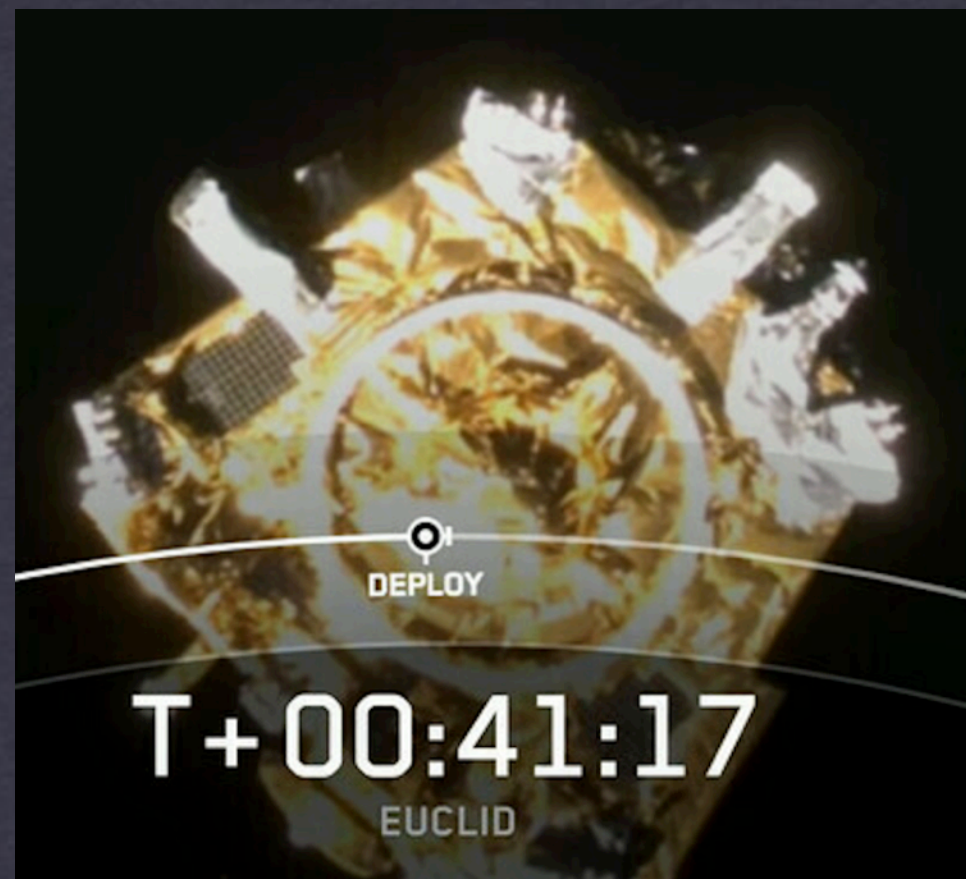


Comment faire de la physique dans l'espace?

Marc Sauvage (DRF/Irfu/DAp)

1^{er} Juillet 2023



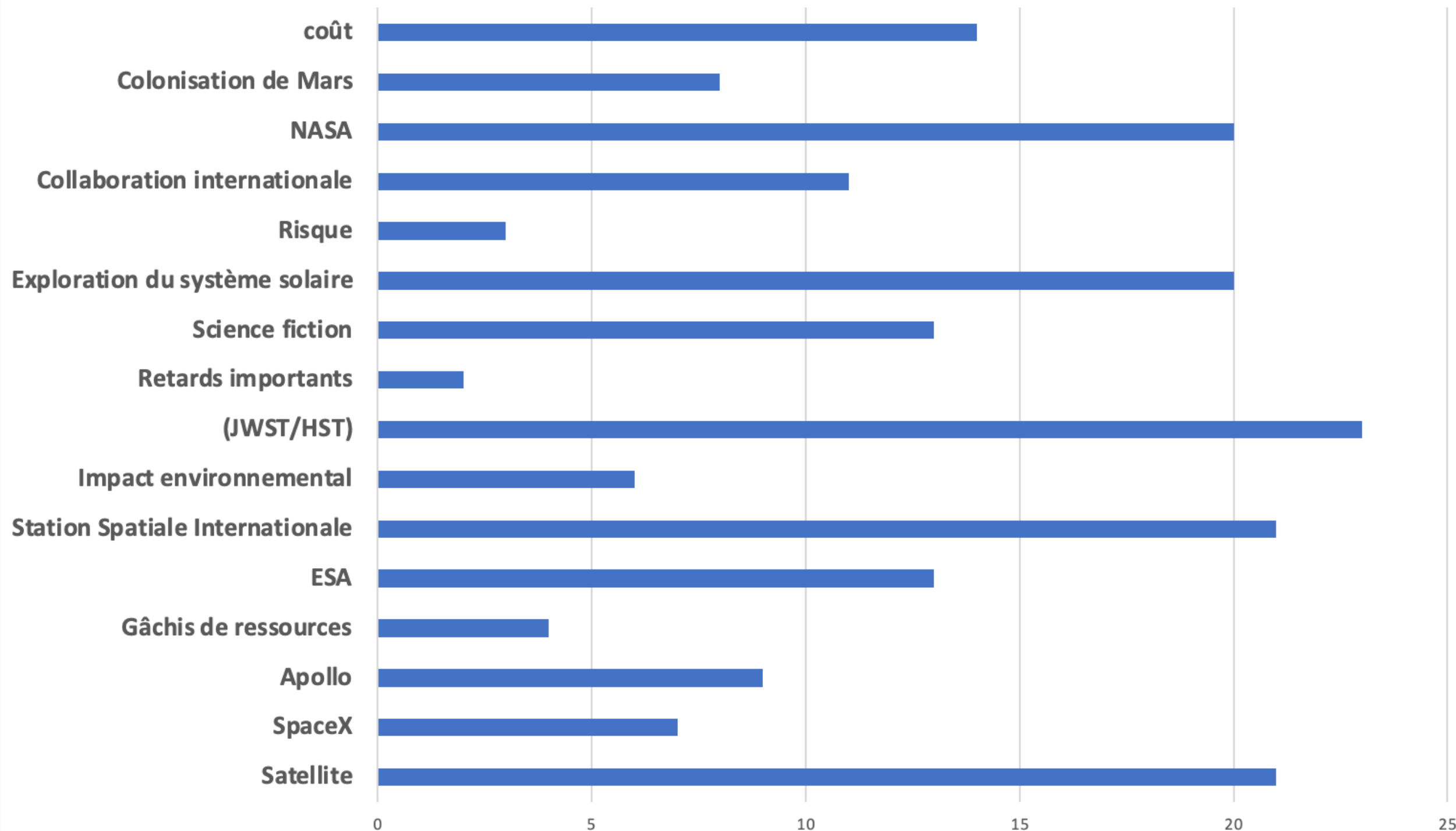
Comment faire de la physique dans l'espace?

Marc Sauvage (DRF/Irfu/DAp)

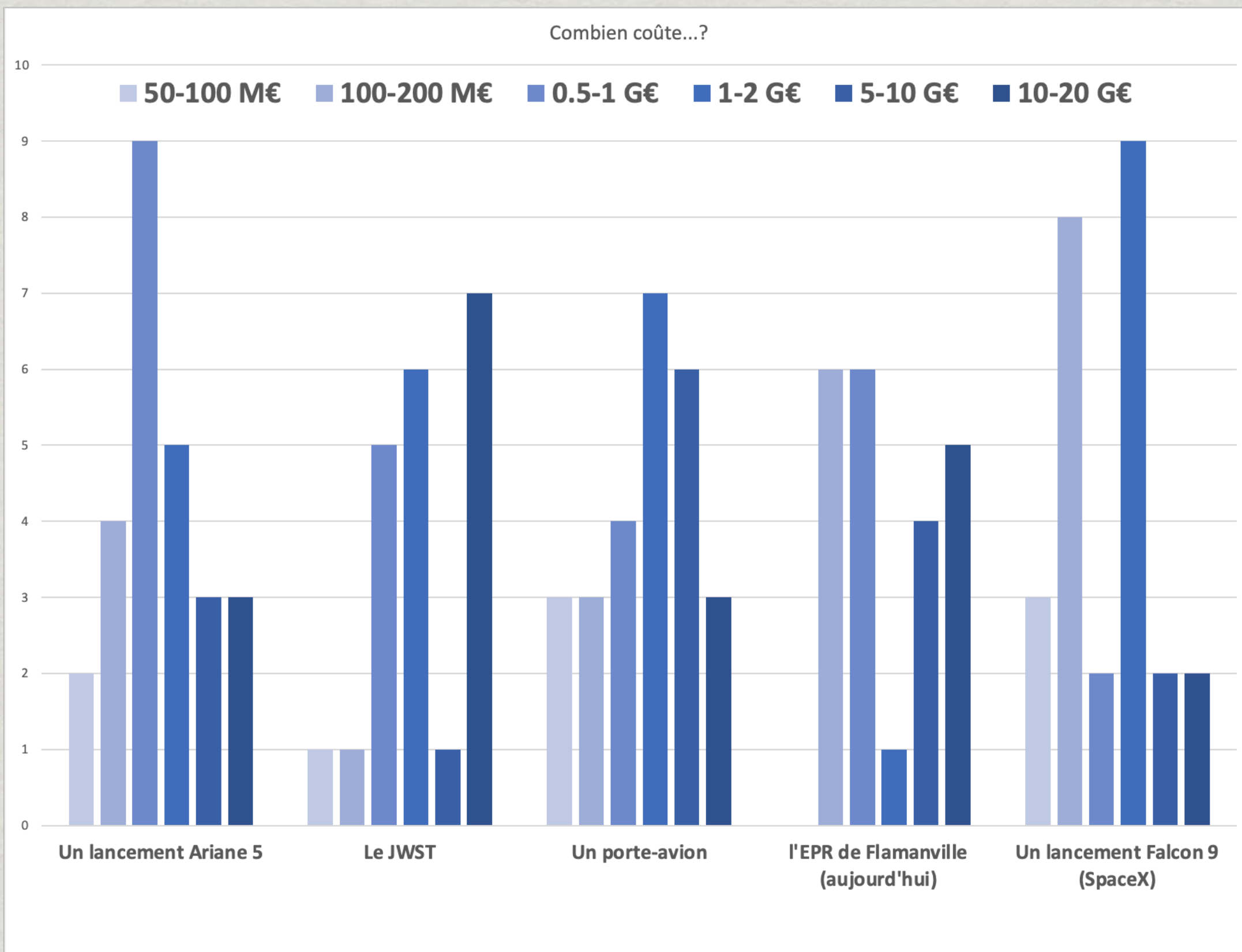
Pourquoi faire de la physique dans l'espace?

La physique dans l'espace, qu'est-ce que ça vous évoque?

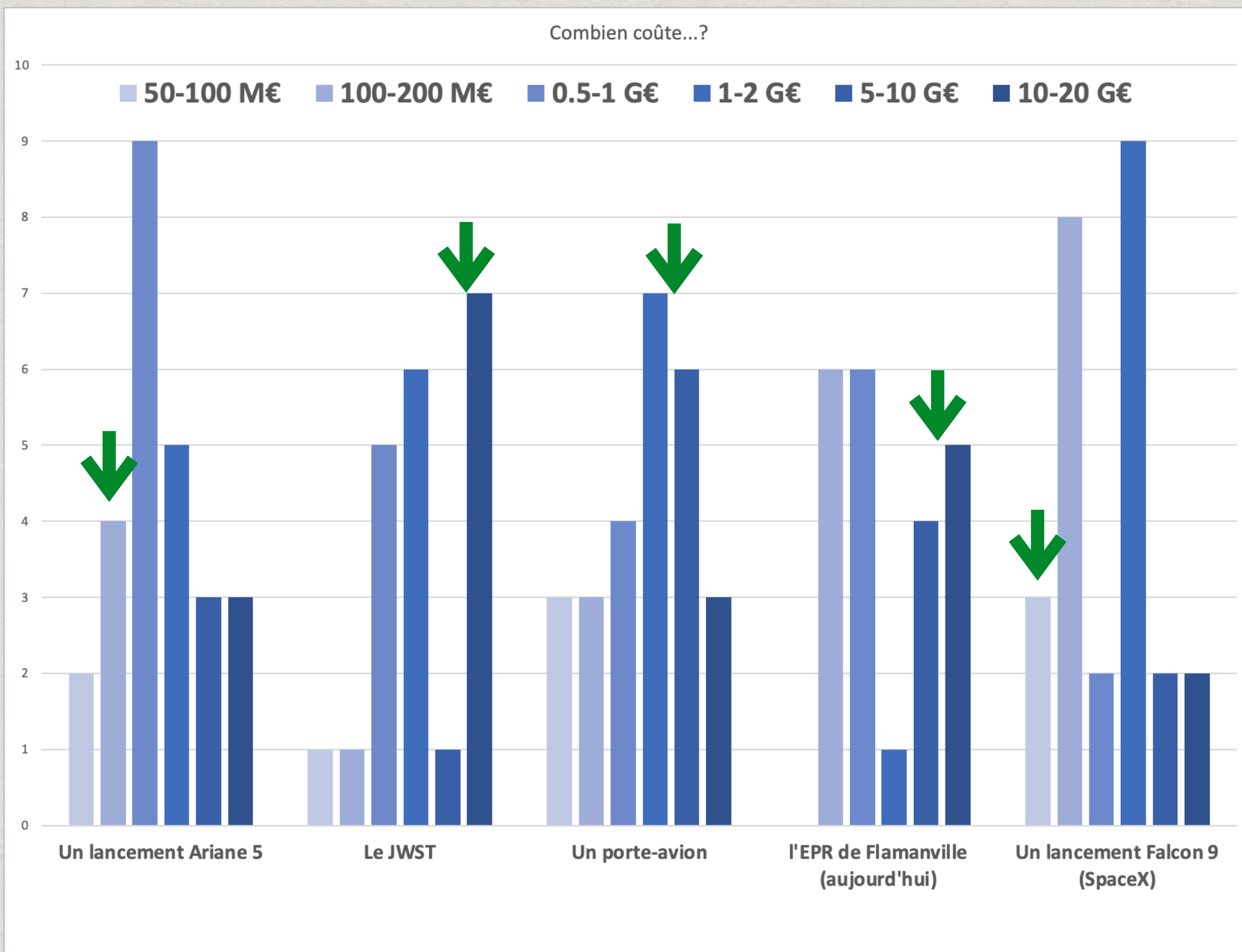
Quand vous entendez "physique dans l'espace vous pensez...



Et si on se mettait à parler d'argent?



