

L'Astronomie depuis la Lune

Version 11 Février 2025

Jean Schneider

Observatoire de Paris

Jean.Schneider@obspm.fr

- Le contexte: la colonisation de la Lune
- Les objectifs et retombées scientifiques
- Mise en œuvre
- Ce que peut faire l'Observatoire

Those that say that it cannot be done should not bother those that are doing it
(J. Graham)

Le contexte: colonisation de la Lune

Objectifs et retombées économiques

- Matières premières : études en cours (abondance, rentabilité)
 - Terres rares
 - He3 comme carburant nucléaire (1 mégatonne) Fusion He3-He3 propre
- Prédiction de PricewaterhouseCoopers : 150 G€ dans le PNB mondial d'ici 2040
- Une affaire suivie de très près par le Forum Economique Mondial

Objectifs environnementaux

- Base de lancements : réduit la pollution par les lancements terrestres (~1/jour)
- Centres de données : réduit le réchauffement climatique par les centres terrestres

Etape vers Mars

1967 : Traité de l'Espace

Objectifs et retombées scientifiques

Sans limite de date

- Science de la Lune
- Base pour l'astronomie
- Physique fondamentale

Science de la Lune

- Orbite et rotation de la Lune
- Composition chimique et propriétés physiques du régolithe
- Exosphère : composition, vents ...
- Magnétisme
- Sismologie, tectonique
- Structure interne de la Lune
- Grottes lunaires
- Histoire de la Lune

Base lunaire pour l'Astronomie

- Pourquoi la Lune
- Objectifs astronomiques

Pourquoi la Lune

Avantages opérationnels

- Plus faible gravité que sur Terre
 - ⇒ Plus grands télescopes constructibles
 - ⇒ Plus grande sensibilité
 - Plus grande résolution angulaire
- Pas de vent ⇒ stabilité des grands télescopes et coupoles
- Mise à niveau permanente des équipements
- Interférométrie : stabilité du sol comparée aux vols en formation libre
- Pas de limite dans le temps (limitation en carburant pour les satellites)

Pourquoi la Lune

Avantages astronomiques

- Pas d'atmosphère : Accès à tout le domaine spectral
Pas de turbulence
- Très grands télescopes, interféromètres : Haute résolution angulaire
Très grande sensibilité
- Pollution radio moindre sur la face cachée
- Ciel vu sous un angle différent que depuis la Terre
- Rotation 28 fois plus faible que la rotation terrestre
⇒ observations continues 28 fois plus longues (exemple : transits planètes)
- Observations coordonnées Terre-Lune

Objectifs astronomiques

Combinaison de la résolution angulaire, et/ou de la sensibilité et/ou de tout le domaine spectral.

Quelques exemples

- Système solaire
- Exoplanètes
- Physique stellaire
- Extragalactique
- Cosmologie
- Rayons cosmiques

Systeme solaire

- La Terre
- Etoiles derriere la Terre
- Le Soleil
- Vent solaire
- Petits corps

La Terre

La Terre en monopixel vue comme une exoplanète

Terre en monopixel



Terre N X N pixels



Exoplanète monopixel

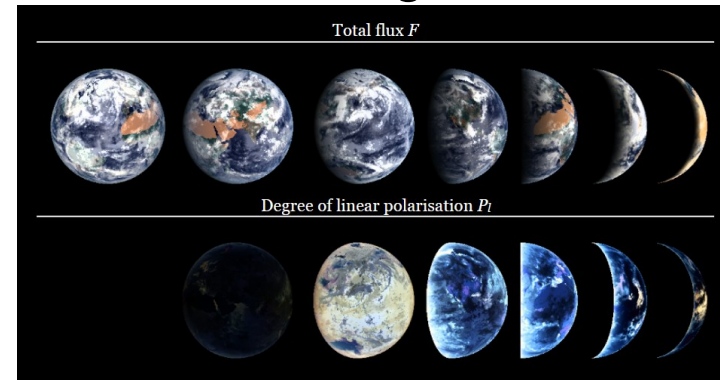
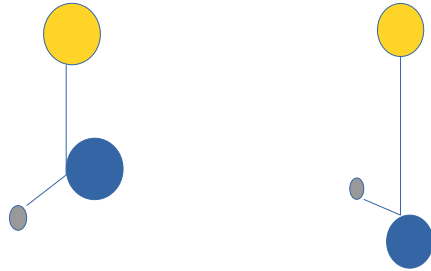


Exoplanète
N X N pixels

La Terre

La Terre en monopixel vue comme une exoplanète

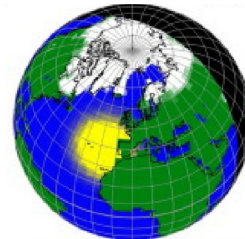
- Variabilité (rotation de la Terre, météo et saisons)
- Polarisation : variation en fonction de l'angle de réflexion



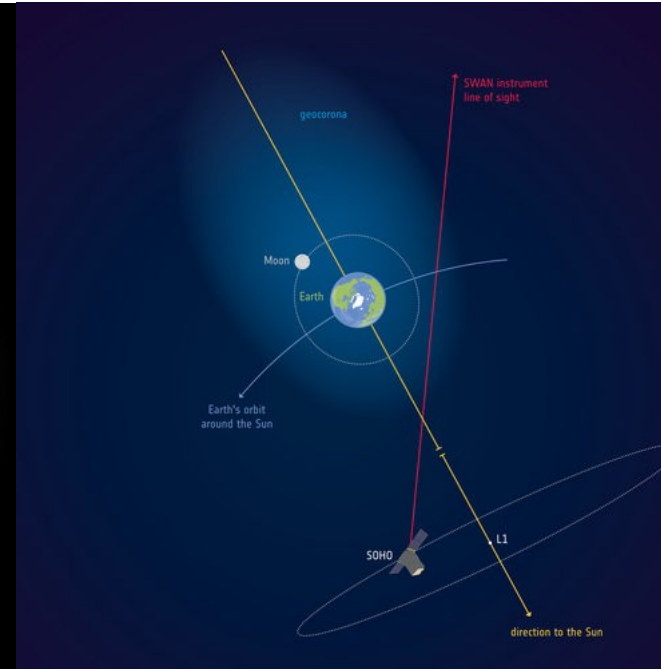
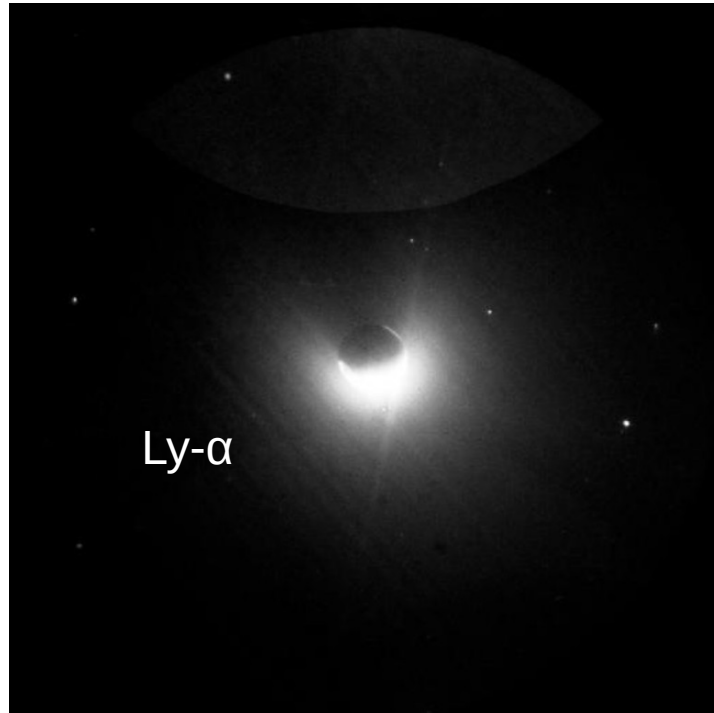
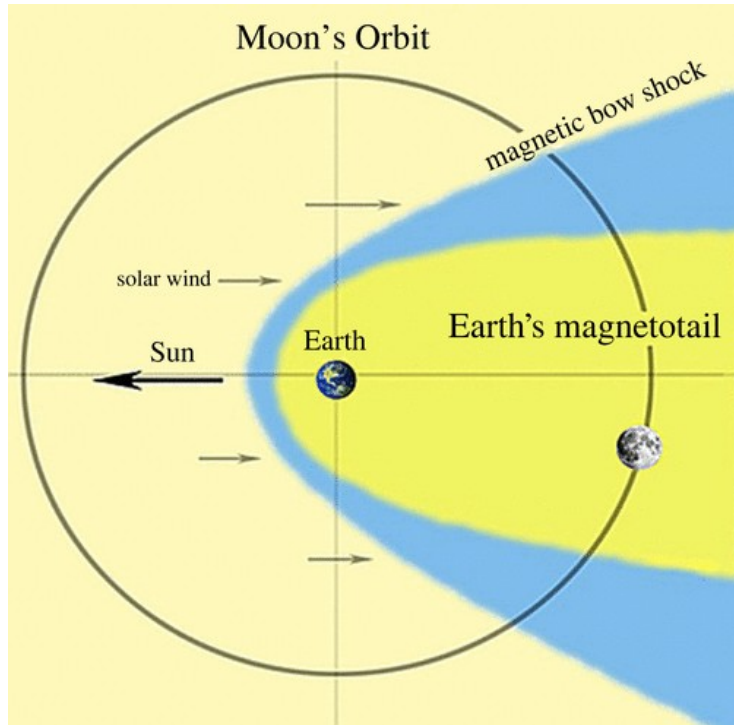
flux

polarisation

- Réflexion spéculaire du Soleil sur les océans



Magnétosphère et « géocouronne » terrestres in situ



Géocouronne vue par Apollo
Géocouronne vue par SOHO (JL Bertaux)

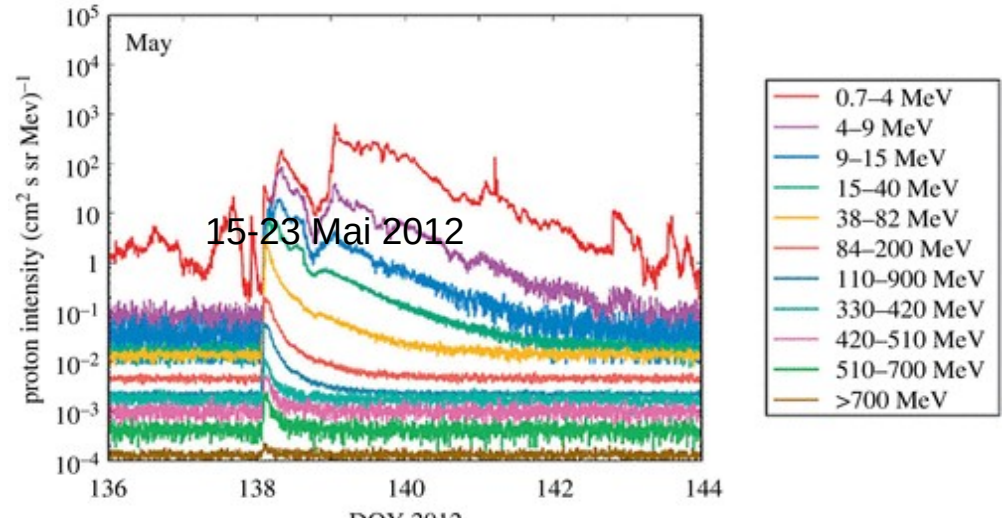
Le Soleil

- Emissions radio :
Cartographie à haute résolution angulaire
des éruptions solaires à 0.1 – 40 MHz
- Le vent solaire
- Eclipses par la Terre
- Les archives du vent solaire dans le régolithe

Vent solaire

- Ions et électrons de 0.5 KeV à 100 Mev
- Protons de 0.5 MeV à 1 Gev

La surveillance du vent solaire :
prédiction des impacts terrestres



Eclipses du Soleil par la Terre

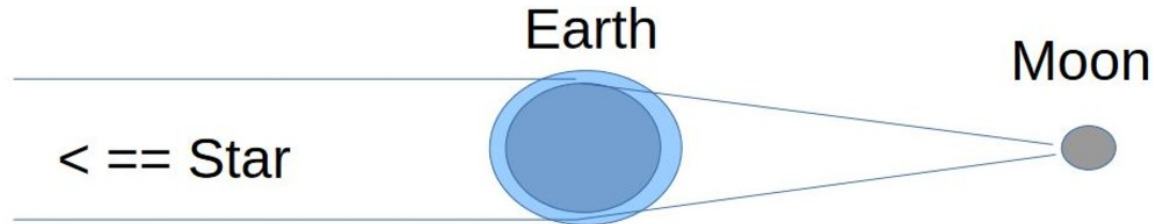
La Terre est 3,5 plus grande que la Lune

==> On observe la couronne solaire 3,5 fois plus loin que depuis la Terre avec les éclipses par la Lune



Etoiles derrière la Terre

- Spectroscopie de transmission d'objets lointains par l'atmosphère terrestre – On ne traverse pas les mêmes couches que depuis le sol
- L'atmosphère terrestre comme loupe

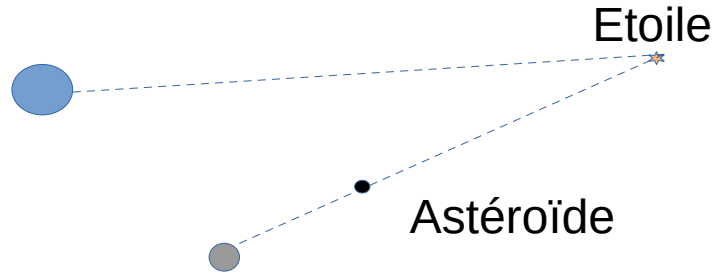


⇒ « Terrascope » Kipping (2019)

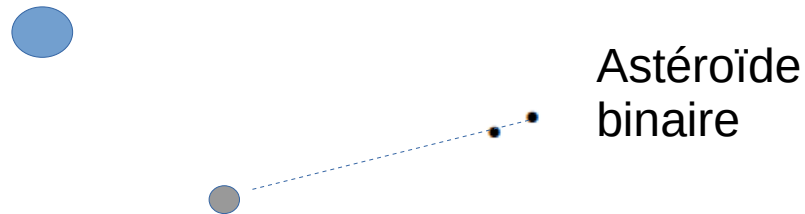
Amplification X 50.000 ⇒ Photométrie rapide (pulsars optiques ...)
Spectroscopie très haute résolution

Petits corps

- Résidus d'astéroïdes sur la Lune \Rightarrow Leur composition minérale
- Occultations stellaires invisibles depuis la Terre



