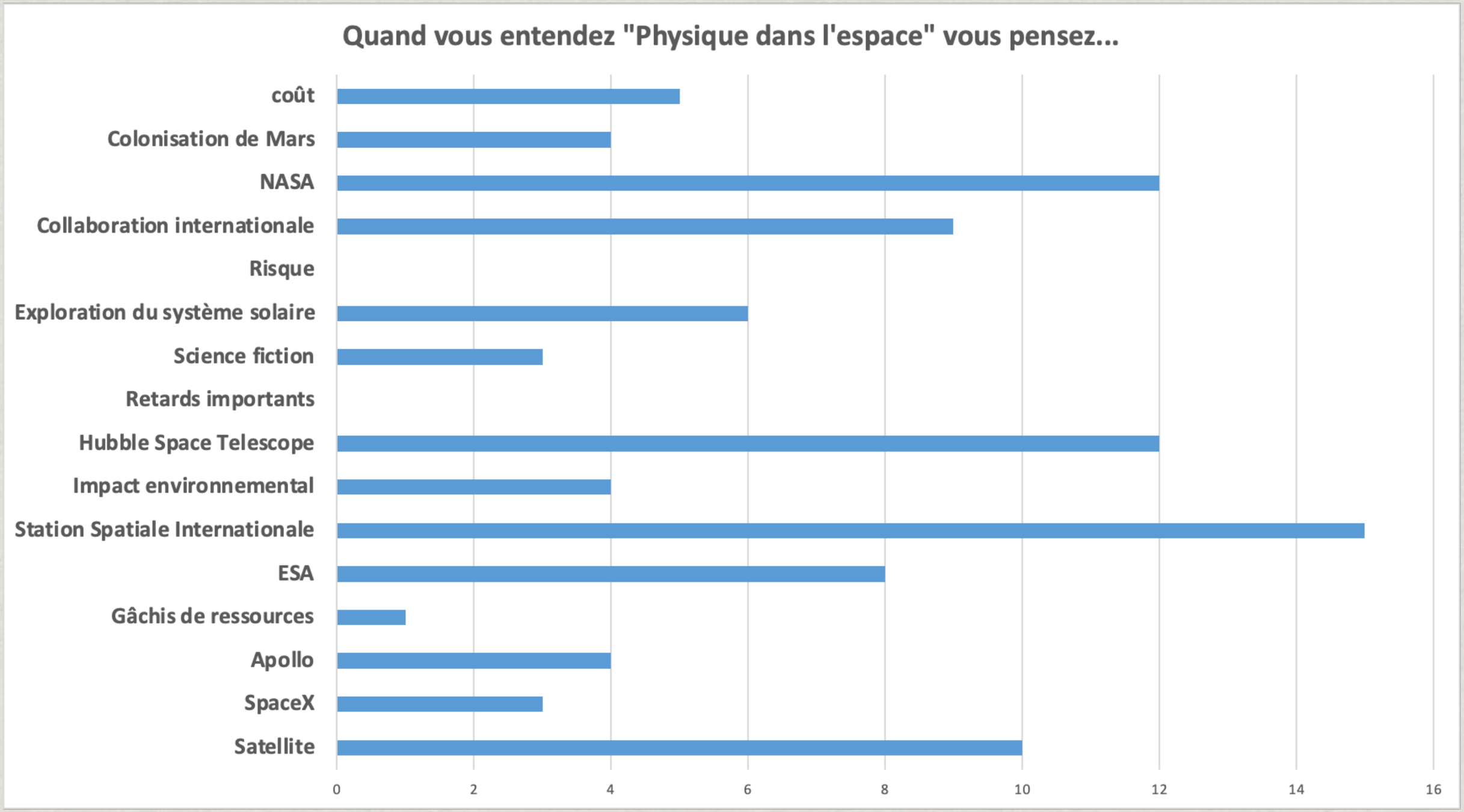
Comment faire de la physique dans l'espace?

Marc Sauvage (DRF/Irfu/DAp)

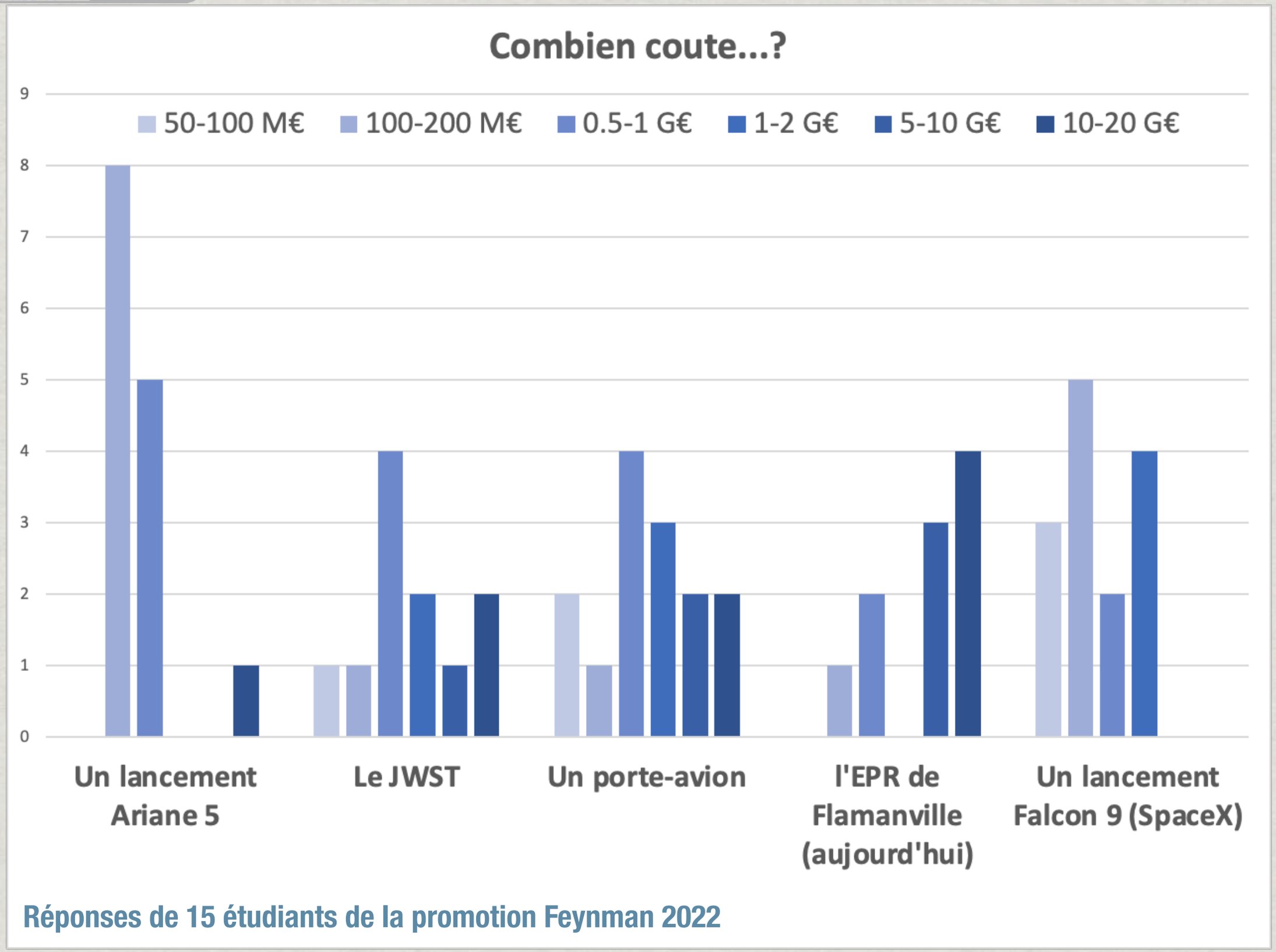
Pourquoi faire de la physique dans l'espace?

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



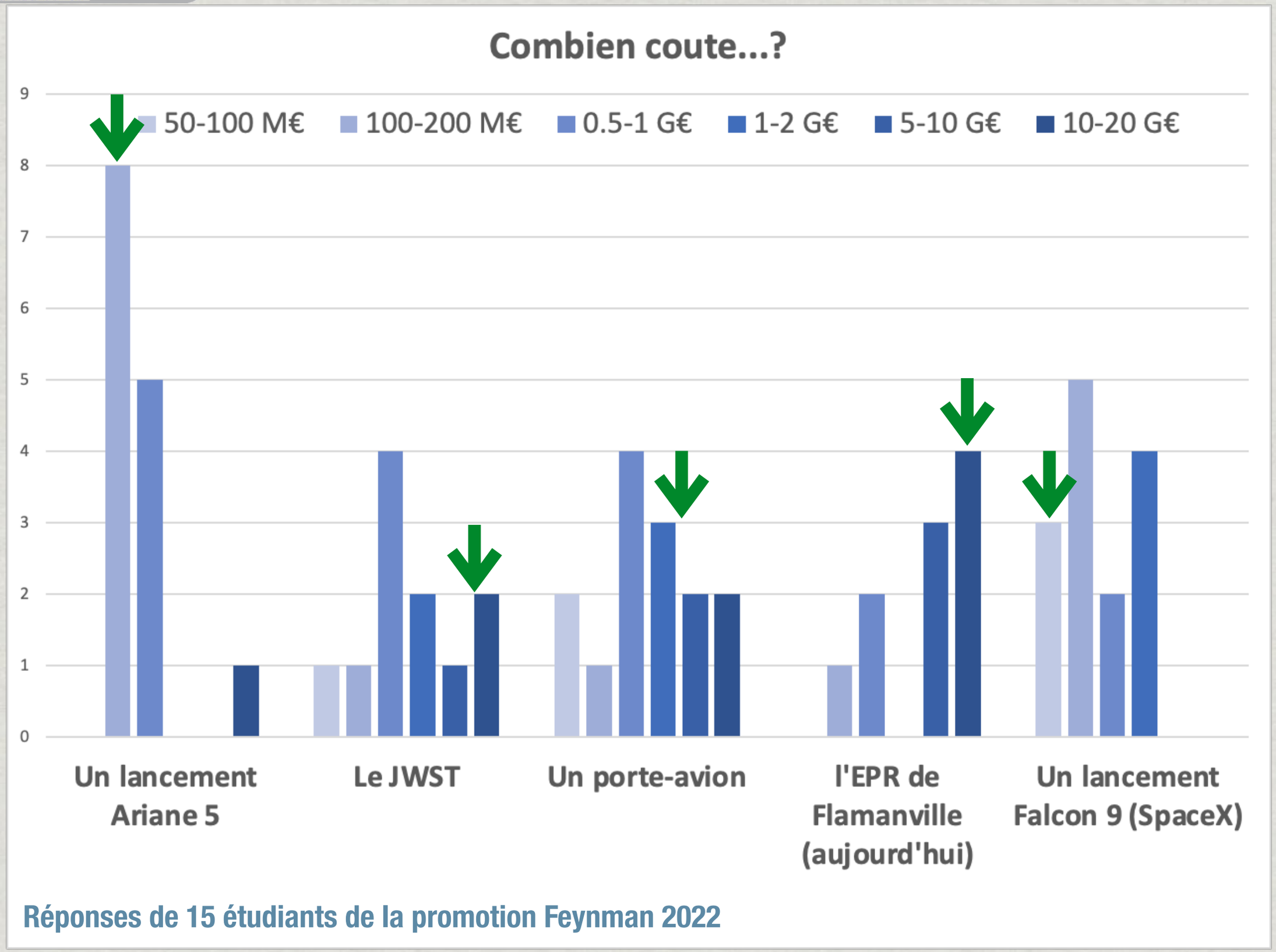
Réponses de 15 étudiants de la promotion Feynman 2022

Et si on se mettait à parler d'argent?



Réponses de 15 étudiants de la promotion Feynman 2022

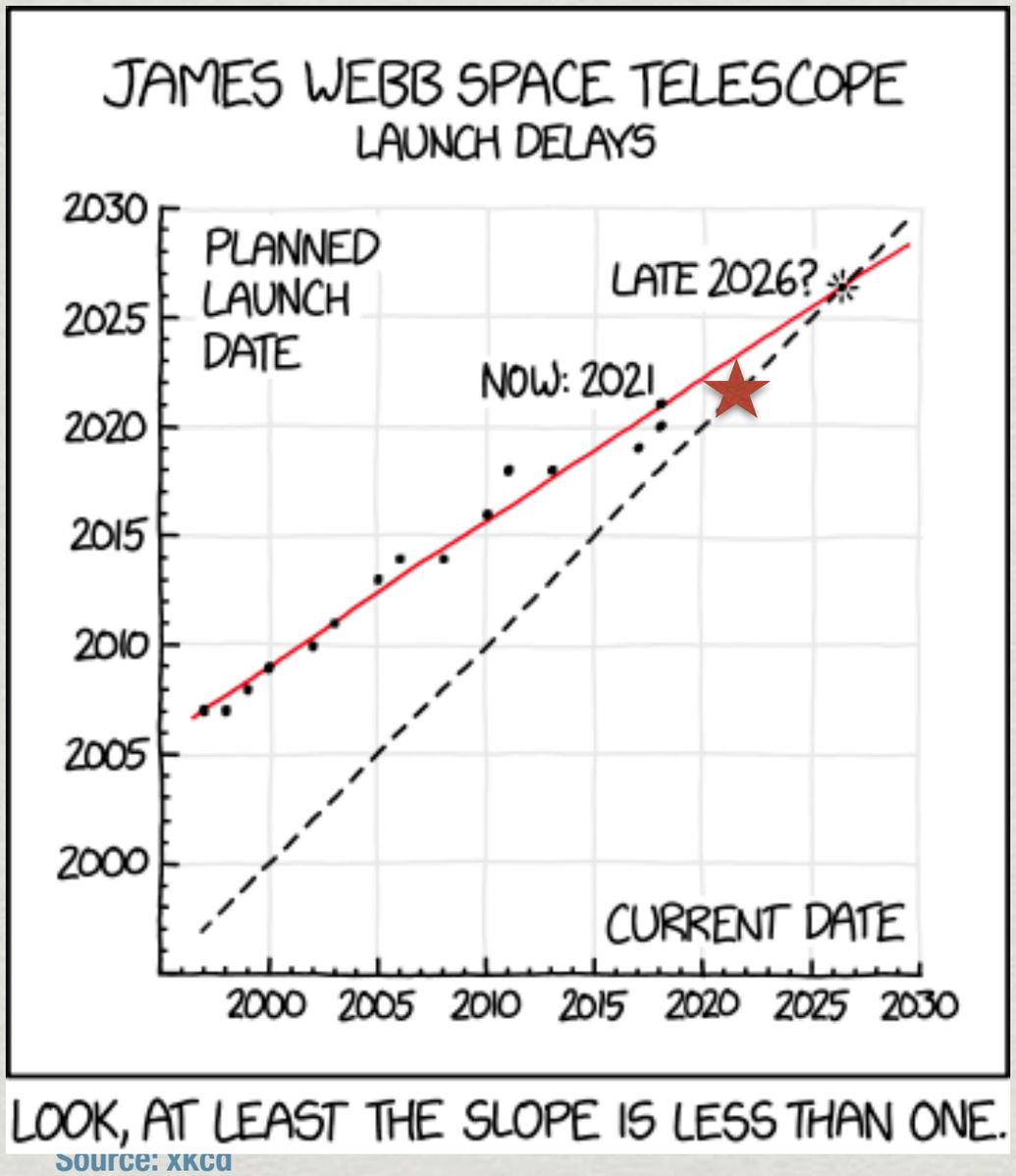
Et si on se mettait à parler d'argent?



Réponses de 15 étudiants de la promotion Feynman 2022

Pourquoi l'espace?

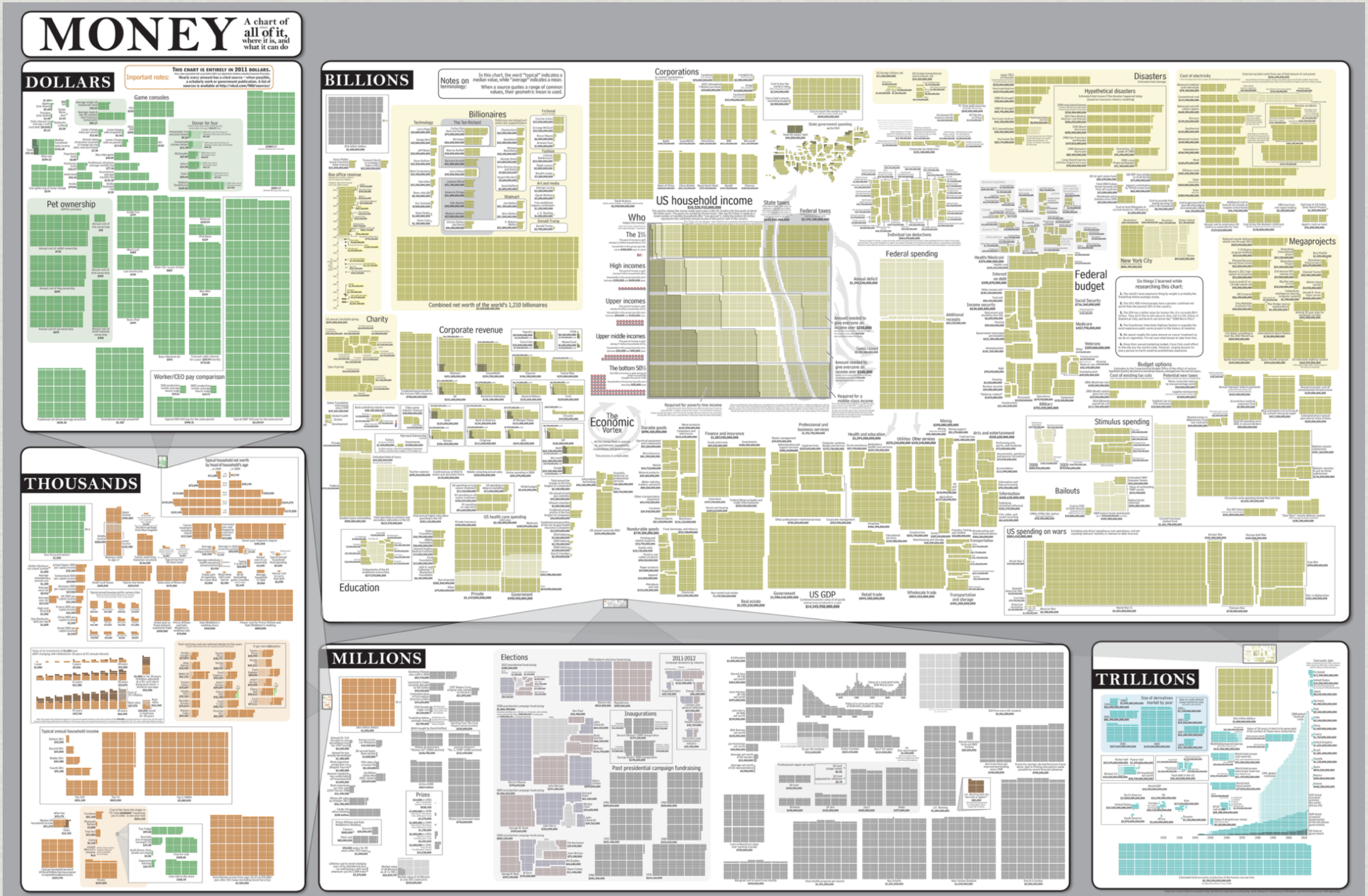
- L'accès à l'espace est cher:
  - Coût d'un lancement: Ariane 5: 170 M€, Falcon Heavy 90 M$
  - Projet Herschel+Planck: 2 G€, presque autant que le LHC (3 G€).
  - James Webb Space Telescope: 10 G€ pour un lancement qui a glissé de 2007 à fin 2021, le congrès américain a heureusement approuvé l'extension du budget...