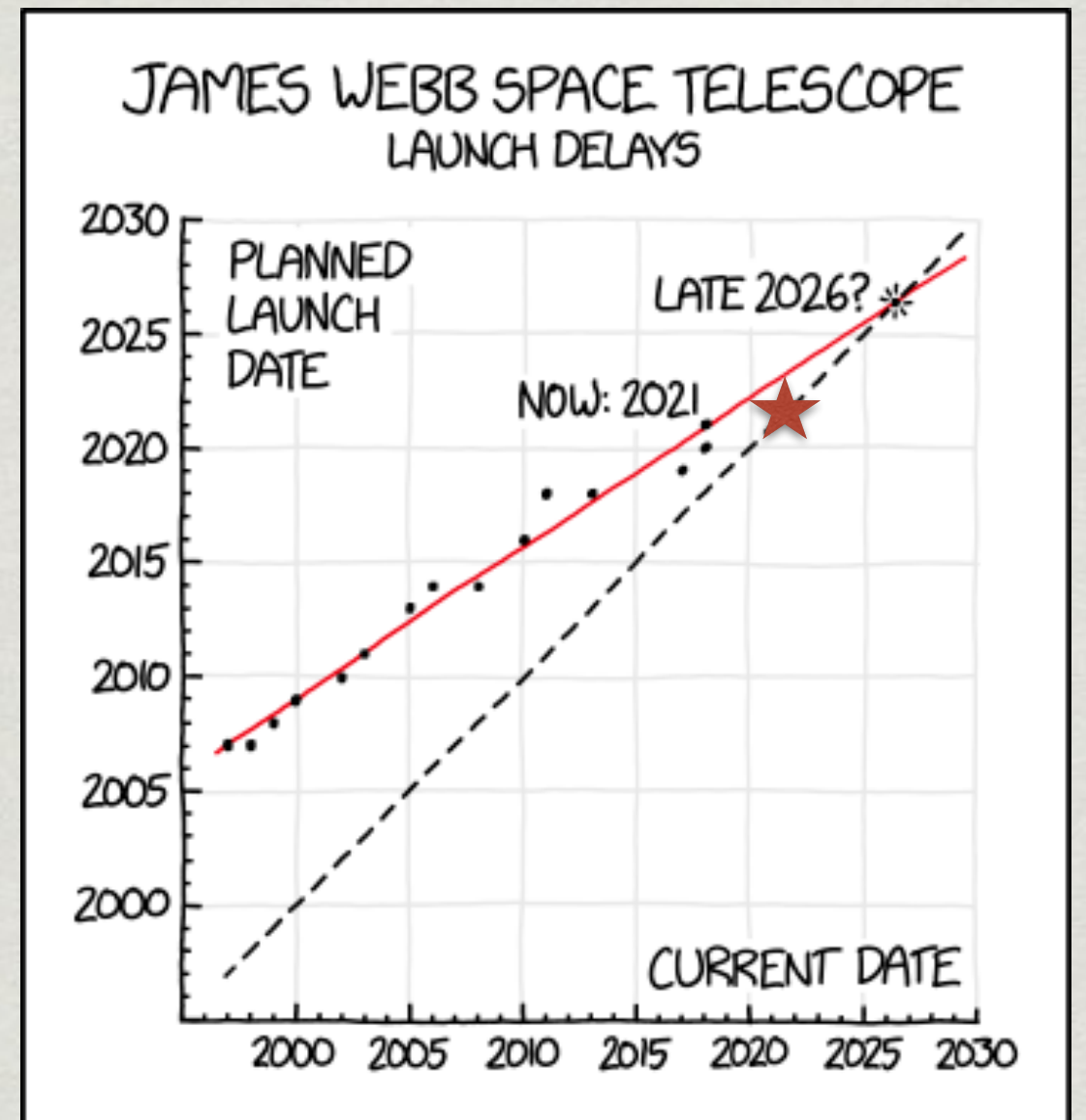
Et si on se mettait à parler d'argent?



Pourquoi l'espace?

* L'accès à l'espace est cher:

- * Coût d'un lancement: Ariane 5: 170 M€, Falcon Heavy 90 M\$
- * Projet Herschel+Planck: 2 G€, presque autant que le LHC (3 G€).
- * Euclid 1.4 G€
- * James Webb Space Telescope: 10 G€ pour un lancement qui a glissé de 2007 à fin 2021, le congrès américain a heureusement approuvé l'extension du budget...
- * Euclid: 1.4 G€ (dont près d'1 G€ pour l'ESA alors que le cadre de départ était de 550 M€)



LOOK, AT LEAST THE SLOPE IS LESS THAN ONE.

Source: xkcd

Pourquoi l'espace?

- * L'accès à l'espace est cher:

- * Coût d'un lancement: Ariane 5: 170 M€, Falcon Heavy 90 M\$, Falcon 9 réutilisable $\leq$ 50 M\$
- * Euclid: 1.4 G€, Athena+LISA (L2 et L3) 3 G€, du même ordre que le LHC (3 G€).
- * James Webb Space Telescope: plus de 10 G€

- * Peu de projets voient le jour:

- * 2021: dernier appel (classe M) de l'agence spatiale Européenne, pression de 25 pour 1.

- * La route est longue:

- * La mission (M7) qui vient d'être sélectionnée (après 5 ans de développement compétitif) sera lancée au plus tôt en 2035

- * L'espace est difficile d'accès.

Pourquoi l'espace?

- * L'accès à l'espace est cher:

- * Coût d'un lancement: Ariane 5: 170 M€, Falcon Heavy 90 M\$, Falcon 9 réutilisable $\leq$ 50 M\$
- * Euclid: 1.4 G€, Athena+LISA (L2 et L3) 3 G€, du même ordre que le LHC (3 G€).
- * James Webb Space Telescope: plus de 10 G€

- * Peu de projets voient le jour:

- * 2021: dernier appel (classe M) de l'agence spatiale Européenne, pression de 25 pour 1.

- * La route est longue:

- * La mission (M7) qui vient d'être sélectionnée (après 5 ans de développement compétitif) sera lancée au plus tôt en 2035

- * L'espace est difficile d'accès.

**Destruction des
satellites Cluster lors
du lancement
d'Ariane-501**



L'espace est aussi le jeu de forces plus “terre à terre”

→ THE EUROPEAN SPACE AGENCY



N° 6–2022: ESA statement regarding cooperation with Russia following a meeting with Member States on 28 February 2022

28 February 2022

L'espace est aussi le jeu de forces plus "terre à terre"

→ THE EUROPEAN SPACE AGENCY



N° 6–2022: ESA statement regarding cooperation with Russia meeting Member States 2022

28 February 2022

We are fully implementing sanctions imposed on Russia by our Member States. We are assessing the consequences on each of our ongoing programmes conducted in cooperation with the Russian state space agency Roscosmos and align our decisions to the decisions of our Member States in close coordination with industrial and international partners (in particular with NASA on the International Space Station).

Regarding the Soyuz launch campaign from Europe's Spaceport in Kourou, we take note of the Roscosmos decision to withdraw its workforce from Kourou. We will consequently assess for each European institutional payload under our responsibility the appropriate launch service based notably on launch systems currently in operation and the upcoming Vega-C and Ariane 6 launchers.

Regarding the ExoMars programme continuation, the sanctions and the wider context make a launch in 2022 very unlikely. ESA's Director General will analyse all the options and prepare a formal decision on the way forward by ESA Member States.

L'espace est aussi le jeu de forces plus “terre à terre”

→ THE EUROPEAN SPACE AGENCY



N° 6–2022: ESA statement regarding cooperation with Russia following a meeting with Member States on 28 February 2022

28 February 2022

5 missions se sont retrouvées sans lanceur:

- Galileo M10 et M11 -> Ariane 6/SpaceX/ULA
- Un satellite militaire français
- EarthCare -> Vega-C
- Euclid -> SpaceX

Pourquoi aller dans l'espace?

L'atmosphère comme limite

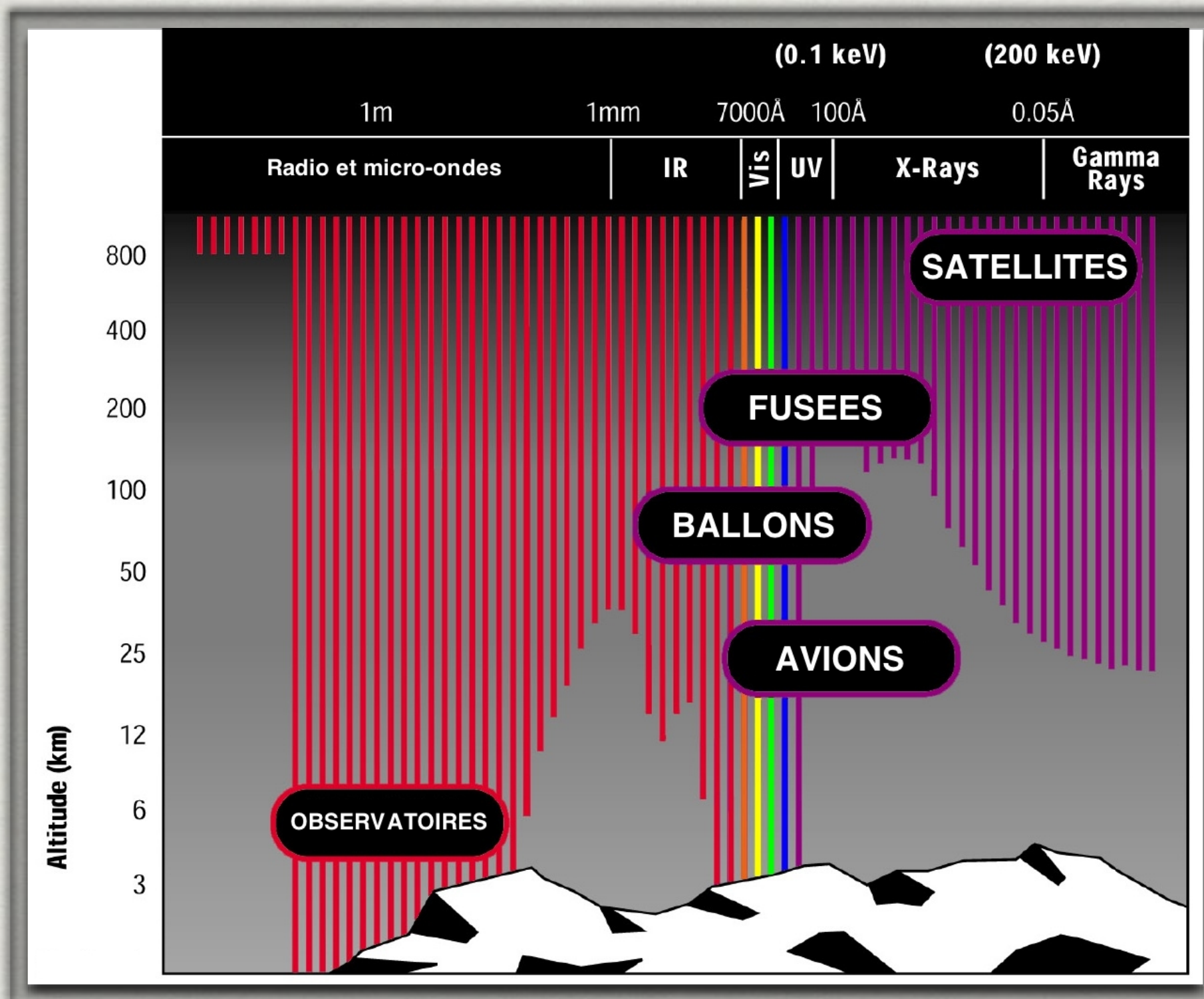
L'atmosphère comme limite

- * L'atmosphère nous protège de rayonnements dangereux, voire mortels:
 - * UV, X, Gamma.
 - * Elle nous en isole aussi, et nous ne pouvons pas les observer.

L'atmosphère comme limite

- * L'atmosphère nous protège de rayonnements dangereux, voire mortels:
 - * UV, X, Gamma.
 - * Elle nous en isole aussi, et nous ne pouvons pas les observer.
- * L'atmosphère absorbe certains rayonnements inoffensifs mais intéressants pour l'astronomie:
 - * Infrarouge et une partie du domaine sub-millimétrique.

L'atmosphère comme limite



Transmission de l'atmosphère en fonction de la longueur d'onde. Le graphe ne représente pas l'émission de l'atmosphère, très importante dans le domaine IR

L'atmosphère comme limite

- * L'atmosphère nous protège de rayonnements dangereux, voire mortels:
 - * UV, X, Gamma.
 - * Elle nous en isole aussi, et nous ne pouvons pas les observer (à part via leur action sur l'atmosphère).
- * L'atmosphère absorbe certains rayonnements inoffensifs mais intéressants pour l'astronomie:
 - * Infrarouge et une partie du domaine sub-millimétrique.
- * L'atmosphère émet (émission thermique, raies):
 - * Dans l'infrarouge elle peut être 10^6 fois plus lumineuse que les sources astronomiques.

L'atmosphère comme limite

- * L'atmosphère nous protège de rayonnements dangereux, voire mortels:
 - * UV, X, Gamma.
 - * Elle nous en isole aussi, et nous ne pouvons pas les observer (à part via leur action sur l'atmosphère).
- * L'atmosphère absorbe certains rayonnements inoffensifs mais intéressants pour l'astronomie:
 - * Infrarouge et une partie du domaine sub-millimétrique.
- * L'atmosphère émet (émission thermique, raies):
 - * Dans l'infrarouge elle peut être 10^6 fois plus lumineuse que les sources astronomiques.
- * L'atmosphère est turbulente:
 - * Elle limite notre résolution spatiale.