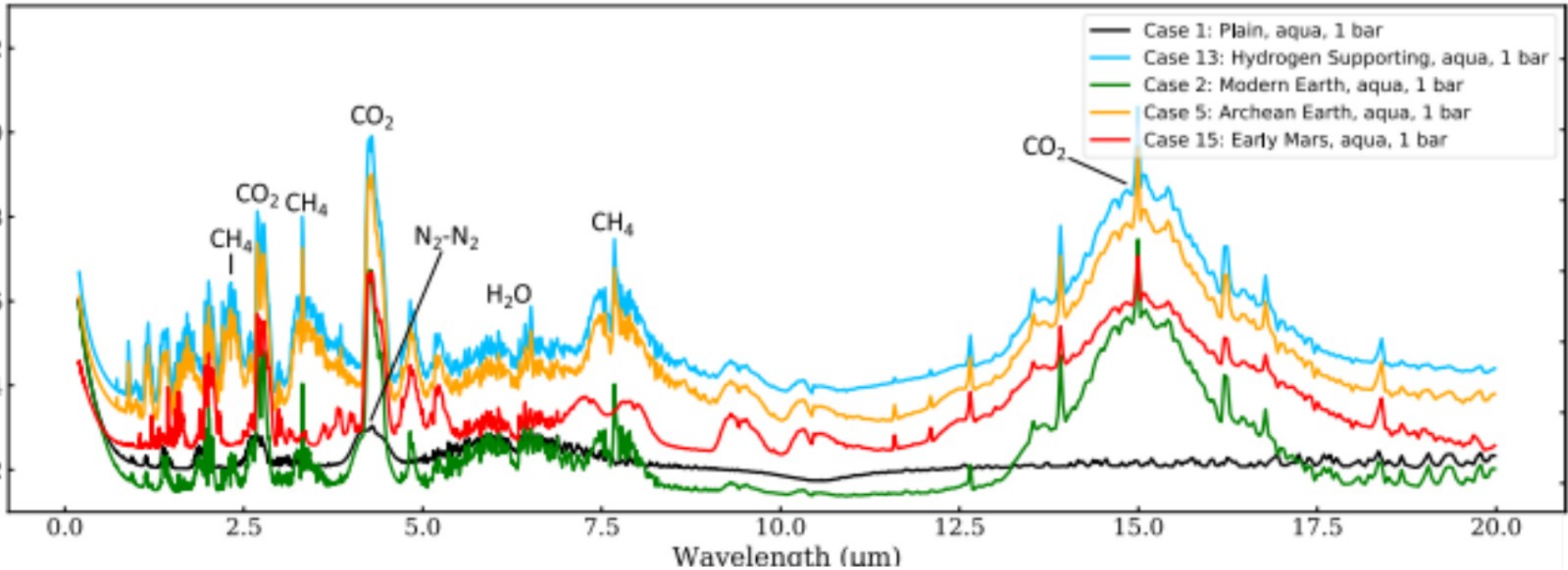
- Eclipses d'astéroïdes binaires



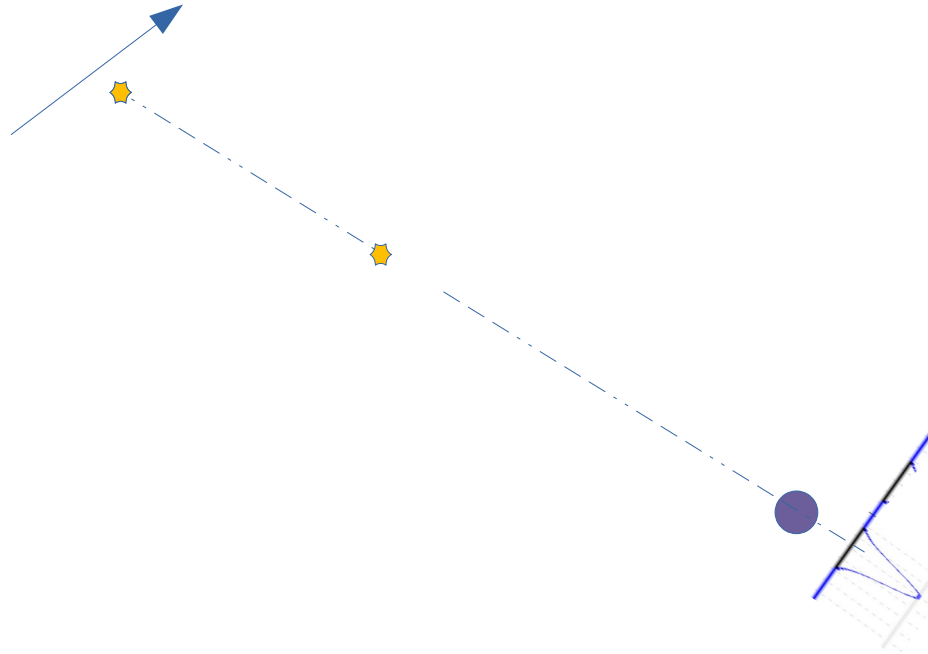
Exoplanètes

- Transits
- Microlentilles
- Astrométrie
- Détection radio
- Imagerie des transits
- Réflexion spéculaire de l'étoile par les océans
- Exolunes

Spectroscopie des transits

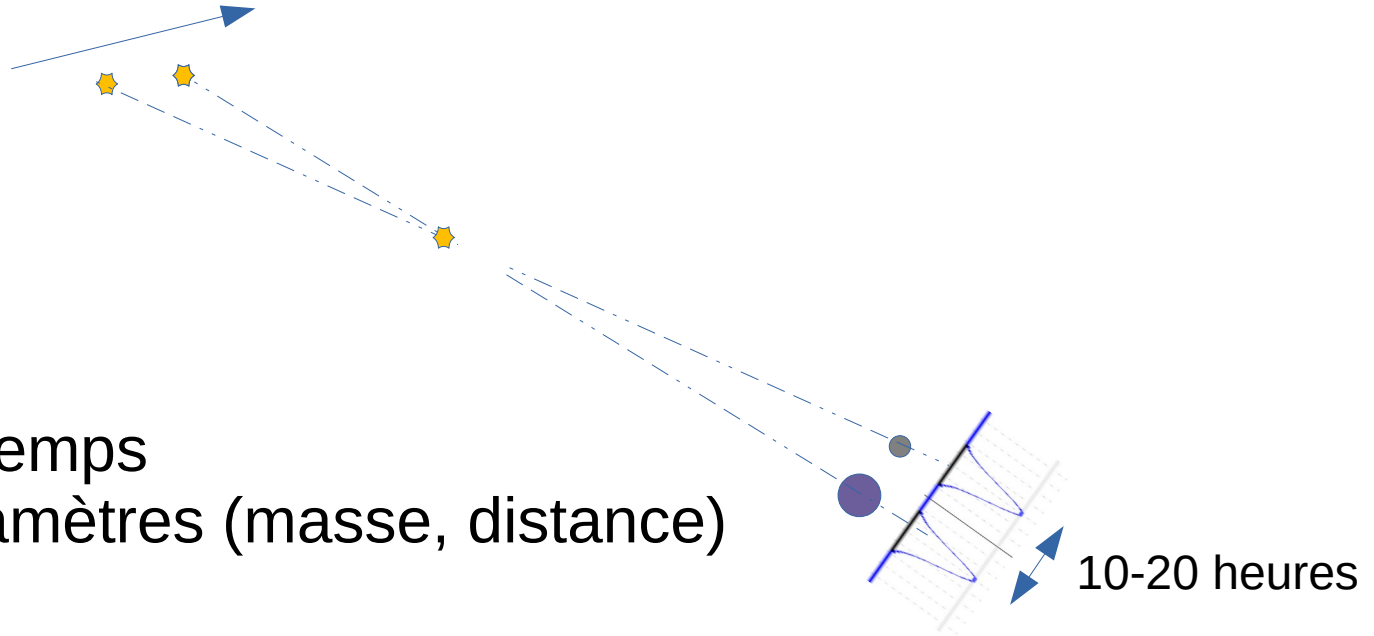


Microlentilles gravitationnelles



Microlentilles gravitationnelles

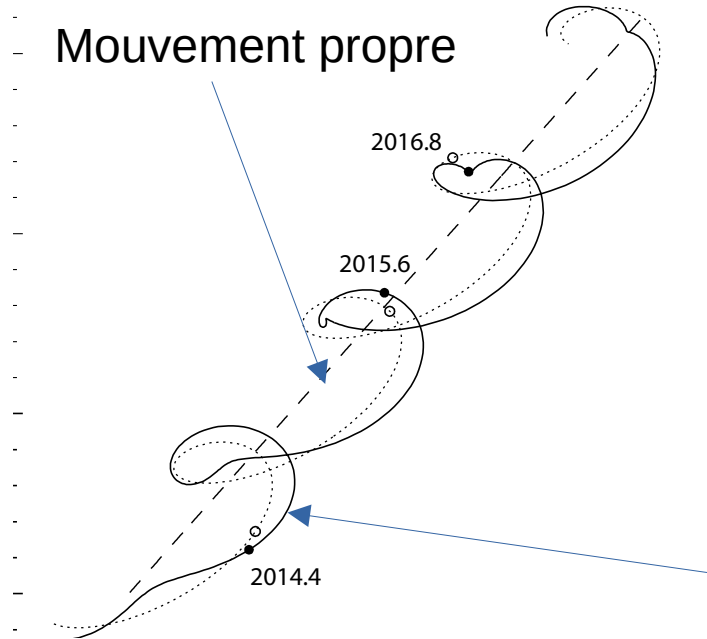
Effet de parallaxe Terre-Lune



Le décalage en temps
contraint les paramètres (masse, distance)

Astrométrie

Anomalie de mouvement propre de l'étoile parente



Planète de 1 Mjup à 100 pc
à 1 UA d'une étoile 1 masse solaire

Anomalie = $\sim 50 \mu\text{as}$
Sensibilité de Gaia : $25 \mu\text{as}$

Anomalie (Simulation Perryman)

Détection radio

Magnétosphère des exoplanètes
induites par le vent stellaire

Idée :

L'intensité du vent stellaire, donc le flux radio, varie comme (distance étoile-planète)⁻² ⇒ gain x 10.000 par rapport à Soleil-Jupiter (Lecacheux, Zarka ..)

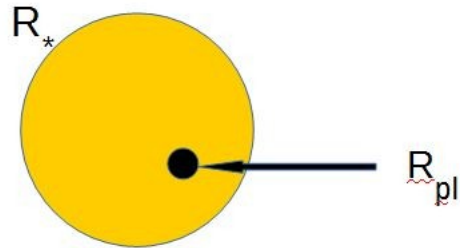
⇒ Favorise les «Jupiters chauds »

Permet d'aller plus loin que le système solaire

Imagerie à haute résolution angulaire des transits

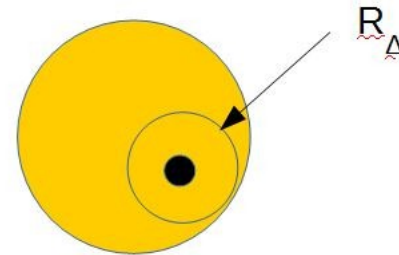
Baisse de flux de l'étoile

$$\left(R_{pl}/R_*\right)^2$$



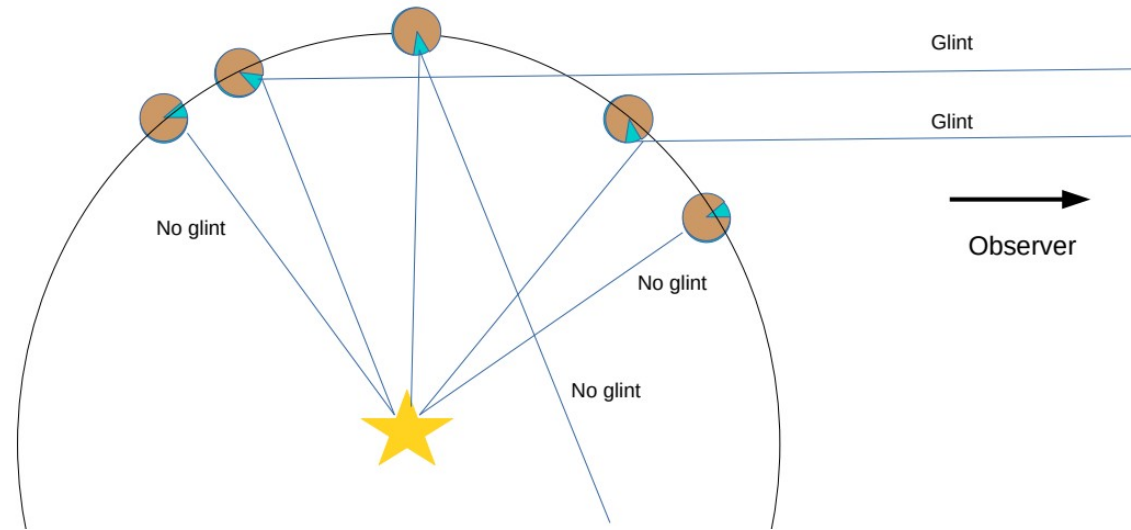
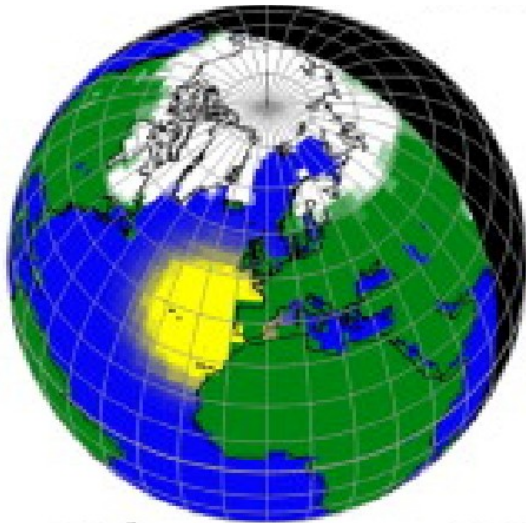
Baisse de flux dans un cercle de rayon R_Δ

$$\left(R_{pl}/R_\Delta\right)^2$$



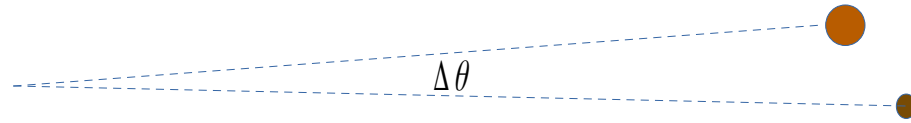
Gain en rapport signal à bruit : R_*/R_Δ

Réflexion spéculaire des exo-océans



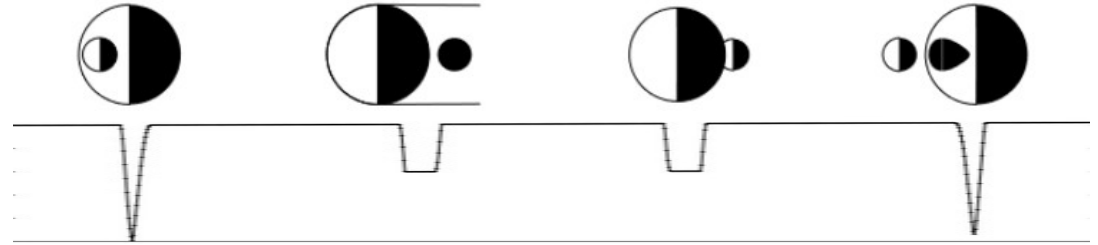
Exolunes

- Imagerie directe



$$\Delta \theta = \text{sep} / \text{distance} = 0.0002 \text{ UA} / 5 \text{ pc} = 0.4 \text{ mas}$$

- Imagerie indirecte :
perturbations du flux
de la planète
par occultations mutuelles

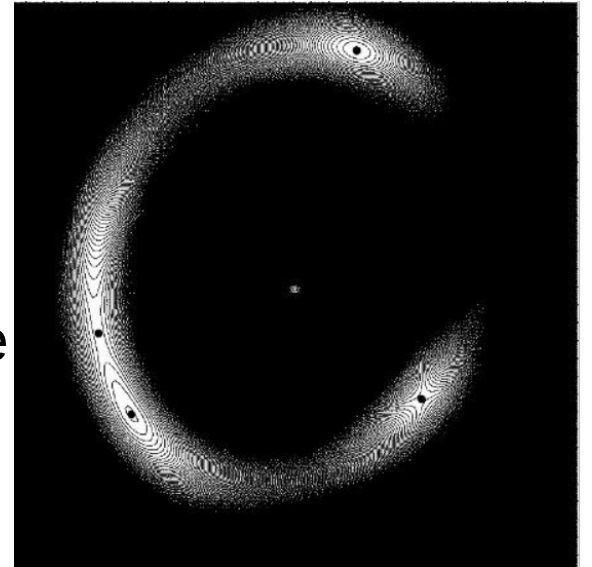


- Astrométrie de la planète parente

Physique stellaire

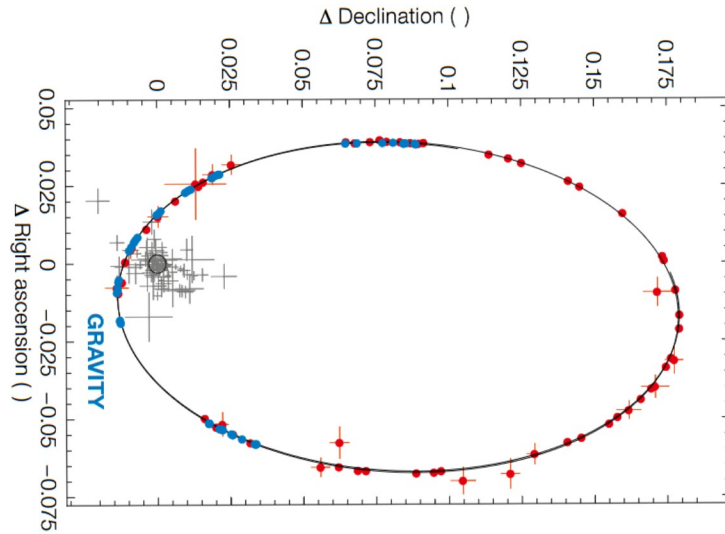
- Imagerie des disques circumstellaires
- Aplatissement des étoiles
- Lentilles gravitationnelles