Source: xkcd

xkcd: money chart (2011)

https://xkcd.com/980/huge/#x=-6432&y=-8352&z=2



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€).
  - James Webb Space Telescope: 8 G€ prévus pour lancer la mission, le congrès américain a heureusement approuvé l'extension du budget...
- 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 prochaine mission (M7) qui sera sélectionnée en 2022 sera lancée au plus tôt en 2037
- 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$
  - Projet Herschel+Planck: 2 G€, presque autant que le LHC (3 G€).
  - James Webb Space Telescope: 8 G€ prévus pour lancer la mission, le congrès américain a heureusement approuvé l'extension du budget...
- 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 prochaine mission (M7) qui sera sélectionnée en 2022 sera lancée au plus tôt en 2037
- 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

esa

Nº 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

esa

Nº 6–2022: ESA statement regarding cooper… Russia meetin… States 2022

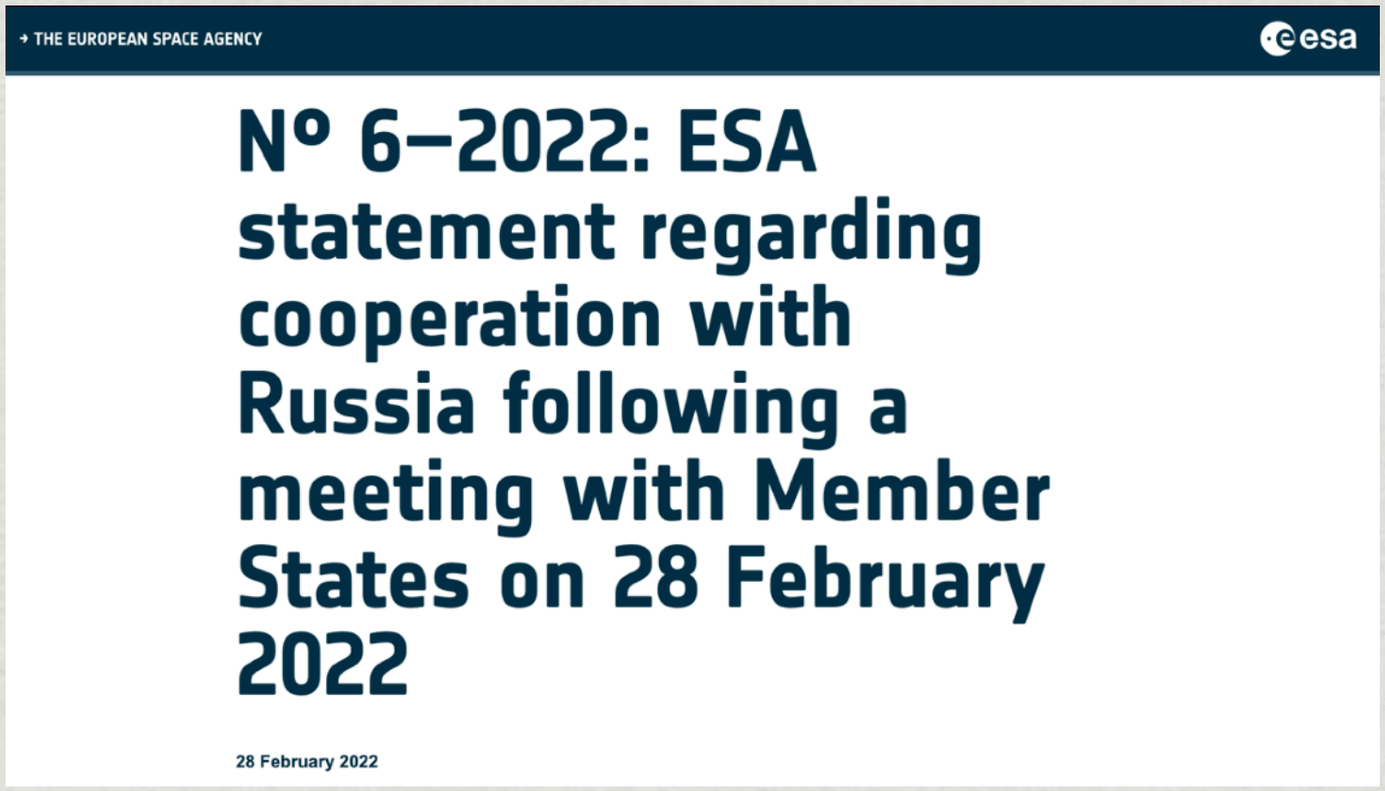
28 February 2022

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

esa

Nº 6–2022: ESA statement regarding cooperation with Russia following a meeting with Member States on 28 February 2022

28 February 2022

5 missions se retrouvent sans lanceur:

- Galileo M10 et M11
- Un satellite militaire français
- EarthCare
- Euclid

Après un échec?

- Evidemment les expériences scientifiques ne sont pas assurées:
  - “L’état est son propre assureur”, et quelle est la “valeur” d’une expérience scientifique unique?

Après un échec?

- Evidemment les expériences scientifiques ne sont pas assurées:
  - “L’état est son propre assureur”, et quelle est la “valeur” d’une expérience scientifique unique?
- **Cluster:** construction d’un des 4 satellites avec les éléments de rechange, financement ESA de 3 nouveaux satellites et lancement double sur Soyouz 4 ans plus tard.

Après un échec?

- Evidemment les expériences scientifiques ne sont pas assurées:
  - “L’état est son propre assureur”, et quelle est la “valeur” d’une expérience scientifique unique?
- **Cluster:** construction d’un des 4 satellites avec les éléments de rechange, financement ESA de 3 nouveaux satellites et lancement double sur Soyouz 4 ans plus tard.
- **Hitomi:** la JAXA a décidé le financement d’un satellite de “remplacement”, reprenant certains des objectifs scientifiques, avec une capacité moindre.

Après un échec?

- Evidemment les expériences scientifiques ne sont pas assurées:
  - “L’état est son propre assureur”, et quelle est la “valeur” d’une expérience scientifique unique?
- **Cluster:** construction d’un des 4 satellites avec les éléments de rechange, financement ESA de 3 nouveaux satellites et lancement double sur Soyouz 4 ans plus tard.
- **Hitomi:** la JAXA a décidé le financement d’un satellite de “remplacement”, reprenant certains des objectifs scientifiques, avec une capacité moindre.

Attention: cela se fait en général sans rallonge budgétaire et donc au détriment de la suite du programme…

Pourquoi aller dans l'espace?

L'atmosphère comme limite

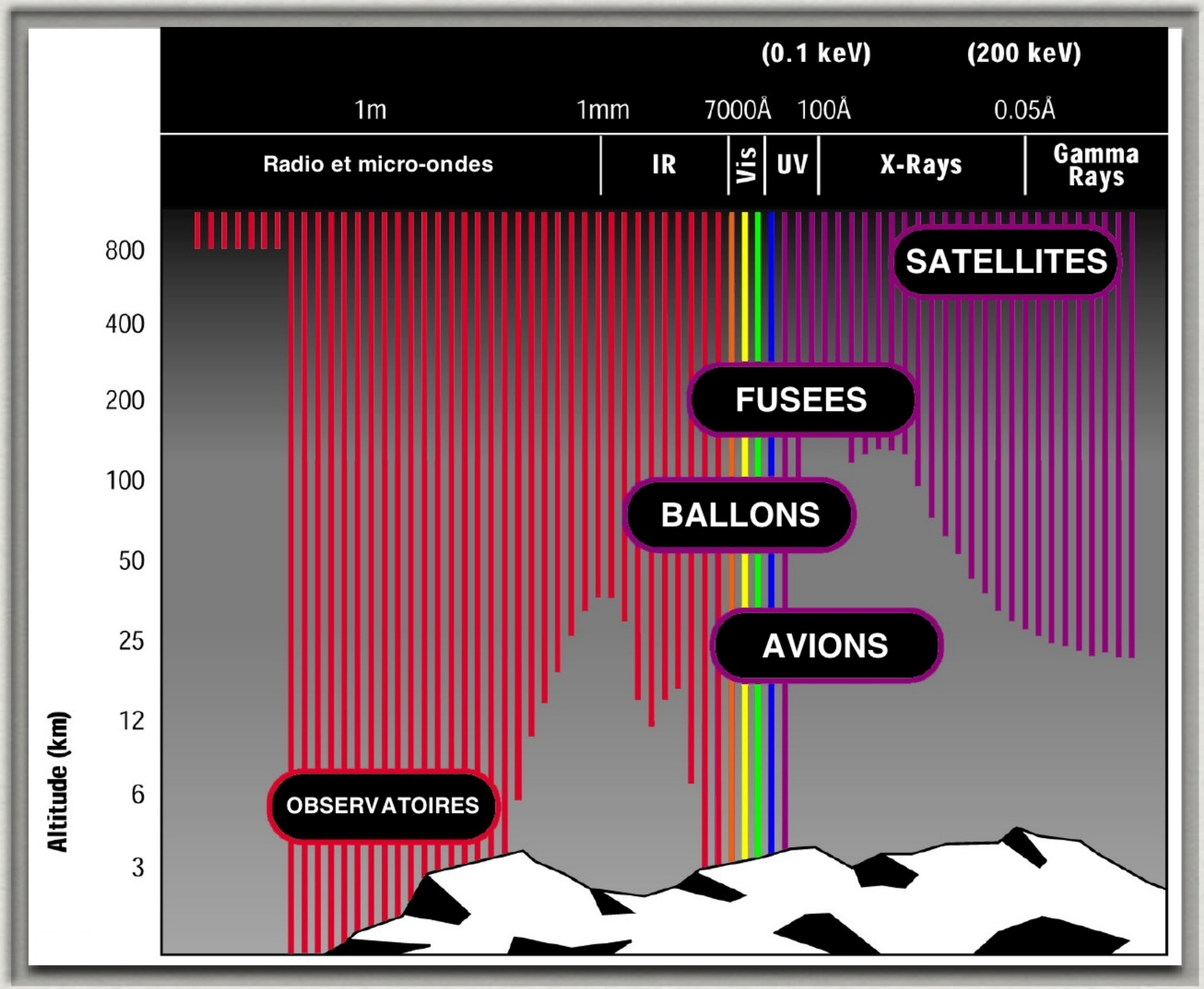
L'atmosphère comme limite

- 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 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 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.

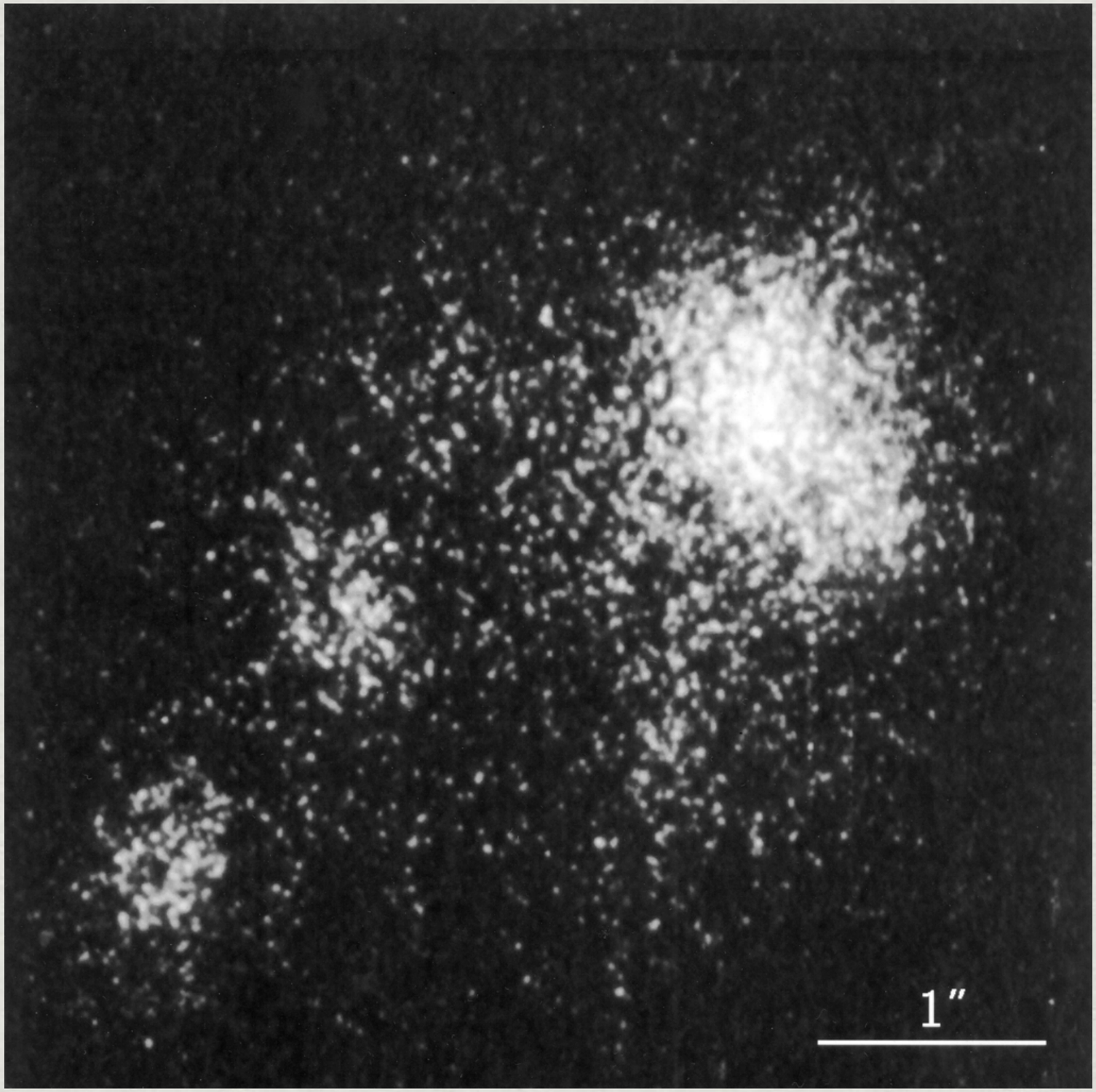
L'atmosphère comme limite

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 a mi-hauteur de la PSF optique au VLT (⌀8.2m) s'approche seulement de celle du HST (⌀2.4m).

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_aua_r136_1992.html

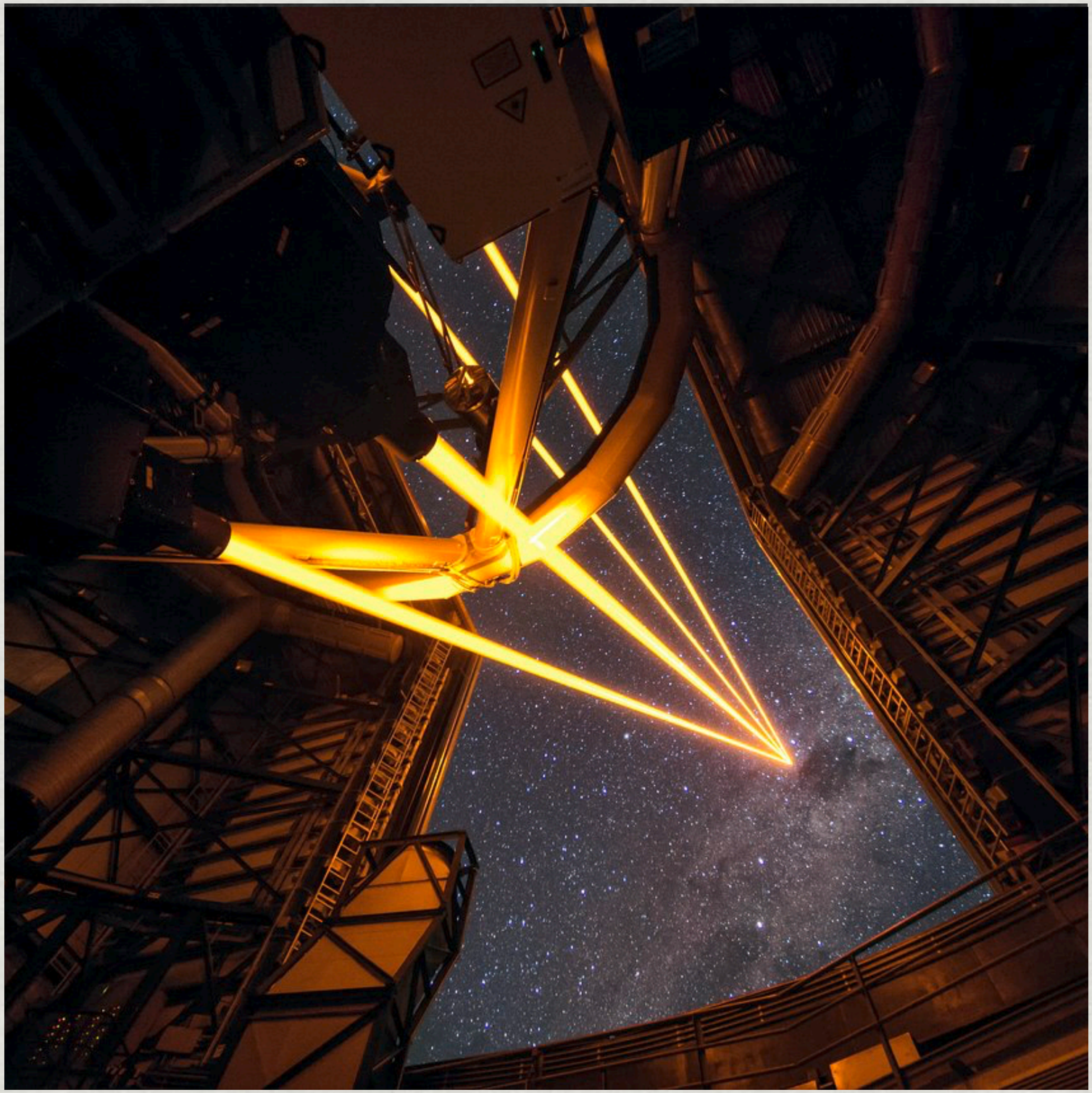
L'atmosphère comme limite

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 a mi-hauteur de la PSF optique au VLT (⌀8.2m) s'approche seulement de celle du HST (⌀2.4m).