L'atmosphère comme limite

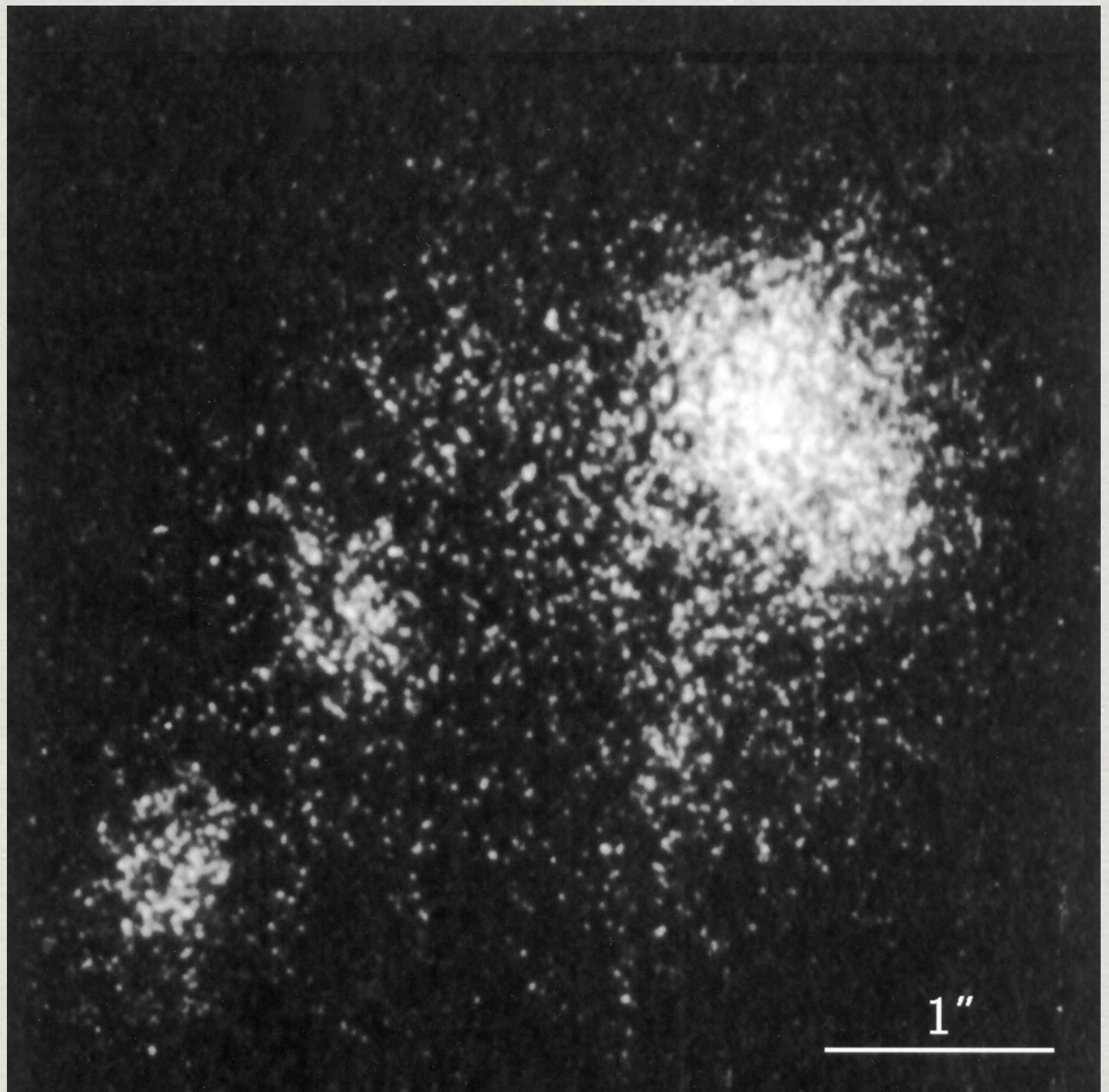
Imagerie en mode Speckle du système R136 dans le grand nuage de Magellan, avec un télescope de 3.6m.

Les taches correspondent au déplacement des images des sources dû à la turbulence atmosphérique.

Dans de bonnes conditions atmosphériques, la largeur à mi-hauteur de la PSF optique au VLT ($\varnothing 8.2\text{m}$) s'approche seulement de celle du HST ($\varnothing 2.4\text{m}$).

Solution: optique adaptative, mais technique complexe et champ d'application limité.

L'intérêt de l'E-ELT ne se conçoit que par l'AO (Adaptive Optics).



L'atmosphère comme limite

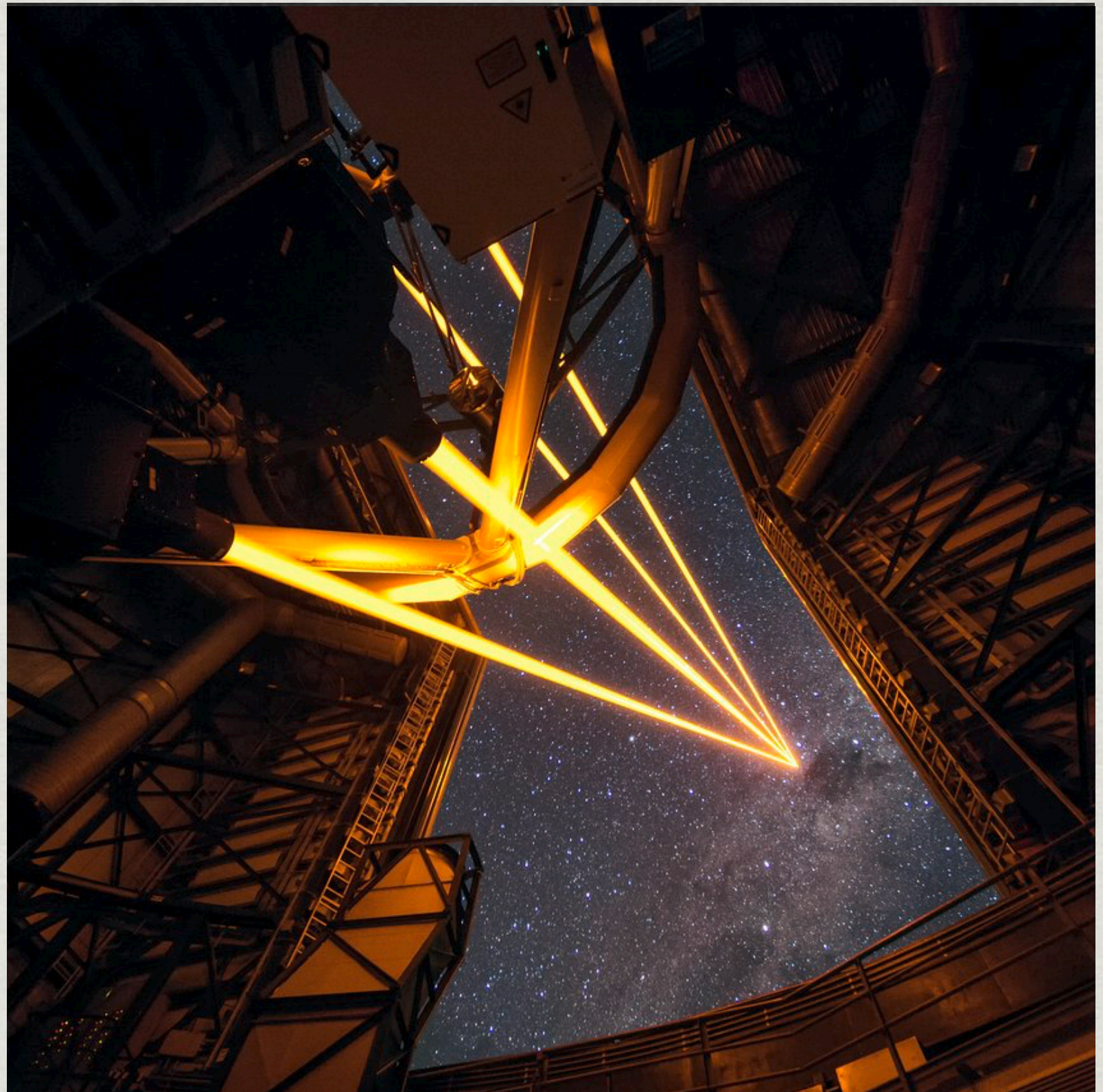
Imagerie en mode Speckle du système R136 dans le grand nuage de Magellan, avec un télescope de 3.6m.

Les taches correspondent au déplacement des images des sources dû à la turbulence atmosphérique.

Dans de bonnes conditions atmosphériques, la largeur à mi-hauteur de la PSF optique au VLT ($\varnothing 8.2\text{m}$) s'approche seulement de celle du HST ($\varnothing 2.4\text{m}$).

Solution: optique adaptative, mais technique complexe et champ d'application limité.

L'intérêt de l'E-ELT ne se conçoit que par l'AO (Adaptive Optics).



source: http://www.mpifr-bonn.mpg.de/div/ir-interferometry/papers/pehlemann_etal_aaa_r136_1992.html

La matière comme limite

- * La gravité est par définition importante en tout point du globe:
 - * Les capacités de chute libre sont très limitées (volume et temps), ce qui rend complexes les tests de physique fondamentale, tout comme le développement même de structures devant fonctionner sans gravité.

La matière comme limite

- * La gravité est par définition importante en tout point du globe:
 - * Les capacités de chute libre sont très limitées (volume et temps), ce qui rend complexes les tests de physique fondamentale, tout comme le développement même de structures devant fonctionner sans gravité.

**LA TOUR DE CHUTE LIBRE DU ZARM (BRÊME):
146M POUR 4.7S DE MICRO-GRAVITÉ**



La matière comme limite

- ✱ L'activité associée à la planète est incessante:
 - ✱ Activité sismique naturelle.
 - ✱ Effets de marée sur les très grands équipements (CERN).
 - ✱ Radioactivité et autres interactions avec la matière.

La matière comme limite

- ✱ L'activité associée à la planète est incessante:
 - ✱ Activité sismique naturelle.
 - ✱ Effets de marée sur les très grands équipements (CERN).
 - ✱ Radioactivité et autres interactions avec la matière.

Au LHC, les marées modifient les propriétés des faisceaux.

The phenomenon of tides in the ocean due to the influence of the Moon (and to a lesser extent that of the Sun) is well known. They cause the level of water on the edge of the sea to rise and fall with a cycle of some 12 hours.

The ground is also subject to the effect of lunar attraction because the rocks that make it up are elastic. At the new Moon and when the Moon is full, the Earth's crust rises by some 25 cm in the Geneva area under the effect of these 'ground tides'.

This movement causes a variation of 1 mm in the circumference of the LHC (for a total circumference of 26.6 km). This variation in its circumference produces changes in beam energy of up to two tenths of one in a thousand!

It may seem small, but measurements in the LHC are so precise that the beam energy must be known down to two hundredths of one in a thousand, ten times smaller than the effect of ground tides.

Thus, physicists must take the Moon into account in their measurements.

La matière comme limite

* L'activité associée à la planète est incessante:

- * Activité sismique naturelle.
- * Effets de marée sur les très grands équipements (CERN).
- * Radioactivité et autres interactions avec la matière.

Au LHC, les marées modifient les propriétés des faisceaux.

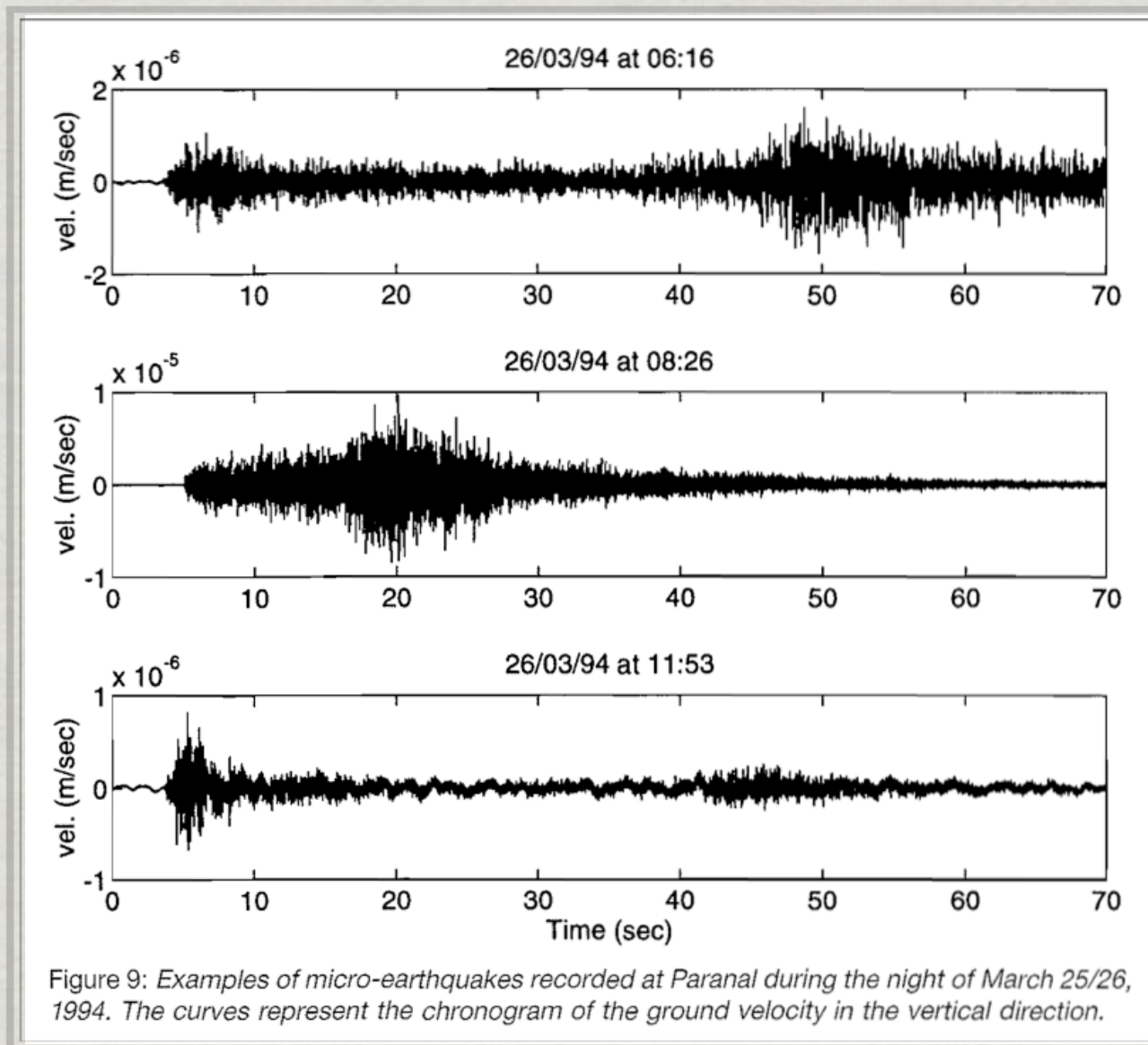
The phenomenon of tides in the ocean due to the influence of the Moon (and to a lesser extent that of the Sun) is well known. They cause the level of water on the edge of the sea to rise and fall with a cycle of some 12 hours.

The ground is also subject to the effect of lunar attraction because the rocks that make it up are elastic. At the new Moon and when the Moon is full, the Earth's crust rises by some 25 cm in the Geneva area under the effect of these 'ground tides'.