Image de l'anneau d'Einstein d'une étoile à 8 pc par une étoile de $1 M_{\odot}$ à 6 pc sur la ligne de visée



Noyaux galactiques

- Orbite de S2 autour du noyau de la Galaxie

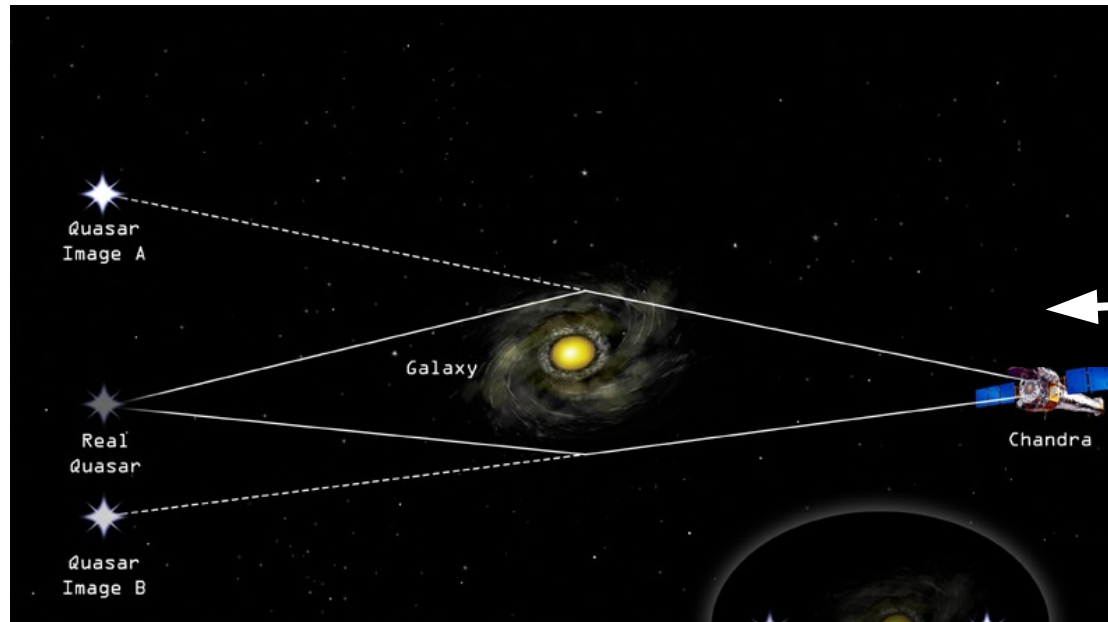


→ Propriétés du trou noir de Kerr

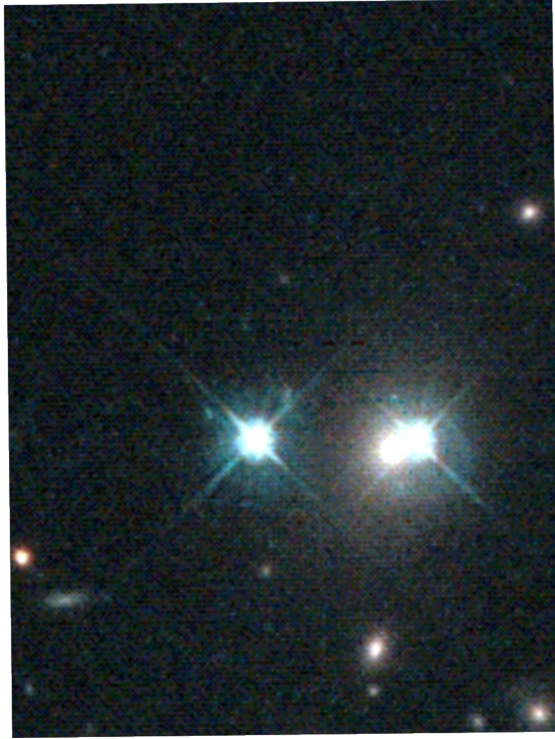
- Noyaux galactiques avec une resolution angulaire de 1 mas

Extragalactique

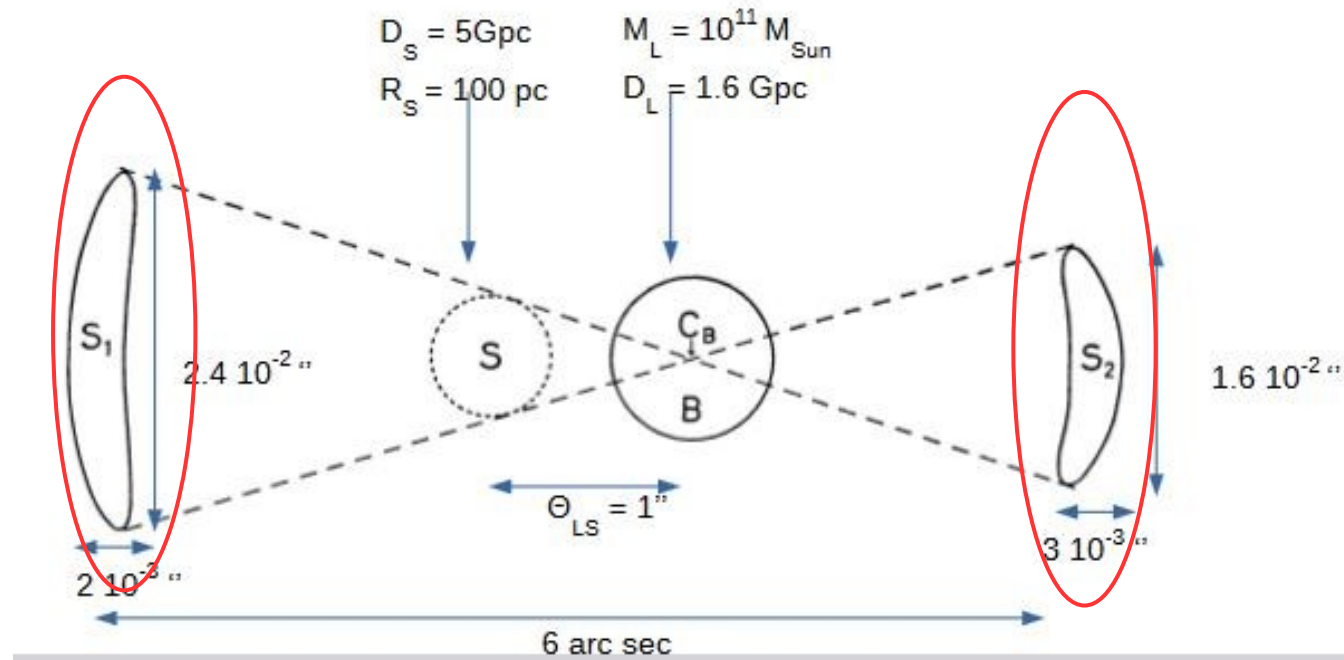
- Imagerie : Distribution de la matière noire
- Images dédoublées de quasars :
Déviation gravitationnelle de la lumière par une galaxie interposée



Extragalactique



QSO 0957+561



Ondes gravitationnelles

Explorer un nouveau domaine de fréquences des OG

- Sur Terre : LIGO, VIRGO
3 km
 $\nu = 10 \text{ Hz} - 10 \text{ Khz}$
Etoiles à neutrons binaires
- Dans l'espace : LISA
2.500.000 km
 $\nu = 0.1 \text{ mHz} - 100 \text{ mHz}$
Trous noirs binaires super-massifs ...
- Sur la Lune : 10 – 1000 km
 $\nu = 0.1 \text{ Hz} - 10 \text{ Hz}$
Etoiles à neutrons binaires
à grand redshift

Cosmologie

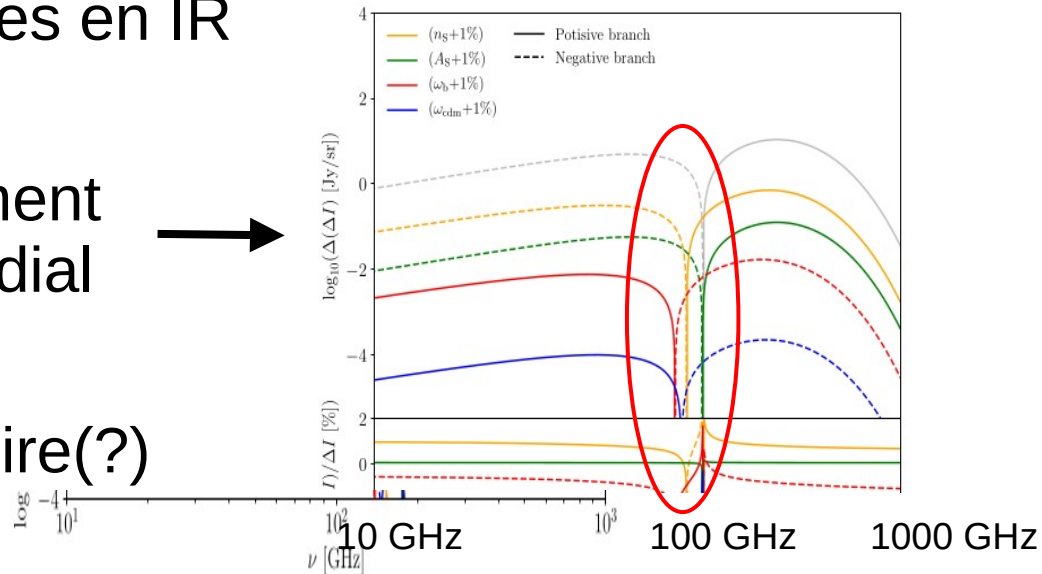
- Observer la raie à 21 cm (1.4 GHz) de l'hydrogène dans les galaxies primordiales.

A un redshift de $z = 30-100$ elle est décalée à 10-30 m (30-10 MHz)

- Formation des galaxies en IR

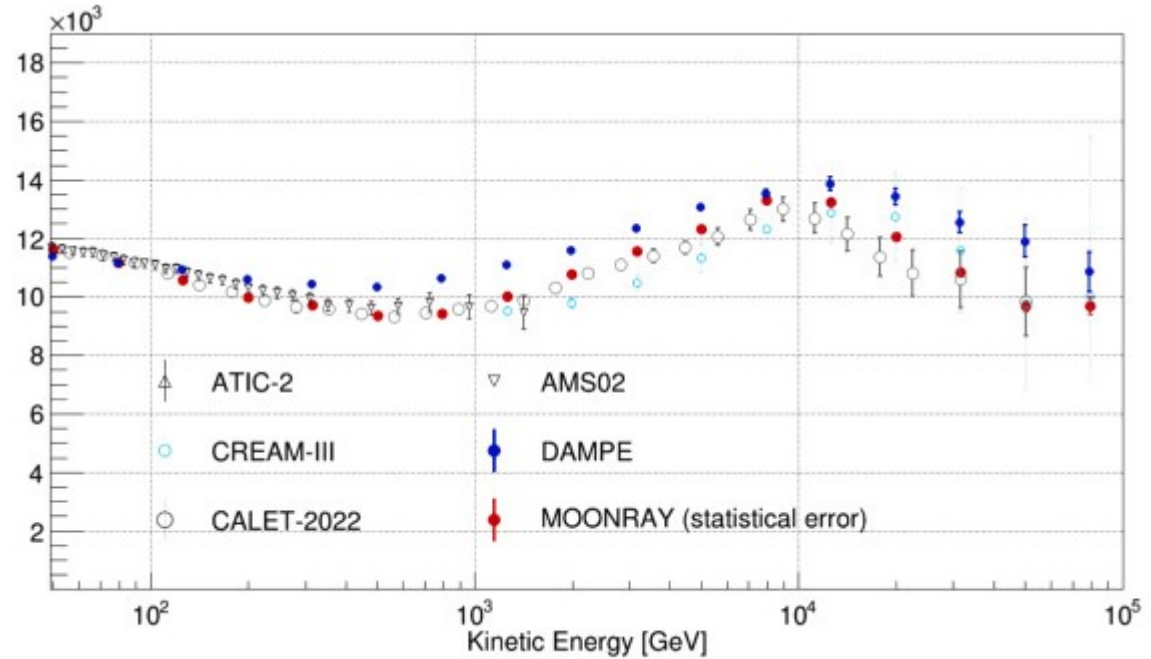
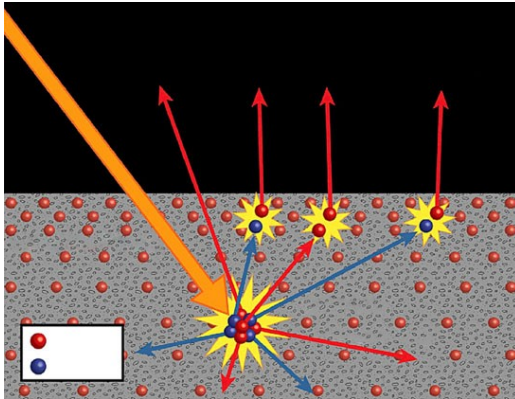
- Distorsion spectrale du fond du rayonnement cosmologique primordial à ~ 100 GHz

- Etoiles de matière noire(?) de type JADES-GS-



Rayons cosmiques

- Vent solaire
- Améliorer le spectre en énergie →
- Physique de l'interaction avec le sol lunaire ⇒ structure du régolithe



Physique Fondamentale

Désintégration du proton

Une prédiction : $p \rightarrow \bar{\nu} K^+$

Durée de vie 10^{34} ans

Indétectable sur Terre à cause du bruit de fond des rayons cosmiques produits dans l'atmosphère

Pas d'atmosphère sur la Lune.

Collisions de particules à >10 PeV (1000 x le LHC du Cern)

Physique Fondamentale

Test de la Mécanique Quantique

Le problème :

Un fait : les résultats de mesures sont imprédictibles

Deux philosophies

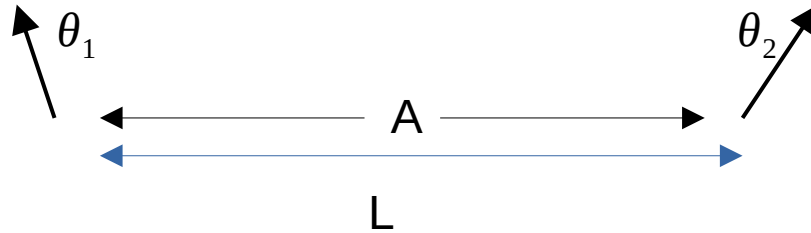
- Modèle « réaliste : distribution probabiliste sous-jacente :
Une grandeur a une valeur bien définie avant la mesure
- **Mécanique Quantique** :
Une grandeur ne prend une valeur qu'au moment de la mesure
⇒ Pas de « réalité en soi »

Physique Fondamentale

Test expérimental :

Mesures à une distance L de la polarisation $P(\theta)$ de deux photons émis par un atome A

« expériences d'Alain Aspect »



Physique Fondamentale

Théorème de Bell :

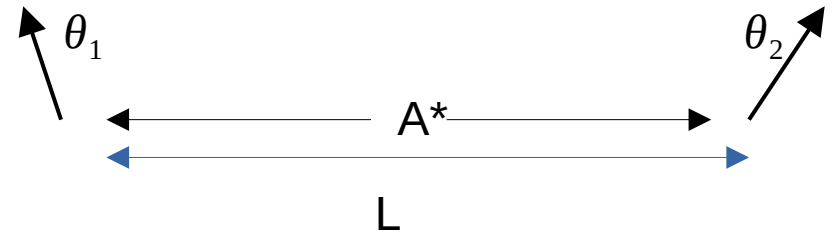
- Il existe une quantité F telle que :
- pour **tout** modèle réaliste : $F < 2$
 - **MQ** : $F = 2\sqrt{2}$ **quelle que soit L**

Prédiction de la MQ vérifiée sur $L = 1200$ km
⇒ Rejet de tout modèle « réaliste »

Modèle « réaliste » de Bohm : $F = F(L)$ telle que

- compatible avec MQ pour $L < L_0$ ($L_0 = ? > 1200$ km)
- $F(L) \neq$ prédiction quantique pour $L > L_0$

Proposition 2009 : mesurer F pour $L =$ distance Terre-Lune $F = F(L) \neq 2\sqrt{2}$?



