



Comment faire de la physique dans l'espace?

Marc Sauvage



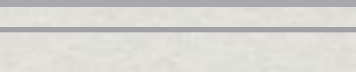
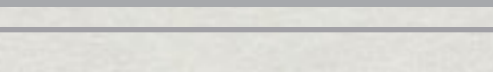
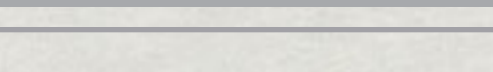
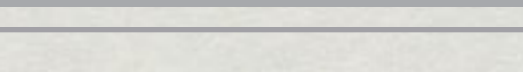
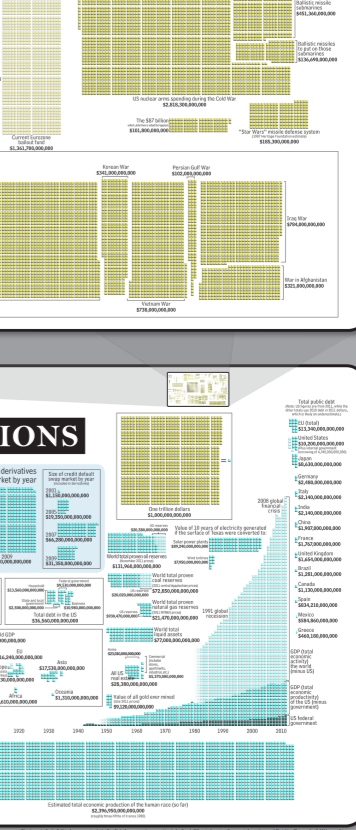
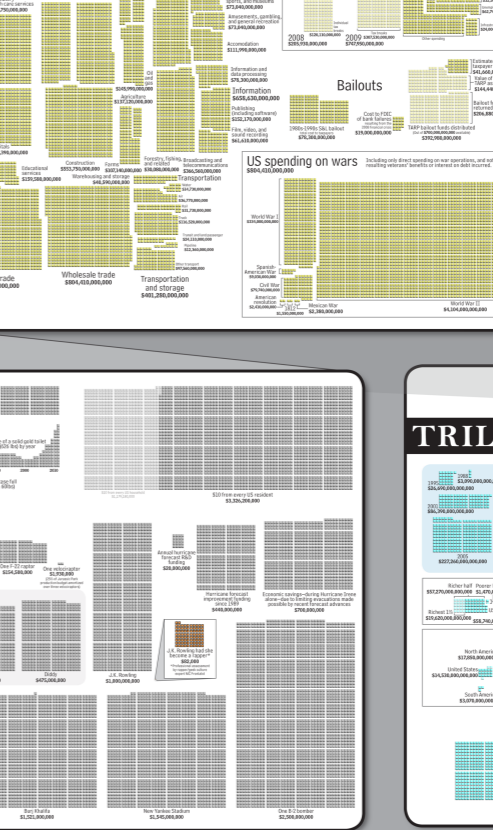
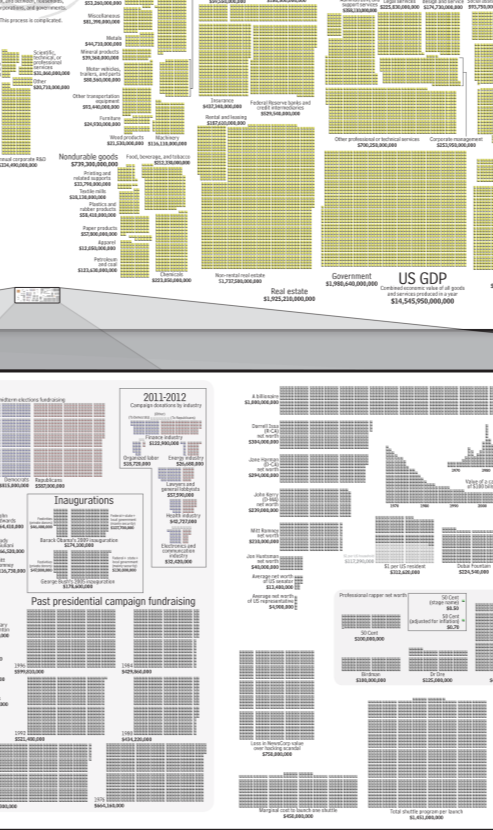
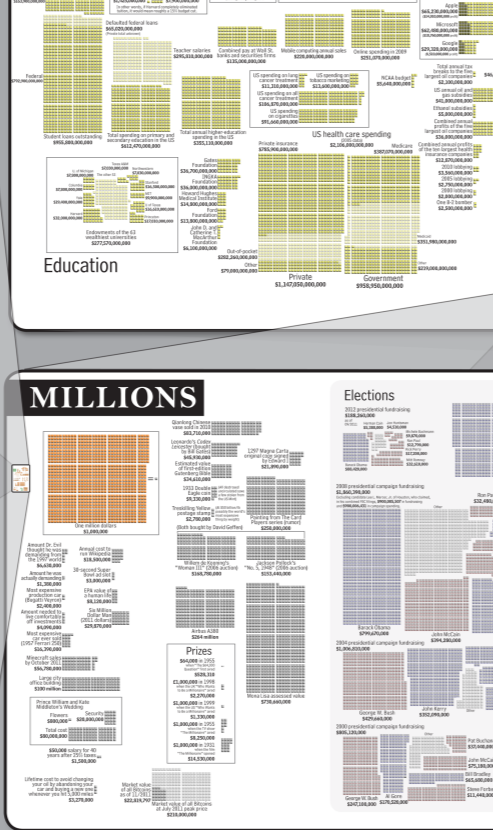
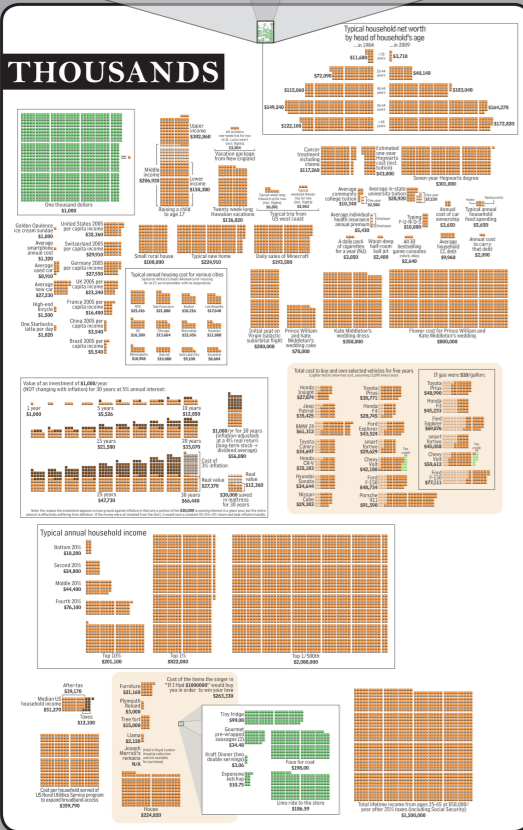
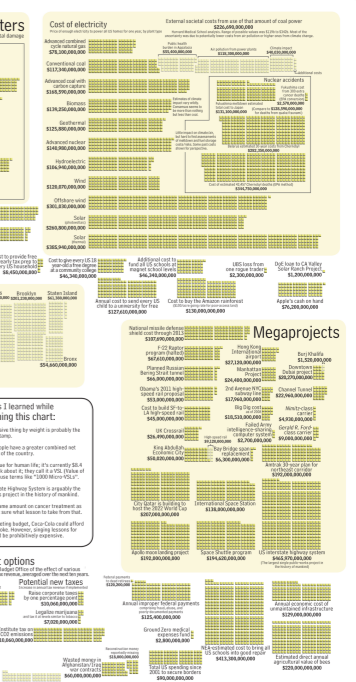
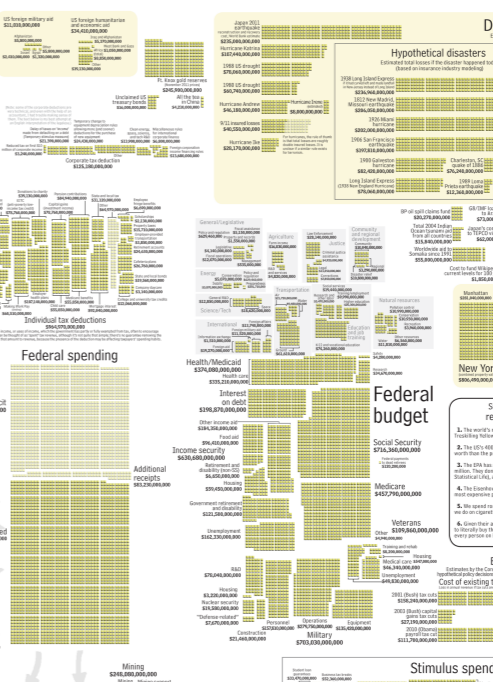
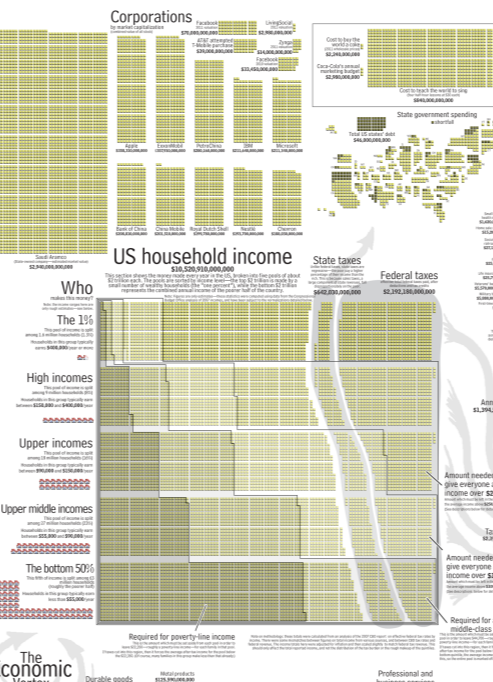
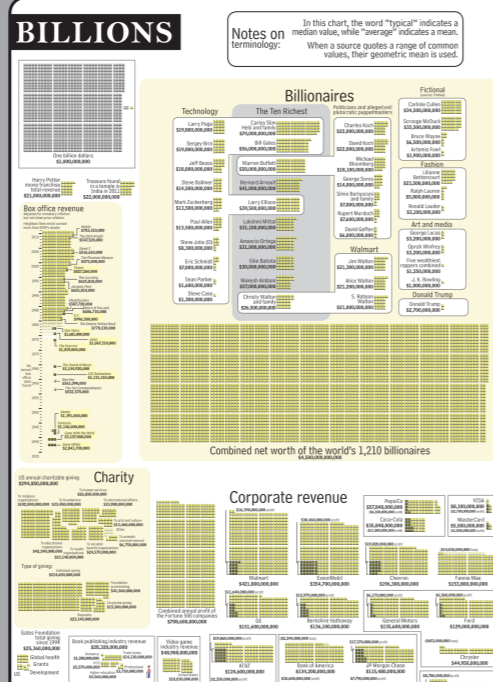
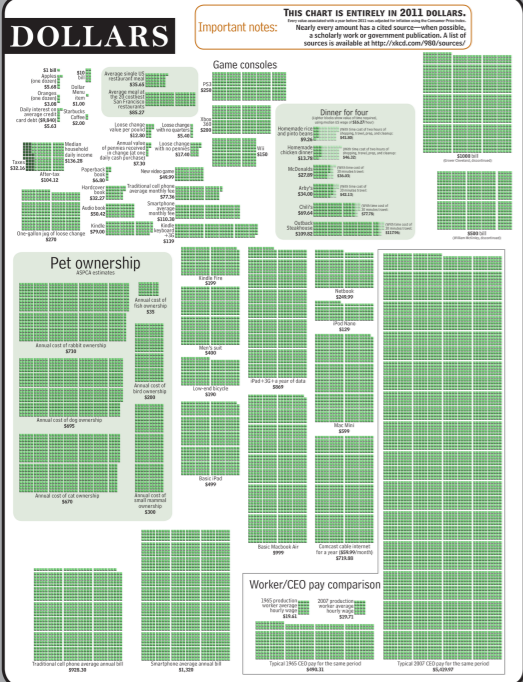
Pourquoi faire de la physique dans l'espace?

Pourquoi l'espace?

- * L'accès à l'espace est cher:
 - * Coût d'un lancement Ariane 5: 170 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...