This movement causes a variation of 1 mm in the circumference of the LHC (for a total circumference of 26.6 km). This variation in its circumference produces changes in beam energy of up to two tenths of one in a thousand!

It may seem small, but measurements in the LHC are so precise that the beam energy must be known down to two hundredths of one in a thousand, ten times smaller than the effect of ground tides.

Thus, physicists must take the Moon into account in their measurements.



Au VLT les micro-tremblements de terre perturbent les mesures d'interférométrie.

La matière comme limite

- * La gravité est par définition importante en tout point du globe:
 - * Les capacités de chute libre sont très limitées (volume et temps), ce qui rend complexes les tests de physique fondamentale, tout comme le développement même de structures devant fonctionner sans gravité.
- * L'activité associée à la planète est incessante:
 - * Activité sismique naturelle.
 - * Effets de marée sur les très grands équipements (CERN).
 - * Radioactivité et autres interactions avec la matière.
- * La Terre tourne:
 - * Il est très difficile de faire des mesures temporelles de long terme depuis le sol.

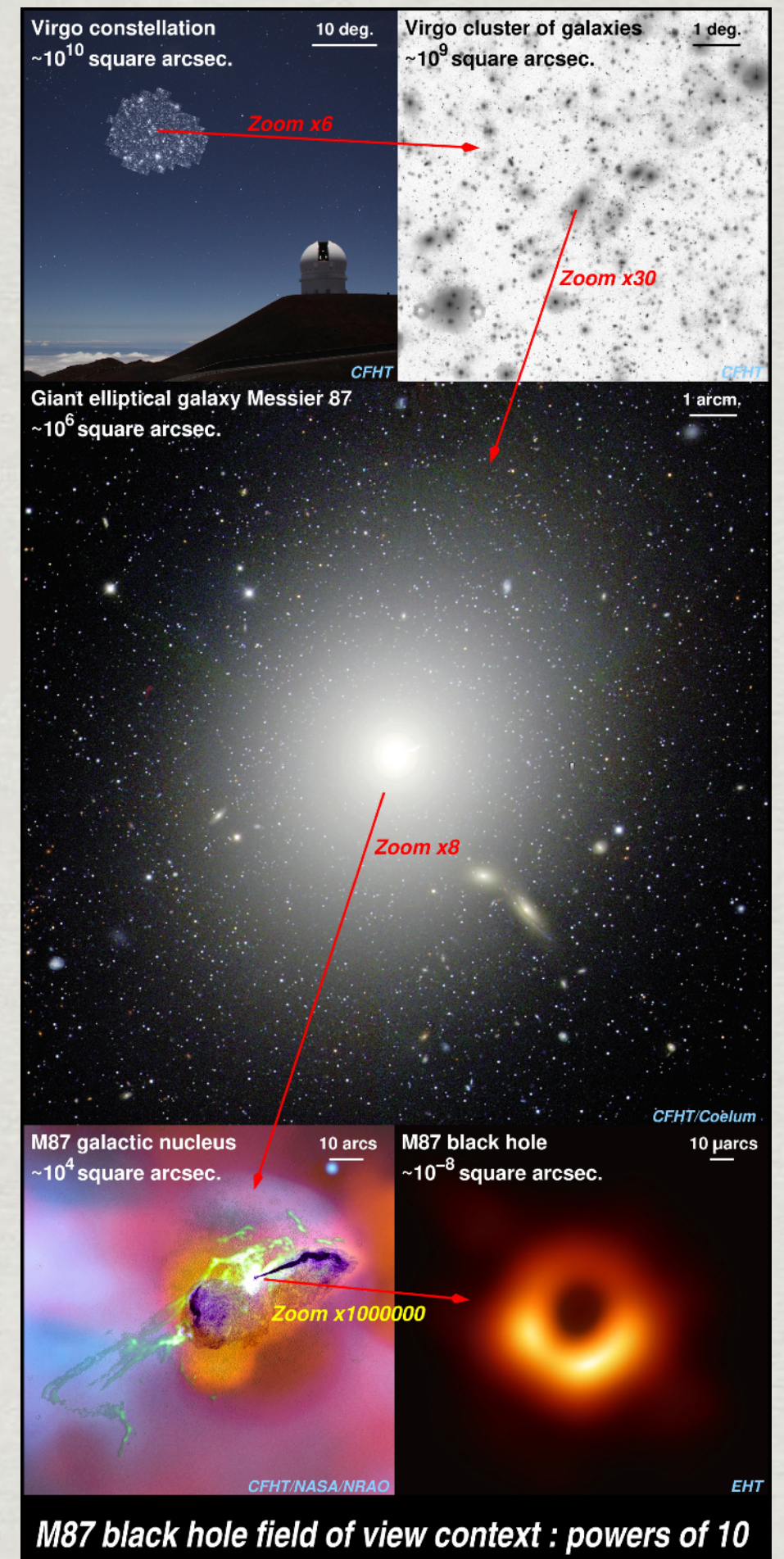
La matière comme limite

- * La gravité est par définition importante en tout point du globe:
 - * Les capacités de chute libre sont très limitées (volume et temps), ce qui rend complexes les tests de physique fondamentale, tout comme le développement même de structures devant fonctionner sans gravité.
- * L'activité associée à la planète est incessante:
 - * Activité sismique naturelle.
 - * Effets de marée sur les très grands équipements (CERN).
 - * Radioactivité et autres interactions avec la matière.
- * La Terre tourne:
 - * Il est très difficile de faire des mesures temporelles de long terme depuis le sol.
- * La Terre est finie:
 - * La distance maximale entre deux points de mesure (interférométrie) est fixée par le diamètre terrestre.

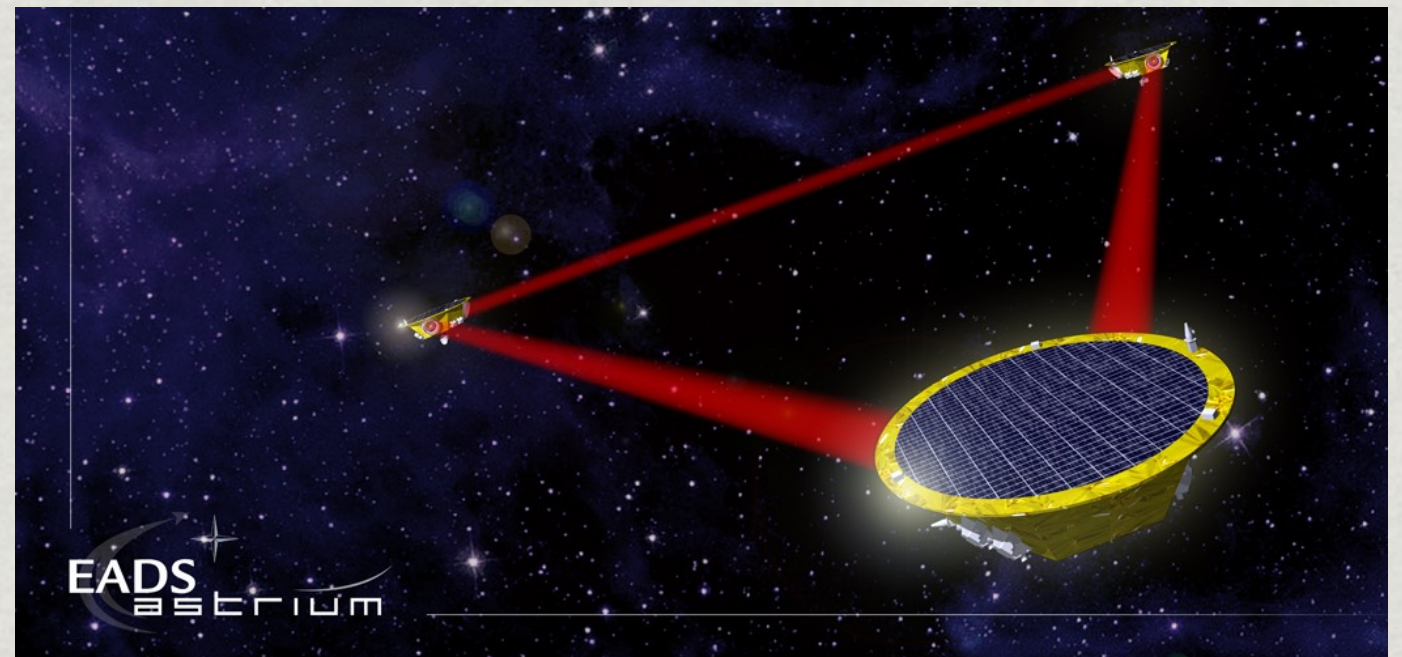
La matière comme “limite”



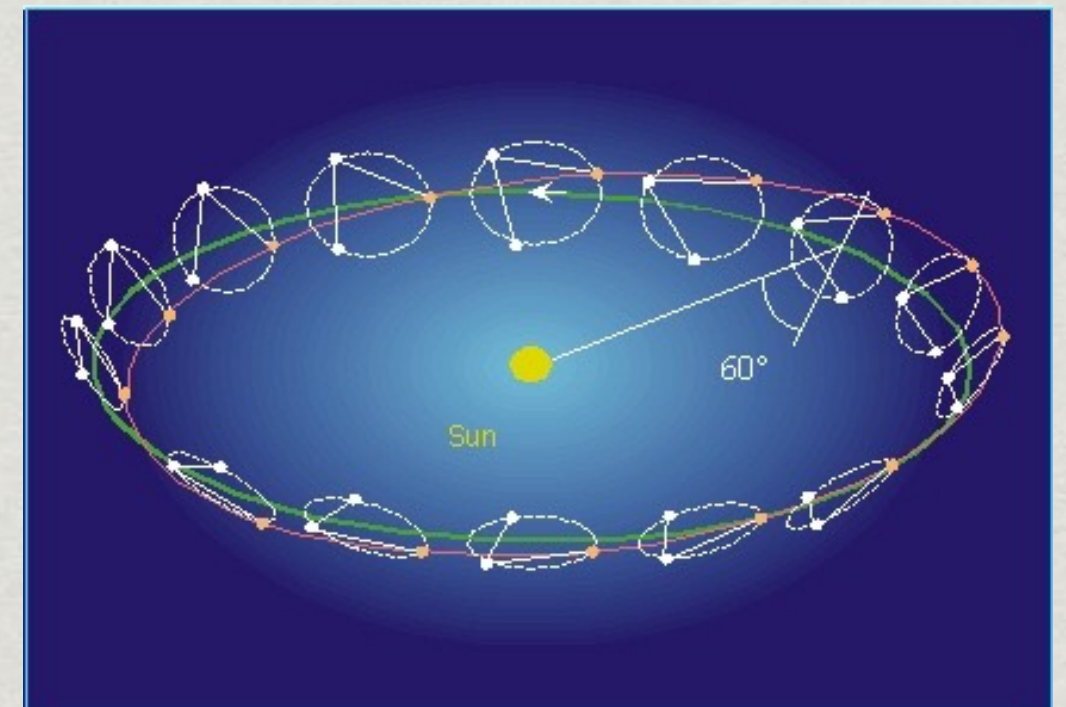
- * Face aux limites, le scientifique s'adapte:
- * Event Horizon Telescope, réseau mondial pour l'interférométrie radio
- * Prochaine étape? l'espace?



La matière comme “limite”



- * Face aux limites, le scientifique s'adapte:
- * Interféromètres gravitationnels VIRGO, LIGO -> 3 km
- * Prochaine étape? l'espace:
Interféromètre LISA -> $5 \cdot 10^6$ km

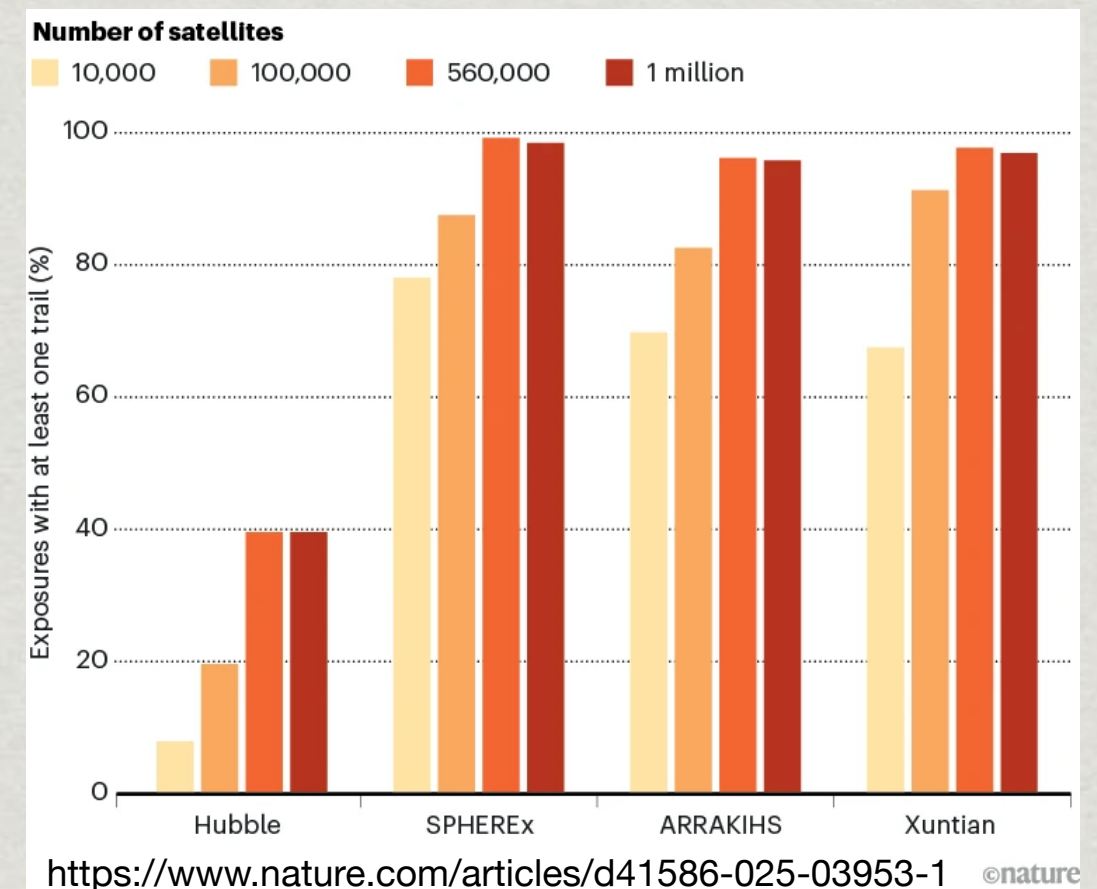


L'homme comme limite

- * La physique (la science en général) ne figure pas au rang des premières préoccupations des décideurs:
 - * Pollution lumineuse qui réduit les capacités des sites d'observation.
 - * Bataille (perdue d'avance) pour les domaines millimétrique et centimétrique (domaines utilisés par les téléphones portables entre autres).
 - * Le domaine visible avec les constellations de satellites pour internet?