Mise en œuvre

> 10.000 documents

- Missions passées et en cours
- Les questions ouvertes
 - Robotique ou présence humaine ?
 - Localisation des télescopes
- Projets
 - Missions programmées
 - Projets et idées de télescopes
 - La logistique
- Les problèmes
- Les acteurs

Les missions passées et en cours

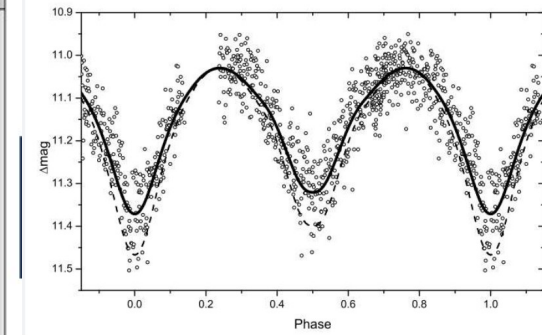
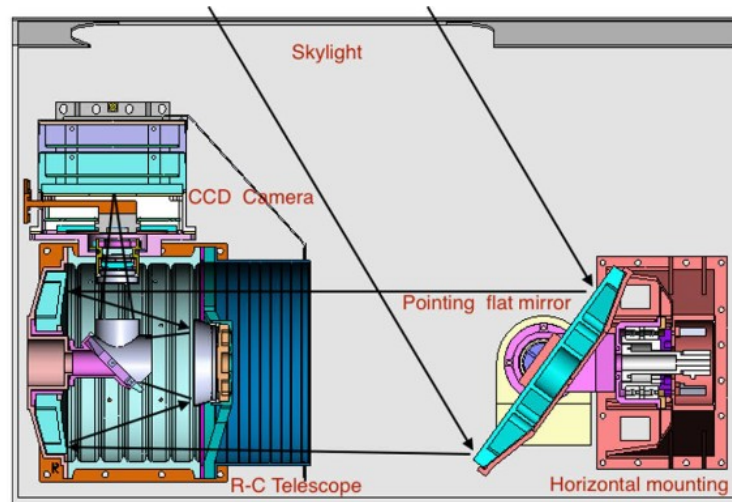
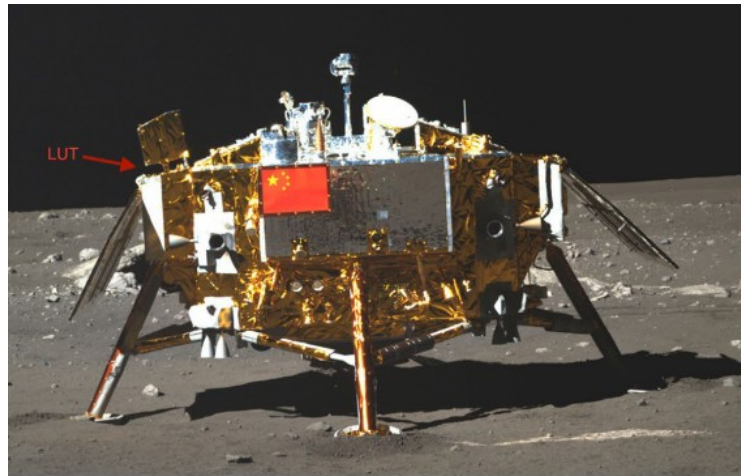
- Apollo : 1969 – 1972
- Luna : 1959 - 1976
- Chang'e 1 : 2007
- Cgang'e 2 : 2010
- Chang'e 3 : 2013
- Chang'e 4 : 2018
- Chang'e 5 : 2020 (retour d'échantillons)
- Artemis I : 2022
- SLIM (Japon) 2023 alunisseur
- Peregrine (Astrobotics) : 2023 alunisseur
- Chandrayaan (Inde) 2024 alunisseur
- ILO-X : Fev. 2024 précurseur de ILO-1 et ILO-2 (ILOA)
- IM-1 (Intuitive Machines) 2024 6 instruments pour l'étude du sol
- ROLSES : 22 Février 2024 détecteur 10 kHz à 1 MHz
- Chang'e 6 : 3 Mai 2024 (instrument Dorn du CNES)
- Blue Ghost : 15 Jan. 2025 étude du sol
- Resilience et Tenacious : 15 Jan 2025 Rovers

Premier télescope en service

LUT Lunar Ultraviolet Telescope (Wang et al. 2015)

15 cm sur Chang'e 3

Mesures photométriques pendant 18 mois de 17 étoiles



V921 Her

Les questions ouvertes

Robotique ou présence humaine ?

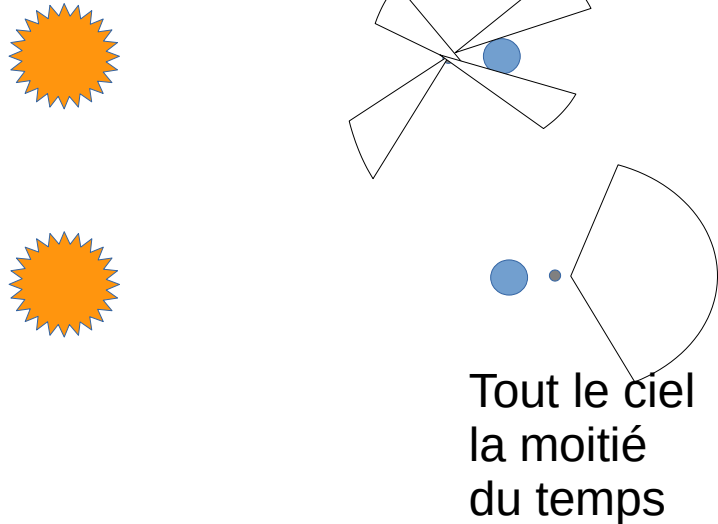
- La présence humaine apporte des complications (\Rightarrow coûts) : habitats etc
- Mais la présence humaine indispensable pour des opérations délicates
- Un fait : motivations de prestige et de goût de l'aventure

Localisation des télescopes : dépend des objectifs

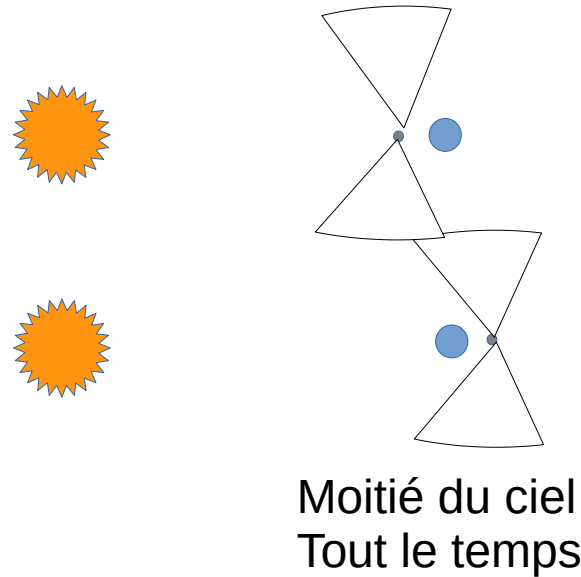
- Face visible : observations en direction de la Terre
- Face cachée : moindre pollution radio par la Terre
- Pôles ou équateur ?
 - Pôles : une moitié du ciel tout le temps
 - Equateur : gêne temporaire du Soleil et/ou de la Terre
- Zones à l'abri du soleil : pour l'infrarouge
- Zones à moindre poussières pour le Vis. et l'IR

Localisation des télescopes

Télescope
à l'équateur



Télescope
au pôle



Cratère de Shackleton
(pôle sud) à l'ombre
tout le temps

Projets et idées

- Missions programmées
- Projets de télescopes
- La logistique

Les missions programmées

- 2025 : IM-2 : forage du sol
- 2025 : IM-3 : mesures magnétiques
- 2025 : Freedom (Lonestar)
- 2025 : PRISM : sismologie de la face cachée
- 2025 : Lunar Trailblazer : détection de l'eau
- 2025 : Griffin : tests d'alunissage
- 2025 : Garatea-L (Brésil): biologie
- 2026 : Firefly : test de communication avec la face cachée
- 2026 : Artemis 2 : Mission habitée circumlunaire
- 2026 : Chang'e 7 : glace au pôle sud
- 2026 : Beresheet-2 (Israël) Rover
- 2026 : Artemis 3
- 2027 : Artémis 4
- 2027 : IM-4 : PROSPECT (ESA)
- 2027 : Luna 26 (Russie)
- 2027 : Rashid-2 (EAU)
- 2028 : Chang'e 8
- 2029 : Artemis 5
- 2030 : astronaute chinois
- 2031 : Artemis 6
- 2032 : Artemis 7

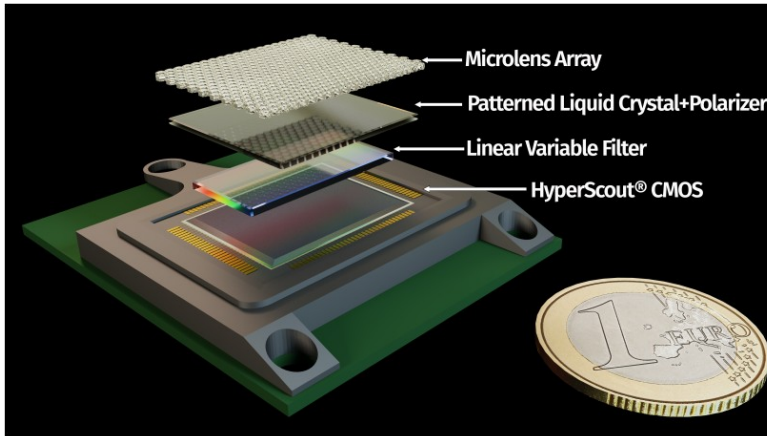
Projets et idées de télescopes

- Loupe : 3cm (Pays-Bas – Daphne Stam) Observation monopixel de la Terre comme exoplanète
- LUCI Lunar Ultraviolet Cosmic Imager : 8 cm (Inde)
- LESTER (Transits 30 cm) Soumis à la NASA
- Louve : 30 cm en UV (Idée soumise à l'ESA - David Ehrenreich)
- LFAST : réseau de télescopes pour spectro. Des transits d'exoplanètes
- ELT lunaire (Idée soumise à l'ESA – J. Silk et al.)
- Interféromètres (P. Kervella, G. Van Bell, NASA)
- Hypertélescope (A. Labeyrie)
- Infrarouge
- Radiotélescopes
- Télescopes X
- Détecteurs de rayons cosmiques
- Détection d'ondes gravitationnelles (A. Loeb – Ph. Lognoné et al.)

Loupe (photo-polarimètre)

LOUPE : Soumis à Netherlands Space Office (NSO)

15 X 20 X 40 cm³ 1



- Construit par Cosine

Prêt pour un lancement en passager

Télescopes de 30 cm

LOUVE (D. Ehrenreich)

Idée soumise à l'ESA

Télescope de 30 cm en UV

Suivi des quasars variables

LUSTER

Télescope de 30 cm

Spectroscopie des transits
d'exoplanètes 300-400 nm

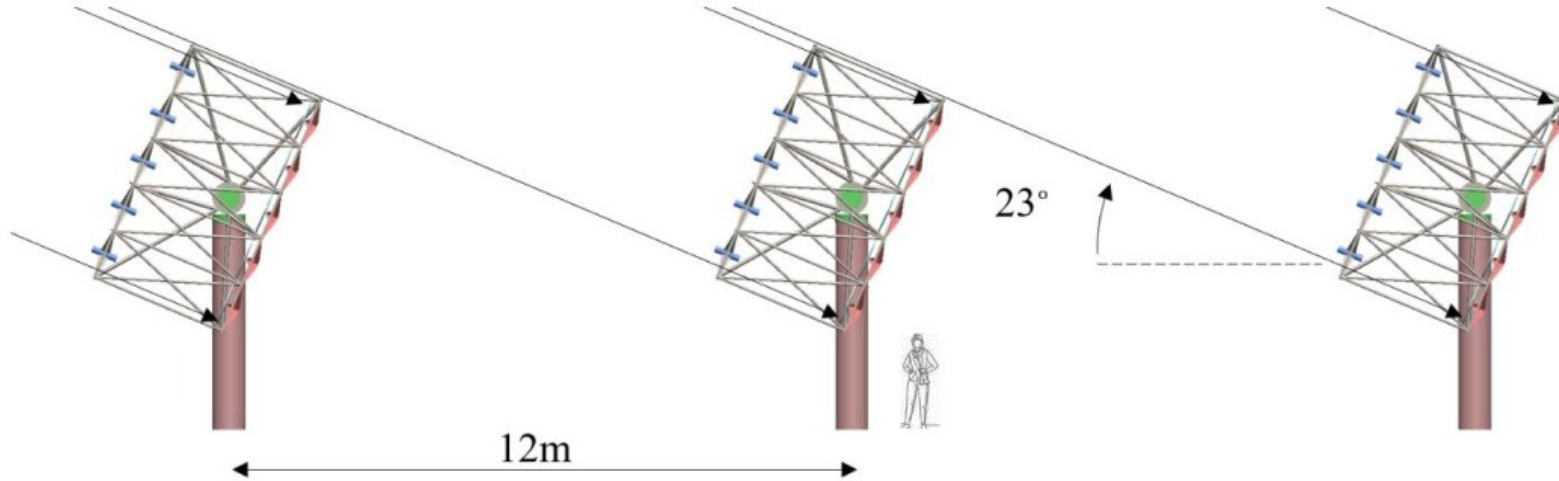
Soumis au programme
« Payloads and Research
Investigations on the Surface of
the Moon » (NASA)

Candidat passager d'un lancement
en 2028

Large Fiber Array Spectroscopic Telescope

LFAST (R. Angel)

Spectroscopie des transits



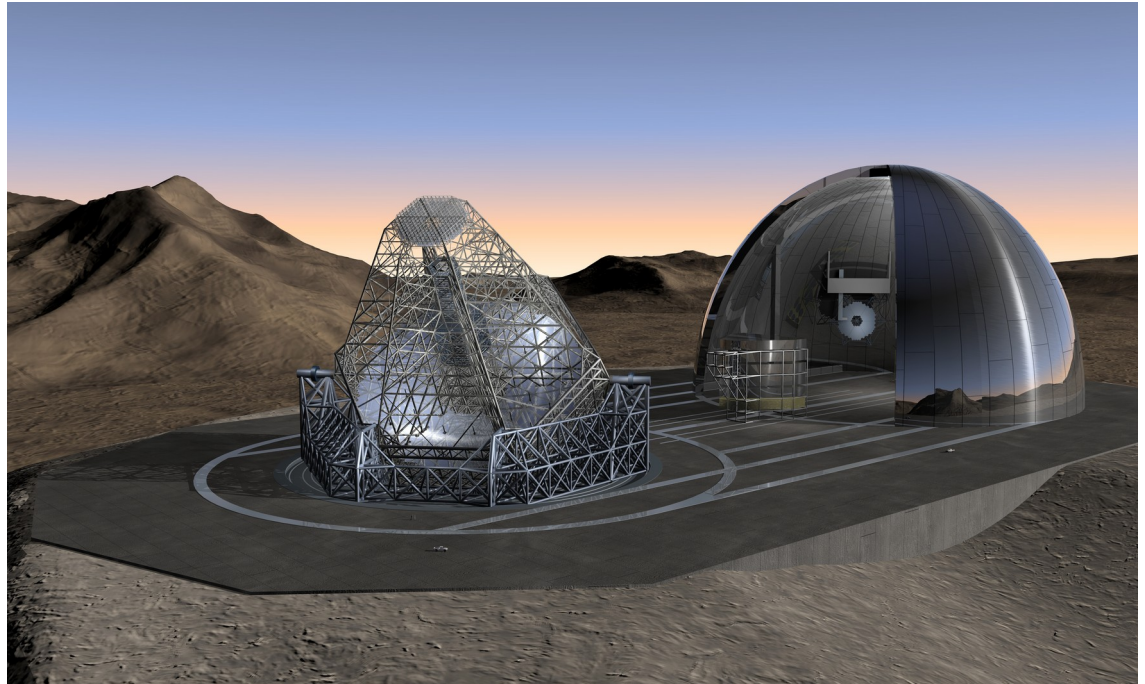
Lunar-ELT (L-ELT)

E-ELT : 39 m L-ELT : $39\text{m} \times (\text{gravité Terre}/\text{gravité Lune}) = 240\text{m}$

Coût : 240m \implies 50 m (« OWL-Moon » Silk et al.)