MONEY

A chart of all of it, where it is, and what it can do

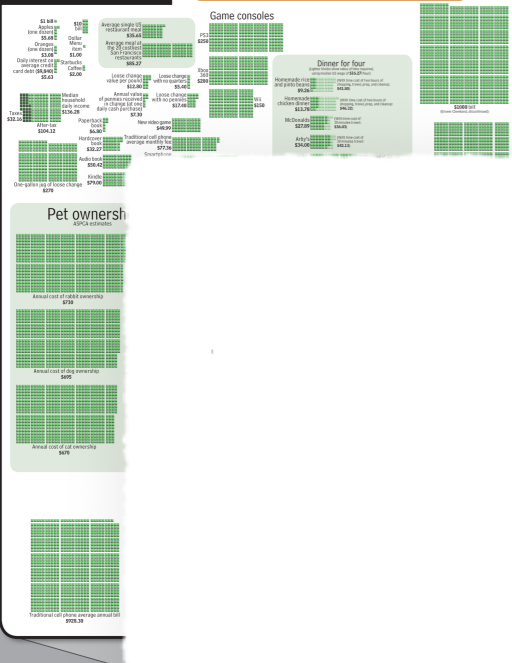


MONEY

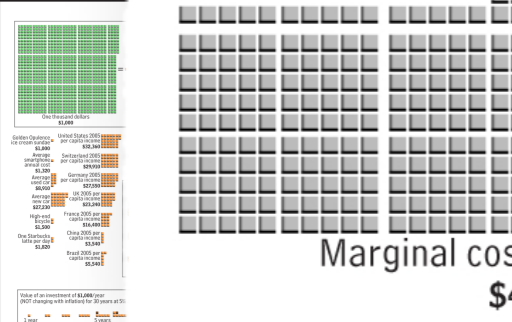
A chart of all of it, where it is, and what it can do

DOLLARS

Important notes: THIS CHART IS ENTIRELY IN 2011 DOLLARS. Nearly every amount has a cited source—when possible, a scholarly work or government publication. A list of sources is available at <http://xkcd.com/980/sources/>

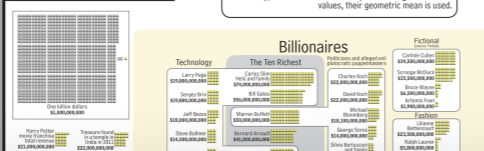


THOUS



BILLIONS

Notes on terminology: In this chart, the word "typical" indicates a median value, while "average" indicates a mean. When a source quotes a range of common values, their geometric mean is used.



Corporations



Disasters



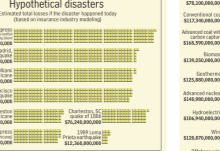
Cost of electricity



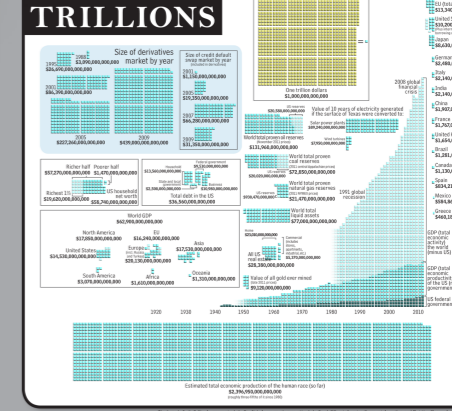
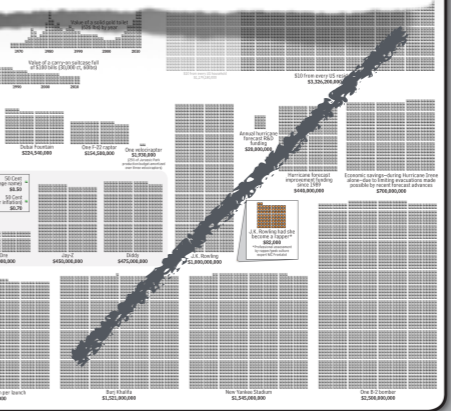
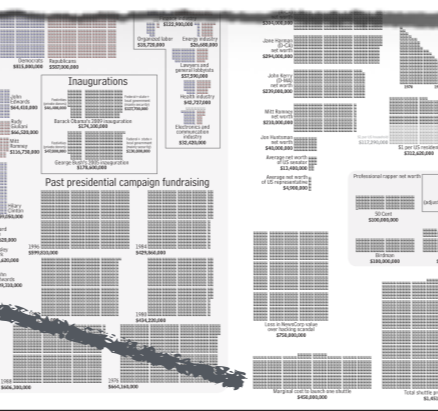
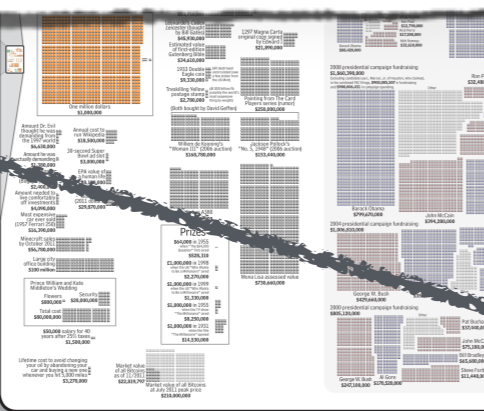
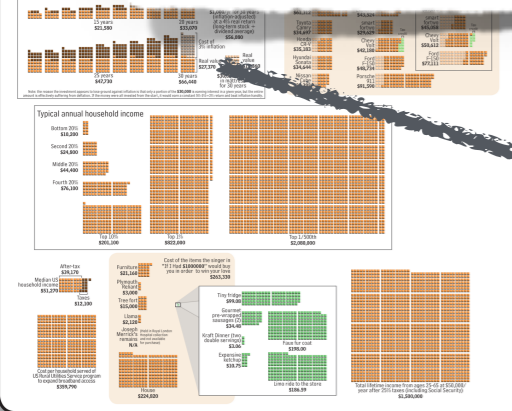
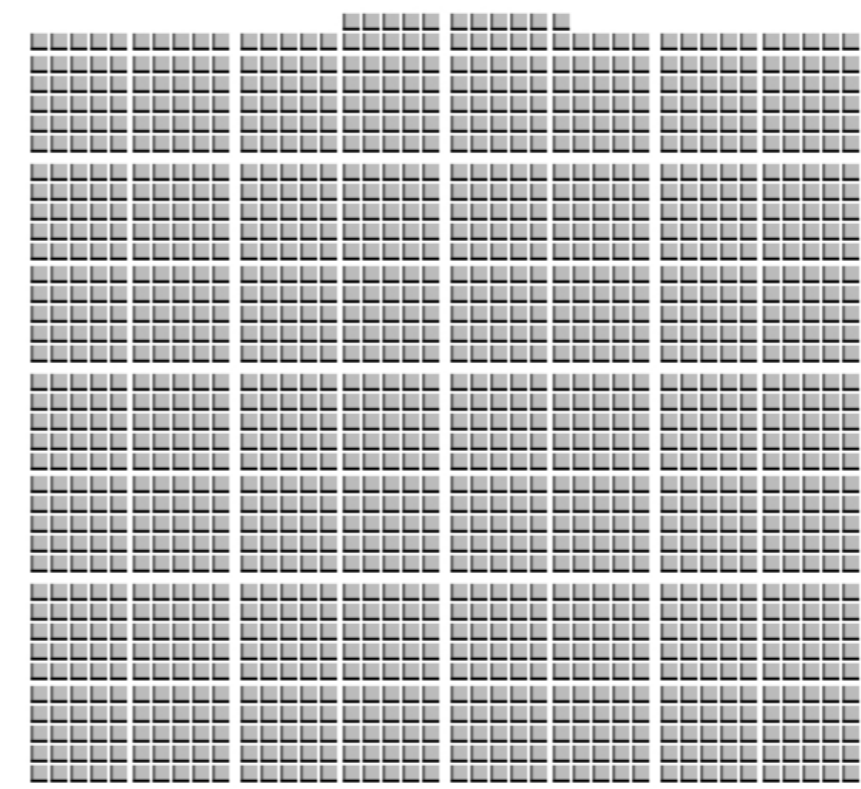
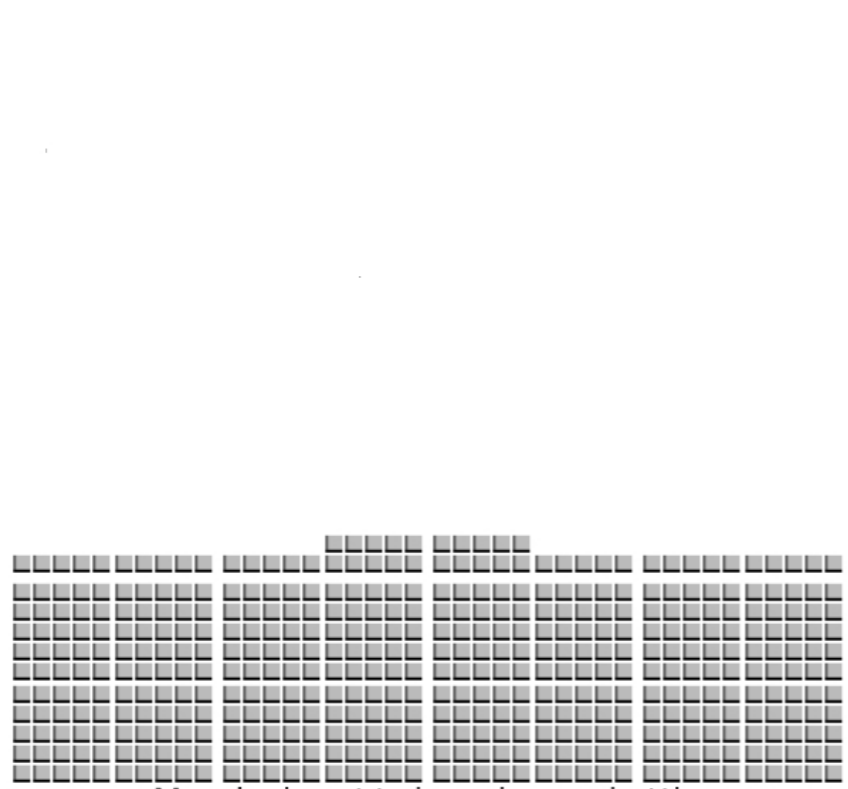
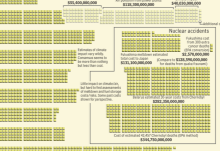
New York City