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_aua_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.
- 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 est fixée par le diamètre terrestre, seule l’interférométrie radio peut s’en affranchir.

La matière comme limite

Au LHC, les marées doivent être prises en compte dans la détermination des 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.

source: http://visits.web.cern.ch/visits/guides/tools/presentation/LHC_booklet-2.pdf

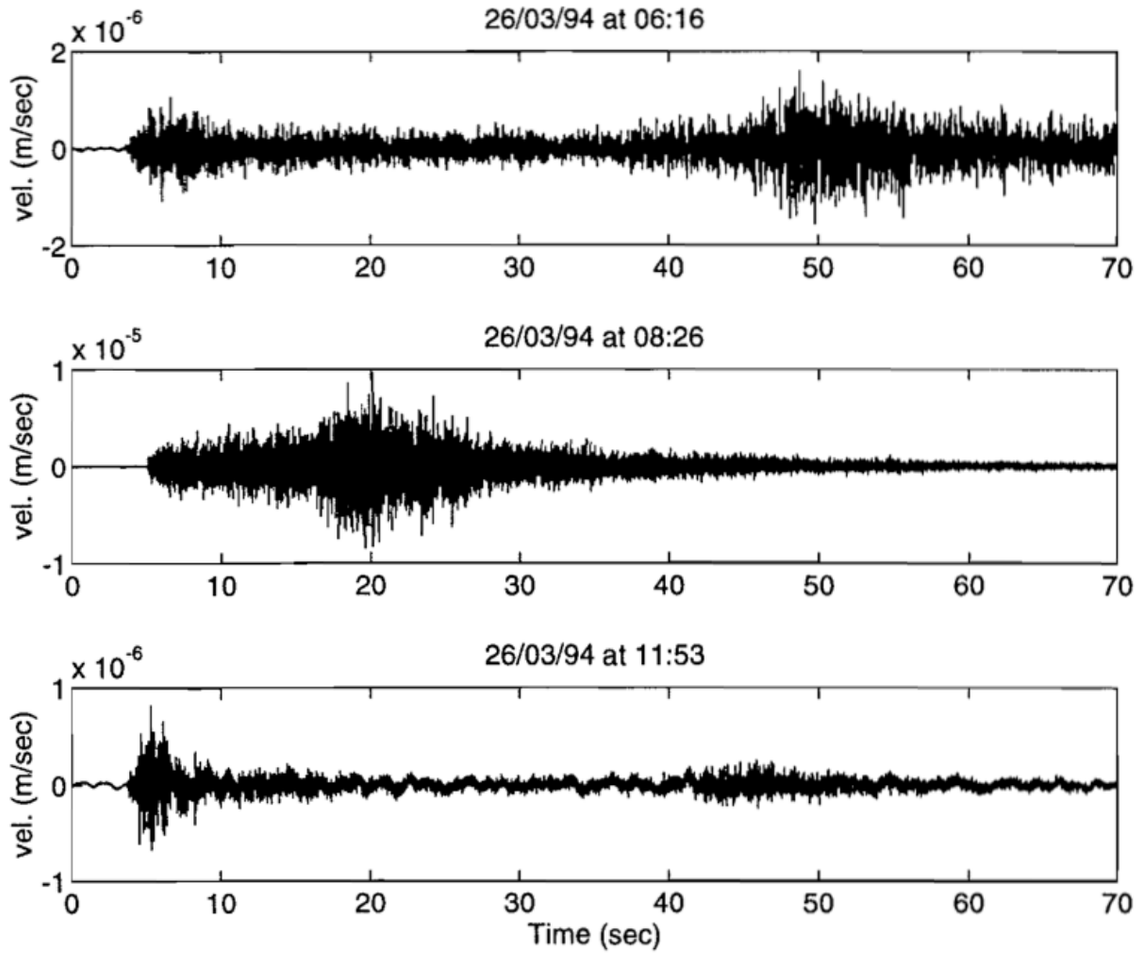
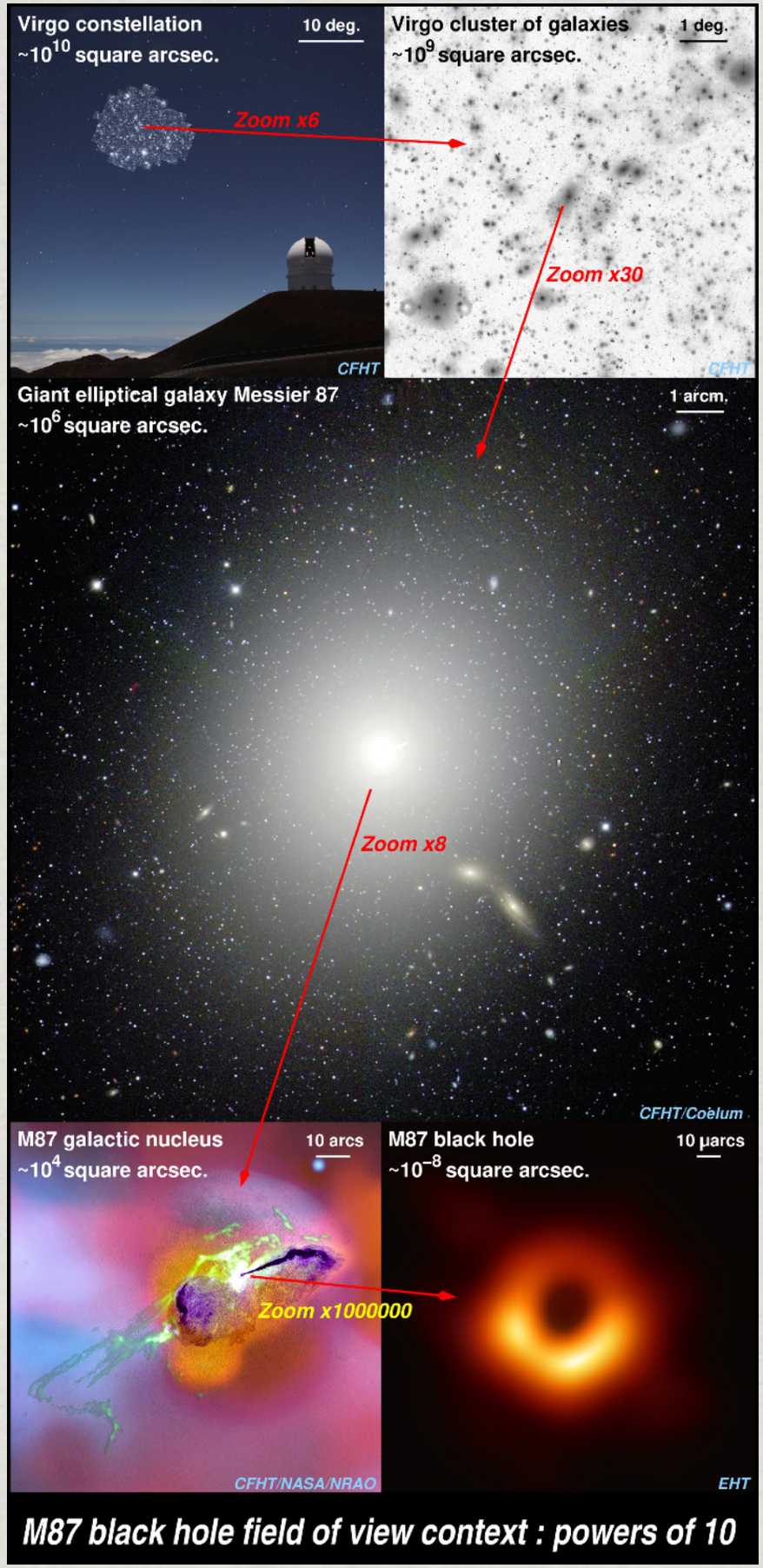


Figure 9: *Examples of micro-earthquakes recorded at Paranal during the night of March 25/26, 1994. The curves represent the chronogram of the ground velocity in the vertical direction.*

Au Paranal (VLT) les micro-tremblements de terre sont permanents, et perturbent les mesures d'interférométrie.

La matière comme “limite”

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

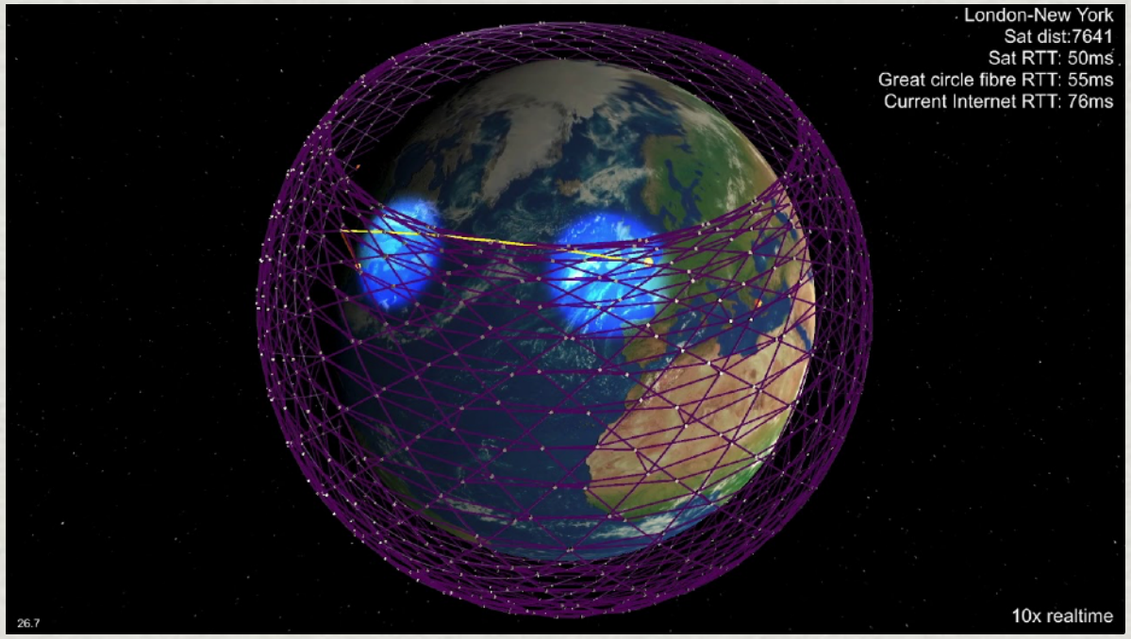


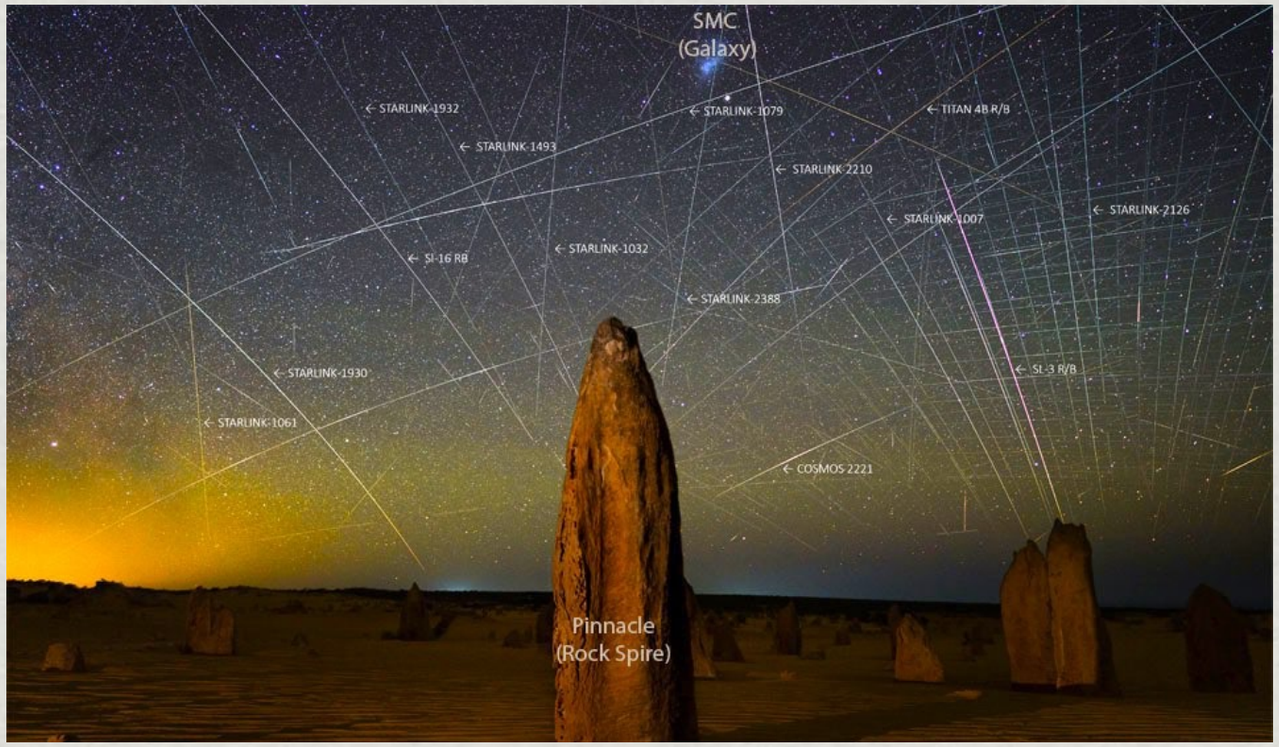
L'homme comme limite

- 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).
  - Bientôt 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).
  - Bientôt le domaine visible avec les constellations de satellites pour internet?





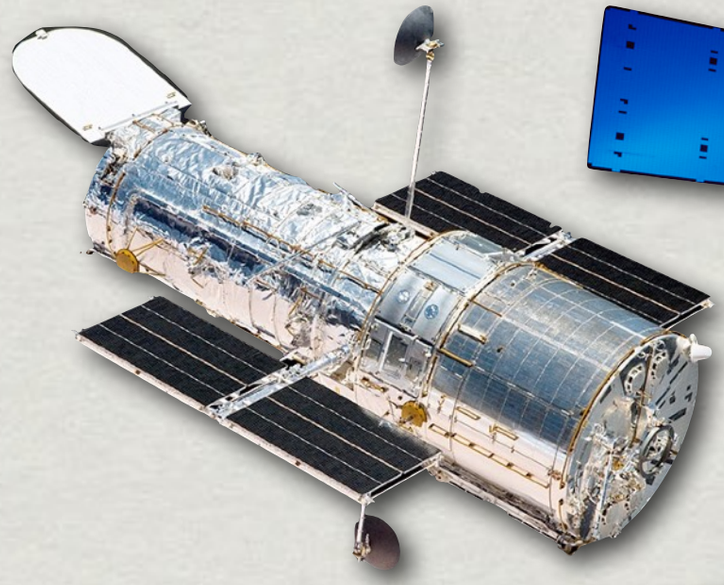
Pourquoi l'espace?