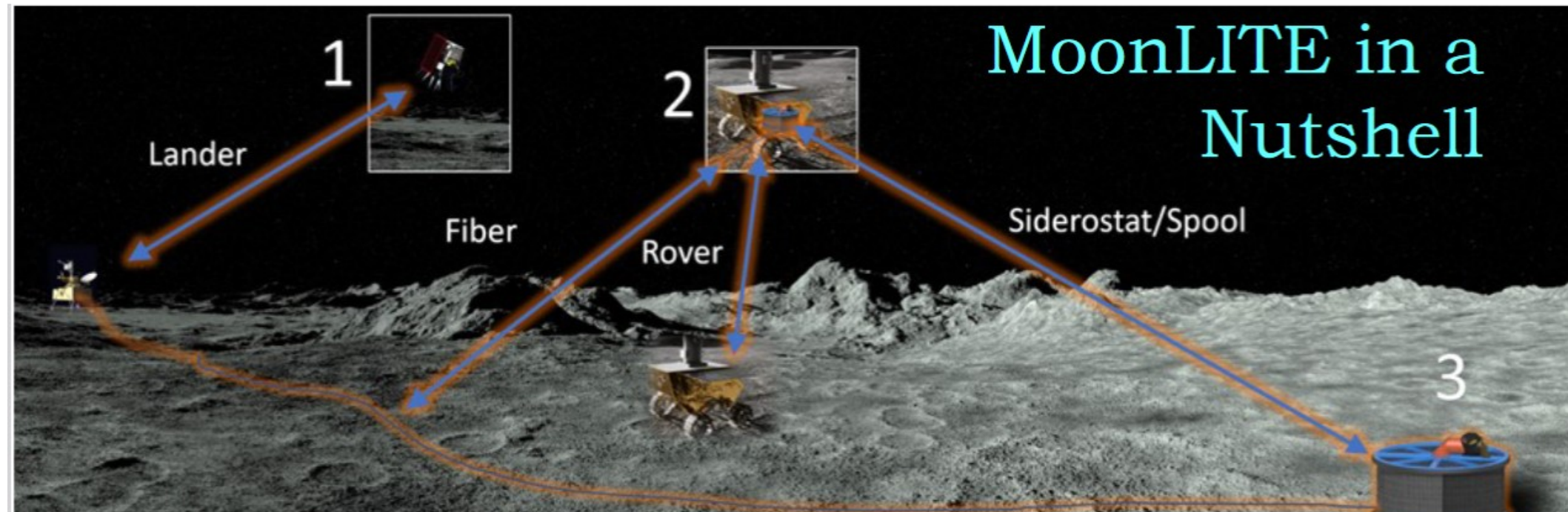
Héritage du projet OWL

« **O**ver**W**helmingly **L**arge
Telescope » 100 m (ESO)



Interféromètres

MoonLITE (G. Van Belle) : télescopes et fibres mis en place par rovers



Interféromètres

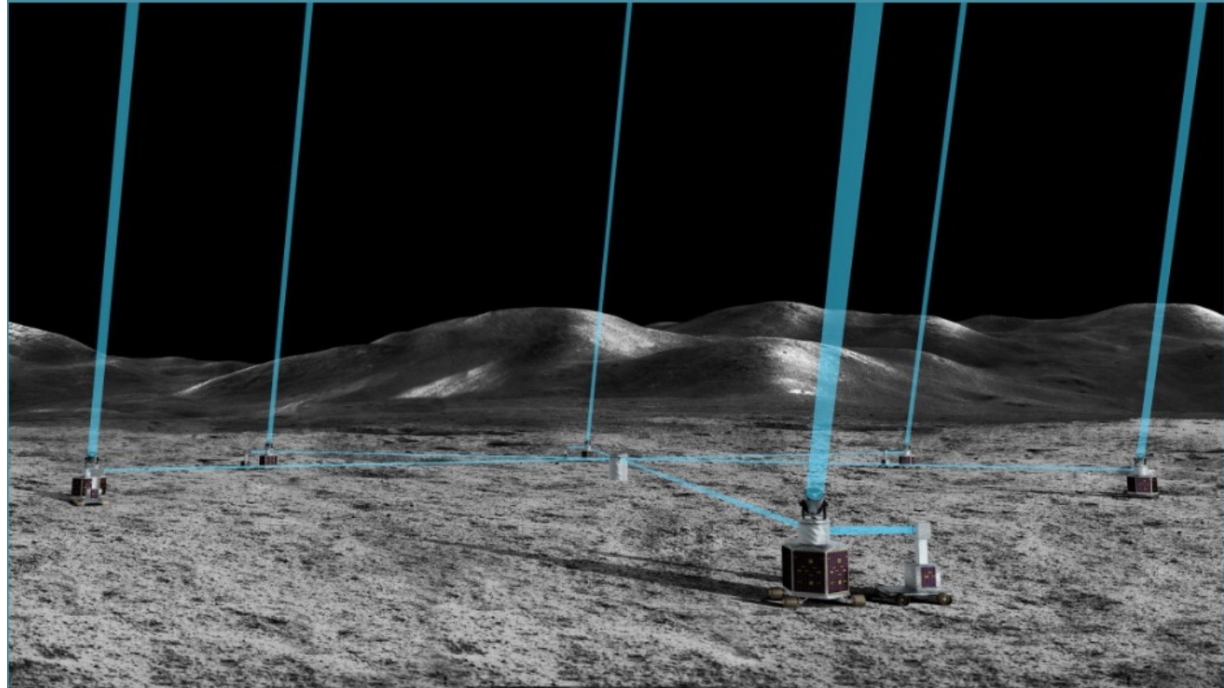
AeSI : Artemis-enabled Stellar Imager

Etude NASA en cours

6 télescopes

Base 500 m

Particularité :
élimination robotisée
de la poussière



Interféromètres

Projet de R. Angel :

4 télescopes de 6,5 m sur une monture unique au pôle sud
Ligne de base 40 m

⇒ Résolution angulaire à 1μ : 5 mas

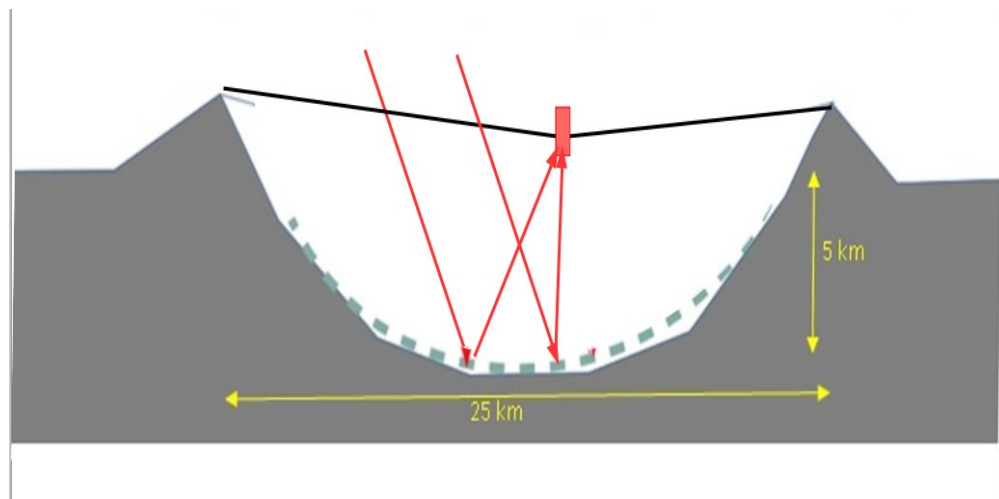
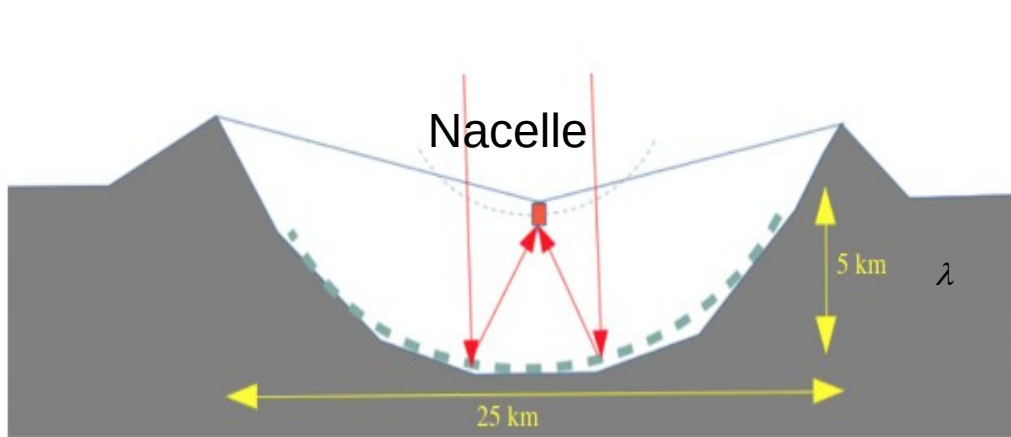
Pour l'imagerie des exoplanètes, élimination
de l'éblouissement de l'étoile par auto-interférence destructive
(« nulling »)

Interférométrie d'intensité

- L'interférométrie d'intensité consiste à corrélérer entre eux des comptages de photons détectés par deux ou plusieurs télescopes dans une bande spectrale très étroite et avec une résolution temporelle de l'ordre de 10^{-12} sec.
- Elle est utilisée sur Terre pour observer Sirius avec des télescopes de 25 cm
- Sur la Lune l'absence d'atmosphère en améliore les performances et on peut mettre à profit les réseaux de télescopes des interféromètres classiques.

Hypertélescope

Dans un cratère : $N > 100$ miroirs disposés sur un paraboloïde
(A. Labeyrie)



Avantages sur un interféromètre classique :

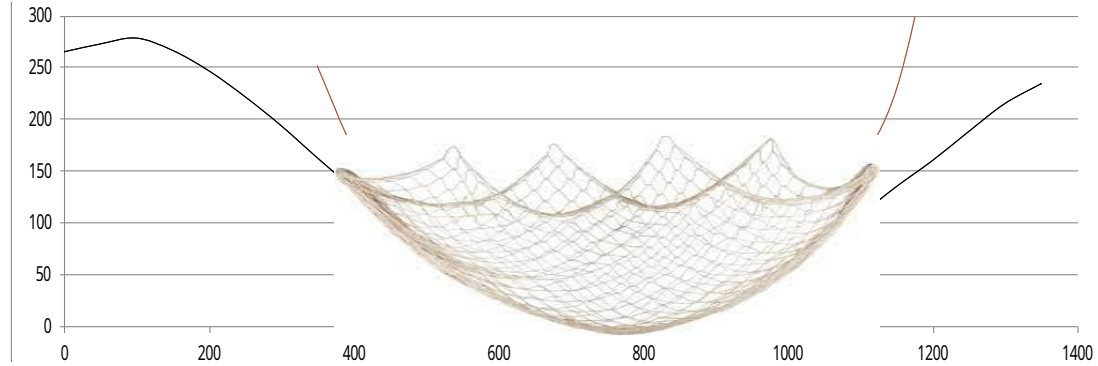
- pas de lignes à retard
- très grande surface collectrice
- très grande résolution angulaire : $\sim \lambda/D \times (\text{séparation}/\text{taille miroirs})$
 $= 10 \mu\text{arcsec}$ pour $\lambda=0.5\mu$, $D = 1 \text{ km}$

Hypertélescope

Montage dans le cratère Anderson

Selected Crater

- Diameter: 1.33 km
- Depth: 275 m
- Depth to Diameter ratio: 0.21
- Location: 14.93497°N, 170.05050°E



Treillis attaché aux bord du cratère

Infrarouge

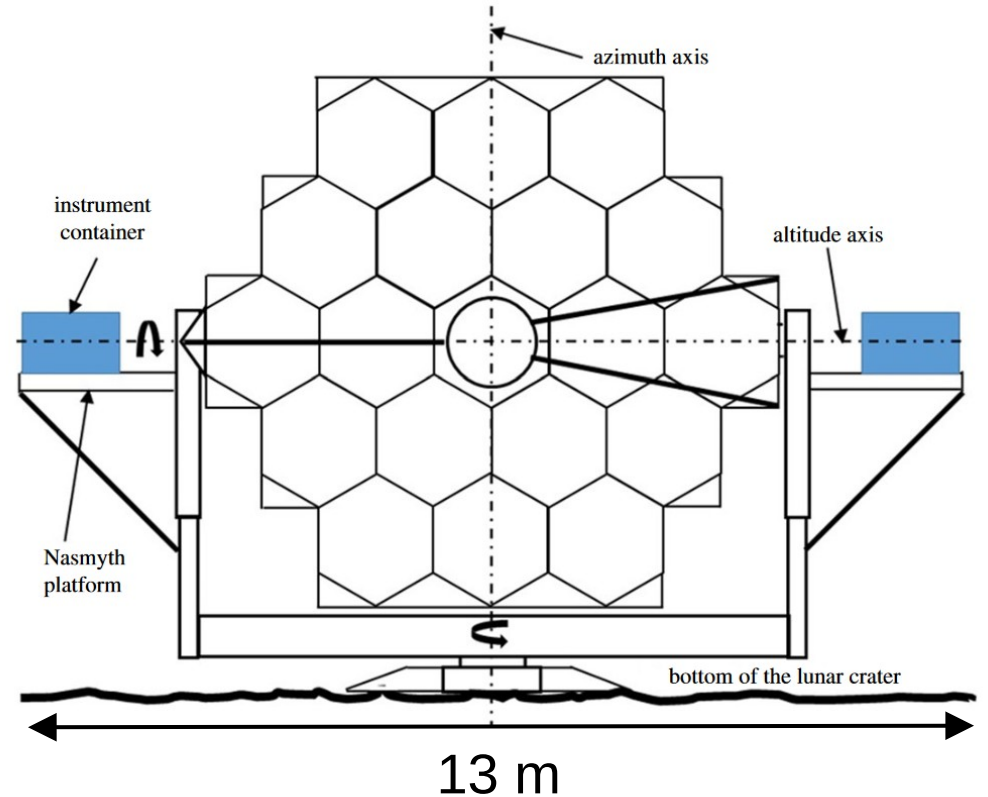
ALLURE

Astronomical **L**arge **L**unar
Explorer

galaxies etc.