Federal budget

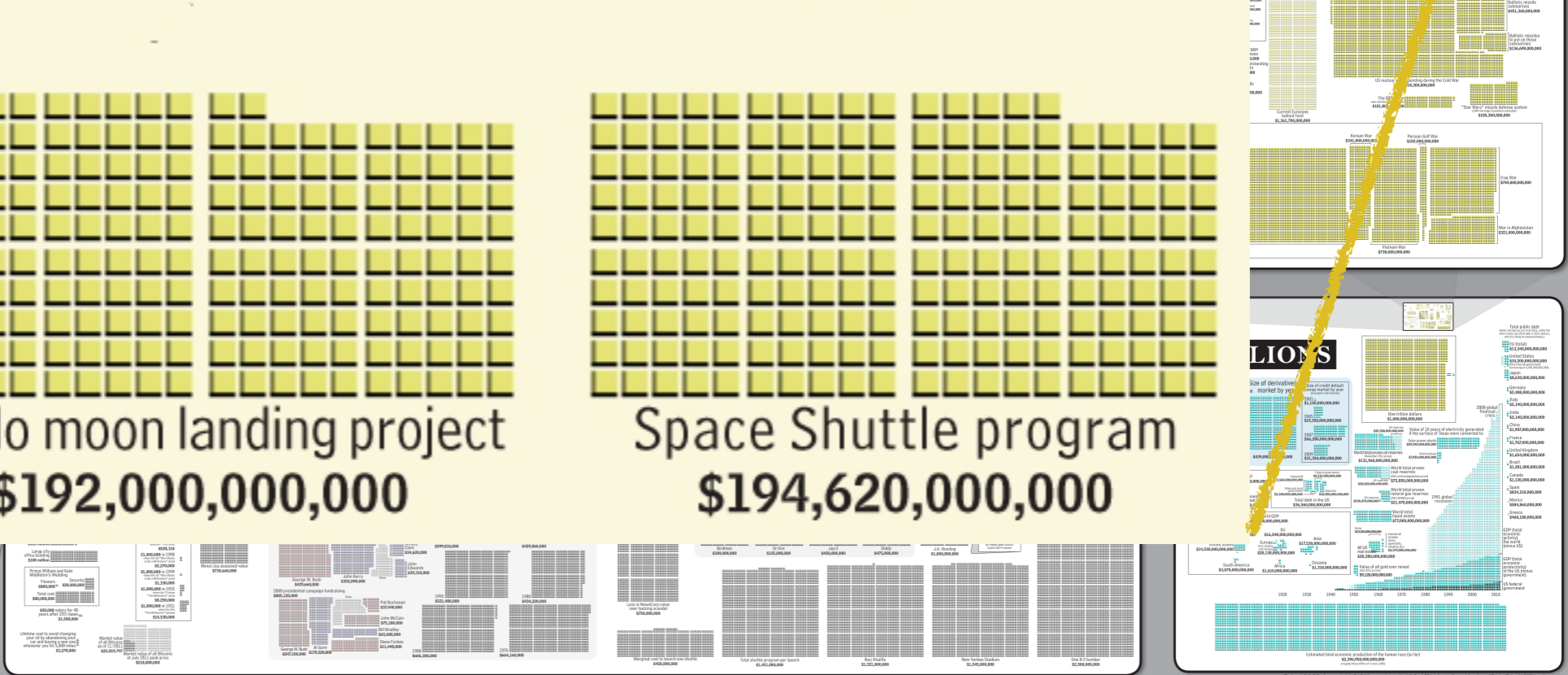
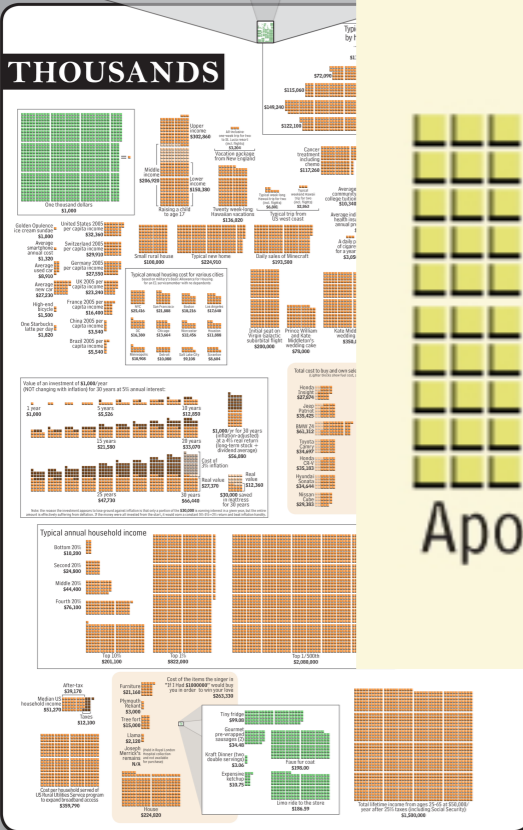
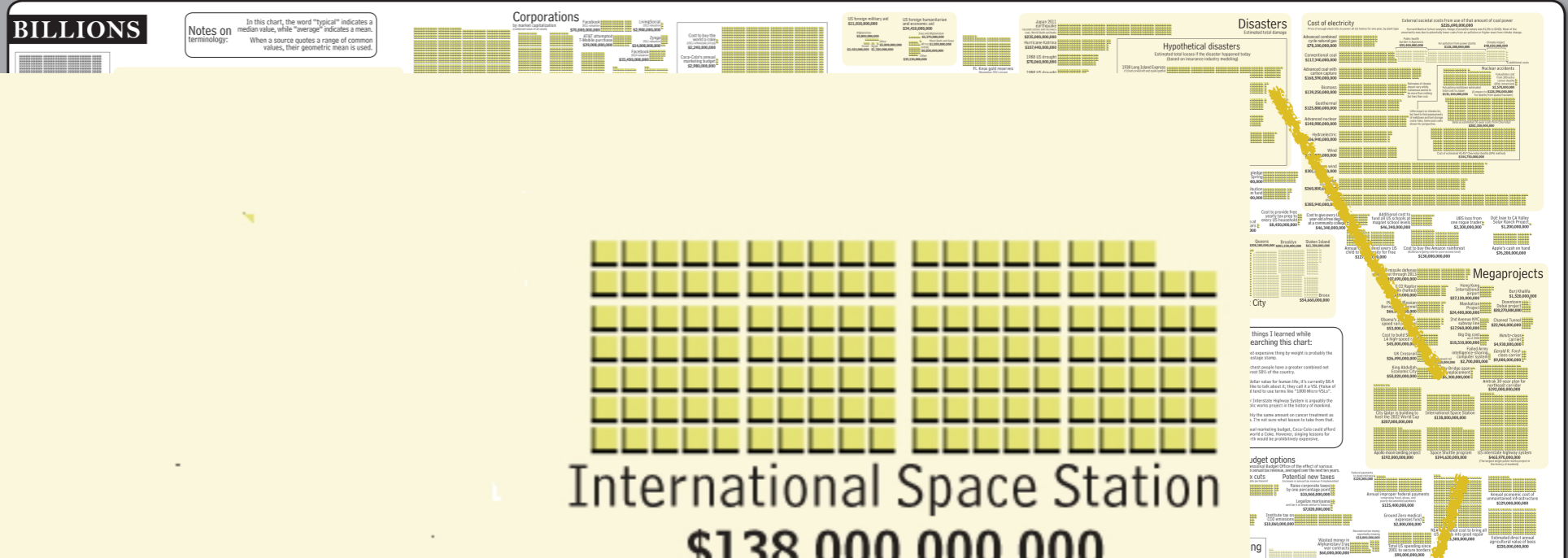
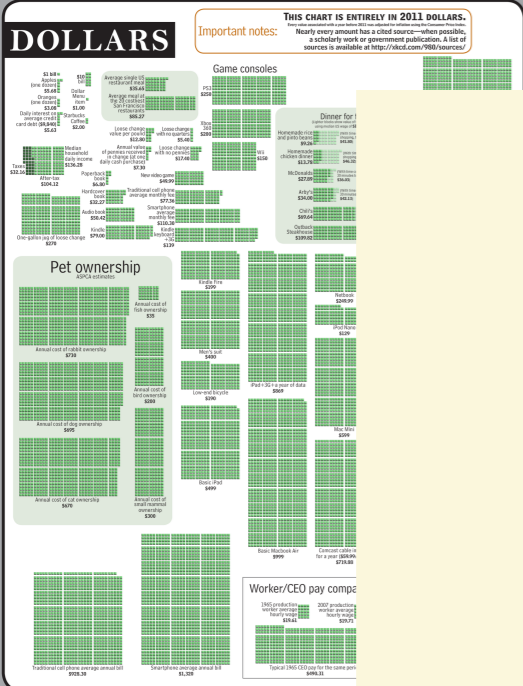


Megaprojects



MONEY

A chart of all of it, where it is, and what it can do



International Space Station
\$138,000,000,000

Apollo moon landing project
\$192,000,000,000

Space Shuttle program
\$194,620,000,000

Pourquoi l'espace?

- * L'accès à l'espace est cher:
 - * Coût d'un lancement Ariane 5: 170 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:
 - * Dernier appel (classe M) de l'agence spatiale Européenne, pression de 30 pour 1.
- * La route est longue:
 - * le projet ARIEL qui a été sélectionné fin 2017 est à l'étude depuis plus de 4 ans et ne décollera qu'en 2025 au plus tôt
- * L'espace est difficile d'accès.

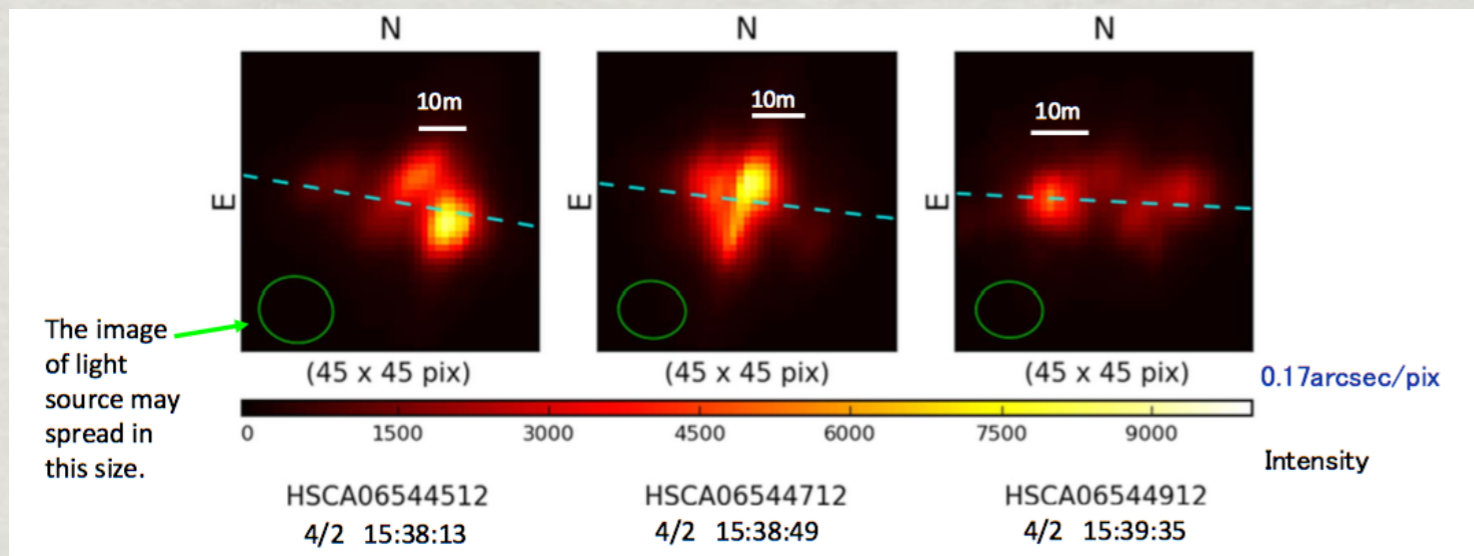
Pourquoi l'espace?

- * L'accès à l'espace est cher:
 - * Coût d'un lancement Ariane 5: 170 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:
 - * Dernier appel (classe M) de l'agence spatiale Européenne, pression de 30 pour 1.
- * La route est longue:
 - * le projet ARIEL qui a été sélectionné fin 2017 est à l'étude depuis plus de 4 ans et ne décollera qu'en 2025 au plus tôt
- * L'espace est difficile d'accès.

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

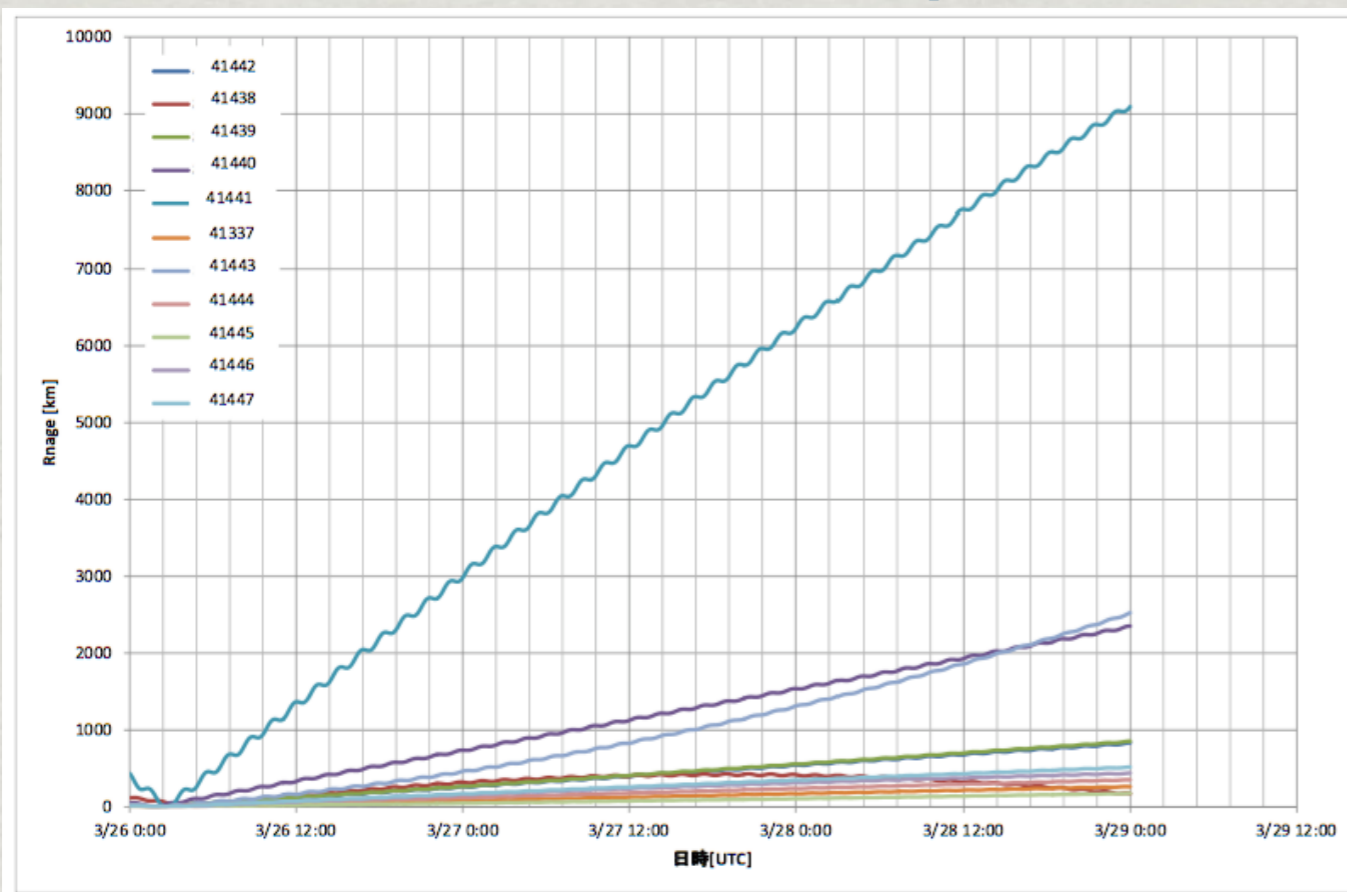


Une autre histoire triste



Observations du satellite depuis le sol

- * Hitomi - Satellite X lancé par JAXA en Février 2016, perdu en Mars 2016
- * Combinaison de multiples facteurs:



Trajectoires d'objets repérés sur l'orbite du satellite

- * Passage (prévu) de la terre dans le star-tracker mais procédure de récupération non-testée.
- * Utilisation d'un mauvais jeu de paramètre décrivant l'inertie du satellite (déployable)
- * Mauvaise communication le long de la chaîne de responsabilité



Pourquoi aller dans l'espace?