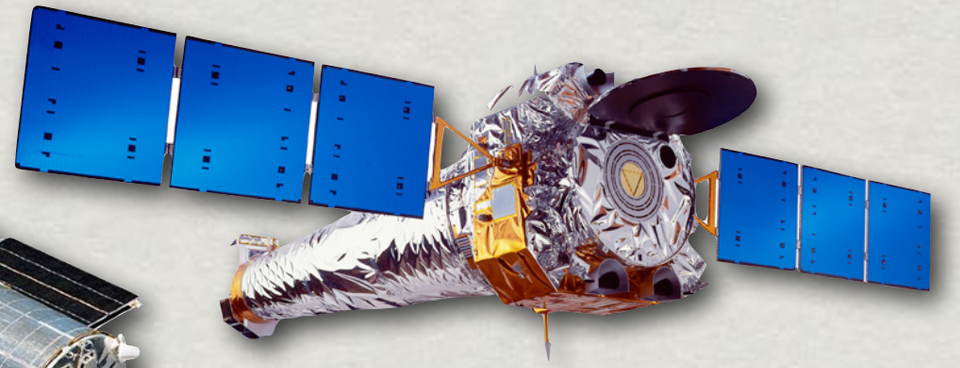
- S'affranchir de l'atmosphère pour accéder de façon optimale à tout le spectre électromagnétique.
  - Observatoires infrarouge, X, mesure du fond cosmologique.
    - **Herschel, XMM-Newton, Chandra, Planck, WMAP, JWST**
- Travailler en l'absence quasi totale de gravité pour simplifier les structures 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 (2023?), WFIRST (2027)*
- Accéder à des tailles effectives d'instruments gigantesques.
  - Interféromètre gravitationnel à l'échelle du million de km.
    - *LISA (2034)*

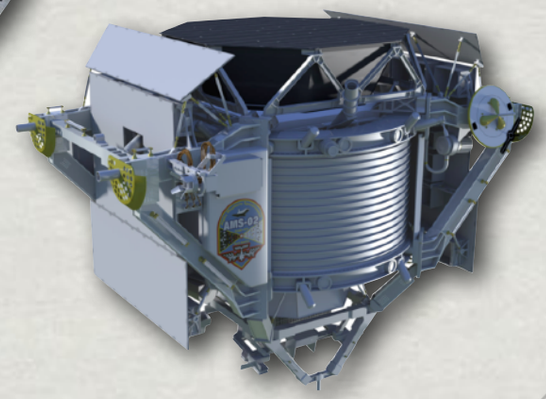
Satellites en exploitation (ou presque)

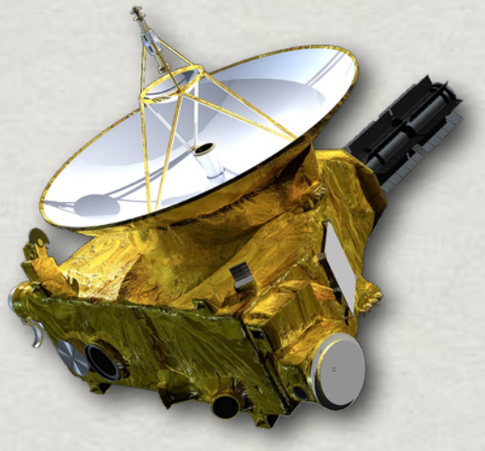
Satellites en exploitation (ou presque)

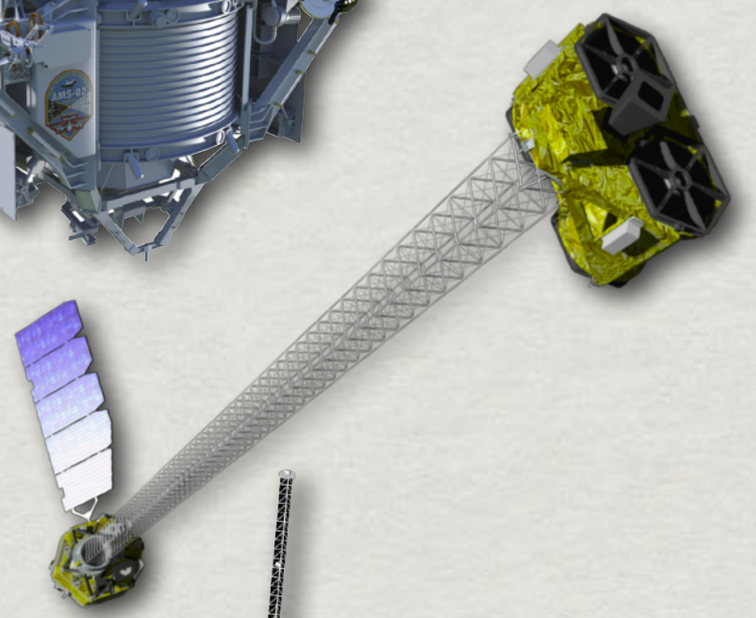
- **HST**: NIR, visible, UV, haute résolution spatiale.
- **AMS**: étude des rayons cosmiques.
- **Chandra, XMM**, **NuSTAR**: observations de l'émission X des trous noirs.
- **New Horizons, Dawn, Juno:** Système Solaire

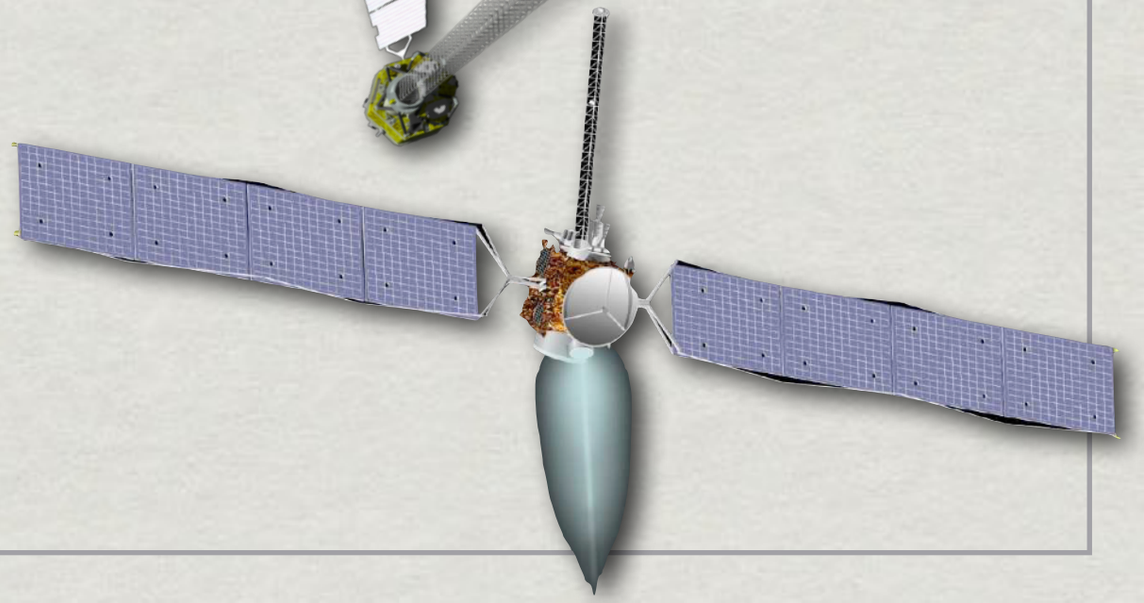


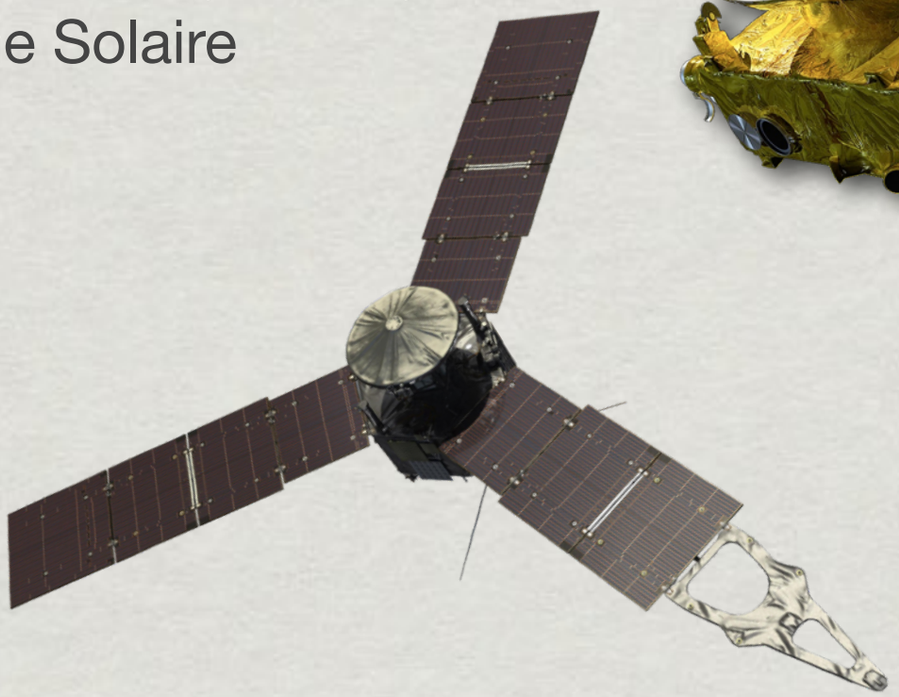






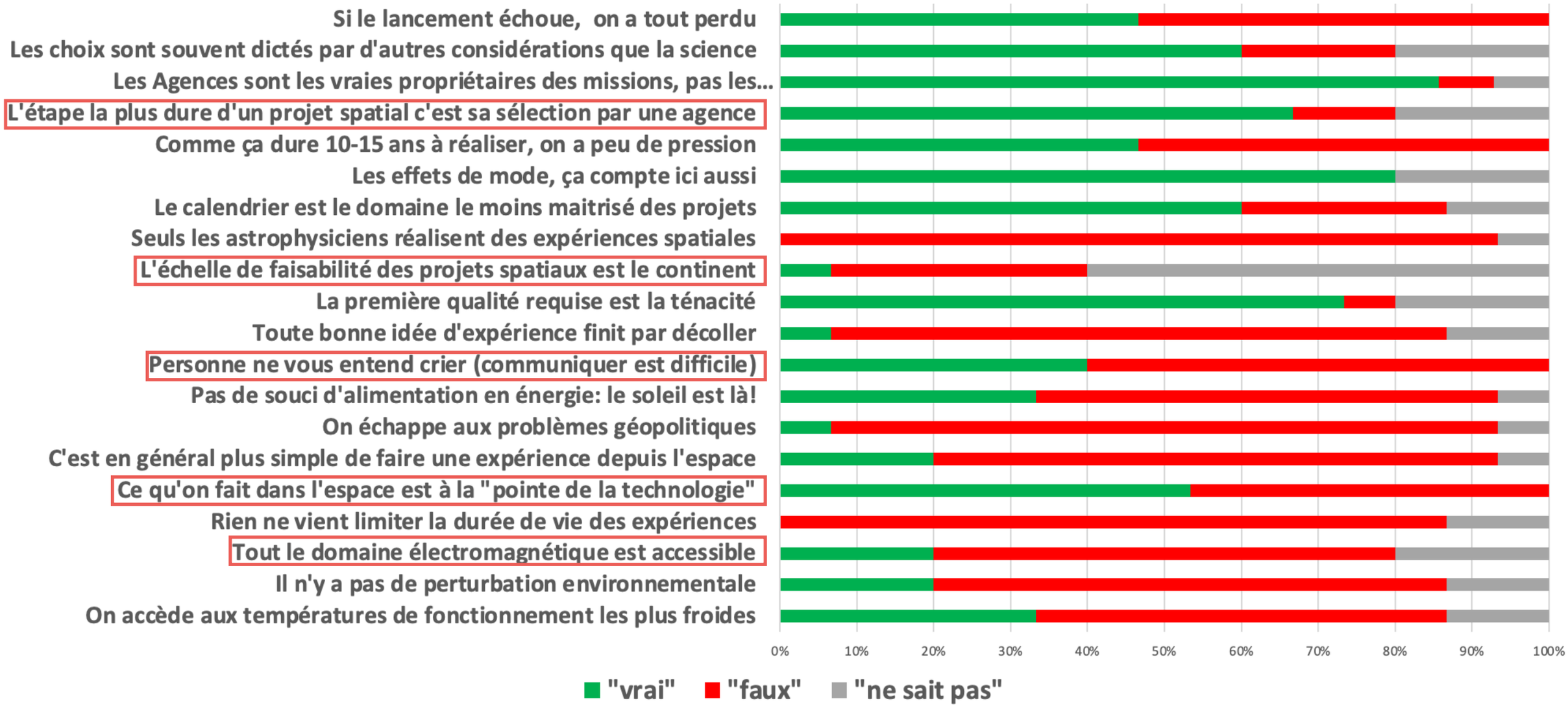






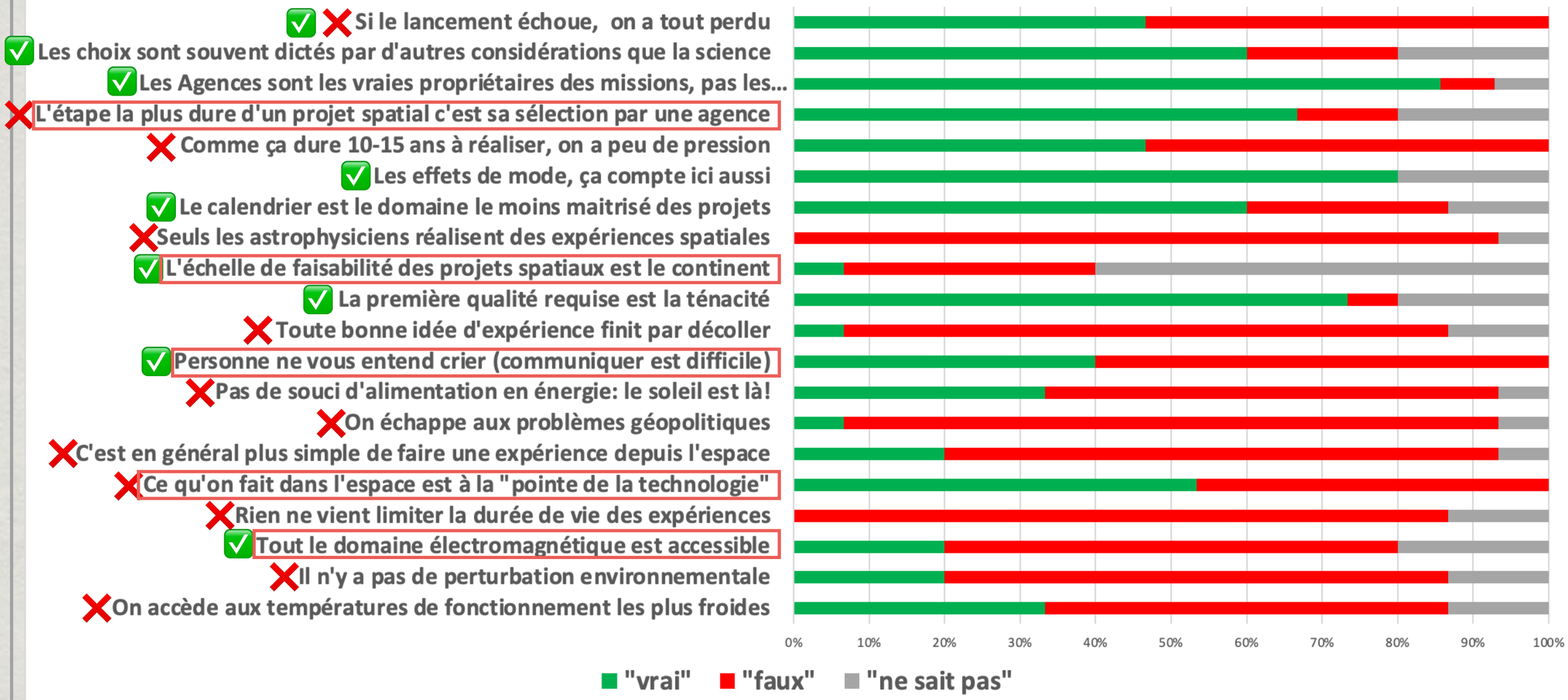
Quelques idées préconçues sur l'espace...

Les affirmation suivantes sont elles vraie ou fausses?



Réponses de 15 étudiants de la promotion Feynman 2022
(encadrées: les questions pour lesquelles la réalité est différente de leur perception initiale)

Les affirmation suivantes sont elles vraie ou fausses?



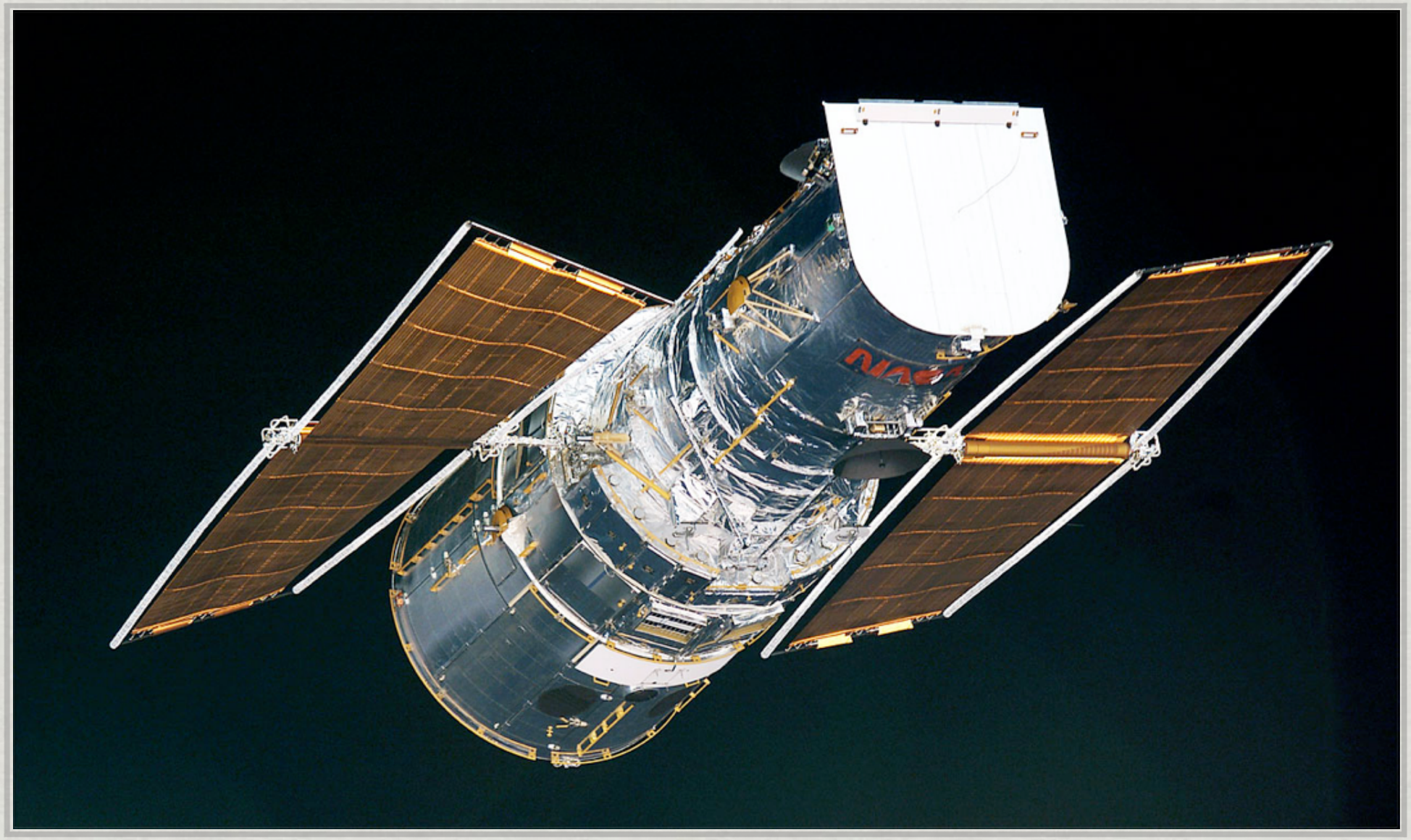
Réponses de 15 étudiants de la promotion Feynman 2022
(encadrées: les questions pour lesquelles la réalité est différente de leur perception initiale)