Au pôle sud (à l'abri du Soleil)

(J.-P. Maillard)



Infrarouge

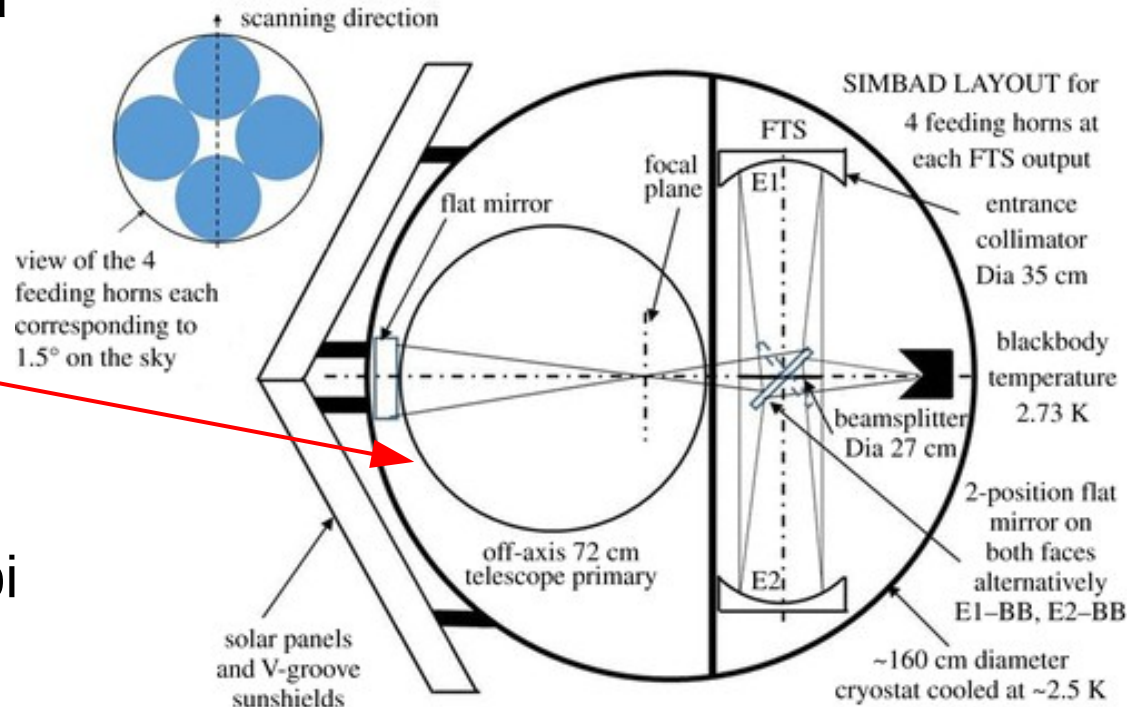
SIMBAD Spectroscopic Interferometer for Microwave **BA**ckground **D**istortions (J.-P. Maillard)

Mesure de la distorsion spectrale du fond cosmologique primordial (3K)

Spectrographe infrarouge à transformée de Fourier

Miroir principal 72 cm

50 x plus sensible que PIXIE
Primordial Inflation Explorer - en orbi

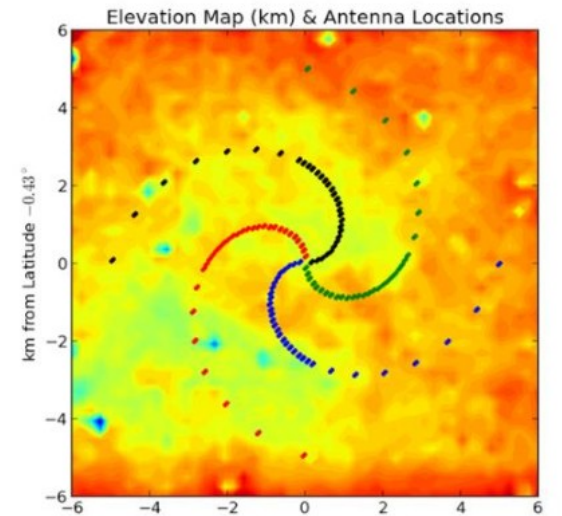
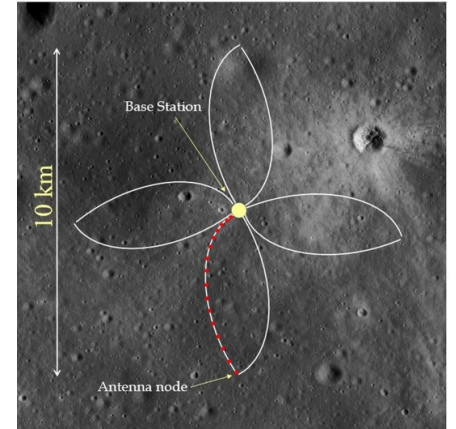


Radiotélescopes

- **FARSIDE** **F**arside **A**rray for **R**adio **S**cience **I**nvestigations of the **D**ark ages and **E**xoplanets : 128 antennes
- **FARVIEW**
- **LARAF** : détection de la raie à 21 cm pour des redshifts $z = 30-50$
- **ROLSES** (Radio wave Observation at the Lunar Surface)
- **ALO** **A**stronomy **L**unar **O**bservatory < 30 MHz

FAR SIDE

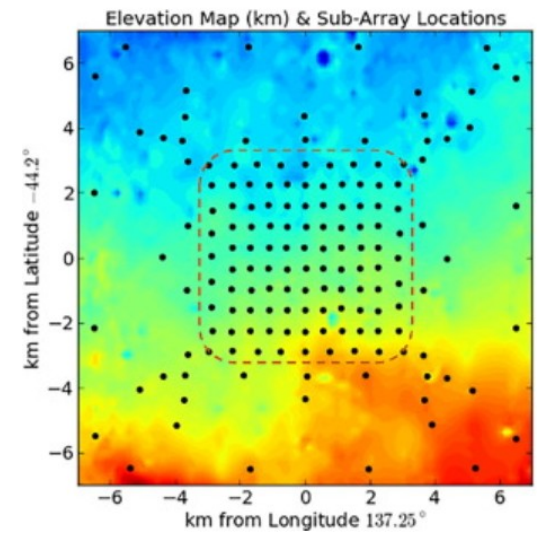
128 paires de dipôles sur 10 kmx10 km
« Pathfinder » de 1 km avec 50-100 dipôles



FarView

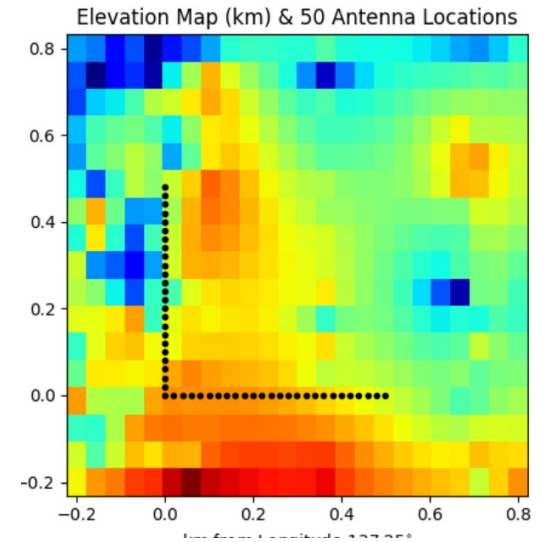
Un LOFAR lunaire

100.000 antennes sur 10 km x 10 km



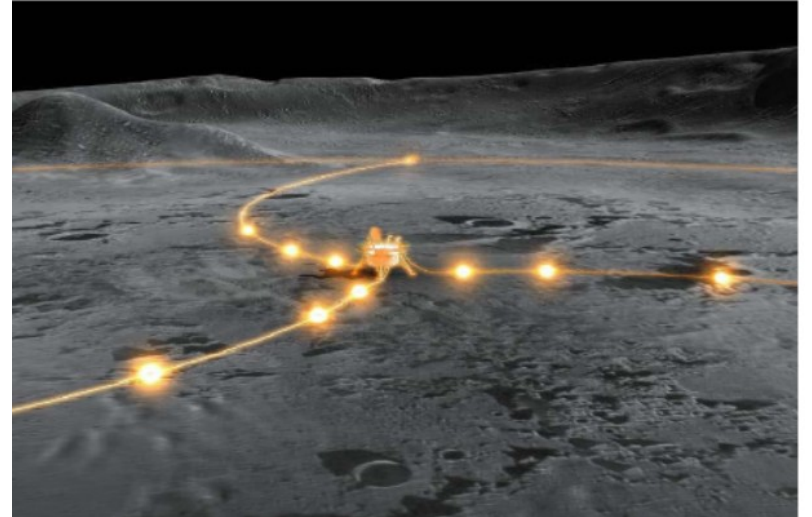
Précurseur

Précurseur de 1 km avec 50-100 dipôles
0-40 MHz



ALO Astronomy Lunar Observatory

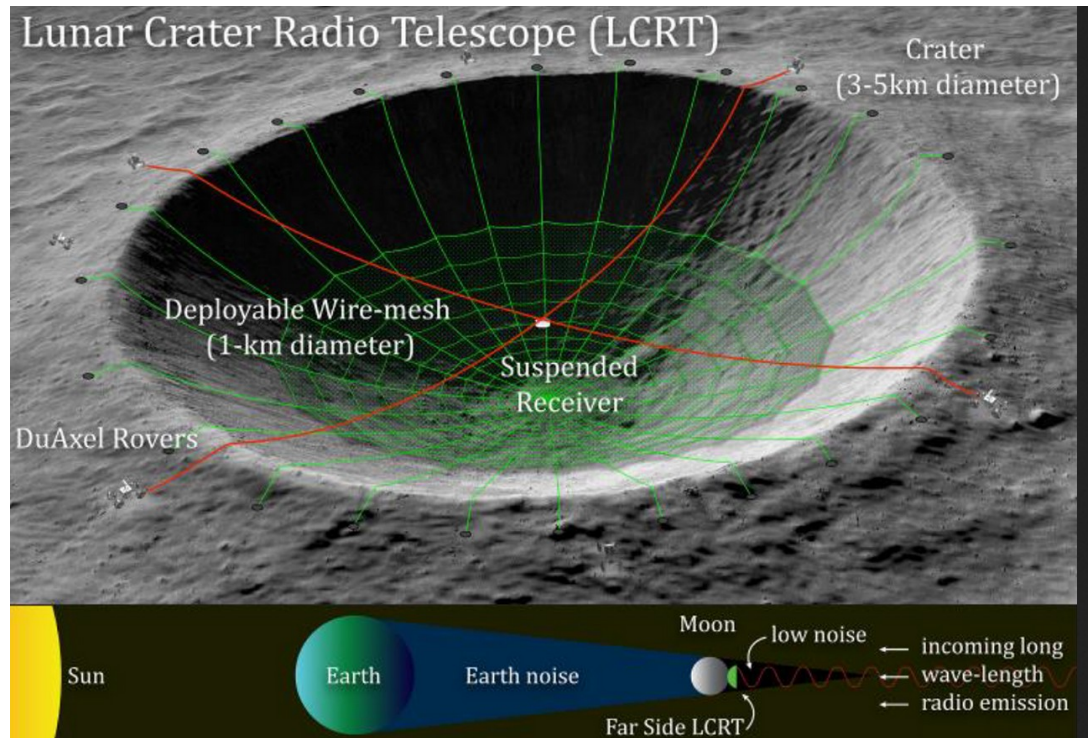
- Concept: Réseau d'antennes déployé sur la face cachée de la Lune. 100 antennes
 - Mise à poste avec Argonaut (ESA)
 - Etudes en cours
- Objectif scientifique principal: cosmologie (Univers jeune)



Lunar Crater Radio Telescope (LCRT)

Projet NASA
Face cachée de la Lune

Combiner avec l'hypertélescope ?



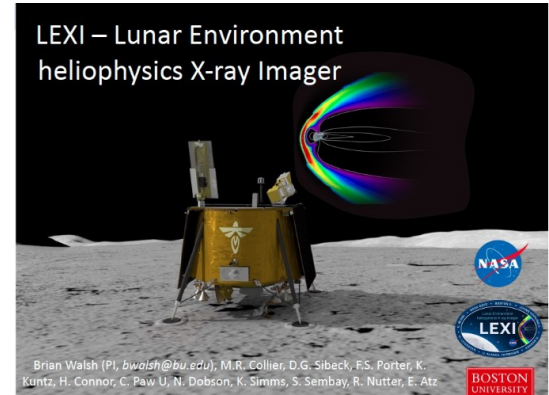
LUNES : **LUN**ar t**E**rahertz tele**S**cope (soumis à ESA Voyage 2050)

Radio-interférométrie Terre-Lune

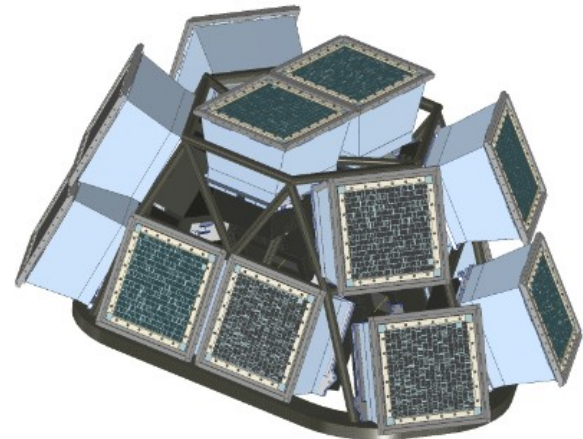
- Résolution angulaire $\delta\lambda$ pour une longueur d'onde λ est $\delta\lambda = \lambda/360.000$ km
 - $\delta\lambda = 10$ μ arcsec à 10 GHz
 - $\delta\lambda = 0.4$ μ arcsec à 300 GHz

Astronomie X

LEXI (NASA) :
Détection en X de l'interaction
magnétosphère terrestre-vent solaire



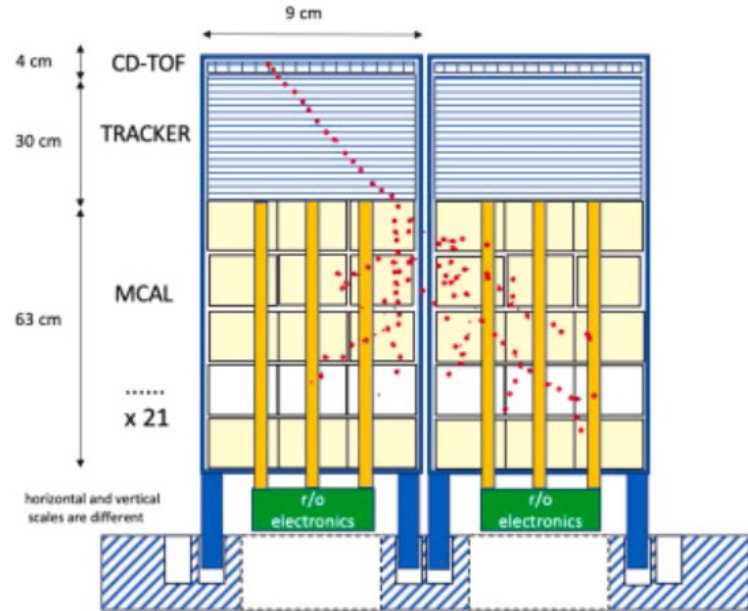
LEM-X (Italie) 2-50 keV
Tests labo en cours