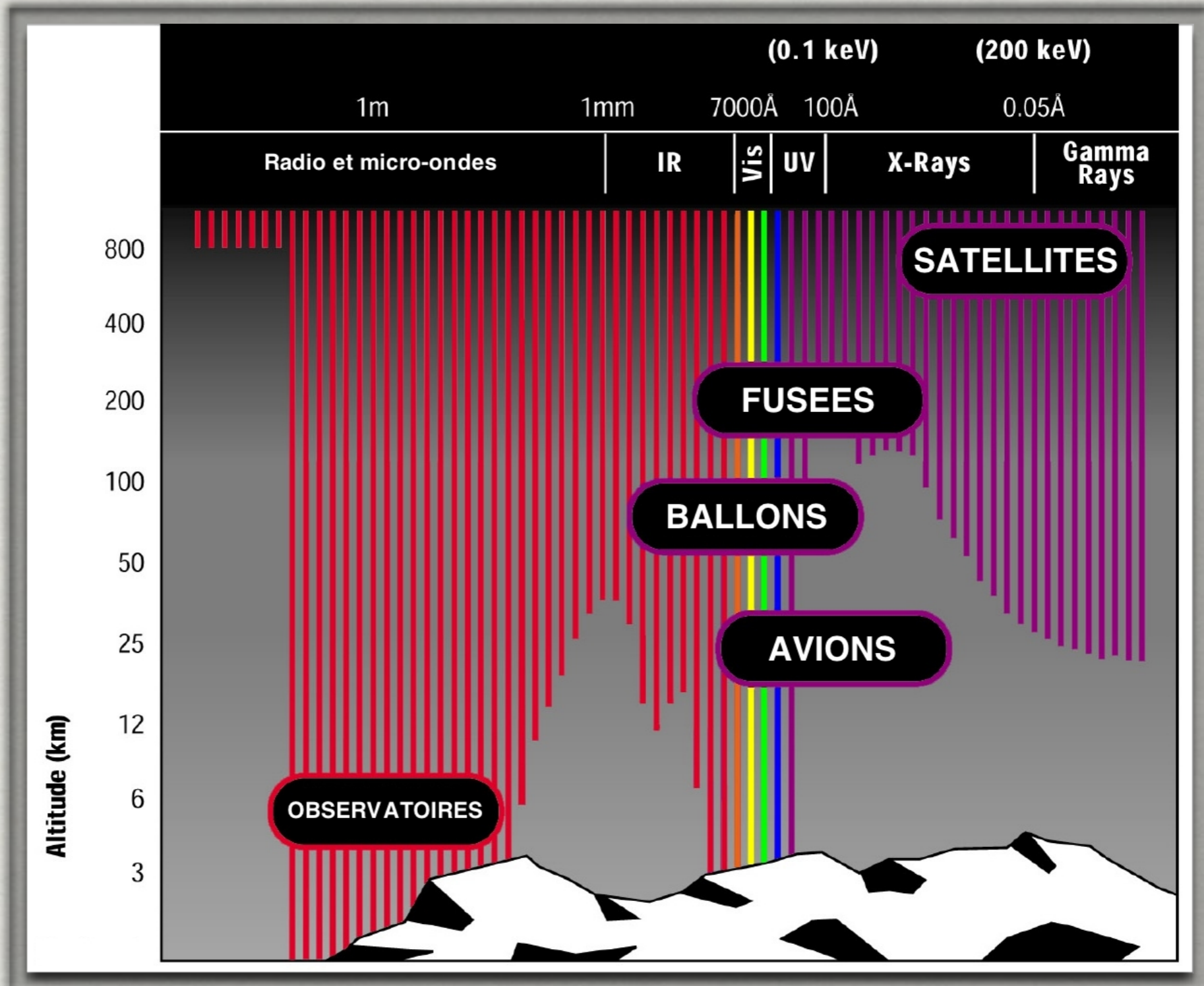


L'atmosphère comme limite

- * 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 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 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 émet (émission thermique, raies):**
 - * Dans l'infrarouge elle peut être 10^6 fois plus lumineuse que les sources astronomiques.

- * 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 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

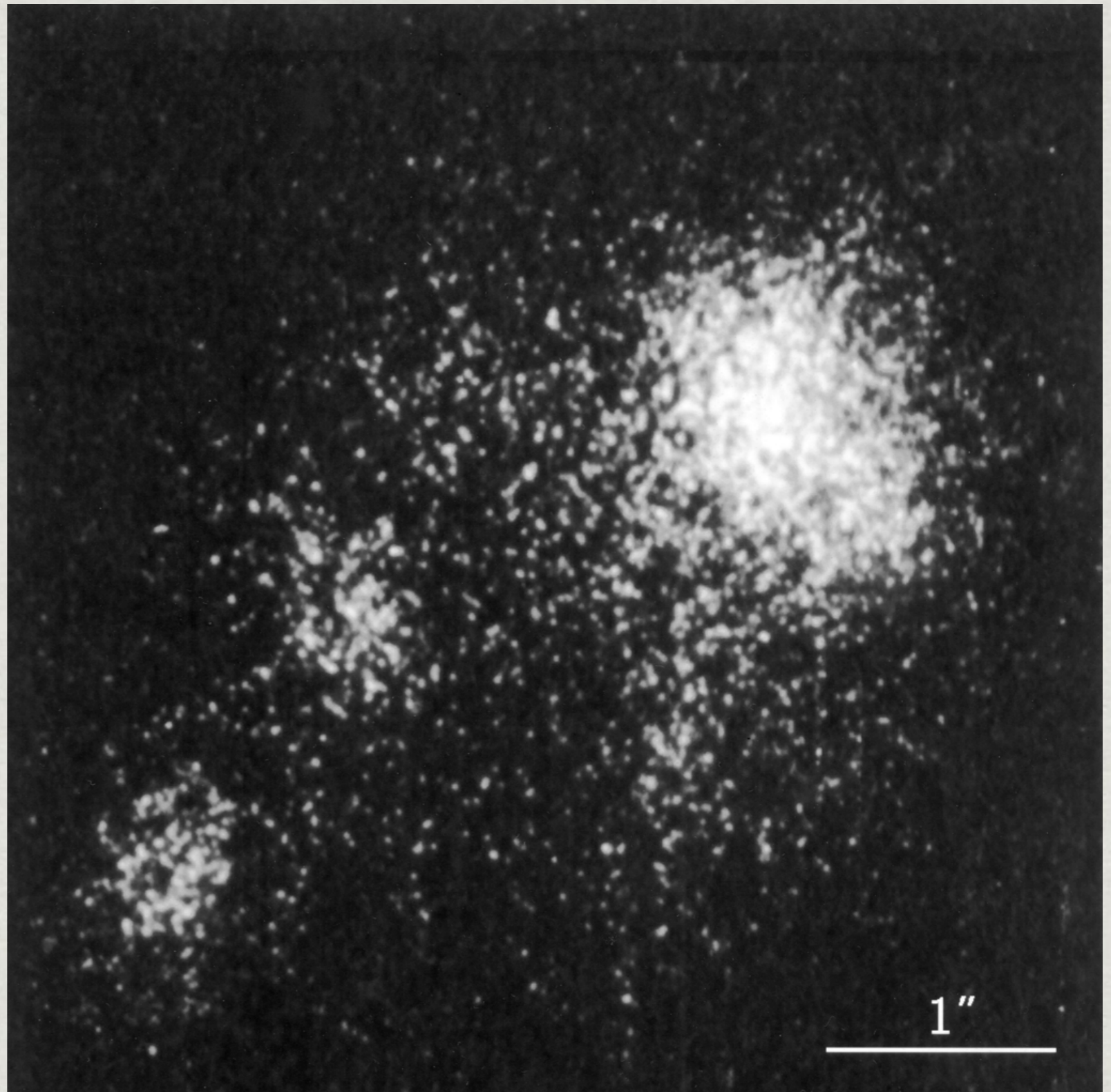
Imagerie en mode Speckle du système R136 dans le grand nuage de Magellan, avec un télescope de 3.6m.

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 ($\varnothing 8.2\text{m}$) 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

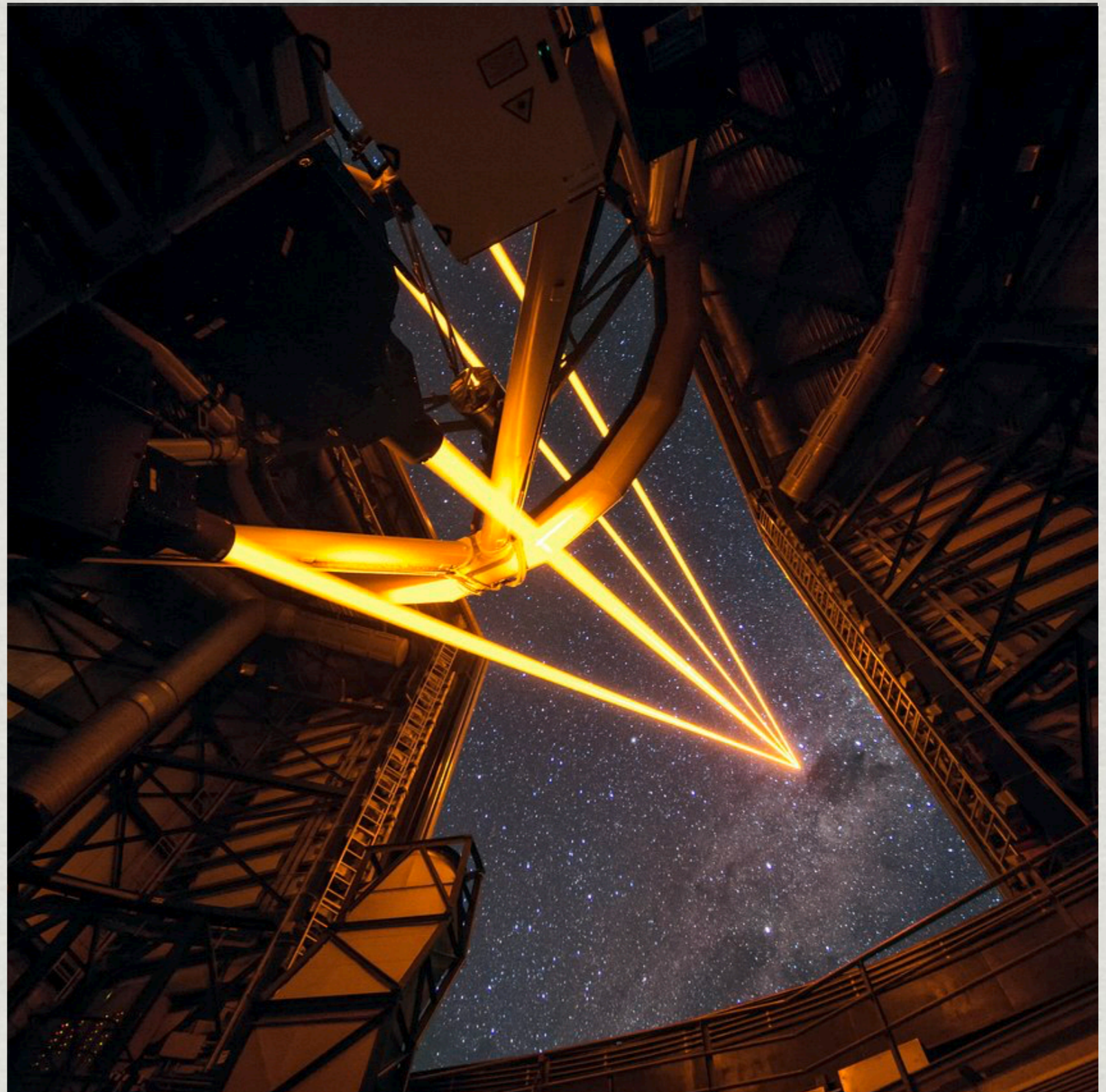
Imagerie en mode Speckle du système R136 dans le grand nuage de Magellan, avec un télescope de 3.6m.