L'homme comme limite

- * La physique (la science en général) ne figure pas au rang des premières préoccupations des décideurs:
- * Pollution lumineuse qui réduit les capacités des sites d'observation.
- * Bataille (perdue d'avance) pour les domaines millimétrique et centimétrique (domaines utilisés par les téléphones portables entre autres).
- * Le domaine visible avec les constellations de satellites pour internet?



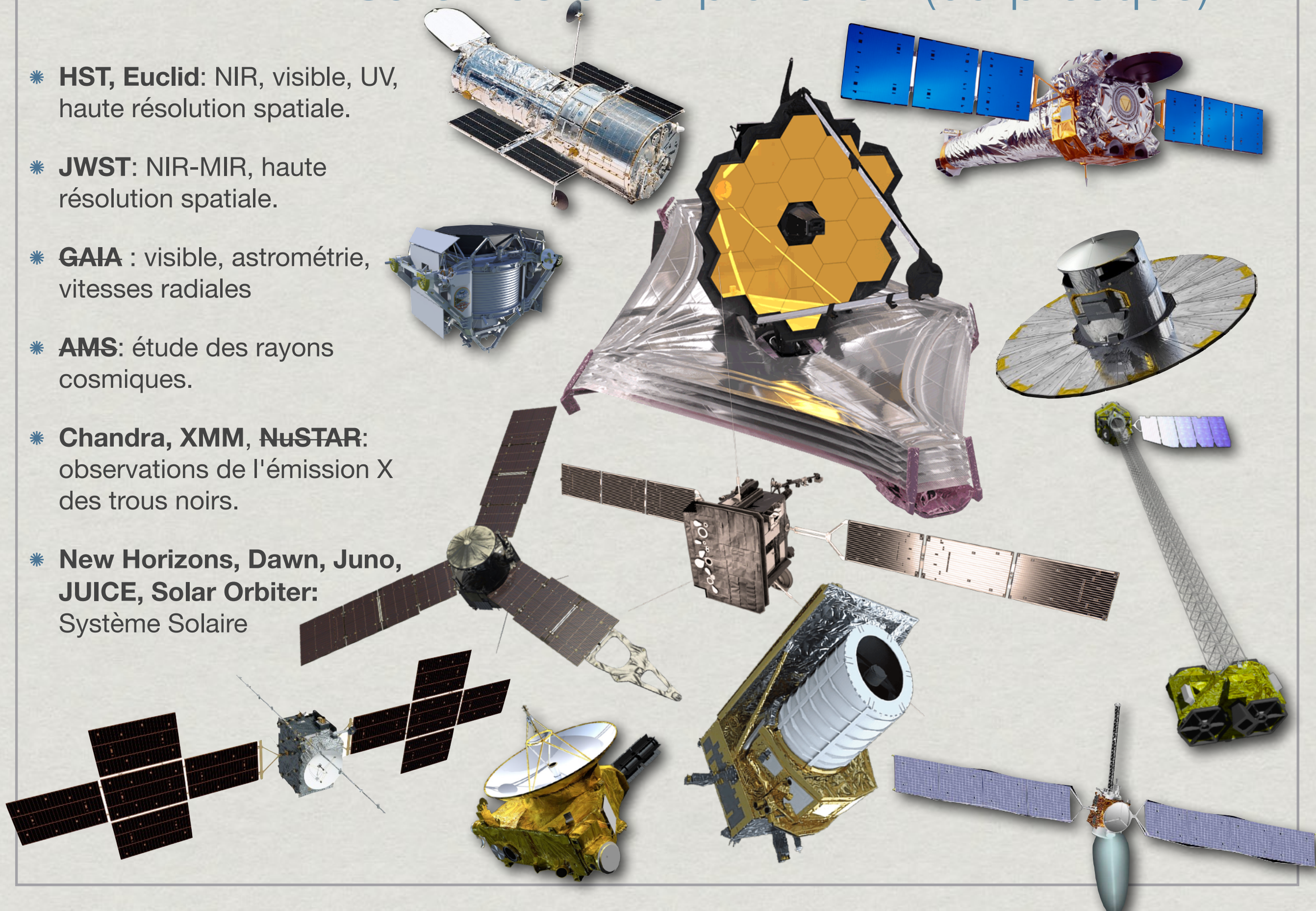
Pourquoi l'espace?

- * S'affranchir de l'atmosphère pour accéder de façon optimale à tout le spectre électromagnétique.
 - * Observatoires infrarouge, X, Gamma, mesure du fond cosmologique.
 - * **Herschel, XMM-Newton, Chandra, Planck, WMAP, JWST, SVOM**
- * Travailler en l'absence quasi totale de gravité pour simplifier les structures et tester des principes fondamentaux de physique.
 - * Test du principe d'équivalence.
 - * **Microscope**
- * Obtenir un laboratoire le plus stable et propre possible pour utiliser des instruments en limite de leur capacité.
 - * Mesure du cisaillement gravitationnel sur tout le ciel en exploitant la stabilité de la qualité optique.
 - * **Euclid, Roman (lancement 30/08/2026)**
- * Accéder à des tailles effectives d'instruments gigantesques.
 - * Interféromètre gravitationnel à l'échelle du million de km.
 - * **LISA (2034??)**

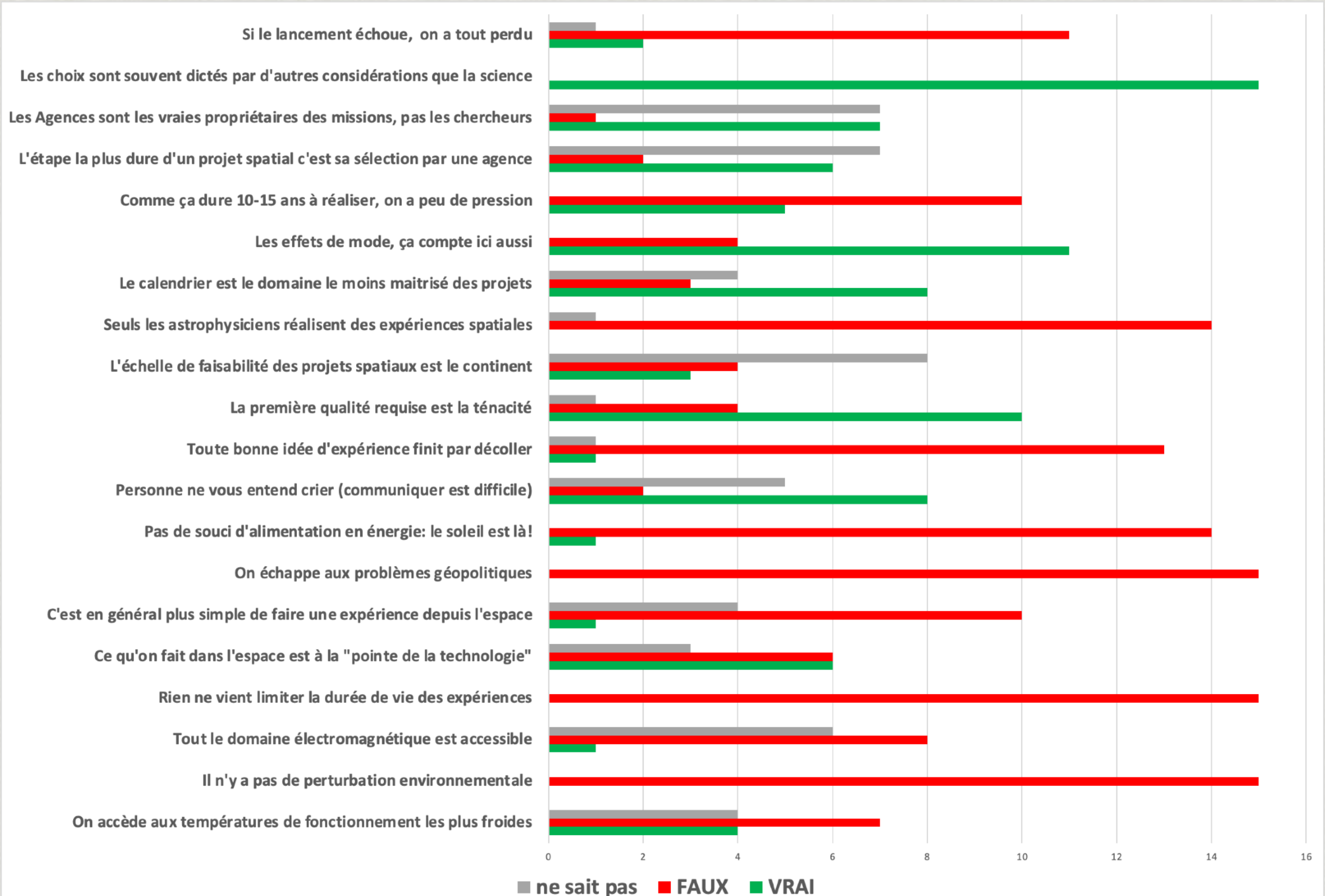
Satellites en exploitation (ou presque)

Satellites en exploitation (ou presque)

- * **HST, Euclid:** NIR, visible, UV, haute résolution spatiale.
- * **JWST:** NIR-MIR, haute résolution spatiale.
- * **GAIA** : visible, astrométrie, vitesses radiales
- * **AMS:** étude des rayons cosmiques.
- * **Chandra, XMM, NuSTAR:** observations de l'émission X des trous noirs.
- * **New Horizons, Dawn, Juno, JUICE, Solar Orbiter:** Système Solaire



Quelques idées préconçues sur l'espace...



Si le lancement échoue, on a tout perdu

Les choix sont souvent dictés par d'autres considérations que la science

Les Agences sont les vraies propriétaires des missions, pas les chercheurs

L'étape la plus dure d'un projet spatial c'est sa sélection par une agence

Comme ça dure 10-15 ans à réaliser, on a peu de pression

Les effets de mode, ça compte ici aussi

Le calendrier est le domaine le moins maîtrisé des projets

Seuls les astrophysiciens réalisent des expériences spatiales

L'échelle de faisabilité des projets spatiaux est le continent

La première qualité requise est la ténacité

Toute bonne idée d'expérience finit par décoller

Personne ne vous entend crier (communiquer est difficile)

Pas de souci d'alimentation en énergie: le soleil est là!

On échappe aux problèmes géopolitiques

C'est en général plus simple de faire une expérience depuis l'espace

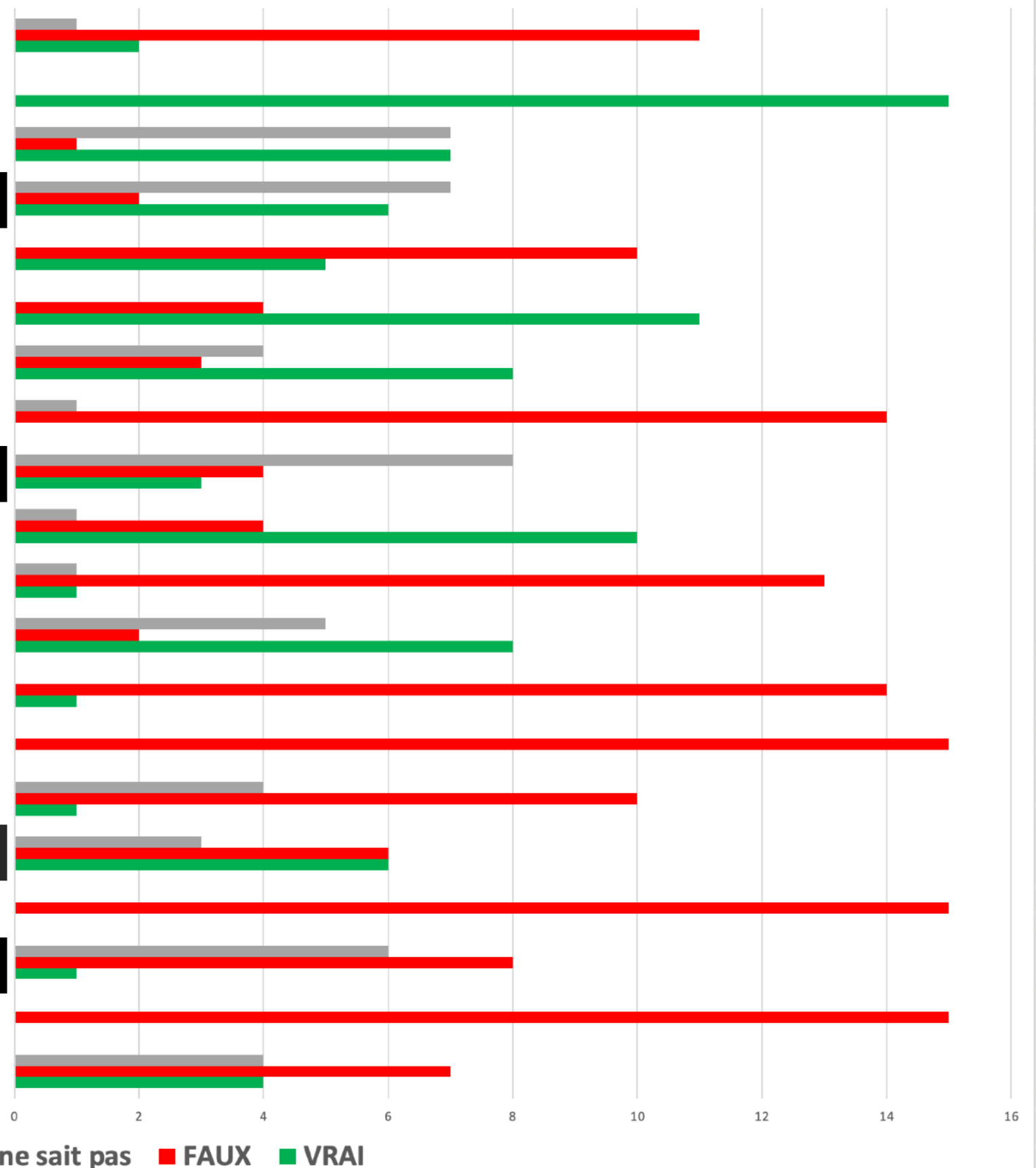
Ce qu'on fait dans l'espace est à la "pointe de la technologie"