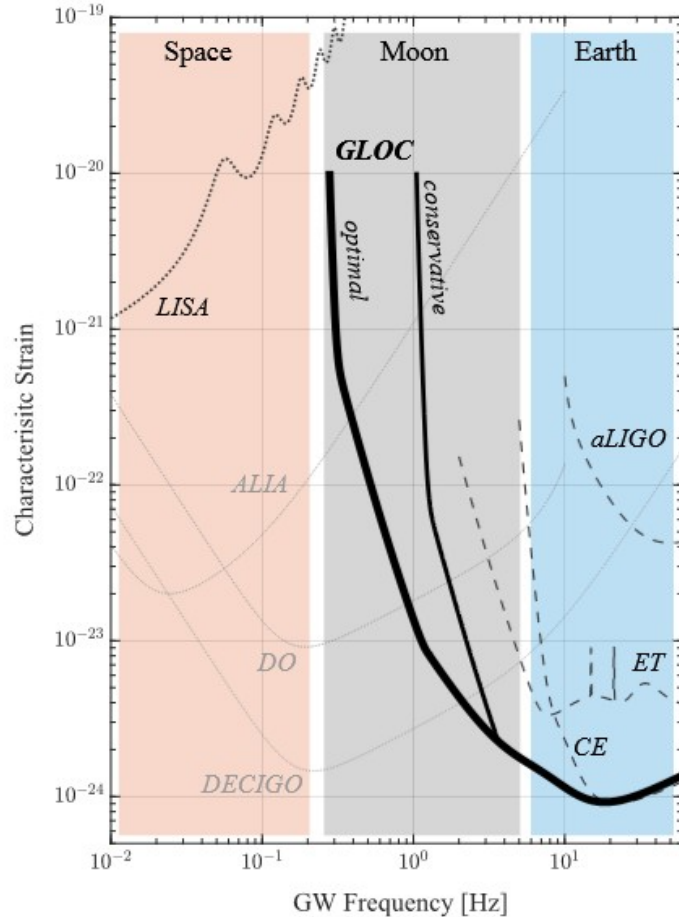
Rayons cosmiques

MoonRay (Agence Spatiale Italienne) : $> 10^{12}$ eV

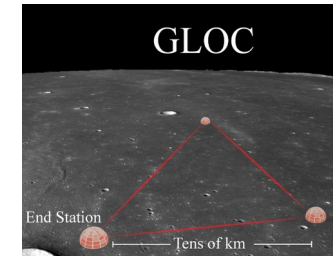
- Réseau de 100 détecteurs : 9cm x 9cm x 1m
- Exemple : 2 détecteurs adjacents



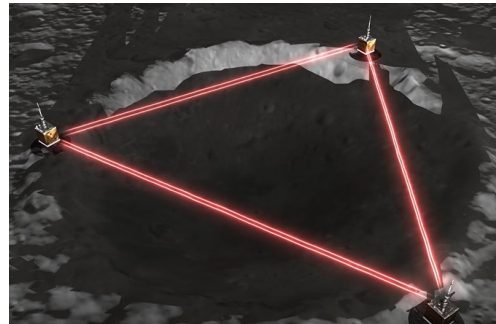
Détecteurs d'ondes gravitationnelles



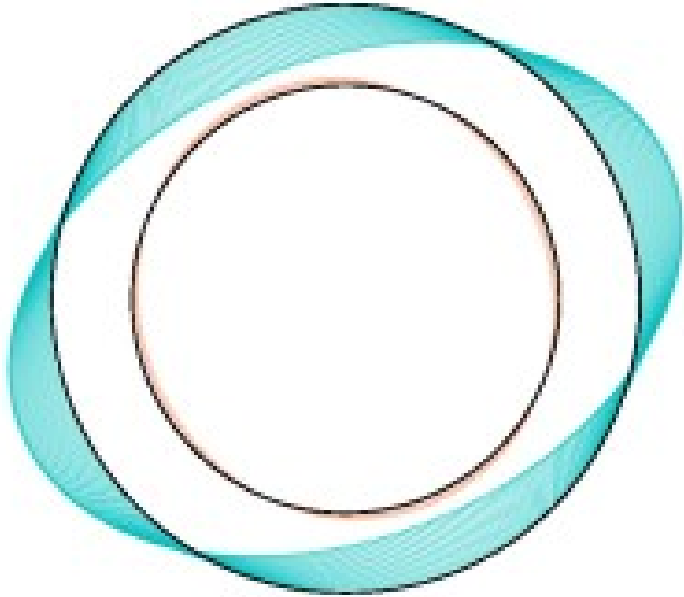
GLOC (A. Loeb)
Gravitational-wave
Lunar **O**bservatory
for **C**osmology



LILA (IPGP – USA)
Laser **I**nterferometer **L**unar **A**ntenna 0,1 – 10 Hz



La Lune comme résonateur gravitationnel

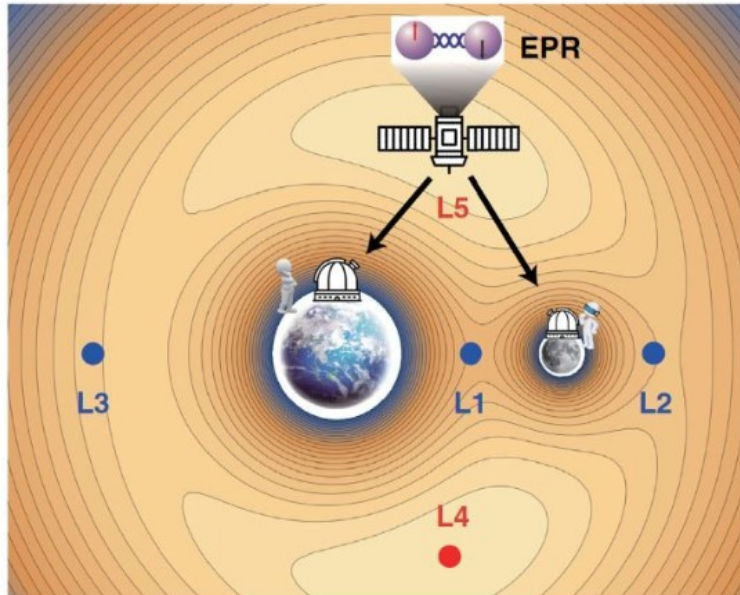


Déformation à 1 mHz pour 2 trous noirs: 10^{-11} cm
Virgo : détection à 10^{-21} cm de la variation
de la distance entre miroirs

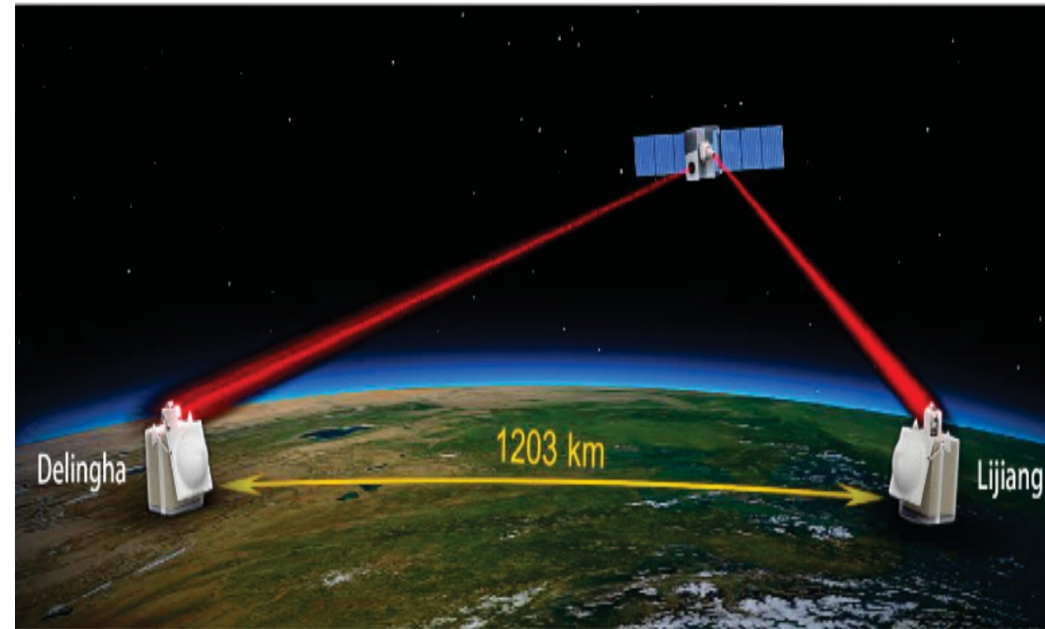
Problèmes : bruits (sismique, mouvements
de la Lune)

Physique fondamentale

- Désintégration du proton : traces de $p \rightarrow \bar{\nu} K^+$ dans l'olivine souterraine lunaire protégée des cosmiques
- Corrélations quantiques Terre-Lune Chine 2035 (Cao et al. 2018)



Micius : précurseur Terre-espace (2017)



Logistique

Pas d'Astronomie depuis la Lune sans infrastructures

- Connaissance du terrain
- Ressources in situ (**In Situ Resource Utilization ISRU**)
- Robotique
- Présence humaine
- Fabrications in situ
- Transports
- Télécommunications
- Sources d'énergie
- Fuseau horaire lunaire : « Temps Lunaire Coordonné »
- Simulations préparatoires en laboratoire

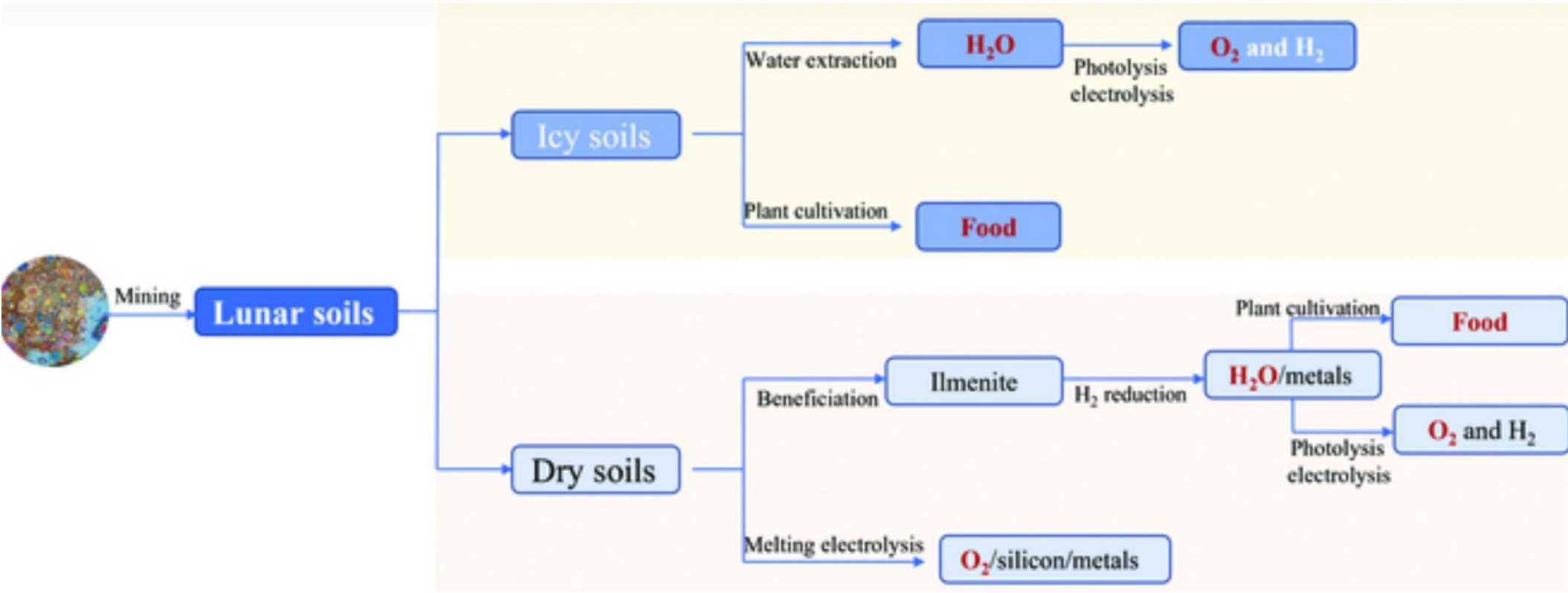
Connaissance du terrain

- Recensement des ressources
- Propriétés chimiques, cristallographiques et mécanique du régolithe
(du graphène découvert dans les échantillons de Chang'e 5)
- Cratères pour mise à l'ombre de télescopes
- Grottes (pour l'habitation humaine)
- Sismologie et tectonique (interféromètres, habitats)

Recensement des ressources

- Eau
- Hydrogène
- Minéraux : silicium, métaux
- Fibres
- Volatiles
- Energie solaire (rayonnement lumineux, rayons cosmiques)
- Leur distribution sur la surface
- Leur distribution en profondeur

Utilisation des ressources in situ (In Situ Resource Utilization ISRU)



Utilisation des ressources in situ (In Situ Resource Utilization ISRU)

- Fibres



Robotique

- Construction des habitats
- Fabrication d'objets à partir du régolithe
- Fabrication d'instruments scientifiques
- Robots en équipes
- Robots auto-réplicatifs en utilisant le régolithe (tests en labo)

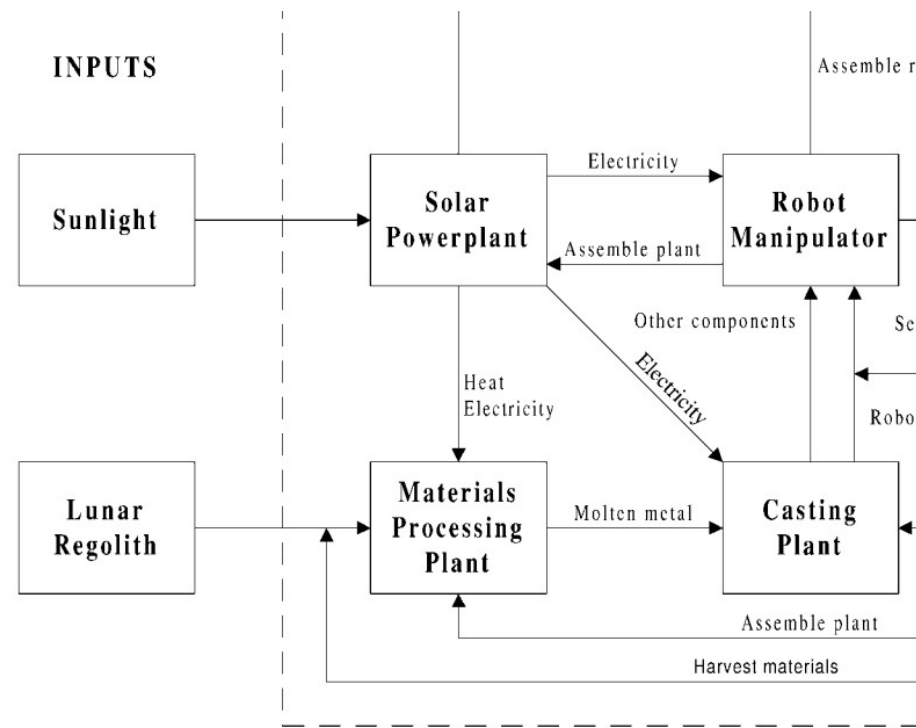
Fabrications in situ

Que construire

- Habitats
- Objets courants pour les astronautes
- Equipements scientifiques

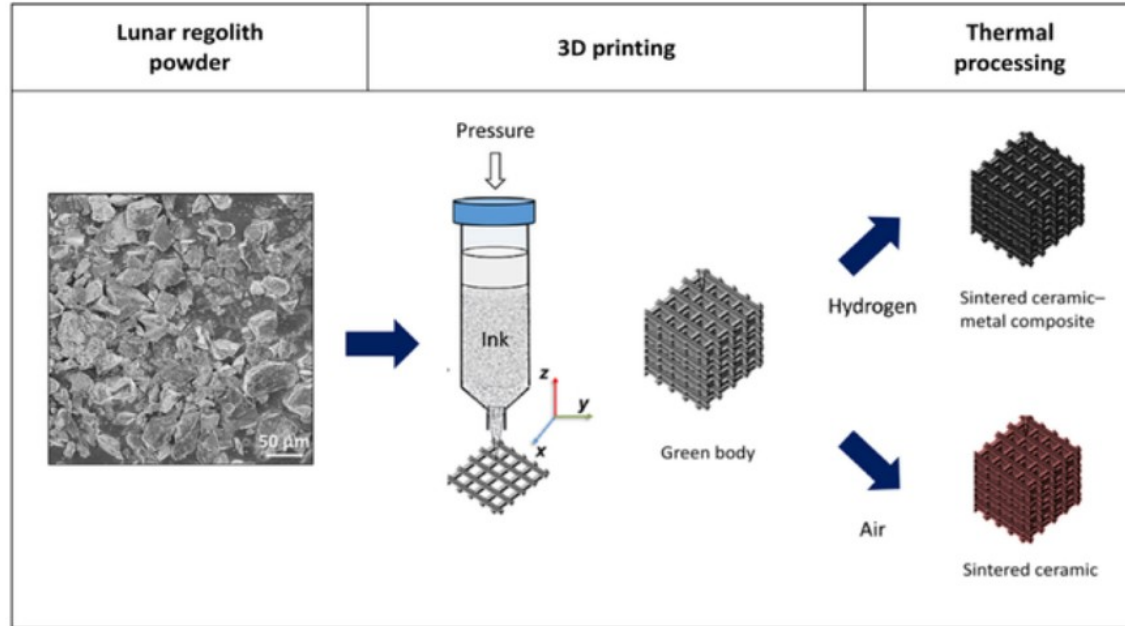
Comment construire (tests labo en cours)