Idées préconçues

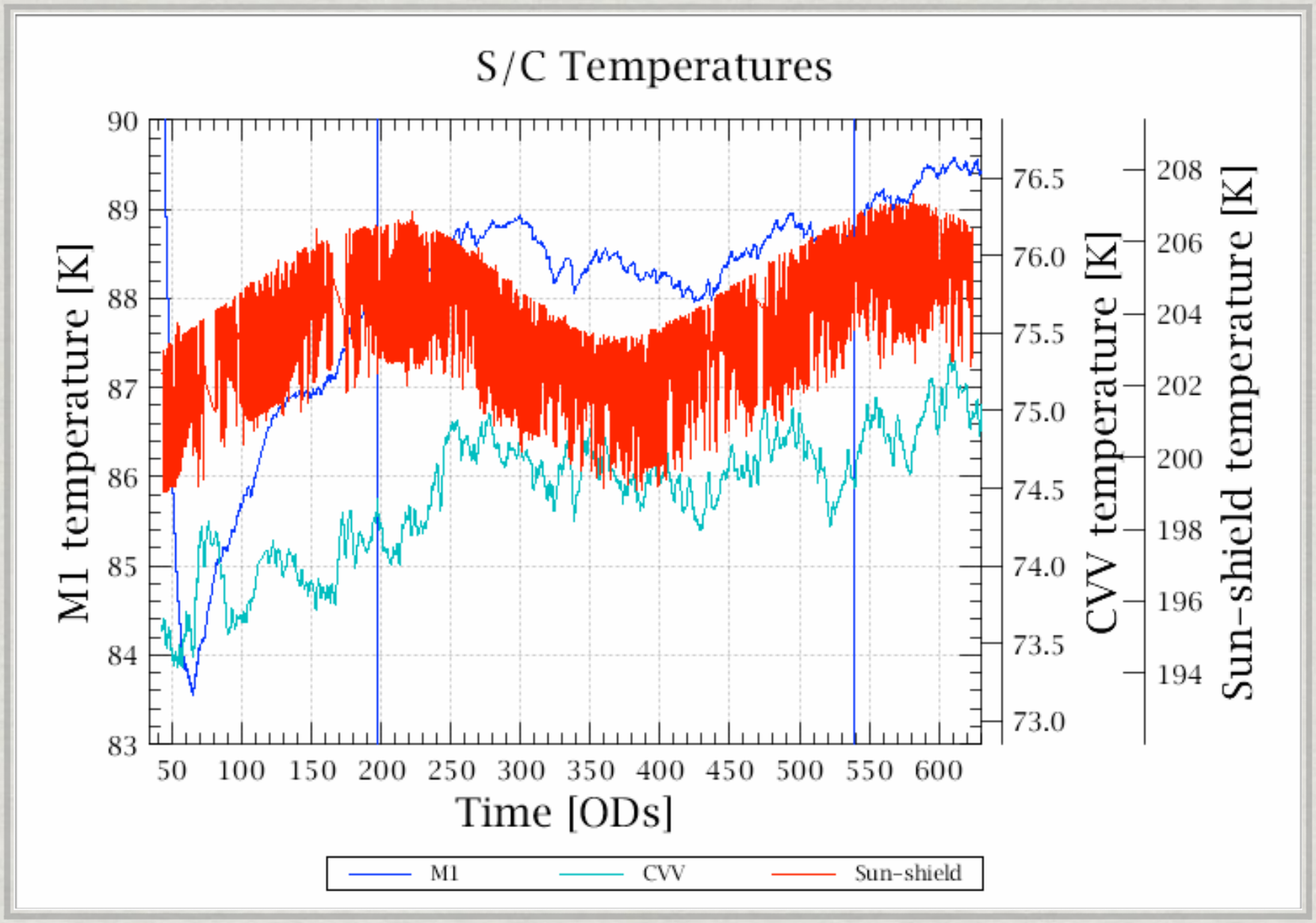
- L'espace est très froid.
- L'espace est vide.
- L'énergie solaire abonde.

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.

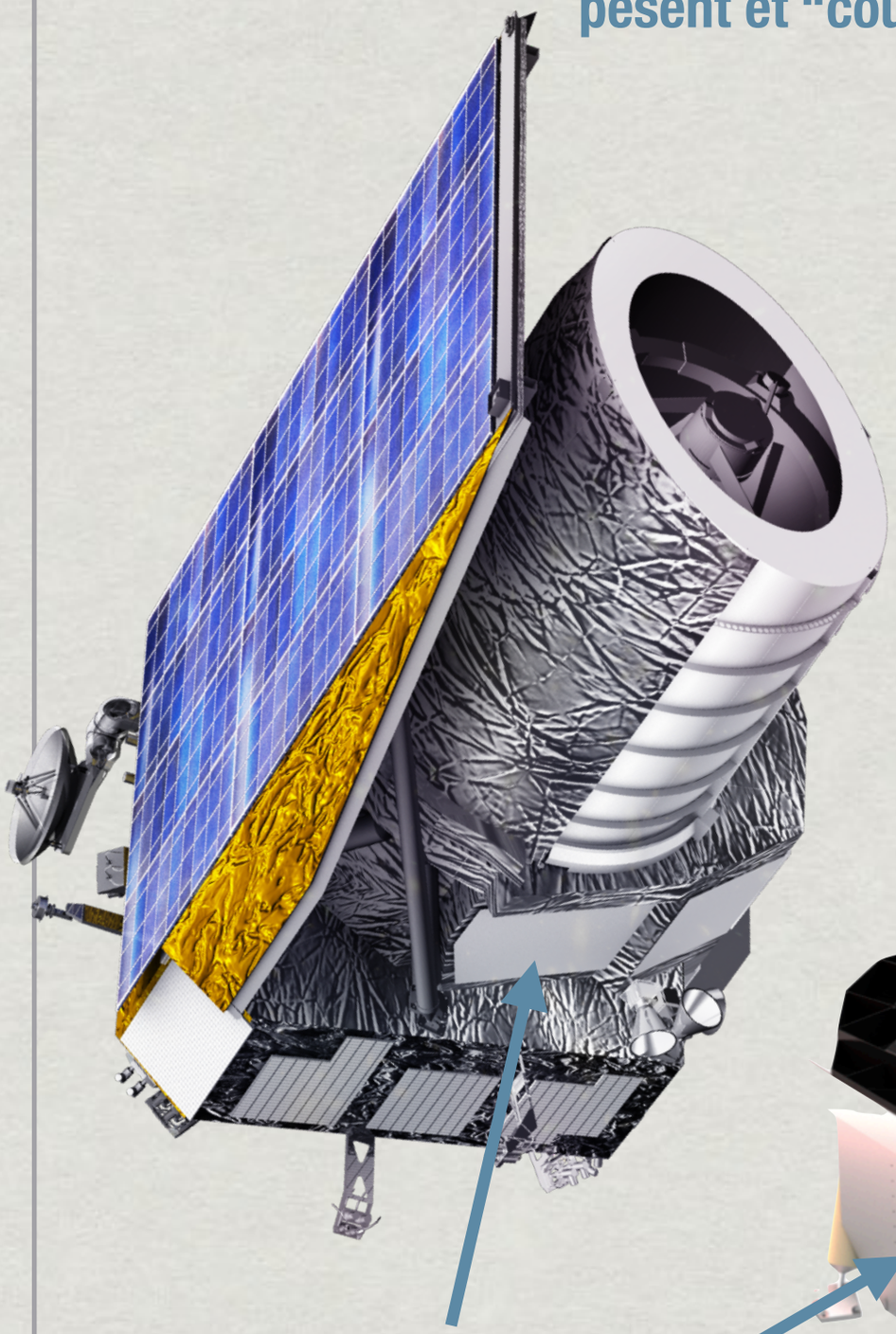


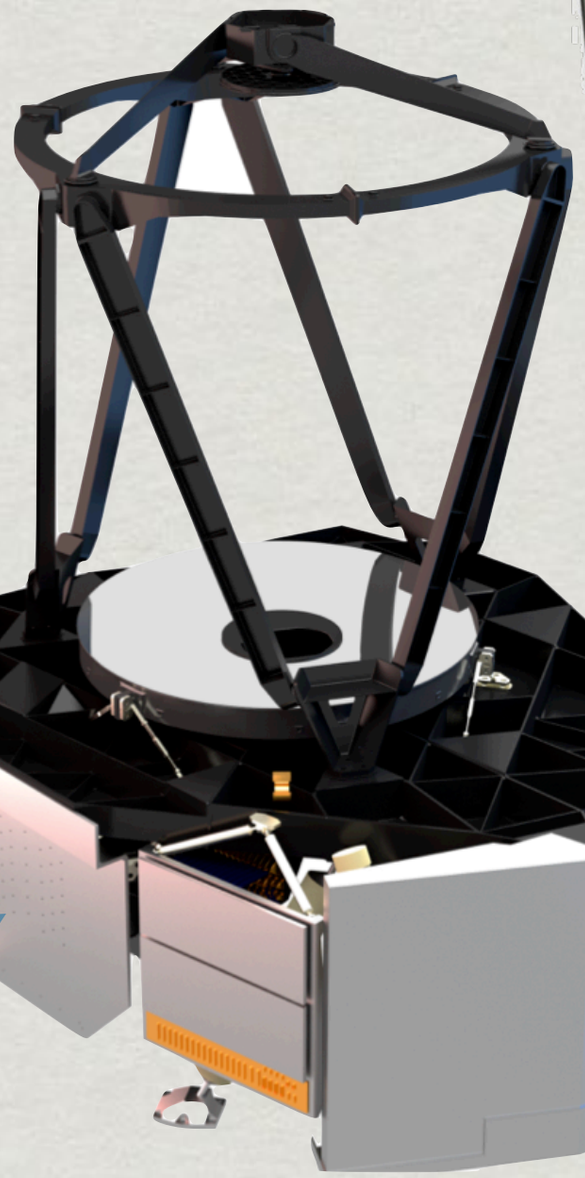
Les premiers panneaux solaires du HST, vieillis par la succession du passage "jour/nuit" en orbite basse terrestre.

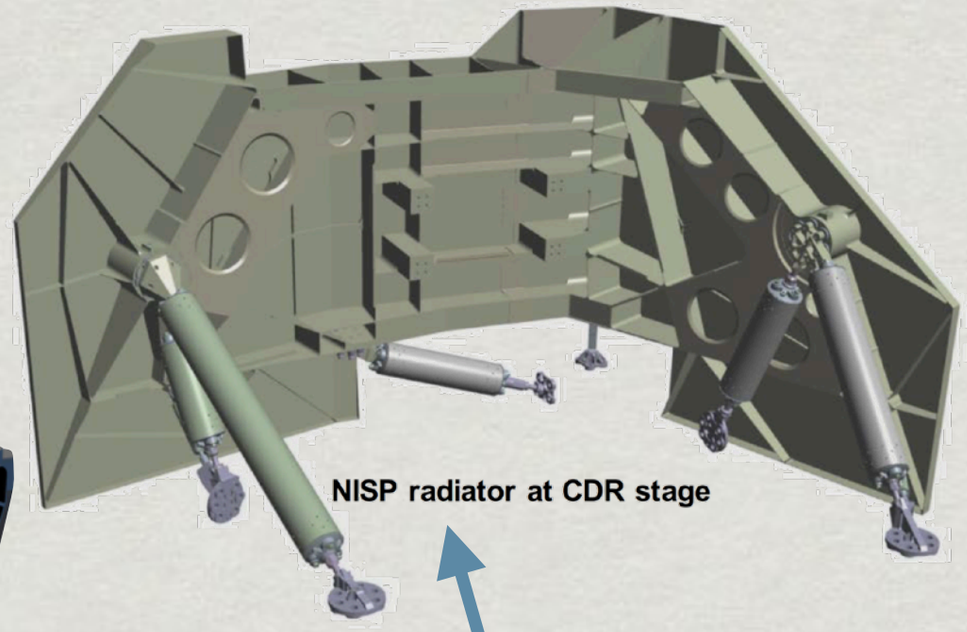


Variation de la température du satellite Herschel (orbite L2) en fonction de la saison (du fait de l'excentricité de l'orbite terrestre, 0.017).

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.



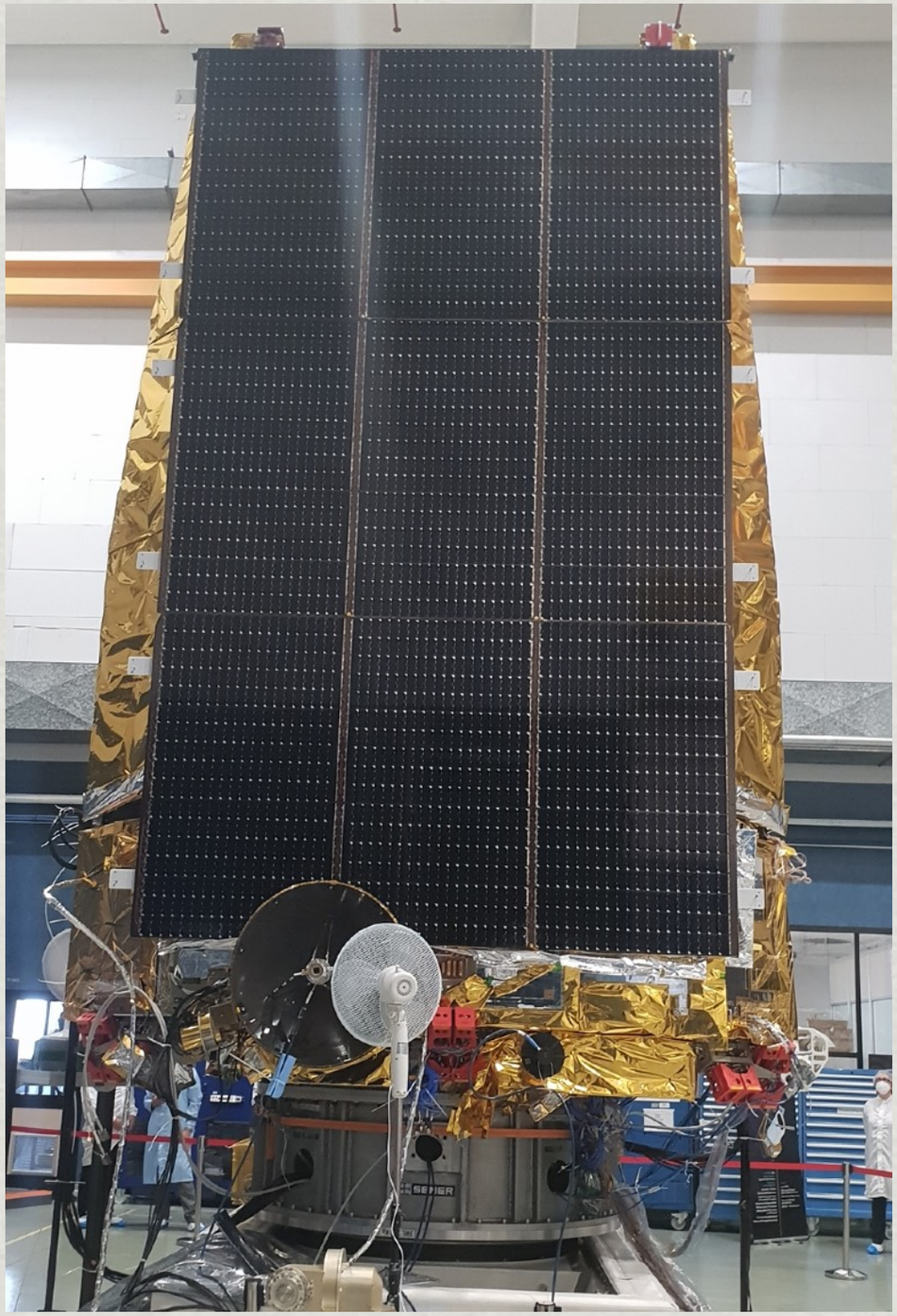




Radiateur NISP
(47 kg pour 150 kg pour l’instrument)