Rien ne vient limiter la durée de vie des expériences

Tout le domaine électromagnétique est accessible

Il n'y a pas de perturbation environnementale

On accède aux températures de fonctionnement les plus froides

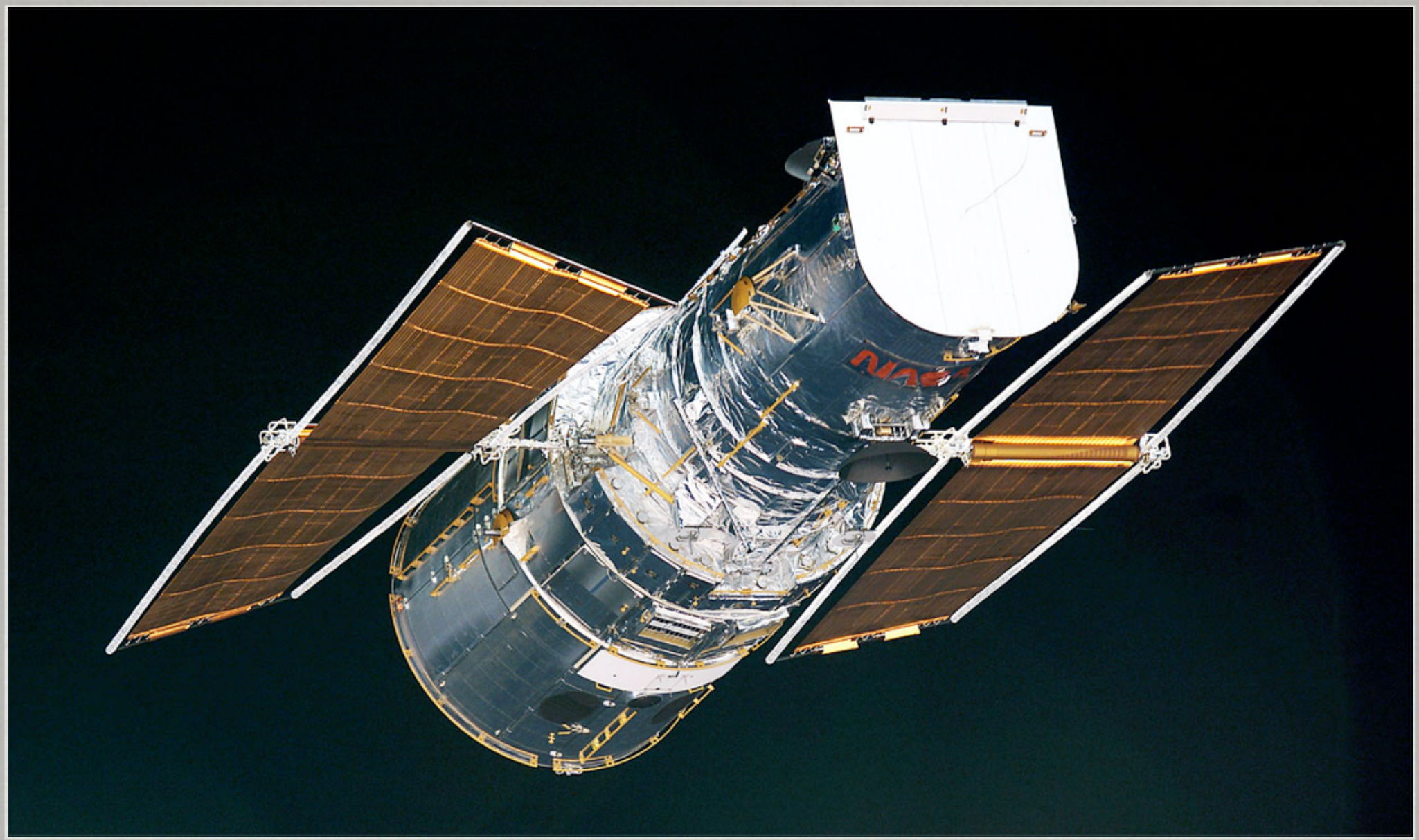


Idées préconçues

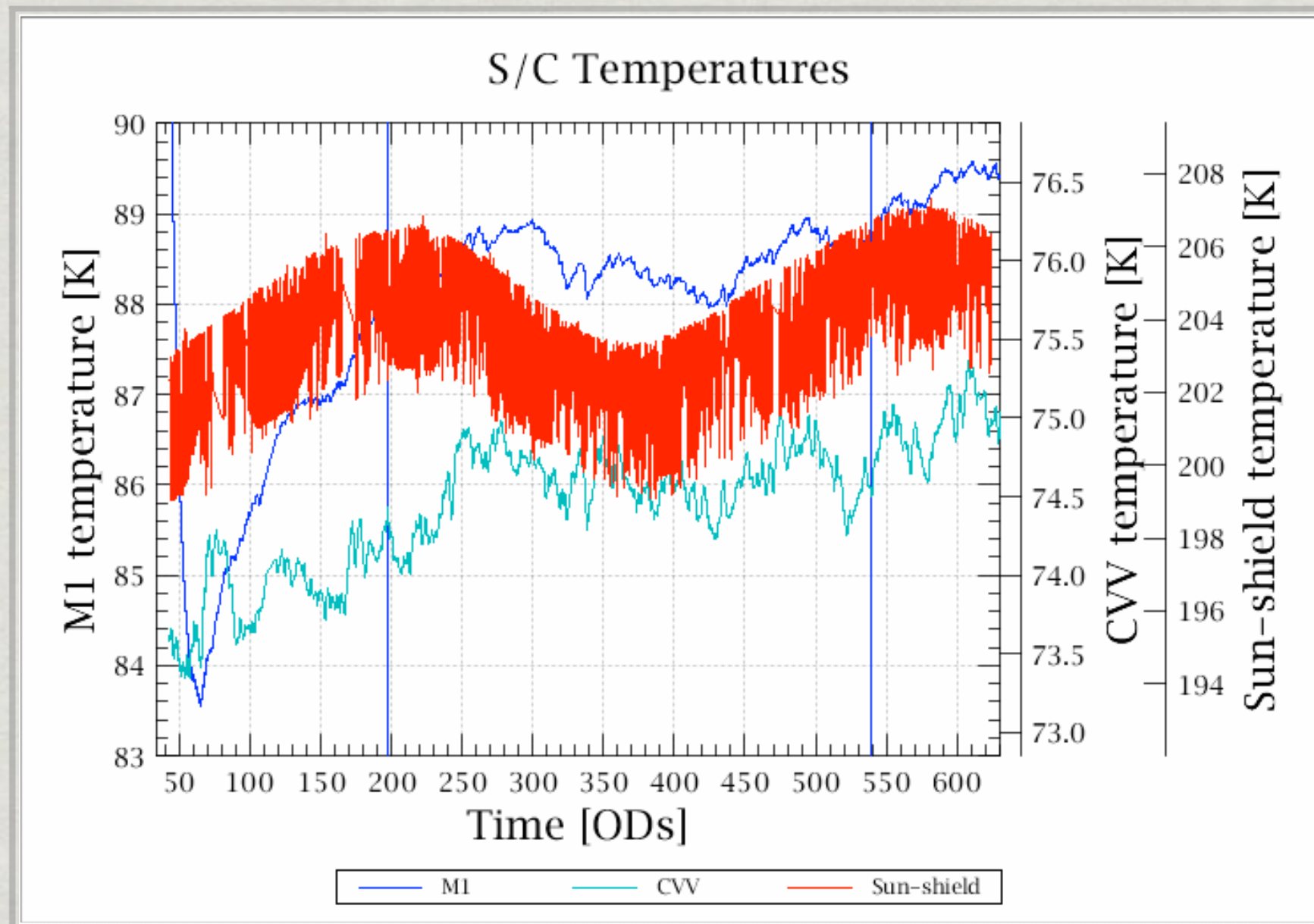
- * L'espace est très froid.
- * L'espace est vide.
- * L'énergie solaire abonde.

L'espace est froid

- * L'espace accessible (interplanétaire) est loin d'être aussi froid qu'on peut le penser:
 - * Au niveau de l'orbite de la Terre un objet éclairé par le soleil peut atteindre des températures de l'ordre de 200 K, à l'ombre sa température est de l'ordre de 80 K.
 - * En pratique il est impossible de refroidir des instruments en dessous de 40K par refroidissement passif
 - * Les gradients thermiques (variations de température) sur un satellite sont extrêmement forts et peuvent induire des effets de vieillissement prématuré des matériels, ou des difficultés à contrôler le pointage.
 - * Beaucoup d'expériences nécessitent de plus basses températures (détecteurs, bruit de fond) et doivent embarquer leur propres systèmes cryogéniques.
 - * Comme la convection n'existe plus, les échanges thermiques ne se font que par radiation, ce qui peut être très inefficace pour de l'électronique par exemple.

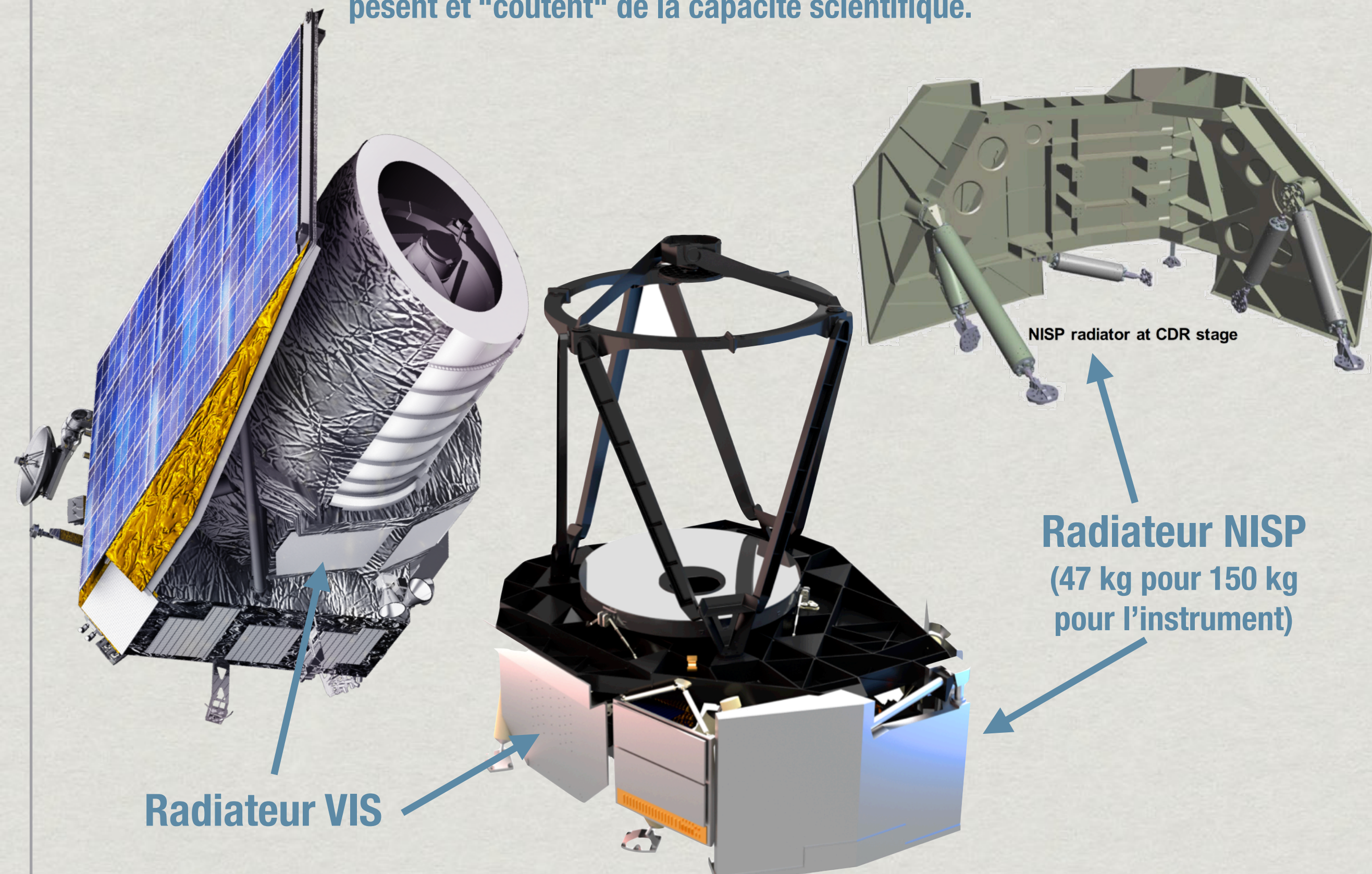


Les premiers panneaux solaires du HST, vieillis par la succession du passage "jour/nuit" en orbite basse terrestre.



Variation de la température du satellite Herschel (orbite L2) en fonction de la saison (du fait de l'excentricité de l'orbite terrestre, 0.017).

Sur Euclid, de larges structures ont pour seul but de fournir de la matière rayonnante pour dissiper la chaleur produite par les instruments, mais elles pèsent et "coûtent" de la capacité scientifique.