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).



- * 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.

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

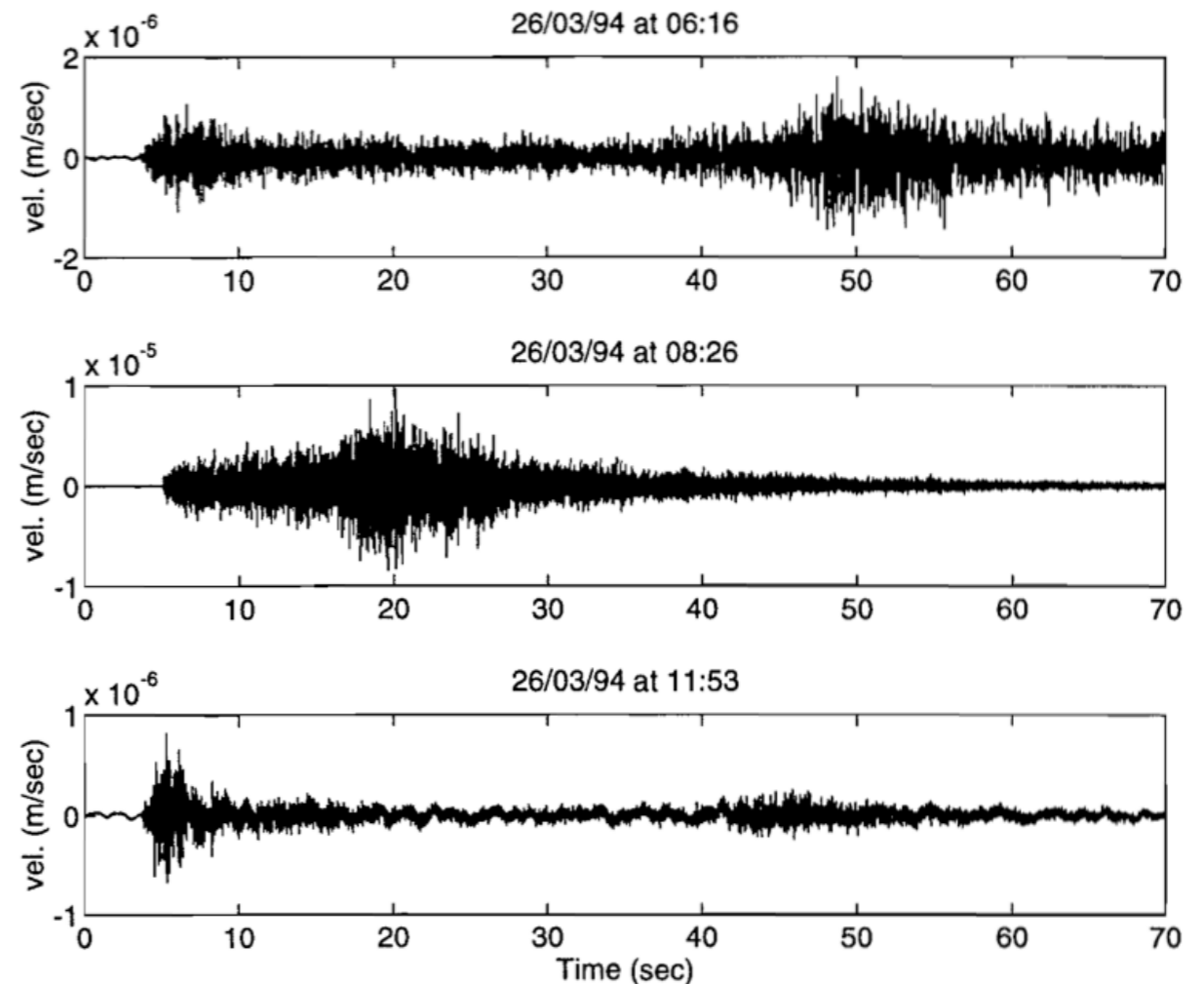


Figure 9: Examples of micro-earthquakes recorded at Paranal during the night of March 25/26, 1994. The curves represent the chronogram of the ground velocity in the vertical direction.

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

- * La physique (la science en général) ne figure pas au rang des premières préoccupations de l'Humanité:
 - * 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).

Pourquoi l'espace?

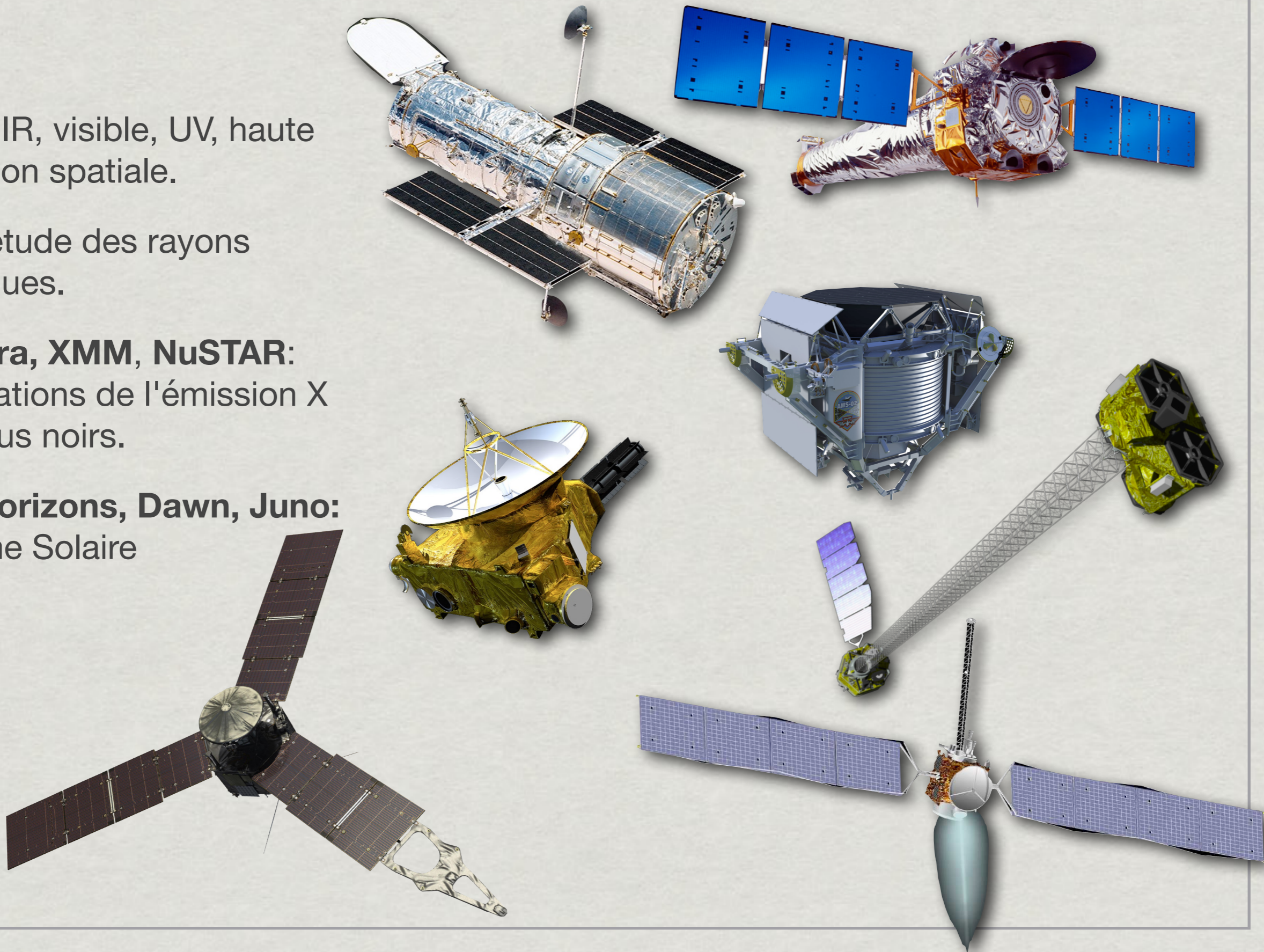
- * S'affranchir de l'atmosphère pour accéder de façon optimale à tout le spectre électromagnétique.
 - * Observatoires infrarouge, X, mesure du fond cosmologique.
 - * **Herschel, XMM-Newton, Chandra, Planck, WMAP**
- * Travailler en l'absence quasi totale de gravité pour simplifier les structures et 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 (2022), WFIRST (2025)*
- * 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

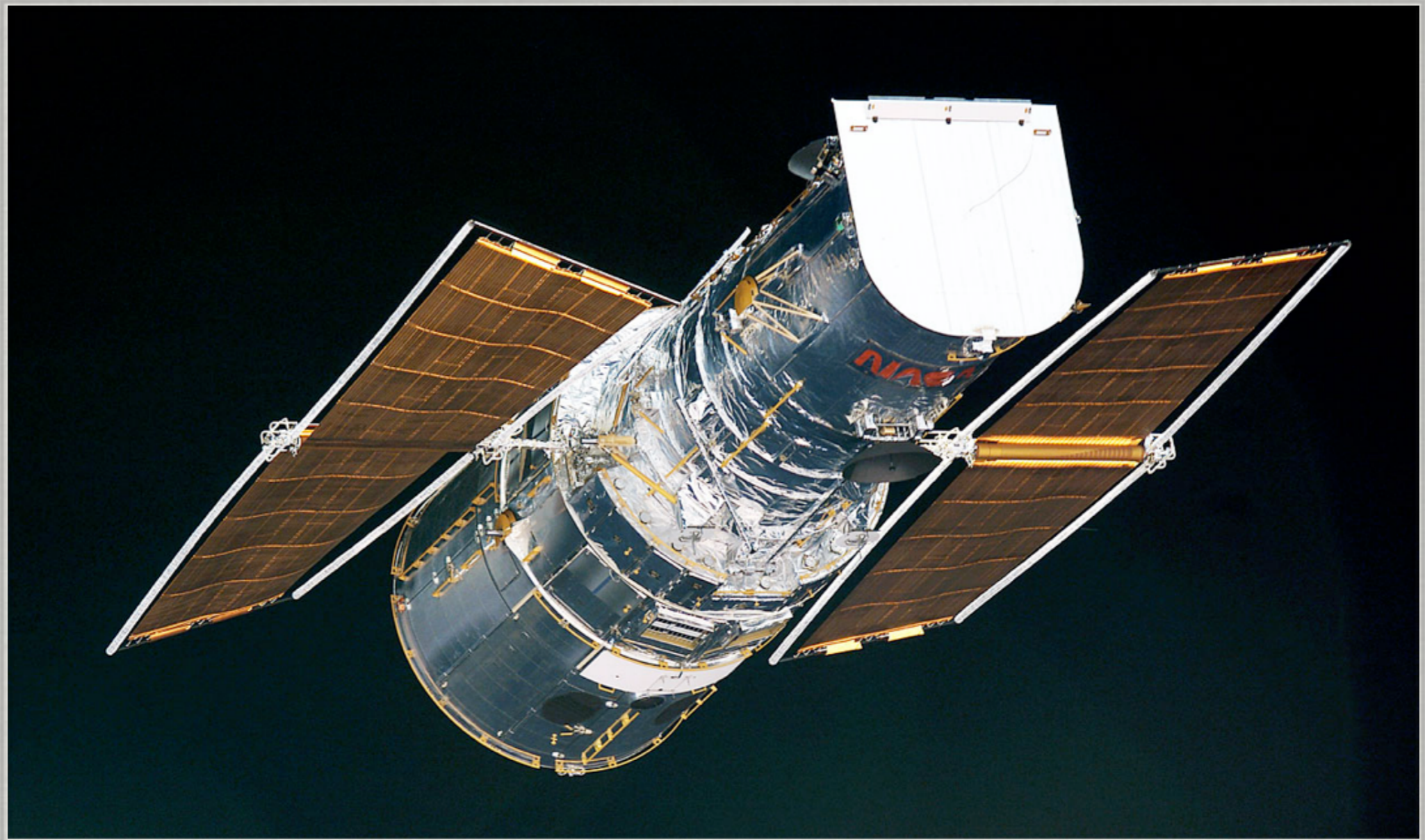


Quelques idées préconçues sur l'espace...