Radiateur VIS

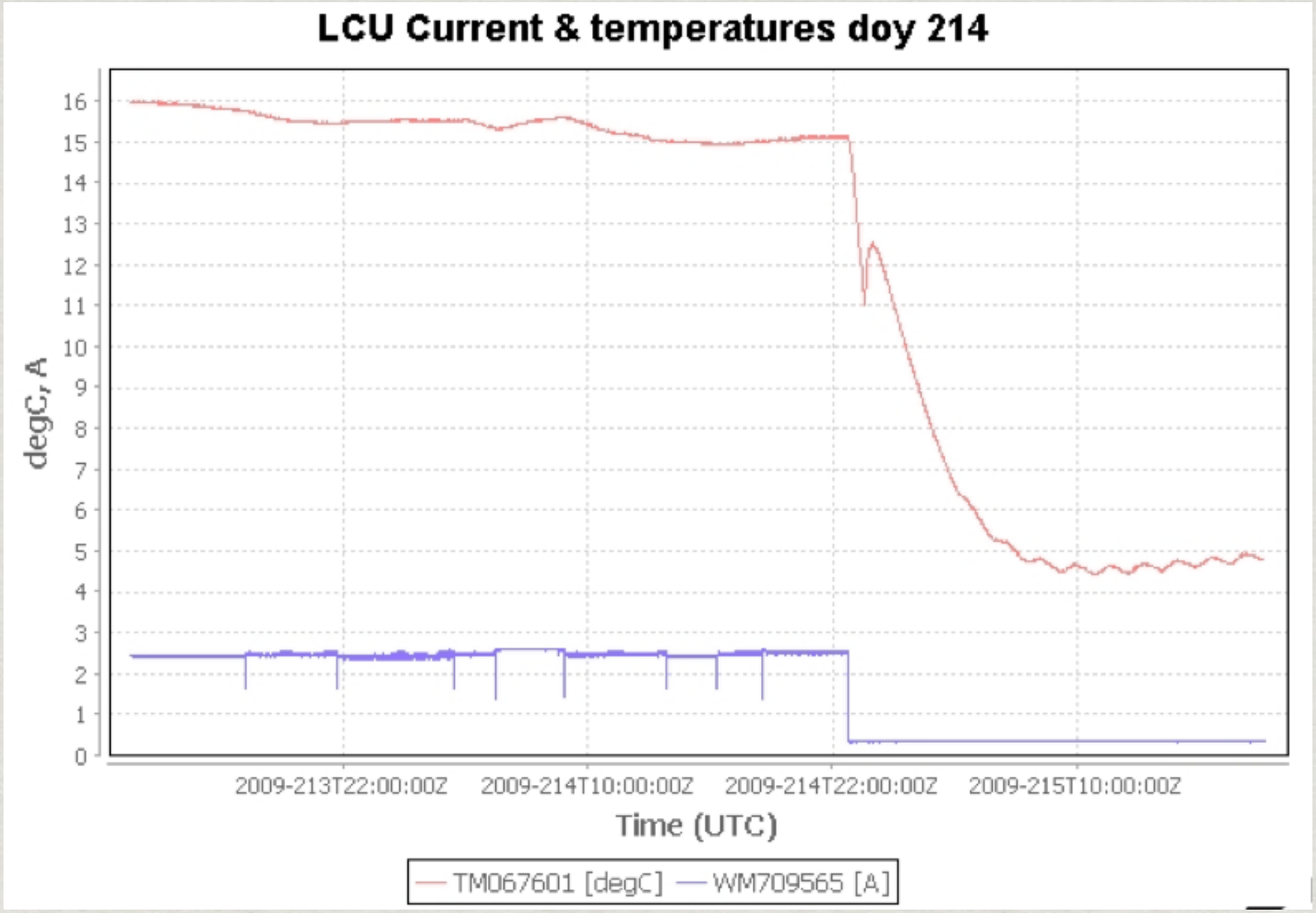
Sur Euclid, de larges structures ont pour seul but de fournir de la matière rayonnante pour dissiper la chaleur produite par les instruments, mais elles pèsent et “coûtent" de la capacité scientifique.



Deux “intrus” se sont glissés dans cette salle blanche…

L'espace est vide

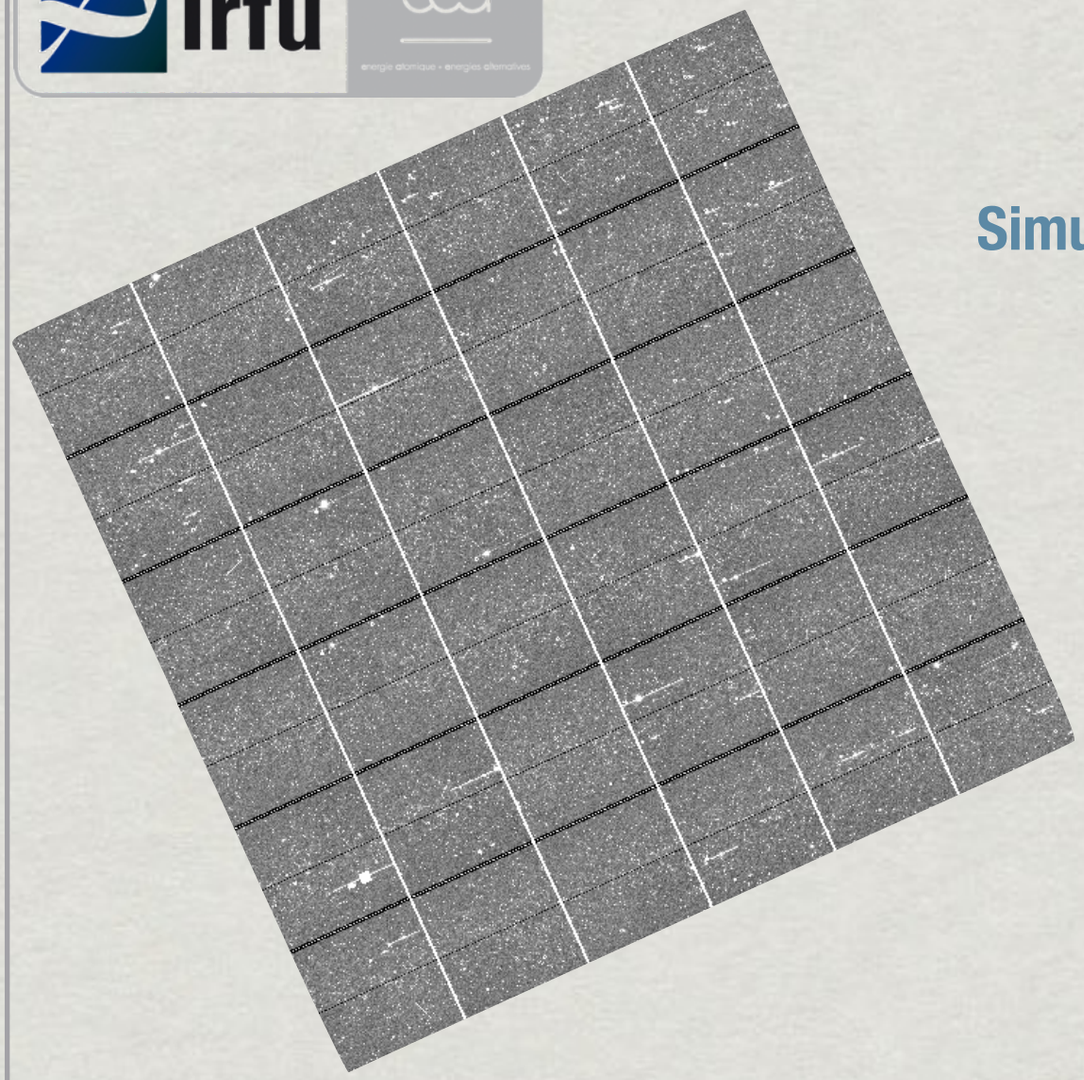
- Si l'espace est effectivement vide par rapport au meilleur des vides terrestres, il est plein de particules absentes de nos laboratoires:
  - Electrons et noyaux du vent solaire.
  - Noyaux du rayonnement cosmique.
- Le bombardement de particules chargées est intensif quelque soit l'orbite choisie: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

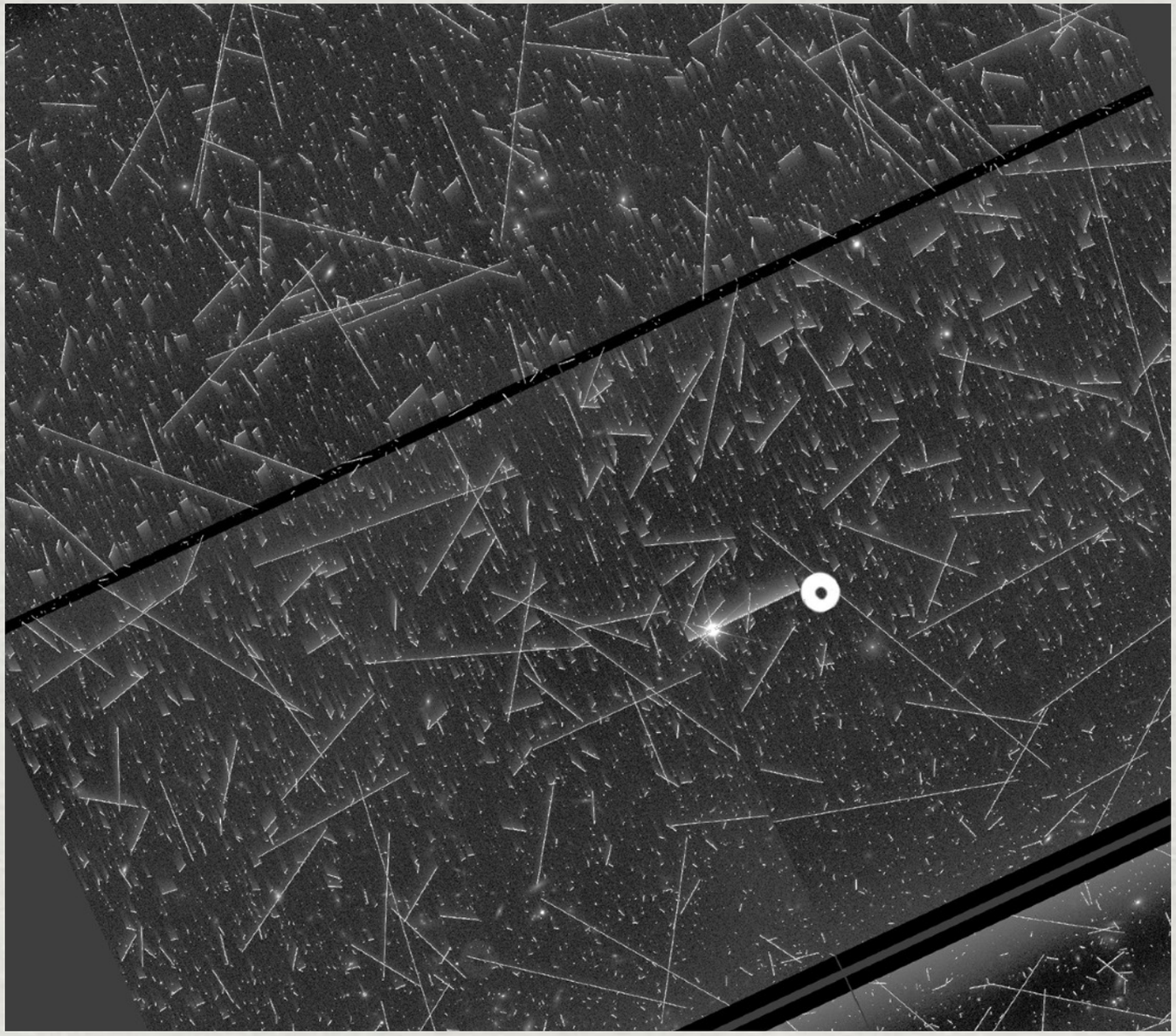


Le 3 Aout 09, 81 jours après le lancement, un simple impact de rayon cosmique dans un composant non “durci” de l'instrument Herschel/HIFI a détruit l'un des boitiers d'électronique, rendant l'instrument inutilisable.

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...).

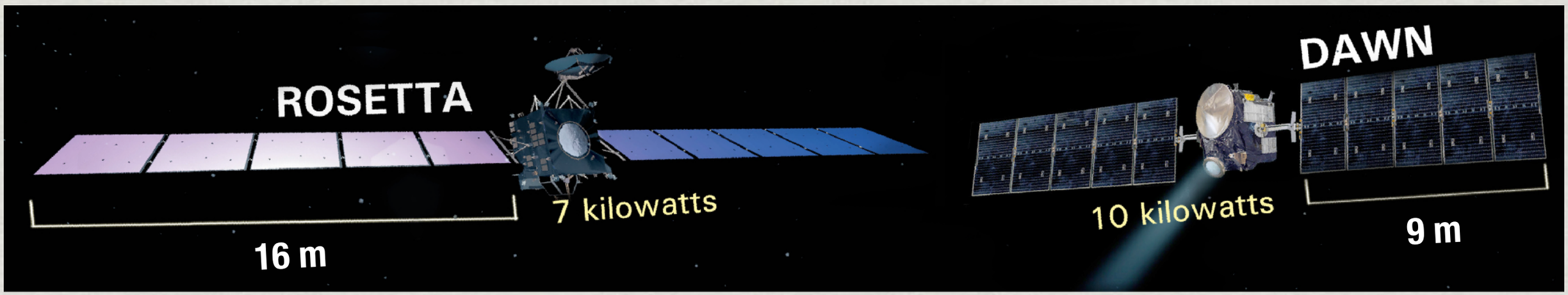
Simulation des images brutes du détecteur VIS pour Euclid





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 $Pu0_2$), 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?

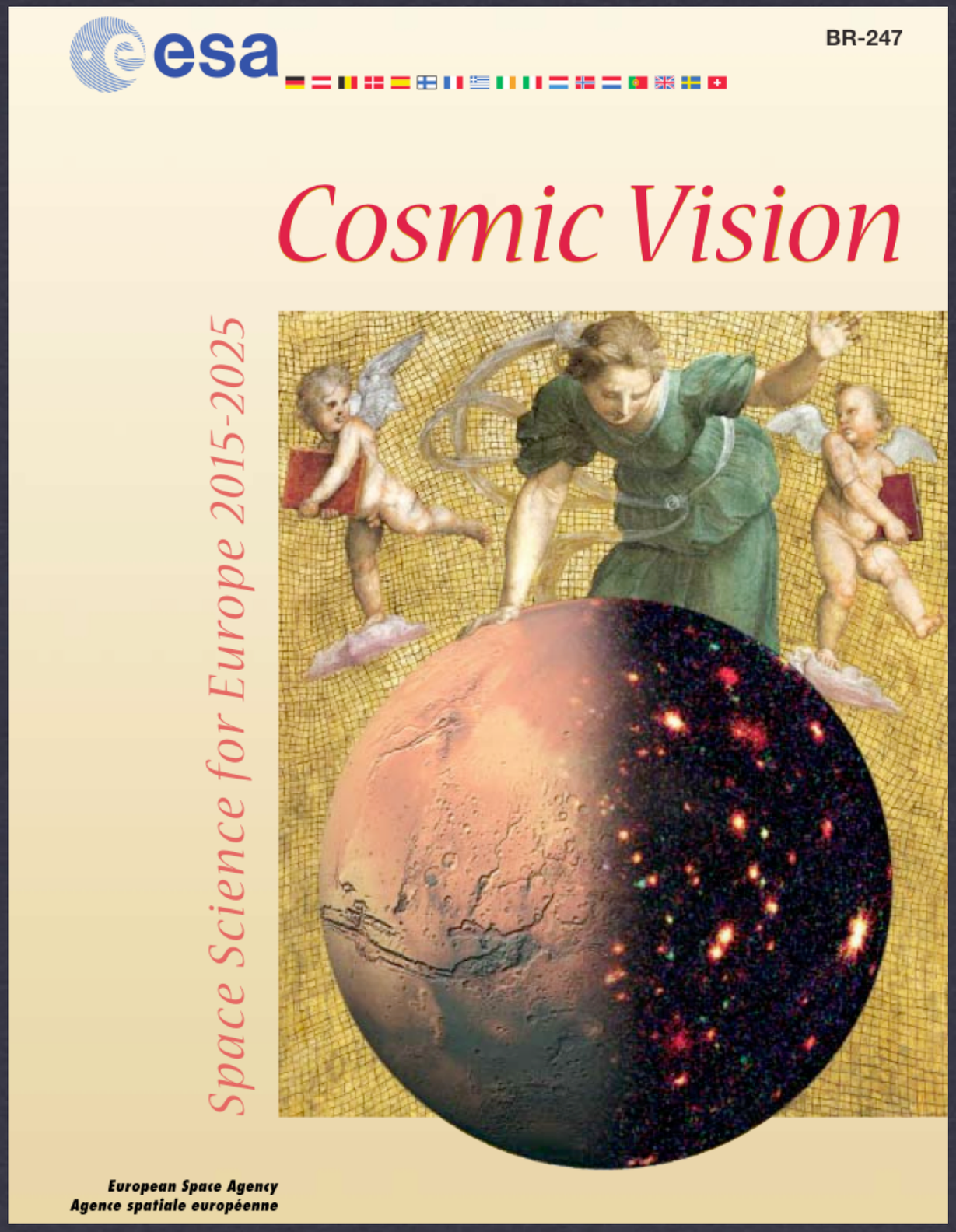
Trois grandes étapes

Le fait de grandes agences.