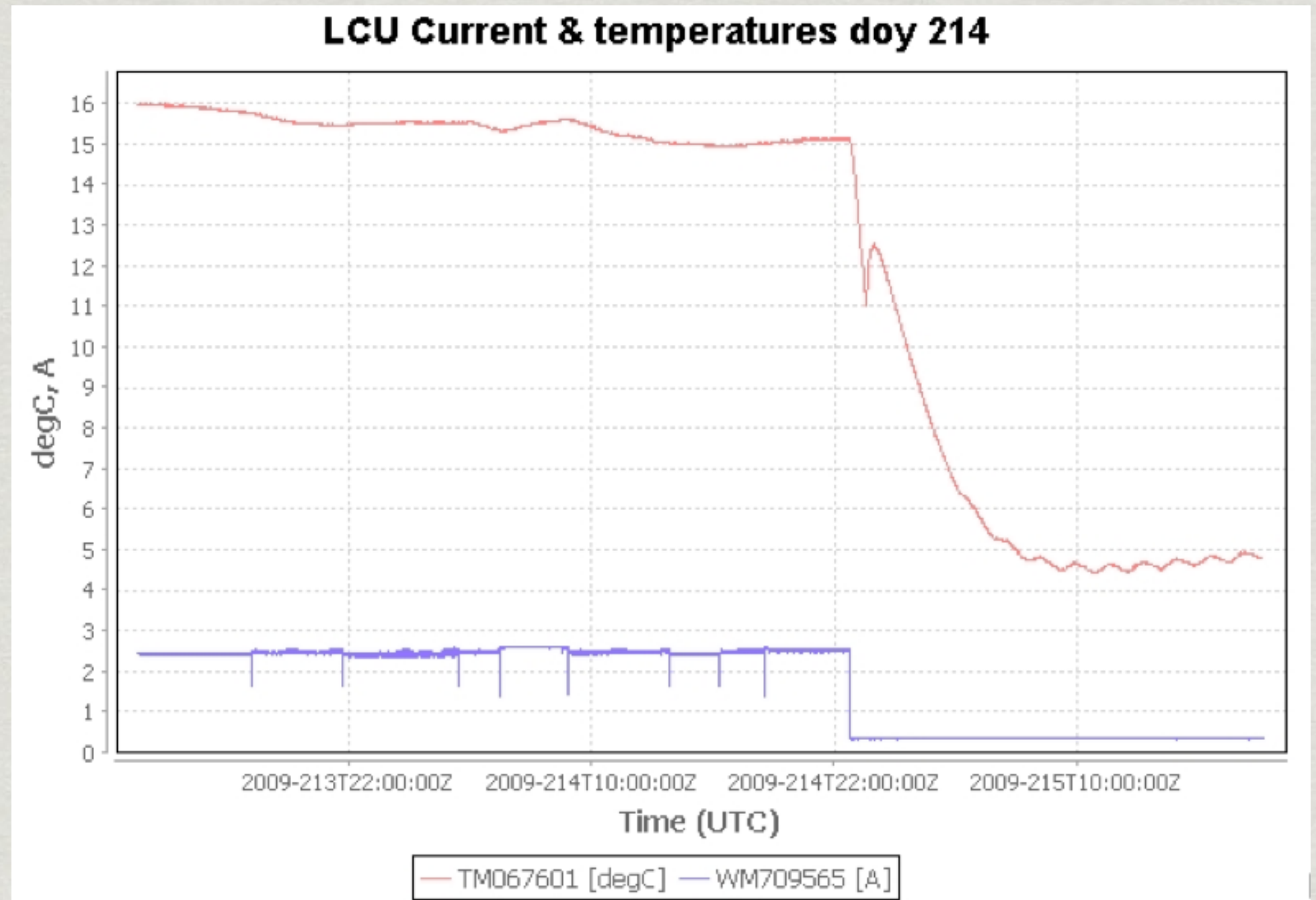


Sur Euclid, de larges structures ont pour seul but de fournir de la matière rayonnante pour dissiper la chaleur produite par les instruments, mais elles pèsent et "coûtent" de la capacité scientifique.



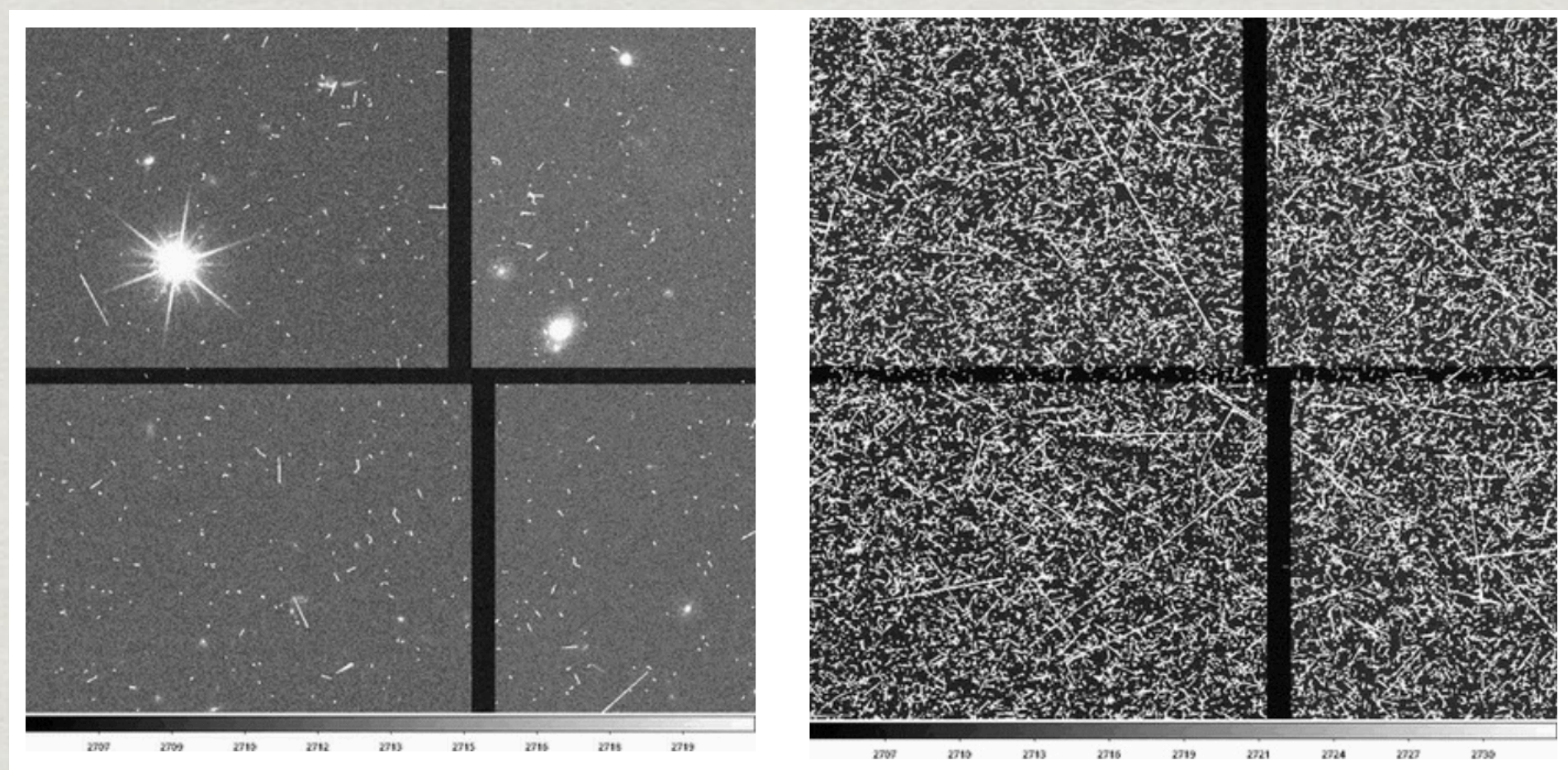
L'espace est vide

- * Si l'espace est effectivement vide par rapport au meilleur des vides terrestres, il est plein de particules absentes de nos laboratoires:
 - * Electrons et noyaux du vent solaire.
 - * Noyaux du rayonnement cosmique.
- * Le bombardement de particules est intensif quelque soit l'orbite:
 - * Ceintures de radiation terrestres en orbite basse.
 - * Eruptions solaire en orbite haute (même L2 à 1.5 Mkm de la Terre).
 - * On peut rarement blinder les instruments (contrainte de poids).



Le 3 Aout 09, 81 jours après le lancement, un simple impact de rayon cosmique dans un composant non “durci” de l'instrument Herschel/HIFI a détruit l'un des boîtiers d'électronique, rendant l'instrument inutilisable.

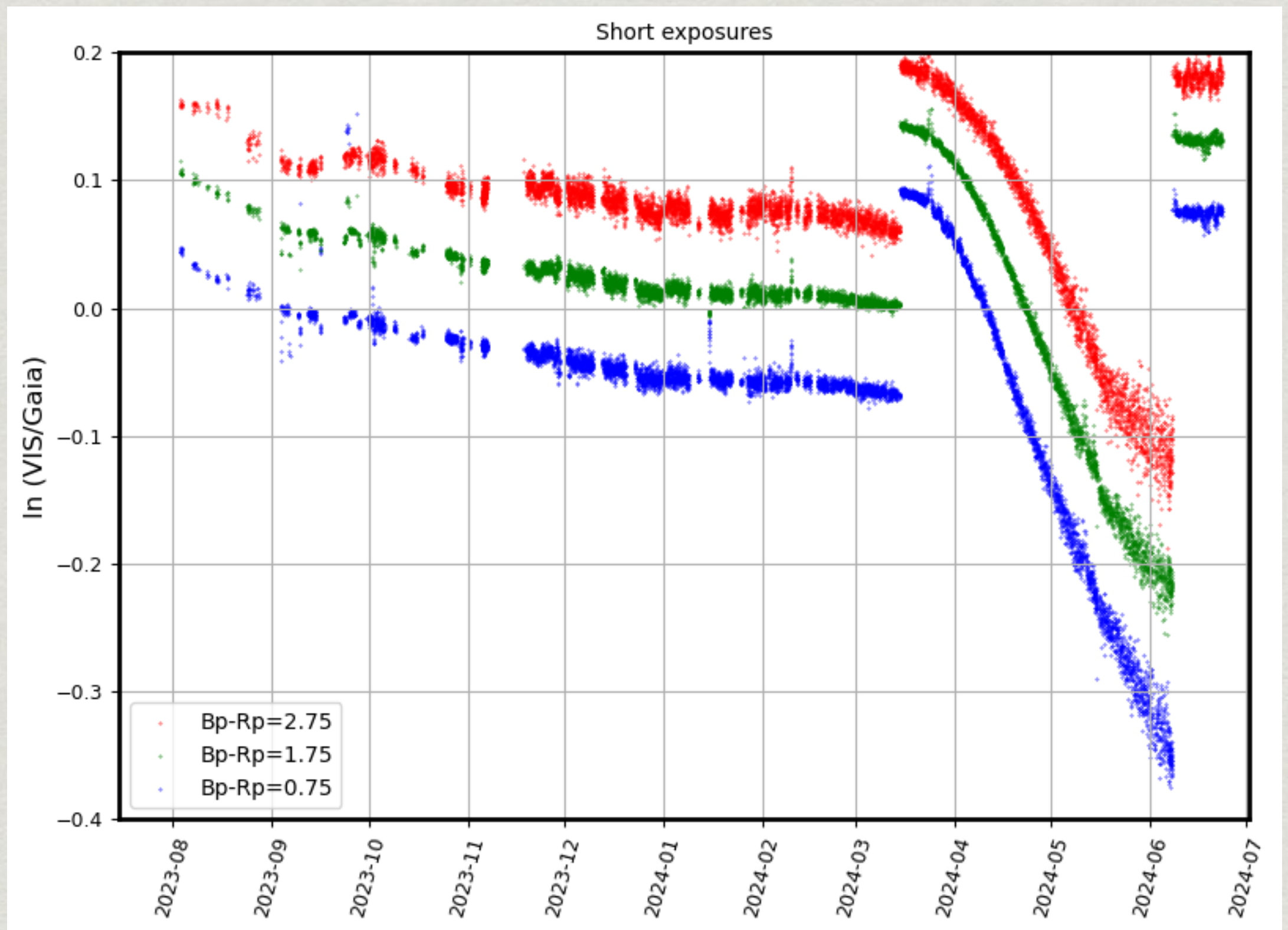
Le logiciel de bord a dû être modifié et l'instrument a fonctionné toute la mission sur sa voie de secours (six mois d'interruption sur une mission de 3.5 ans...).



Deux images du canal VIS à bord d'Euclid, à gauche dans des conditions normales d'opérations, à droite lors de l'arrivée d'une éruption solaire.

L'espace est vide

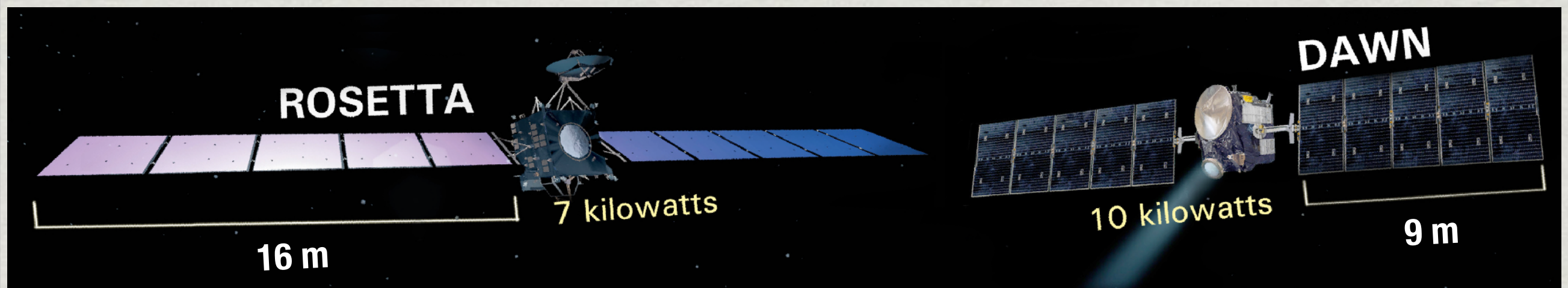
- * Si l'espace est effectivement vide par rapport au meilleur des vides terrestres, il est plein de particules absentes de nos laboratoires:
 - * Electrons et noyaux du vent solaire.
 - * Noyaux du rayonnement cosmique.
- * Le bombardement de particules est intensif quelque soit l'orbite:
 - * Ceintures de radiation terrestres en orbite basse.
 - * Eruptions solaire en orbite haute (même L2 à 1.5 Mkm de la Terre).
 - * On peut rarement blinder les instruments (contrainte de poids).
- * ...si on évite d'y emmener des contaminants!
 - * La plupart des matériaux adsorbe des molécules (par exemple de l'eau) qui dégazent en orbite et peuvent poser problème.



Evolution de la transmission du détecteur VIS d'Euclid, depuis le lancement, avec deux actions de décontamination

Le soleil fournit toute l'énergie nécessaire

- * L'énergie solaire est certes disponible sans obstacle mais:
 - * Au delà de l'orbite de Mars, le flux d'énergie devient limite pour alimenter les satellites, la seule alternative est d'utiliser la fission (New Horizons emportait 11kg de PuO_2), d'où de sérieux problèmes de sécurité au lancement.
 - * Pour les satellites dans le voisinage terrestre il faut vérifier l'absence de trop longues périodes d'éclipse par la terre.
 - * Les puissances disponibles pour les instruments restent (très) faibles. Elles se comptent en kW (5 kW à 150 Å pour le HST).



Comment faire de la physique dans l'espace?

Trois grandes étapes

Le fait de grandes agences.

NASA, ESA les deux agences d'échelle continentale, JAXA au Japon, depuis quelques années apparition de la Chine.

CNES en France, DLR en Allemagne, ASI en Italie...