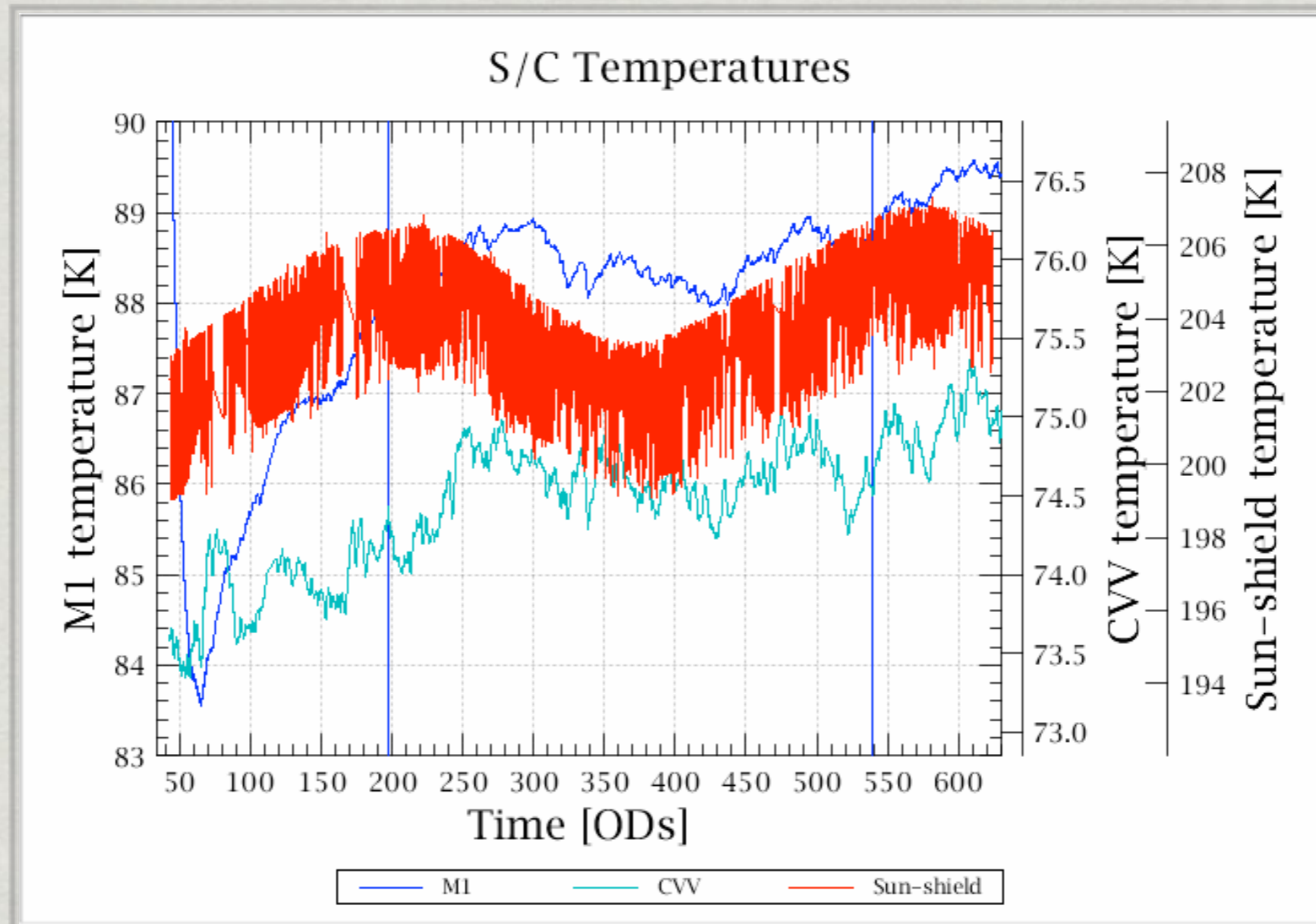
Idées préconçues

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

- * 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 sur un satellite sont extrêmement forts et peuvent induire des effets de vieillissement prématuré des matériels, ou des difficultés à contrôler son 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.

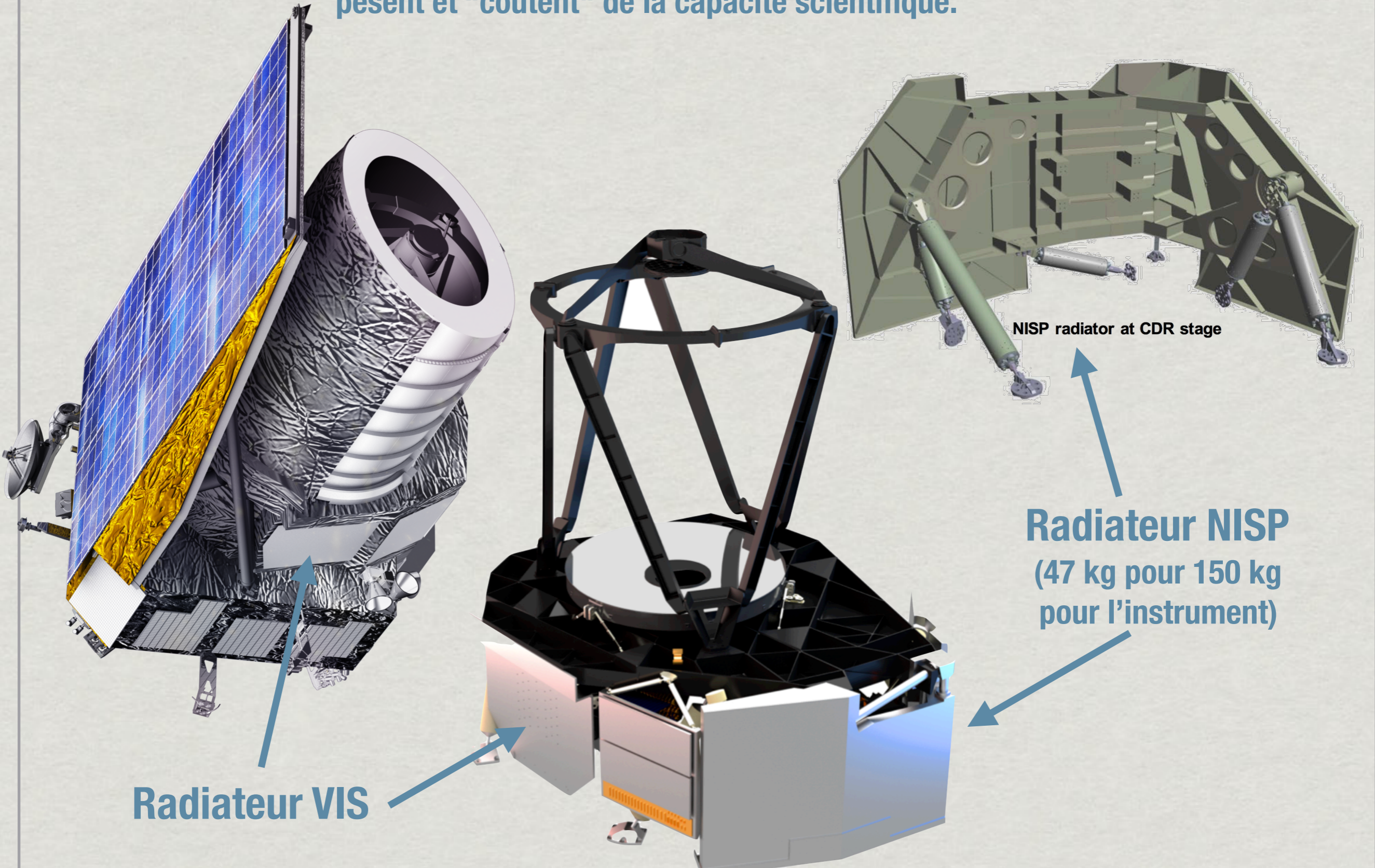


Les premiers panneaux solaires du HST, vieillis par la succession du passage "jour/nuit" en orbite basse terrestre.



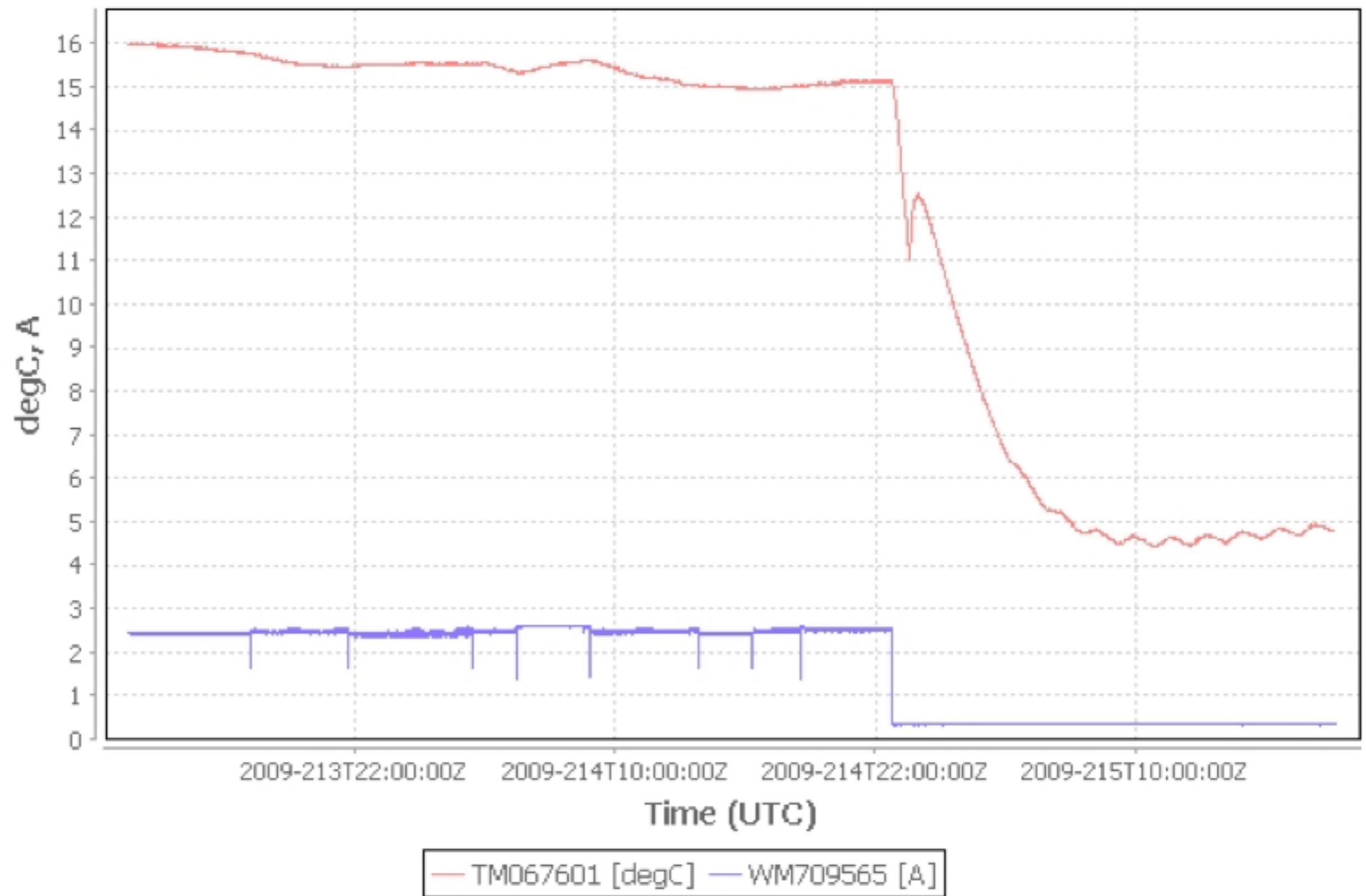
Variation de la température du satellite Herschel (orbite L2) en fonction de la saison (du fait de l'excentricité de l'orbite terrestre, 0.017).

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.