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

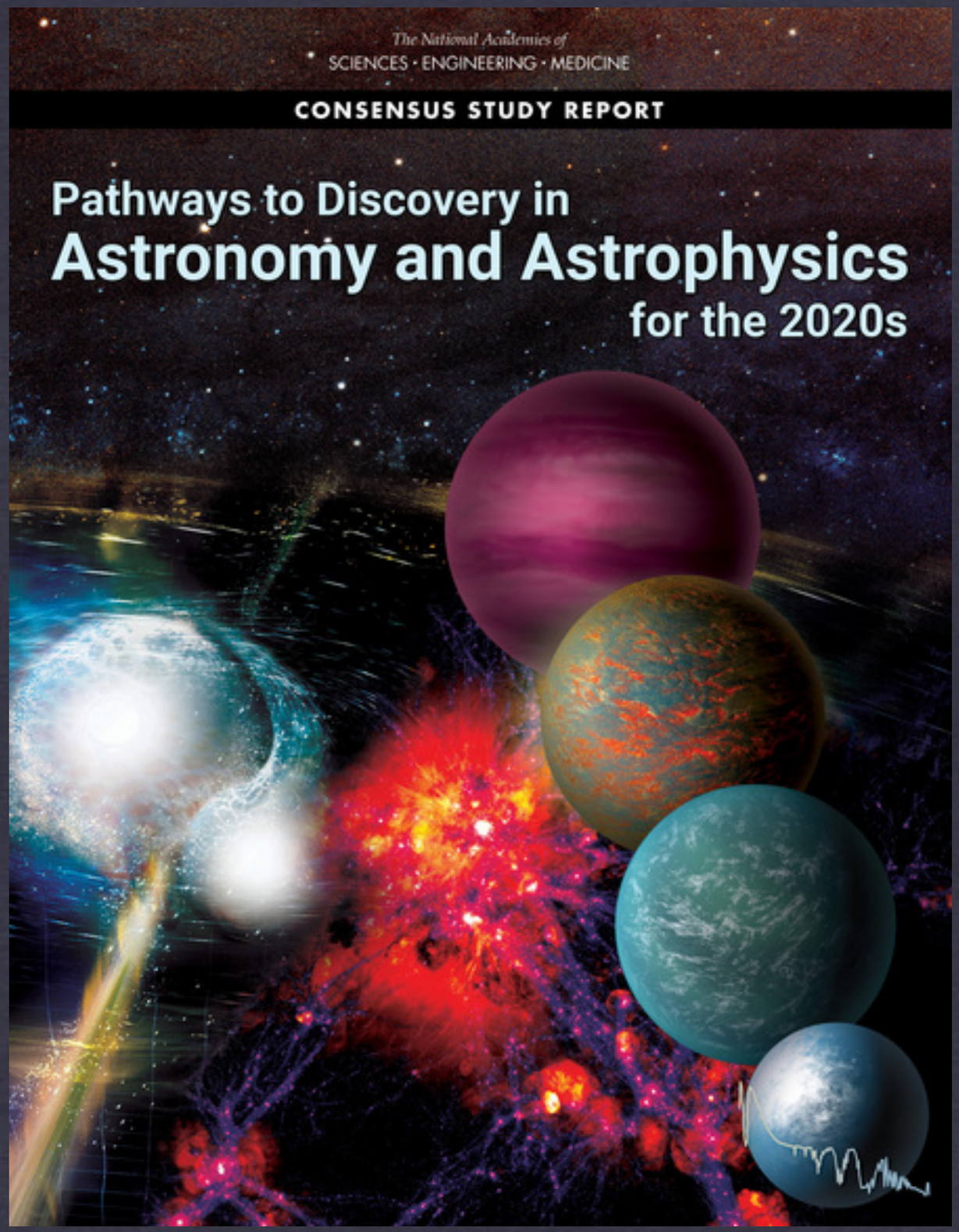
CNES en France, DLR en Allemagne, ASI en Italie…

- 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).



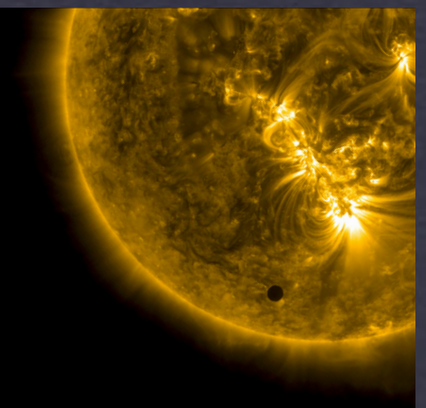
LES DEUX PROGRAMMES PRINCIPAUX

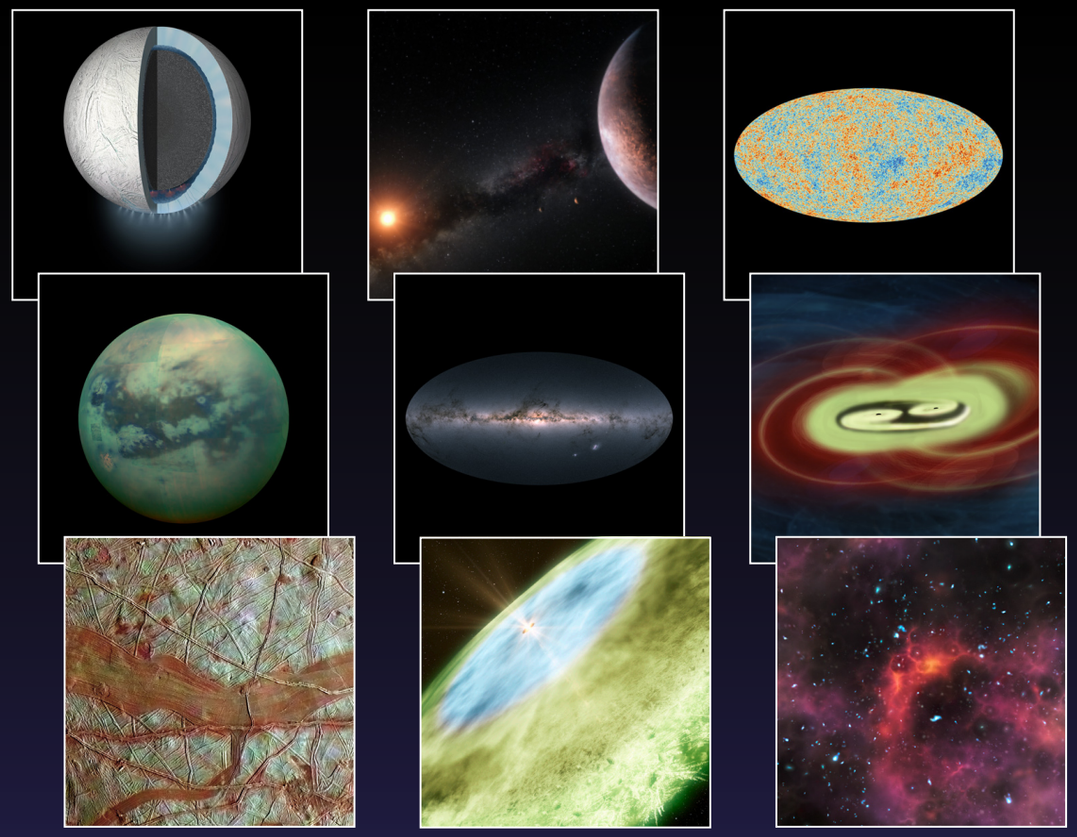
USA 2012-2021 - UE 2015-2025



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

La phase prospective

- Qui dit prospective, dit réflexion, dit temps long?

La phase prospective

- Qui dit prospective, dit réflexion, dit temps long?
- Construction du programme Voyage 2050:
  - Appel en mars 2019
  - Date limite de réponse 5 Août 2019
  - Conférence d'approfondissement des réponses sélectionnées Octobre 2019
  - Recommandations finales mi-2020…

La phase prospective

- Qui dit prospective, dit réflexion, dit temps long?
- Construction du programme Voyage 2050:
  - Appel en mars 2019
  - Date limite de réponse 5 Août 2019
  - Conférence d'approfondissement des réponses sélectionnées Octobre 2019
  - Recommandations finales mi-2020…

Le lancement de la première mission du programme Cosmic Vision (M1, Solar Orbiter) a eu lieu en février 2020.
Le lancement de la première grande mission de Cosmic Vision (L1, Juice) est prévu pour 2023.

Les appels d’offres

- Ils contiennent:
  - Un cadrage financier qui permet de déterminer l'ampleur de la mission.
    - Mission de classe M: 550 M€, de classe L: 1G€, lancement et exploitation compris.
  - Une date de lancement ainsi qu'un lanceur (définition des coûts associés au lancement et de la masse de charge utile disponible).
  - Eventuellement des précisions sur le type de science (exploration du système solaire, astronomie, physique fondamentale, pour les missions L).
  - Parfois des choix de technologies à mettre en jeu pour les plateformes satellites lorsque l'agence entend développer un savoir-faire particulier (exemple: vol en formation).
  - Parfois l’appel d’offres est clairement orienté par un calendrier politique des agences, comme dans le cas de l'appel S2 pour des missions entre l’Europe et la Chine

Actuellement l’ESA est en phase de sélection pour une mission M (M7) et une mission F (Fast), La NASA va lancer en 2023 un appel pour une mission Probe (1G$)

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,
  - ...

Après la sélection

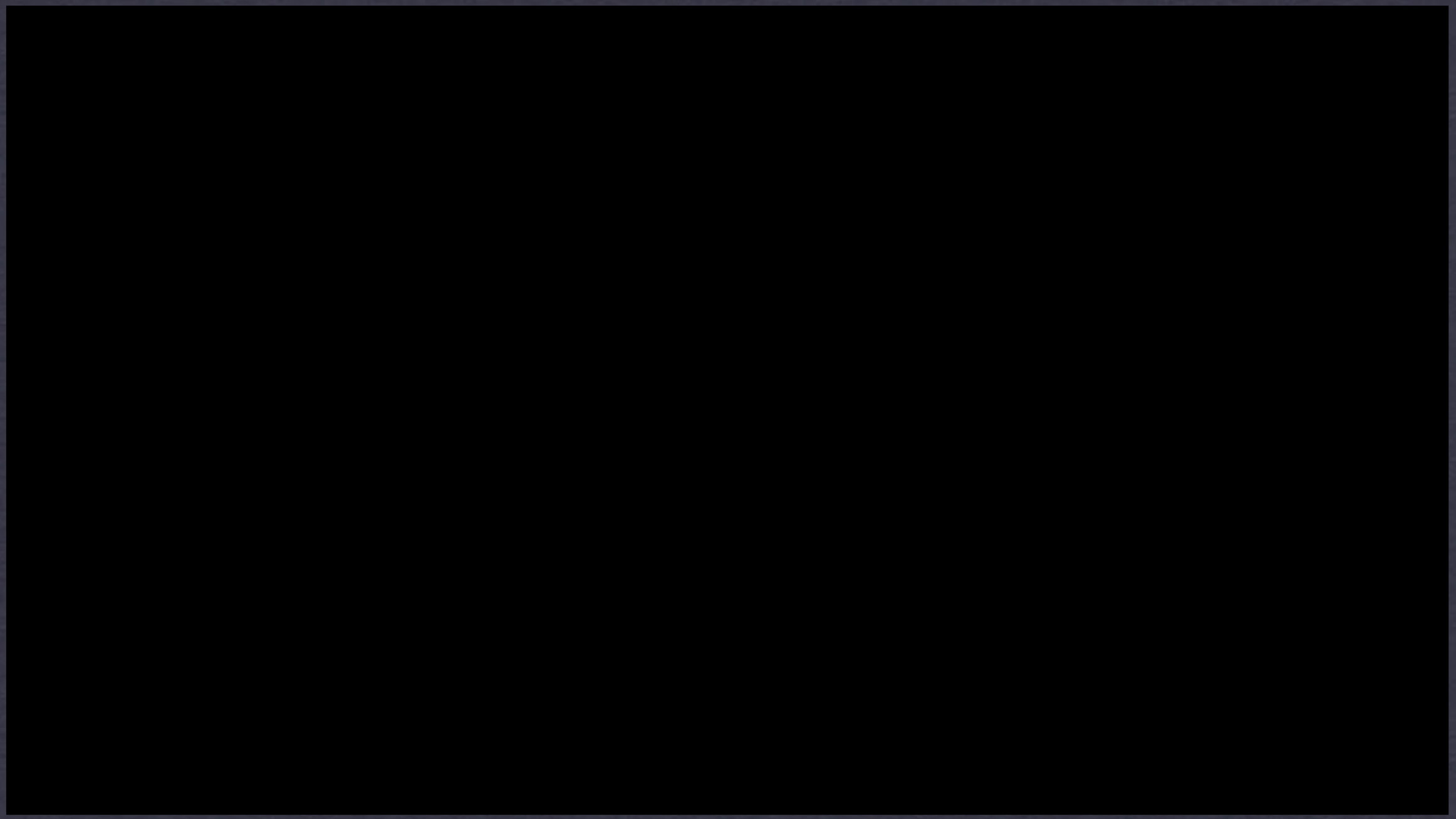
- Travailler dans le domaine spatial, c'est suivre des règles différentes de la plupart des domaines de la physique.
- Quand une agence sélectionne un projet, elle ne "signe pas un chèque" à une équipe scientifique.
- Elle “achète” un concept, et contracte des équipes pour le mettre en oeuvre:
  - des scientifiques pour réaliser des instruments et produire des données.
  - des industriels pour réaliser le satellite lui-même.
  - de nombreuses étapes de revue vont jalonner le processus de développement, avec parfois le sentiment que la science est complètement perdue de vue.

Après la sélection

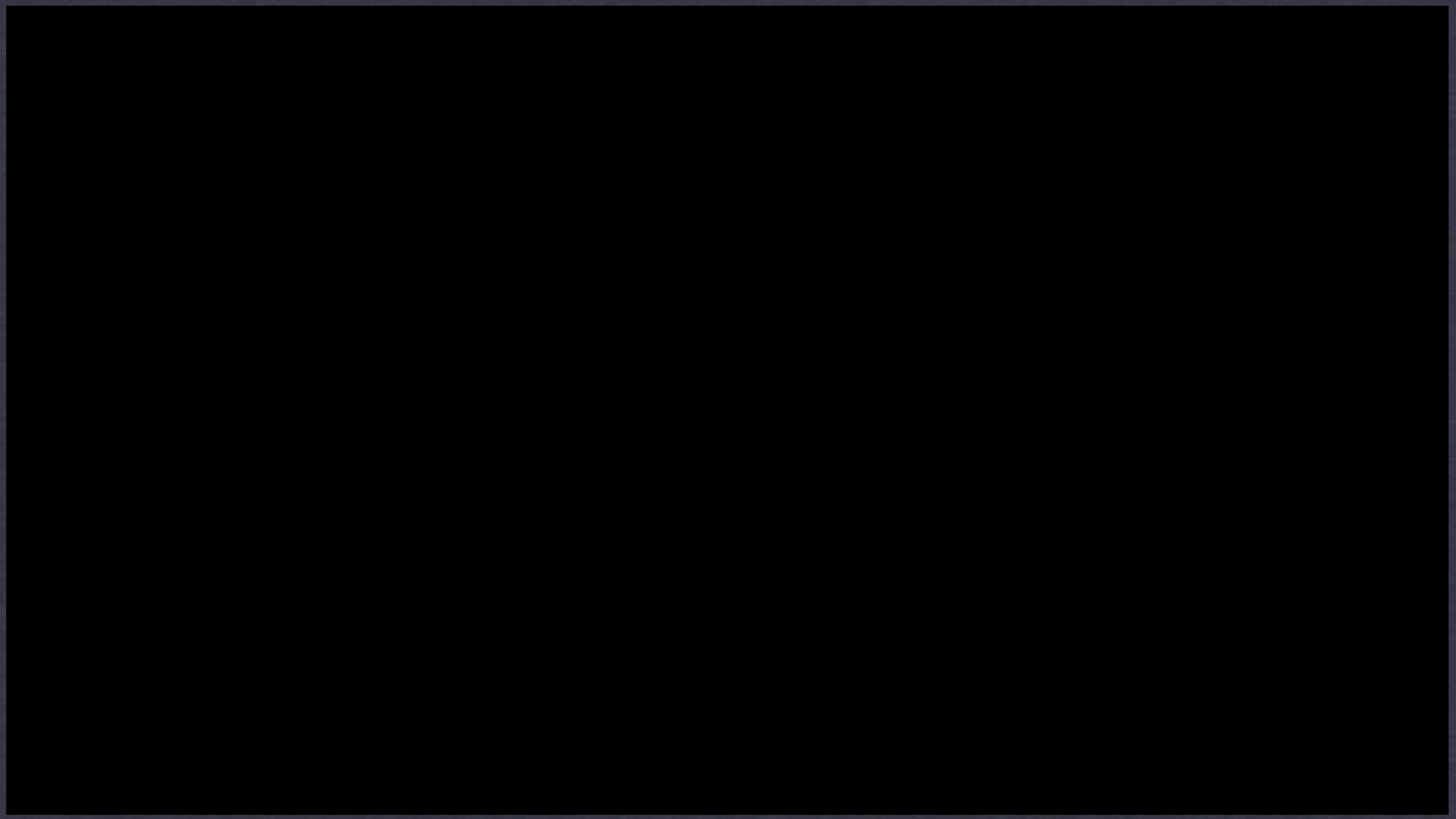
- Le processus de développement d'une instrumentation spatiale obéit à beaucoup plus de règles et de contraintes que n'importe quel autre développement:
  - On demande aux instruments de pouvoir fonctionner longtemps (au moins 2 à 3 ans au sol, souvent le double dans l'espace) sans panne.
  - Tout système doit être doublé pour permettre de faire face aux imprévus.
  - Les composants électroniques doivent être durcis aux radiations.
  - Tout écart aux règles doit faire l'objet de dérogations (long processus technico-administratif).

Après la sélection

- Certaines solutions techniques sont interdites parce que trop risquées ou inefficaces:
  - Eviter les pièces mobiles qui peuvent se bloquer.
  - Attention aux poussières (lubrifiants, peintures).
  - Pas question de ventiler des électroniques qui chauffent, pas de refroidissement par convection, uniquement par radiation.
- Des contraintes "matérielles" influencent les choix scientifiques:
  - Euclid: la stratégie de relevé du ciel n'est pas optimisée du point de vue scientifique, mais du point de vue des déplacements, pour minimiser le poids du carburant embarqué!
- Certaines contraintes semblent contradictoires:
  - Au prix du kilo à satelliser, on diminue la masse des instruments, mais cela les fragilise, or il faut qu'ils tiennent les vibrations du lancement.