* Prospective

- * C'est la phase de définition du programme des agences. Il s'agit de déterminer quels devront être les grands axes des expériences spatiales des 10 (voir 20) prochaines années.
- * Phase de lobbying intense.
- * Peut procéder par appel à idées: Voyage 2050 (Programmation ESA pour 2035-2050)

* Compétition

- * Les agences déterminent un calendrier des missions (enveloppe financière, dates de lancement) et publient des appels d'offres.

* Réalisation

- * Un projet sélectionné par une agence entre en phase de réalisation (5 à 15 ans).



Cosmic Vision

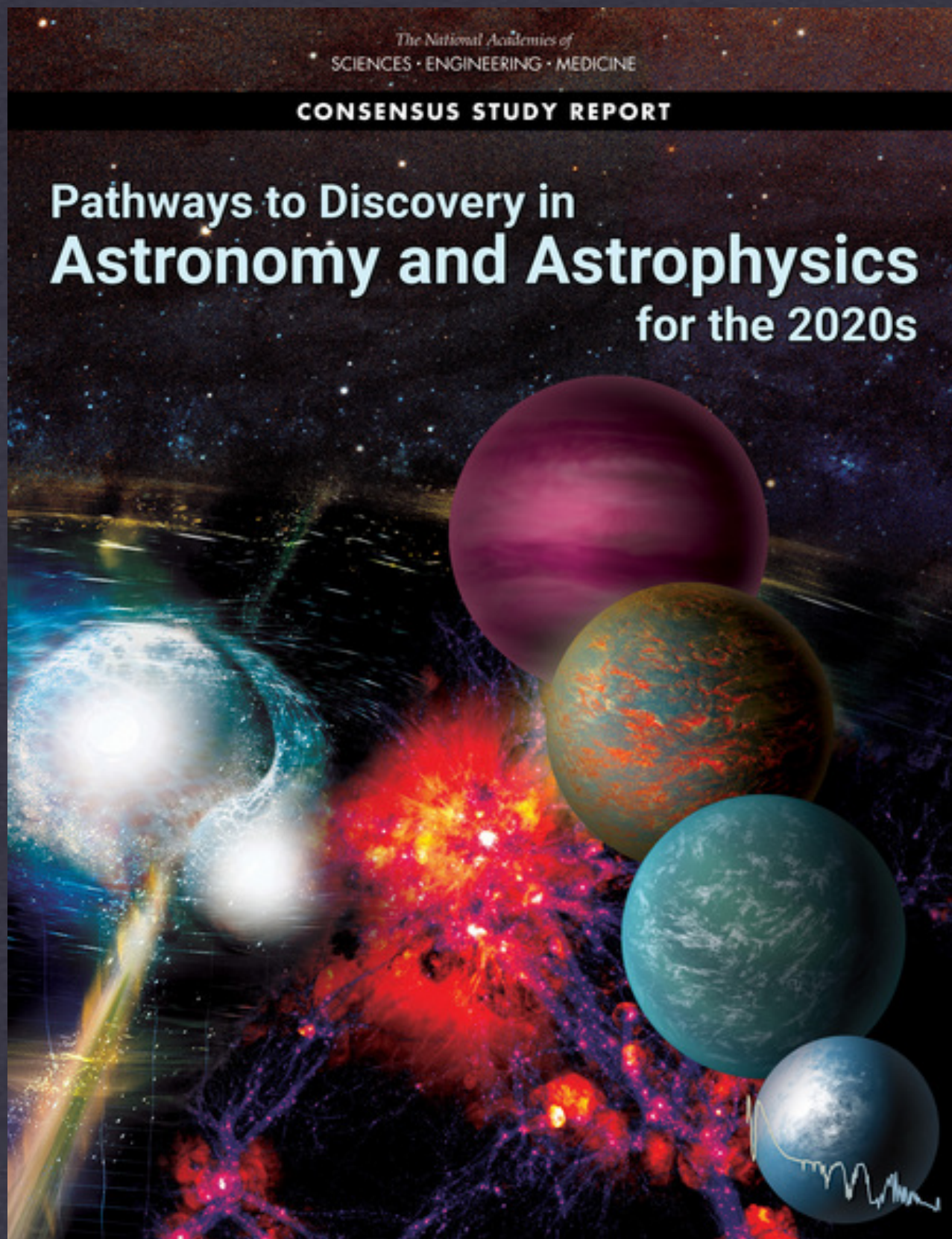
Space Science for Europe 2015-2025



European Space Agency
Agence spatiale européenne

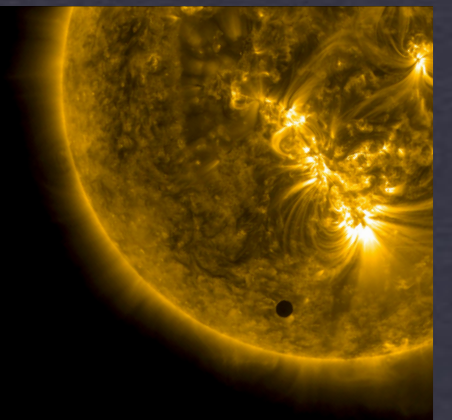
LES DEUX PROGRAMMES PRINCIPAUX

USA 2012-2021 - UE 2015-2025



Voyage 2050

Final recommendations from
the Voyage 2050 Senior Committee



Voyage 2050 Senior Committee: Linda J. Tacconi (*chair*), Christopher S. Arridge (*co-chair*),
Alessandra Buonanno, Mike Cruise, Olivier Grasset, Amina Helmi, Luciano Iess, Eiichiro Komatsu,
Jérémy Leconte, Jorrit Leenaarts, Jesús Martín-Pintado, Rumi Nakamura, Darach Watson.

May 2021

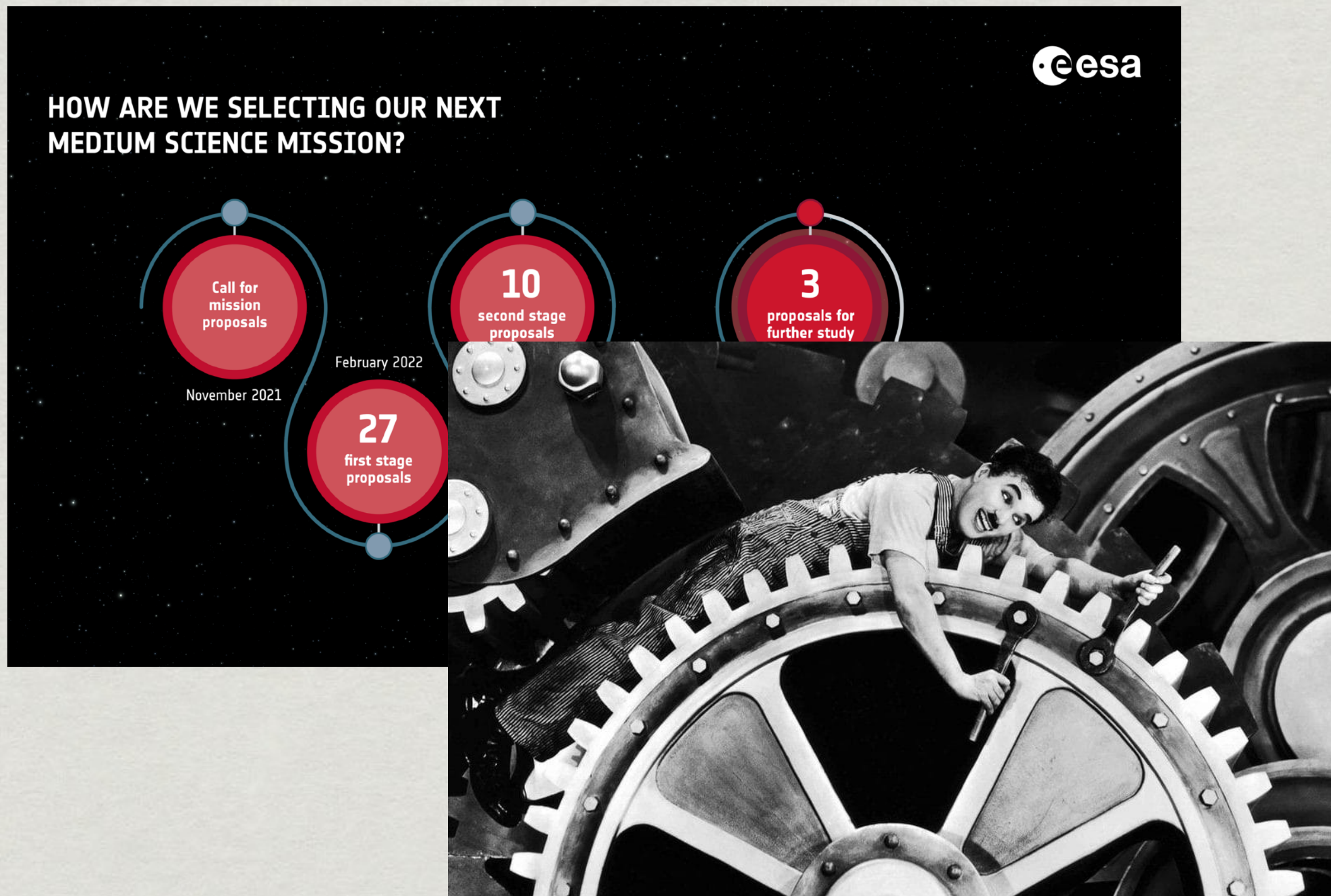
LES DEUX PROGRAMMES PRINCIPAUX

USA 2030-2050 - UE 2035-2050

Le processus...



Le processus...



Répondre à un appel d'offre

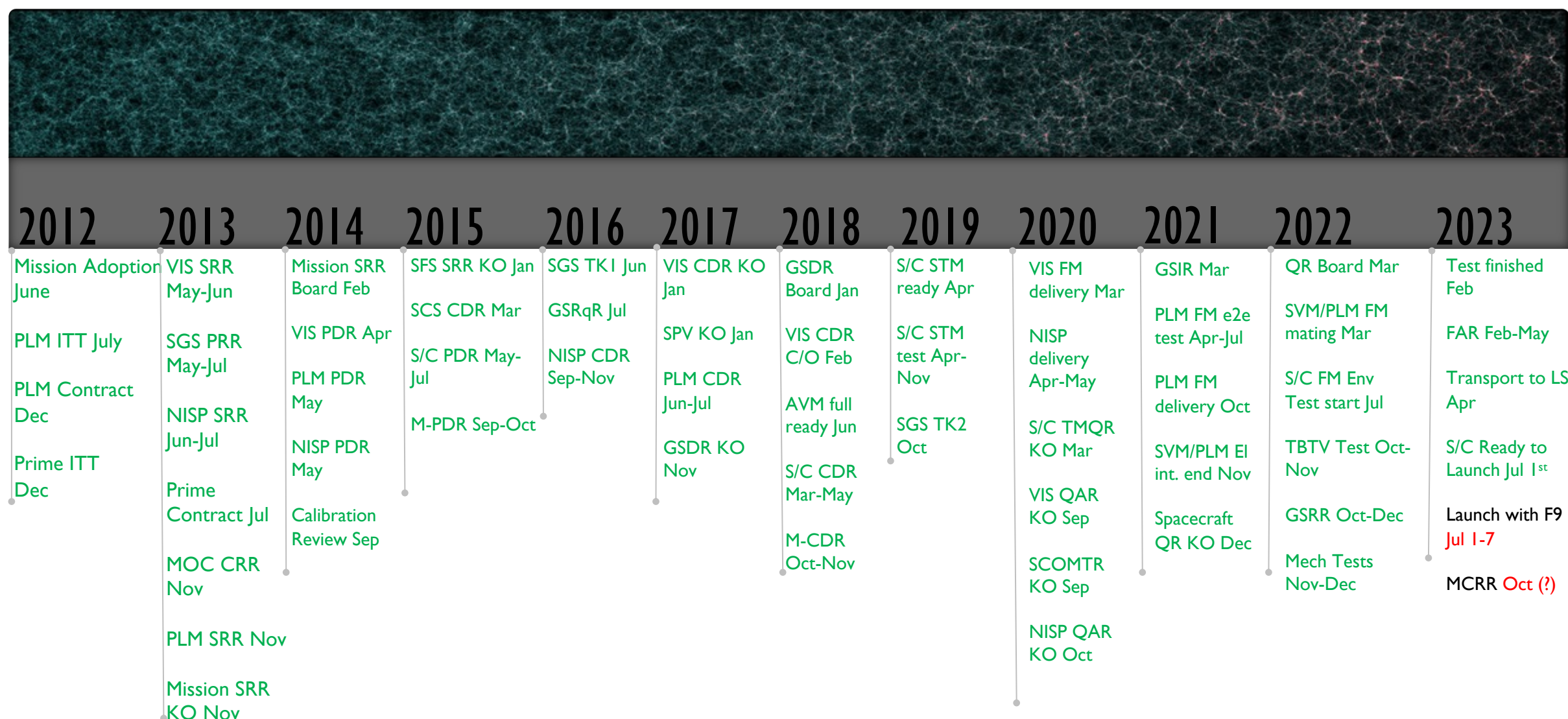
- * Il s'agit de la phase 0 d'un projet.
- * Elle peut faire l'objet d'un soutien d'une agence nationale.
- * Elle peut être le fait d'un petit groupe de chercheurs:
 - * Pour une mission de classe M (< 550 M€), les propositions rassemblent de l'ordre de 50 à 100 chercheurs (avec un noyau dur d'une dizaine de personnes).
- * La concurrence est rude:
 - * 40 réponses à l'appel d'offre M3 pour 2022, 27 pour l'appel M4 (2024, contexte pré-contraint).
 - * 42 réponses à l'appel de définition scientifique L2 et L3 (2028, 2034).
 - * Plus de 30 réponses à l'appel "New Science Ideas" qui ne proposait qu'une aide de phase 0.
 - * 28 réponses pour l'appel M7 & F2

Après la sélection...

Les métiers du spatial

- * Les phases qui précèdent la sélection sont surtout une affaire de chercheurs (avec des ingénieurs pour identifier les verrous techniques).
- * Après la sélection une expérience spatiale rassemble:
 - * des chercheurs pour continuer à définir les performances requises et les modes d'utilisations, mais aussi pour inventer les détecteurs.
 - * des électroniciens,
 - * des mécaniciens pour la conception physique,
 - * des spécialistes en cryogénie,
 - * des opticiens,
 - * des informaticiens,
 - * ...

Development – Planning/Progress Overview



Euclid Consortium Meeting 2023 | Project Status, G.D.Racca | Copenhagen, 20/06/2023 | Slide 2



→ THE EUROPEAN SPACE AGENCY