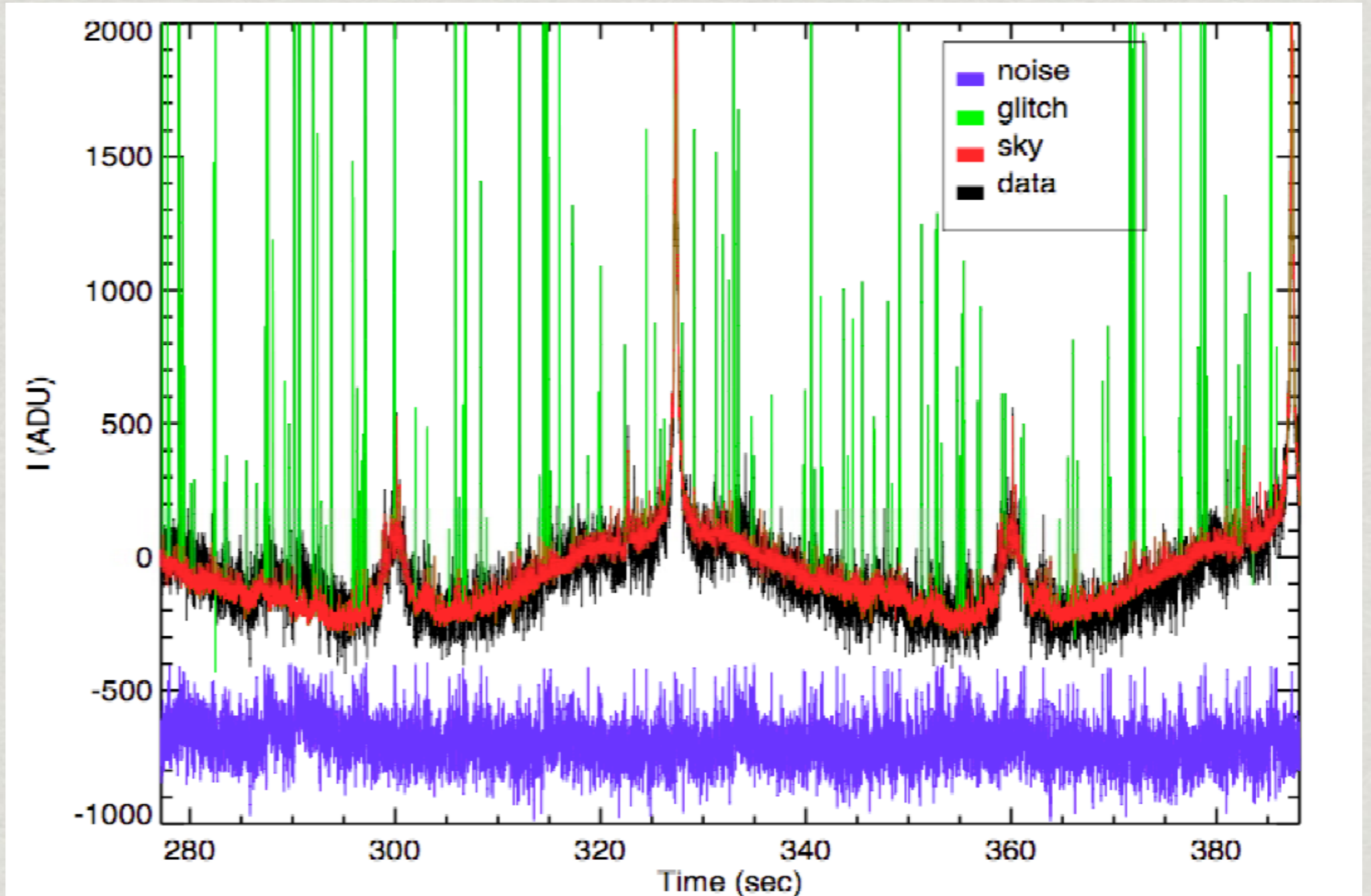
- * Si l'espace est effectivement vide par rapport au meilleur des vides terrestres, il est plein de particules absentes de nos laboratoires:
 - * Electrons et noyaux du vent solaire.
 - * Noyaux du rayonnement cosmique.
- * Le bombardement de particules chargées est intensif quelque soit l'orbite choisie:
 - * 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).

LCU Current & temperatures doy 214



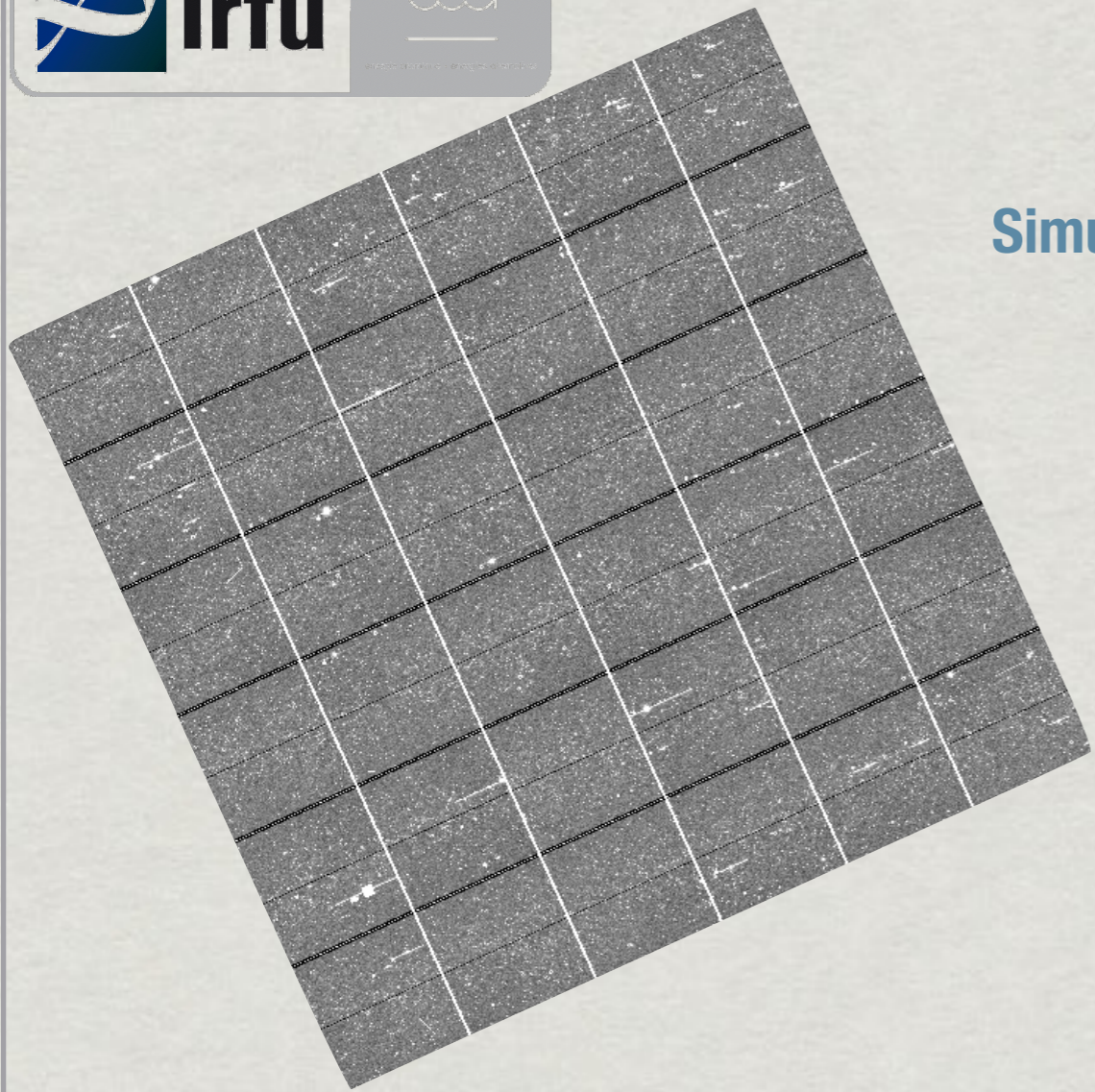
Le 3 Aout 09, 81 jours après le lancement, un simple impact de rayon cosmique dans un composant non “durci” de l'instrument Herschel/HIFI a détruit l'un des boitiers d'électronique, rendant l'instrument inutilisable.

Le software 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...).

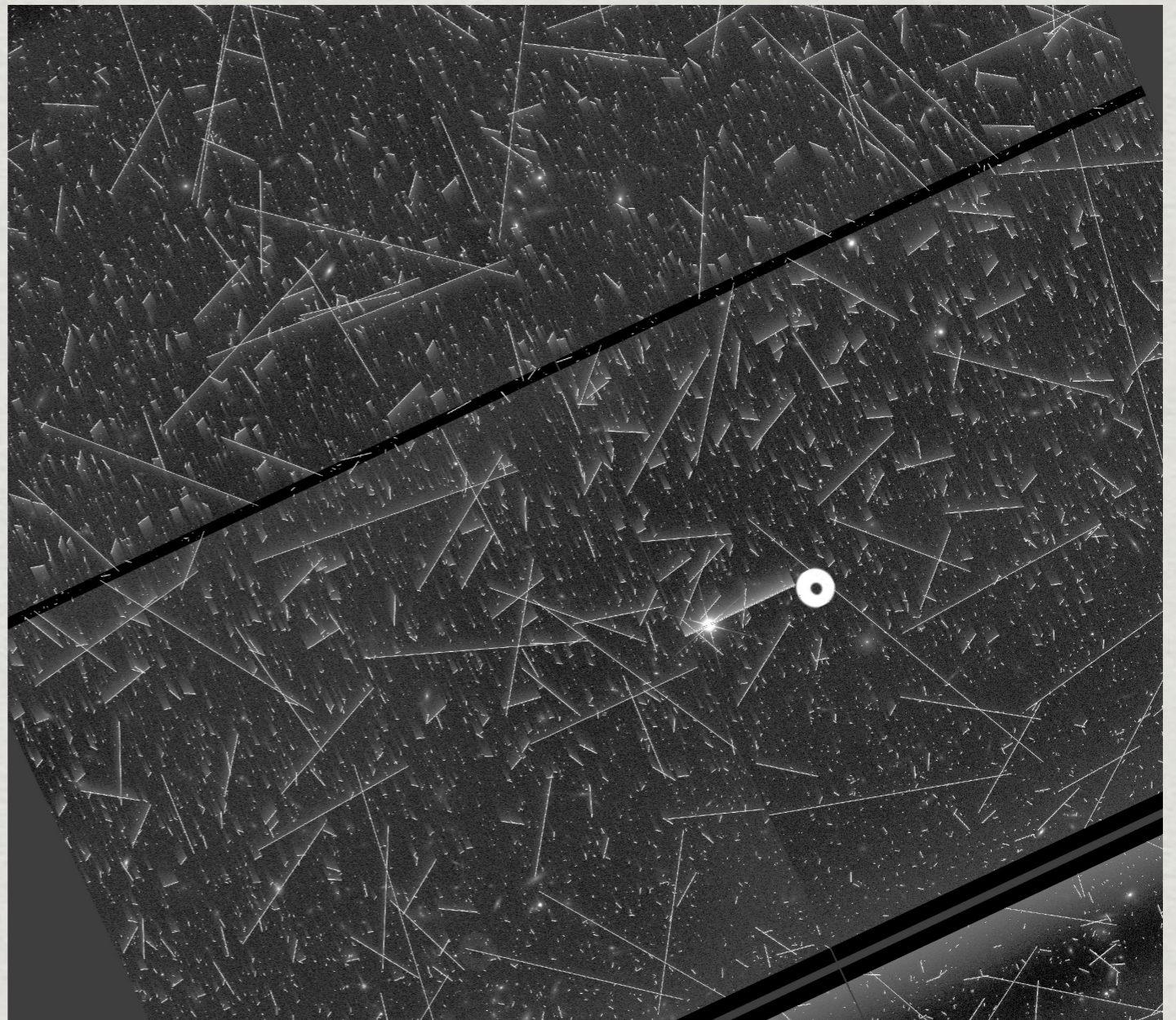


Signal brut du canal à 353 GHz de Planck/HFI, montrant la fréquence des impacts de particules chargées (cosmiques, rayonnement solaire).

15-20% des données sont rejetées à cause de ces impacts.

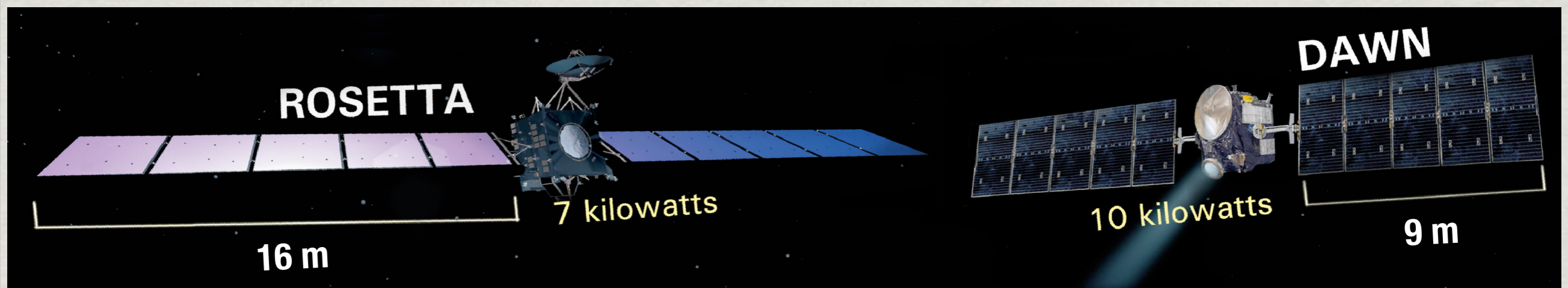


Simulation des images brutes du détecteur VIS pour Euclid



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 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, 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 (comme l'appel pour les missions L2/L3 de l'ESA).