Test de vibration du satellite Herschel complet



Test de vibration du satellite Herschel complet

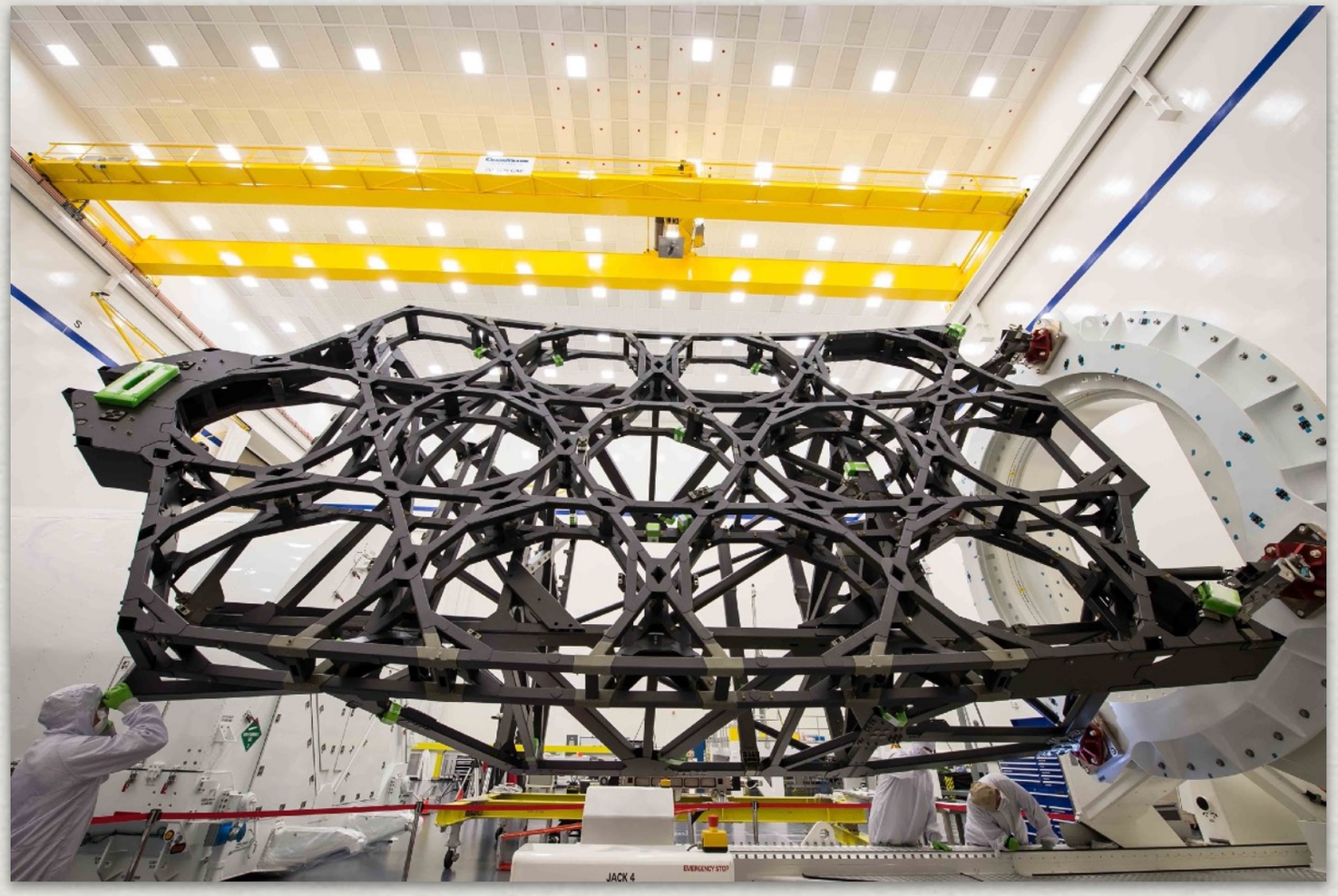
Un problème de limites

- Les deux paradigmes du développement spatial:
  - L’experience est construite au sol, telle qu’elle devra être dans l’espace, rigide.
  - L’expérience est testée et validée dans ses conditions de fonctionnement.

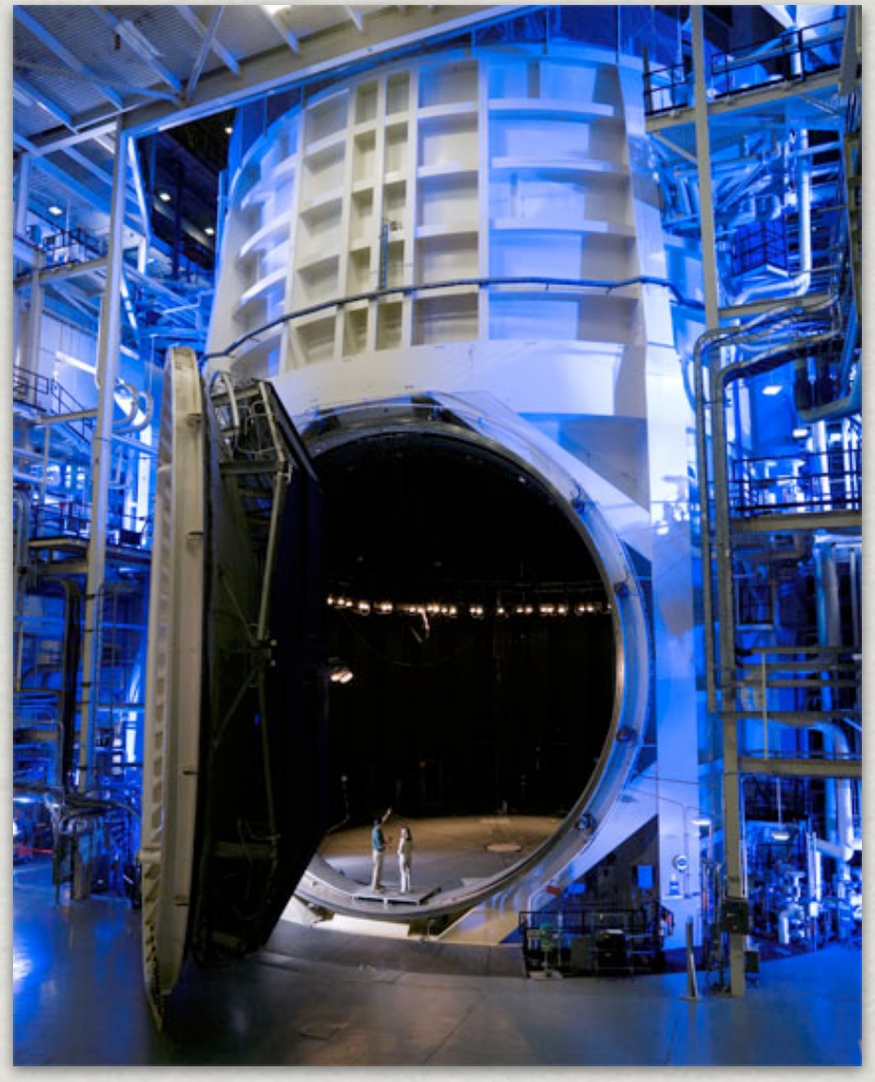
Un problème de limites

- Les deux paradigmes du développement spatial:
  - L’experience est construite au sol, telle qu’elle devra être dans l’espace, rigide.
  - L’expérience est testée et validée dans ses conditions de fonctionnement.

Le cas du James Webb Space Telescope



La structure de support des miroirs, rigide, complexe et massive.



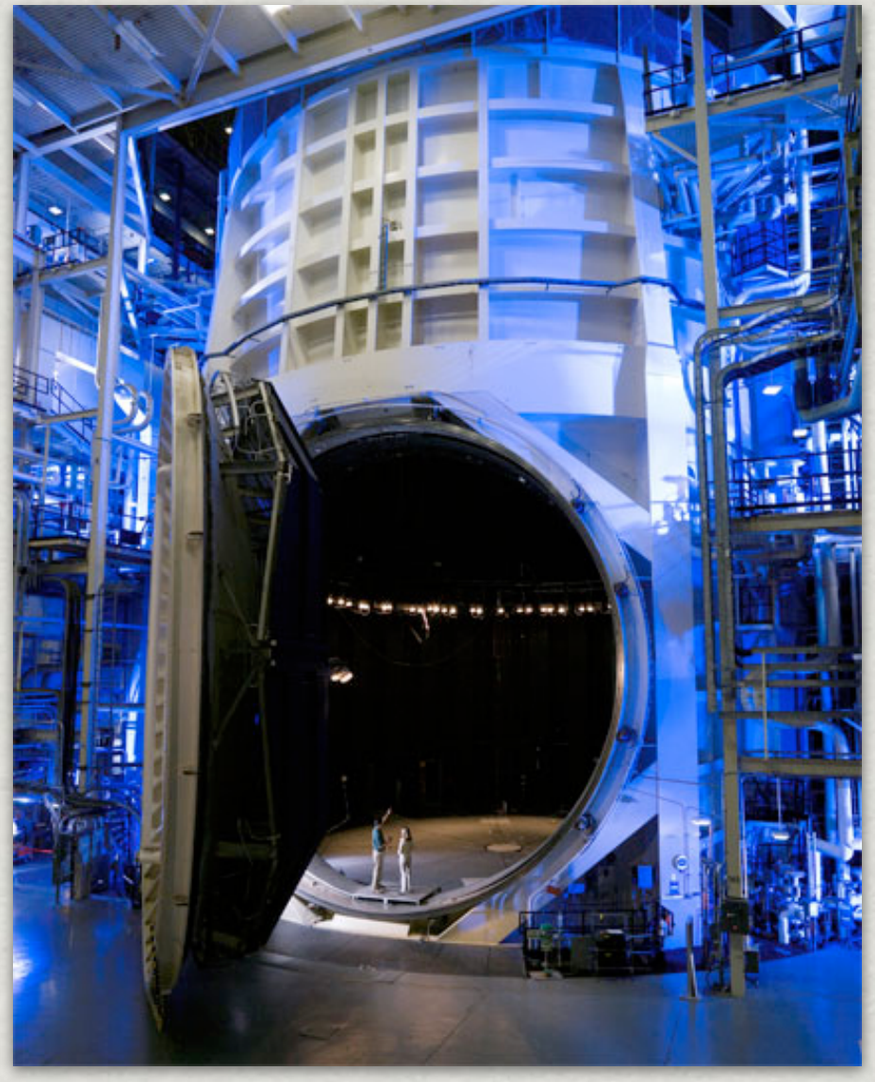
La chambre A, construite pour les missions Apollo, est la plus grande chambre à vide cryogénique du monde (∅19m, H36m)

Un problème de limites

- Les deux paradigmes du développement spatial:
  - L’experience est construite au sol, telle qu’elle devra être dans l’espace, rigide.
  - L’expérience est testée et validée dans ses conditions de fonctionnement.

Le cas du James Webb Space Telescope

La structure de support des miroirs, rigide, complexe et massive.

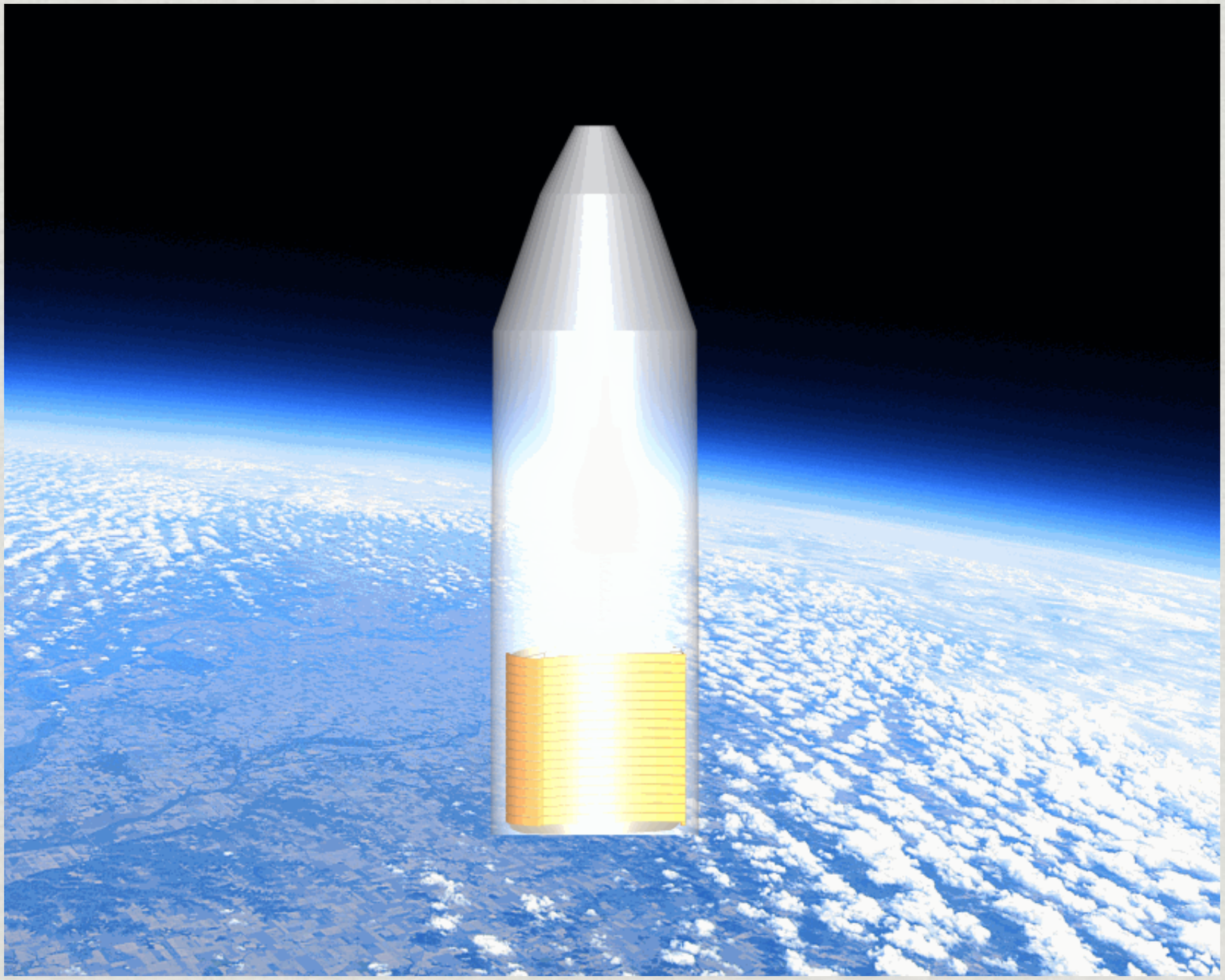


La chambre A, construite pour les missions Apollo, est la plus grande chambre à vide cryogénique du monde (⌀19m, H36m)

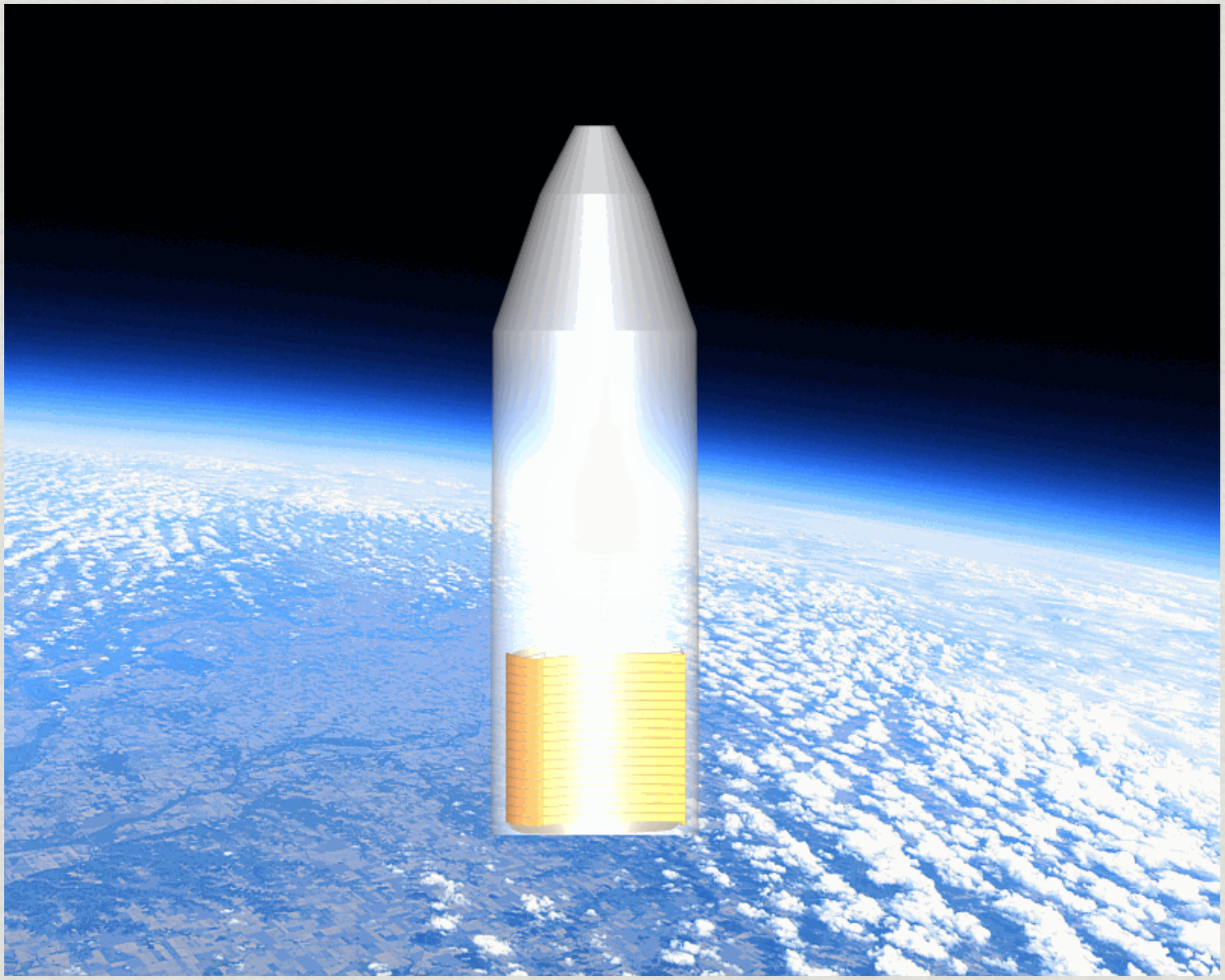
Changer de paradigmes

- TALC: un projet de telescope avec un miroir déployable de 20m de diamètre.

- **Flexible**
- **Sensible à la valeur de g**
- **Trop grand**



Changer de paradigmes

- TALC: un projet de telescope avec un miroir déployable de 20m de diamètre.

- **Flexible**
- **Sensible à la valeur de g**
- **Trop grand**