* 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 10 ans).



New Worlds, New Horizons

in Astronomy and Astrophysics

NATIONAL RESEARCH COUNCIL
OF THE NATIONAL ACADEMIES

Cosmic Vision

Space Science for Europe 2015-2025



European Space Agency
Agence spatiale européenne

LES DEUX PROGRAMMES PRINCIPAUX

USA 2012-2021 - UE 2015-2025

* Ils contiennent:

- * Un cadrage financier qui permet de déterminer l'ampleur de la mission.
 - * Mission de classe M: 500 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 du récent appel S2 pour des missions entre l'Europe et la Chine

- * 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 (< 500 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.

Après la sélection...

- * 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,
 - * ...

- * 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.

- * 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).

- * 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 les 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.



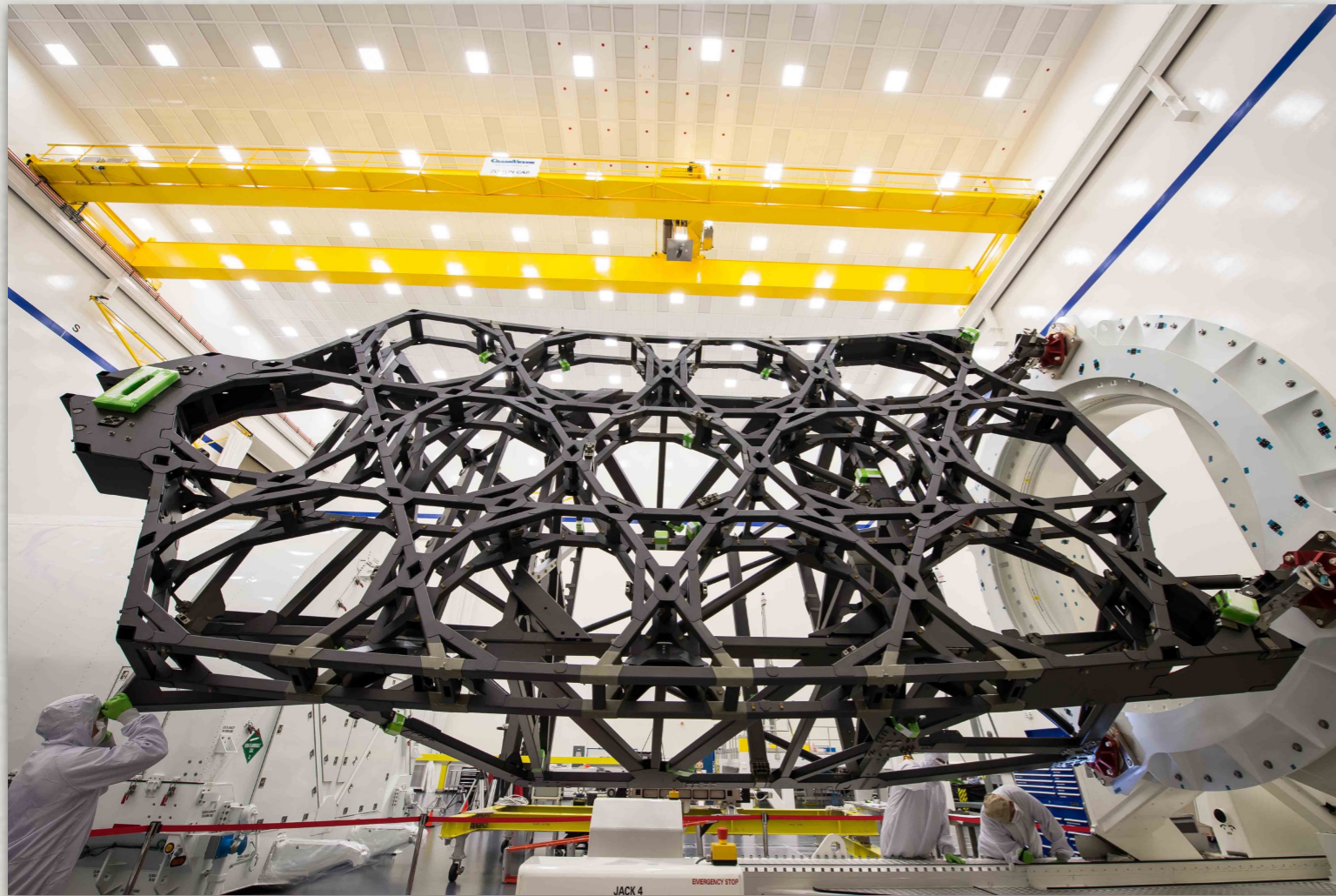
Test de vibration du satellite Herschel complet

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

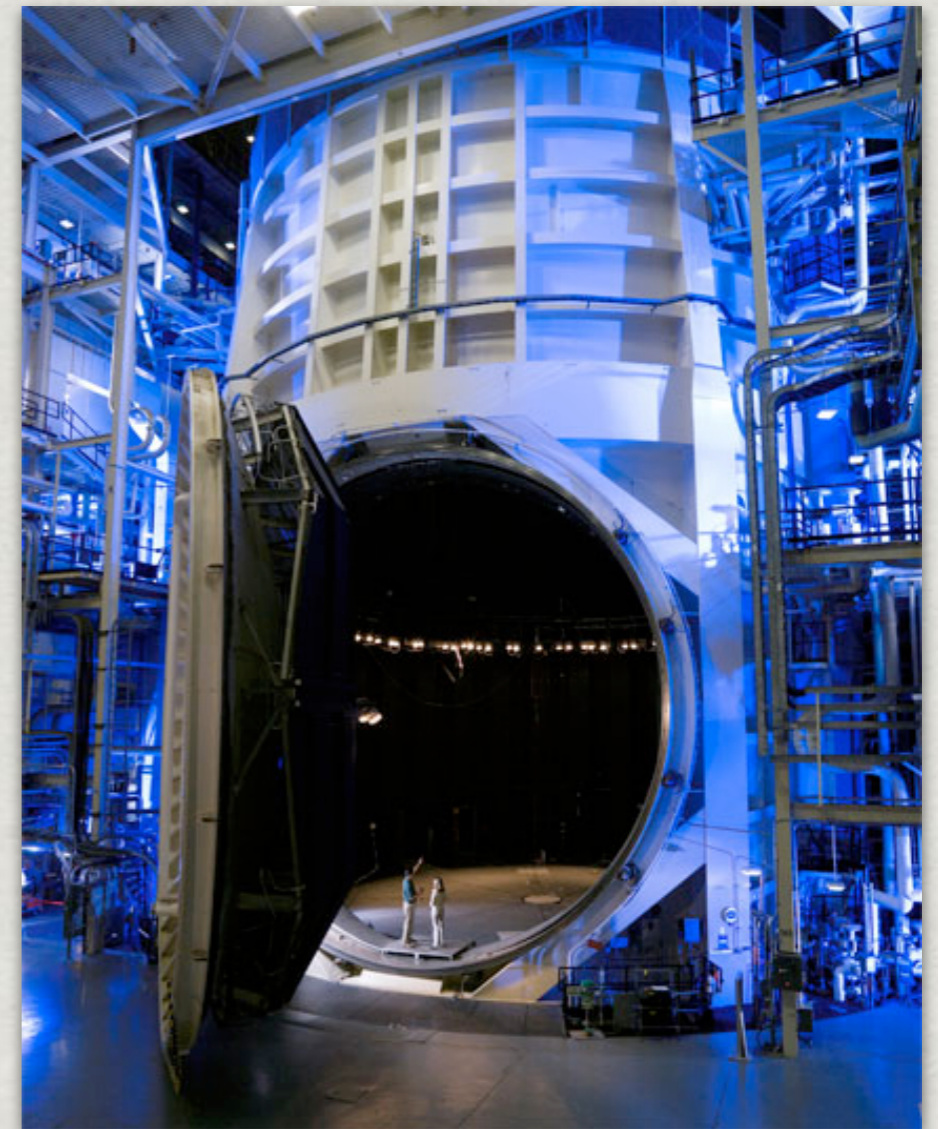
Un problème de limites

- * Les deux paradigmes du développement spatial:
 - * L'expérience 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 Web 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 (Ø19m, H36m)

Un problème de limites

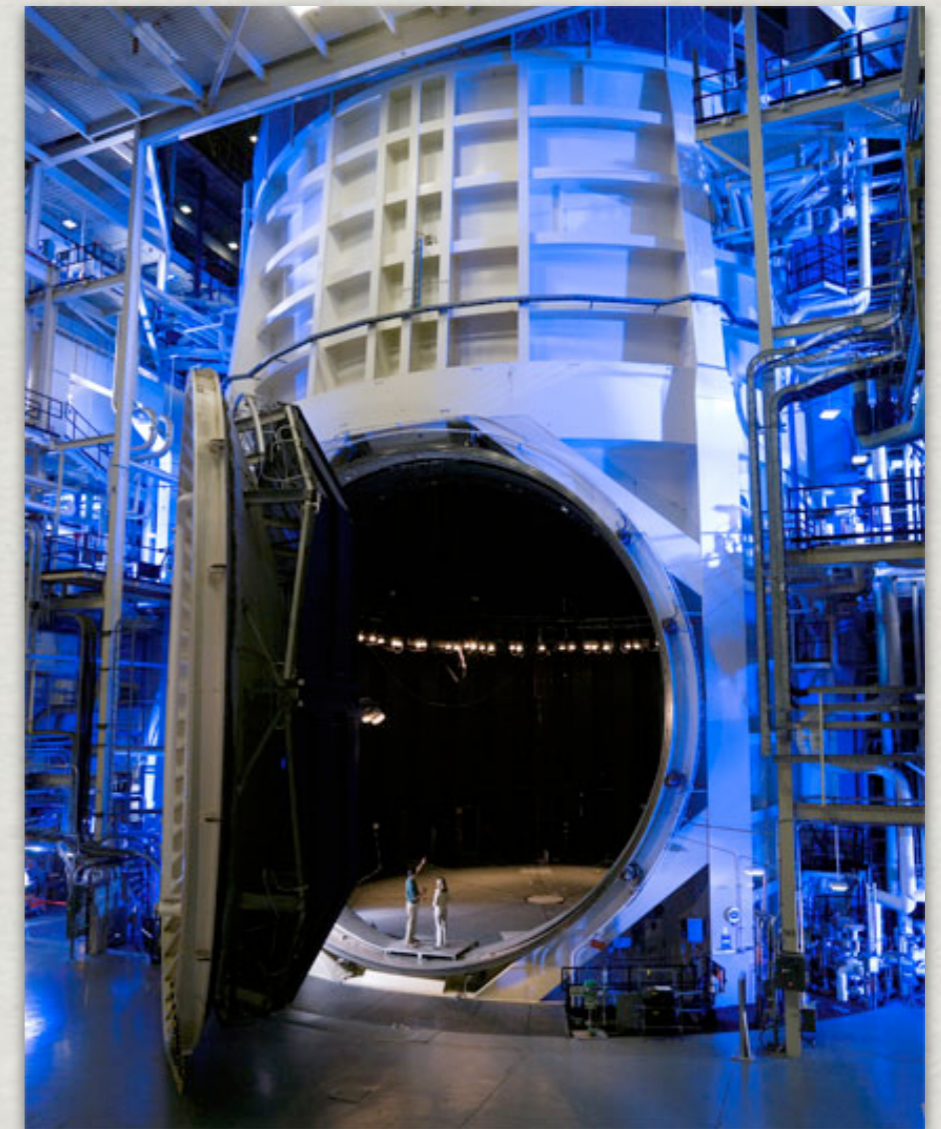
- * Les deux paradigmes du développement spatial:
 - * L'expérience est construite au sol, telle qu'elle devra être dans l'espace, rigide.
 - * L'expérience est testée et validée dans ses conditions de fonctionnement.

Le cas du James Web Space Telescope



JWST = 8 Milliards de \$,
2 fois le budget annuel de l'ESA...
Et après?

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 (Ø19m, H36m)