- Manufacture du régolithe
 - Brut – par fusion, par frittage
 - Mélangé à des epoxy
 - Bétonnage
 - Par impression 3D
- Métallurgie du régolithe, extraction
 - Par des bactéries : « biolixivation »
 - Par fusion



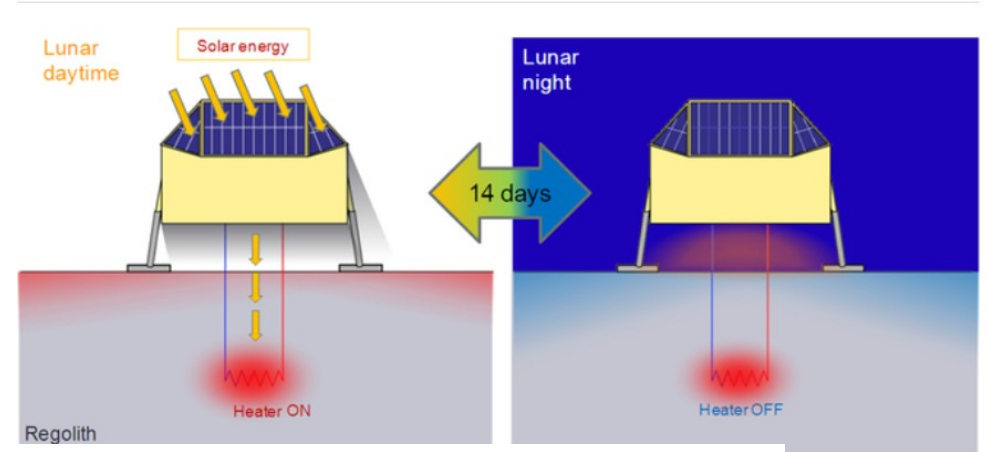
Fabrications in situ

- |

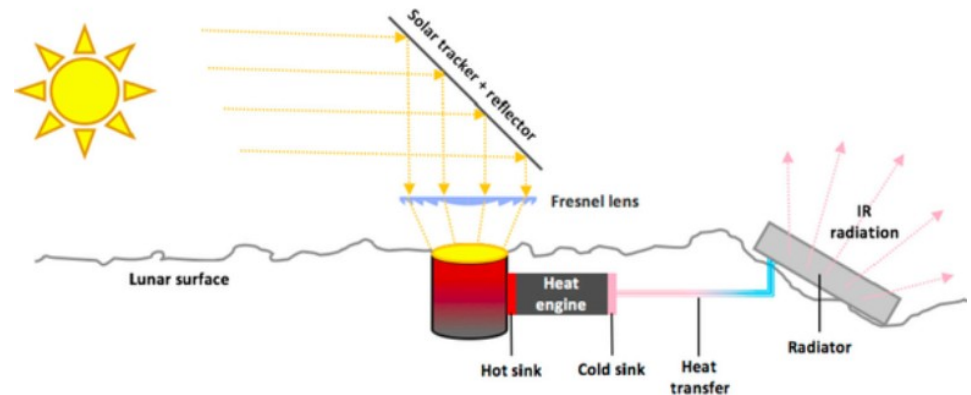


Conversion in situ de l'énergie

- Stockage de l'énergie solaire



- Conversion de l'énergie solaire



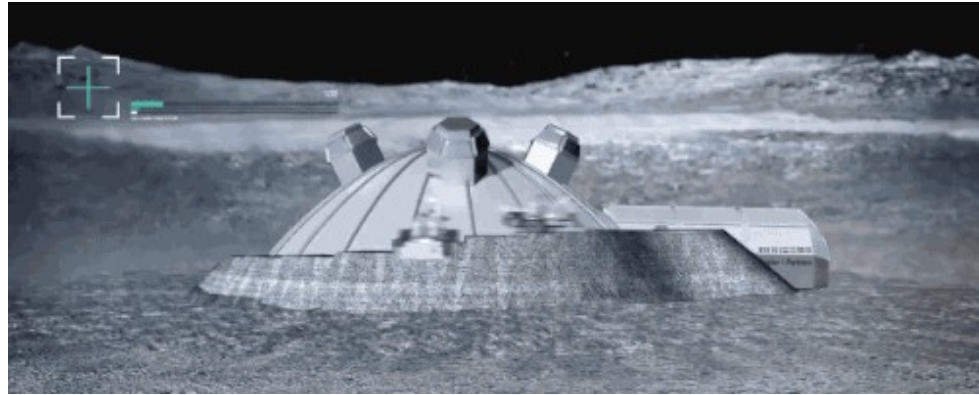
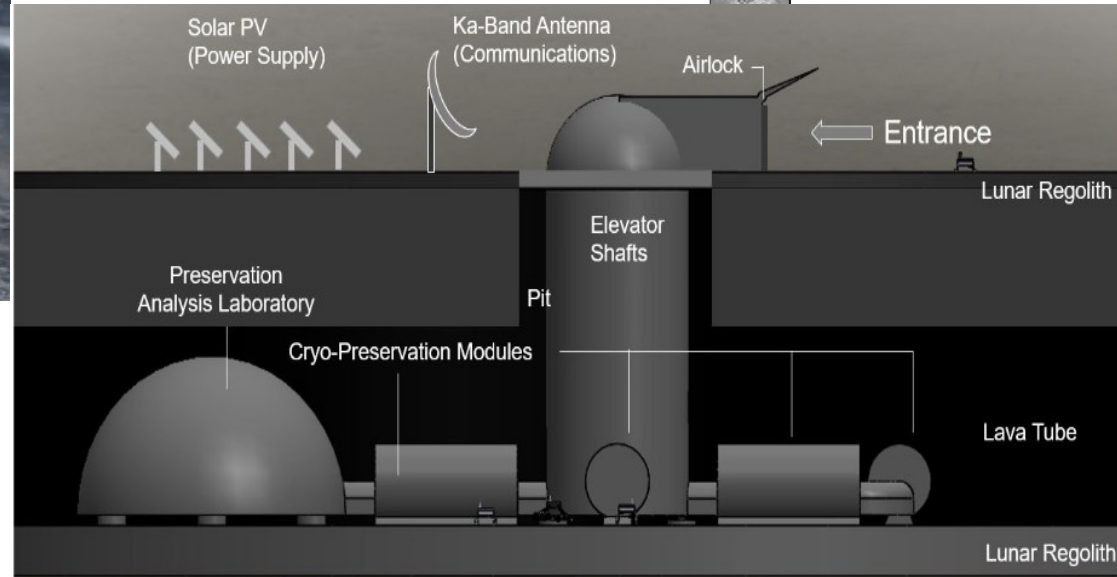
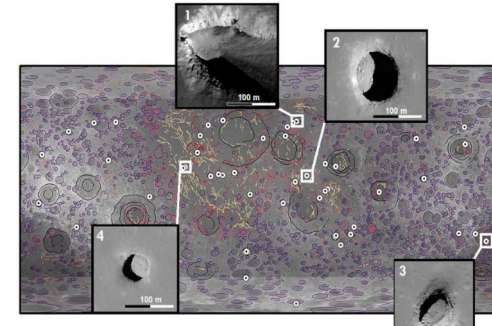
Habitats et conditions de vie

- Habitats
 - Construction à partir du régolithe
 - Fabrication de meubles, de vaisselle, ... à partir du régolithe
 - Utilisation de grottes naturelles
- Alimentation

Habitat

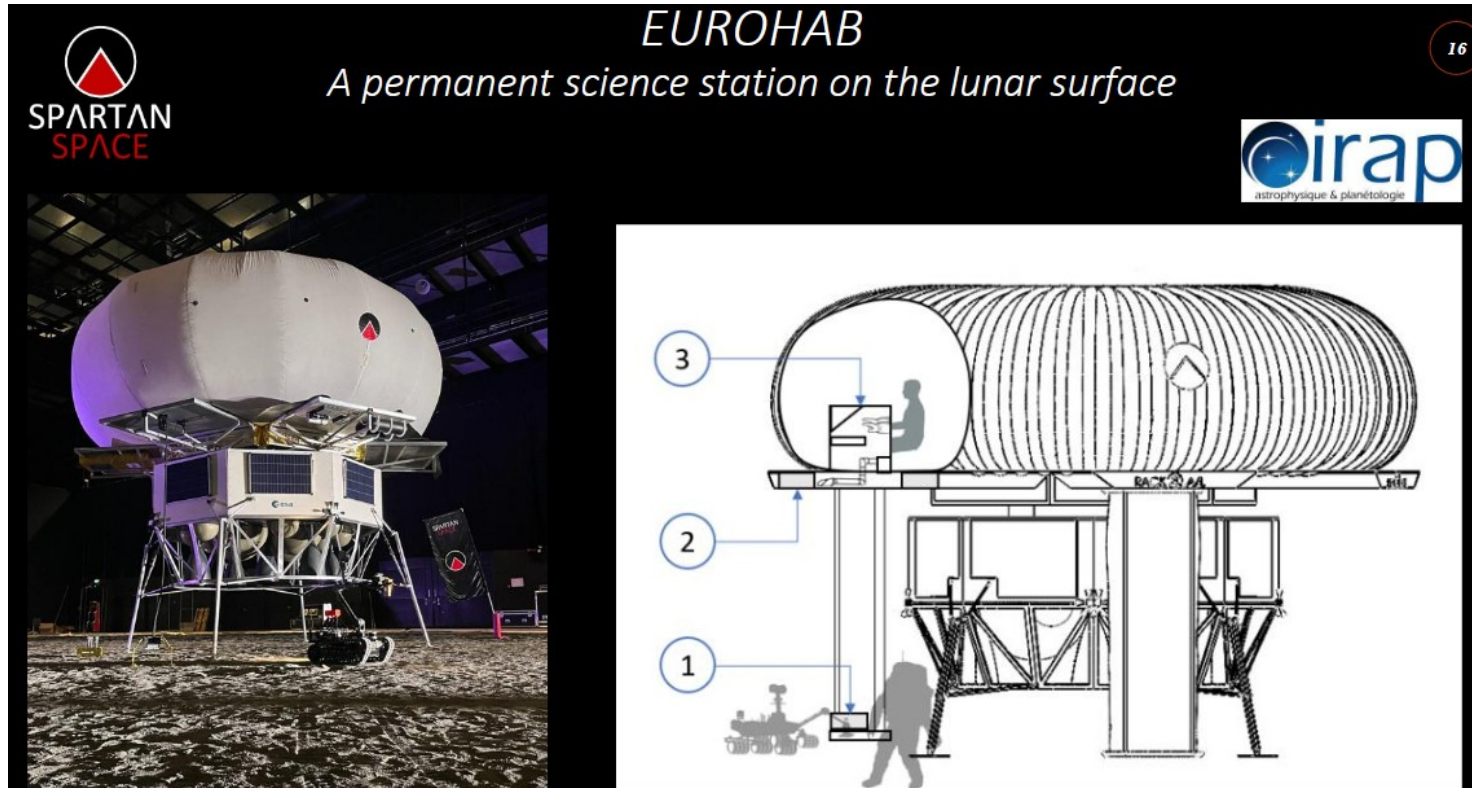
Projet de construction
À partir du régolithe (ESA)

Habitat souterrain



Habitat

EUROHAB (SPARTAN SPACE) Testé en labo en 2022



Alimentation

Pas question d'apporter fréquemment des aliments depuis la Terre
Il faut les produire sur place
⇒ Agriculture et aquaculture lunaires

Agriculture

- Un précurseur : culture de coton sur Chang'e-4 en 2019
- Test en labo en cours (Russie) :
Culture d'aliments riches en calories
Blé, arachide
Module de 4 x 4 x 6m 9Kcal/jour
pour 3 astronautes



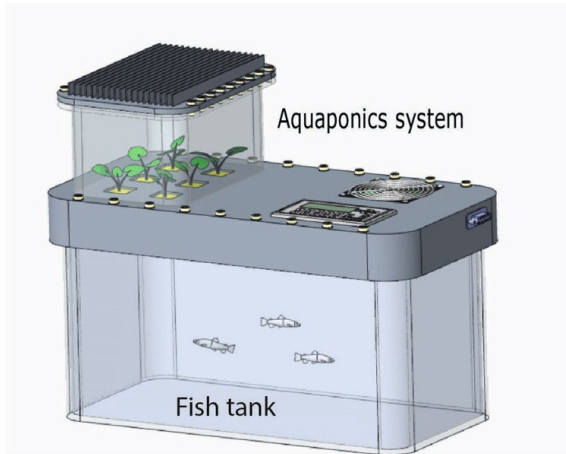
Aquaculture

Idée : envoyer des œufs de poisson sur la Lune pour les y cultiver en piscine pour donner du poisson frais aux astronautes

- Programme **LAU**nch Vibration on fish Embryo - U. Montpellier
- Programme Lunar Hatch - Ifremer
- Etude BioMoon (UK)



Aquaculture lunaire



- Plus bas consommateur d'énergie
- Moins producteur de CO2 qu'un mammifère
- Meilleur producteur d'énergie

Transports

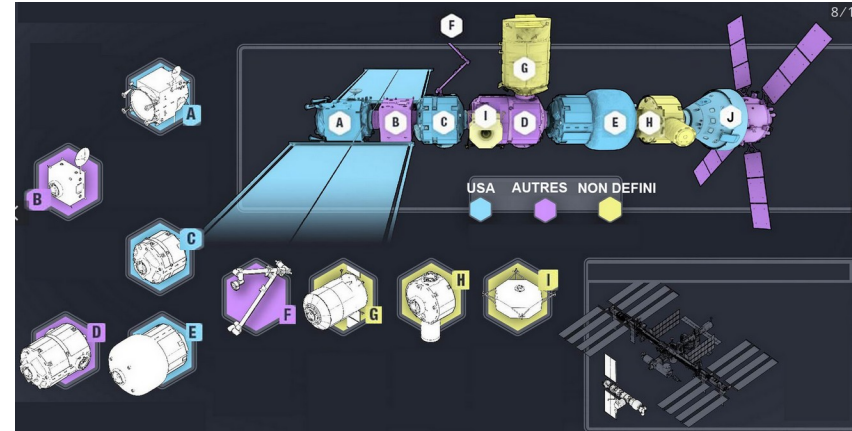
- Lanceurs depuis la Terre
 - StarShip (SpaceX) : charge utile 100 tonnes
 - Space Launch System (NASA) : charge utile 38 tonnes
 - Longue Marche 9 (Chine)
 - Blue Moon sur New Glenn (Blue Origin) charge utile 13 tonnes
- Station relai circum-lunaire Gateway (NASA)
- Transfert vers le sol lunaire : Argonaut (ESA) : 1,5 tonne de charge utile
- Déplacements sur la Lune
 - Rovers
 - Trains
 - Sauteur ?
- Câbles élévateurs sol-orbite lunaire ?

Gateway (NASA)

Station spatiale circumlunaire (2027)
NASA, Canada, EAU, ESA, JAXA

Modules :

- PPE (énergie et propulsion)
- HALO (habitation)
- I-HAB (habitation)
- ESPRIT (télécommunications et propulsion)

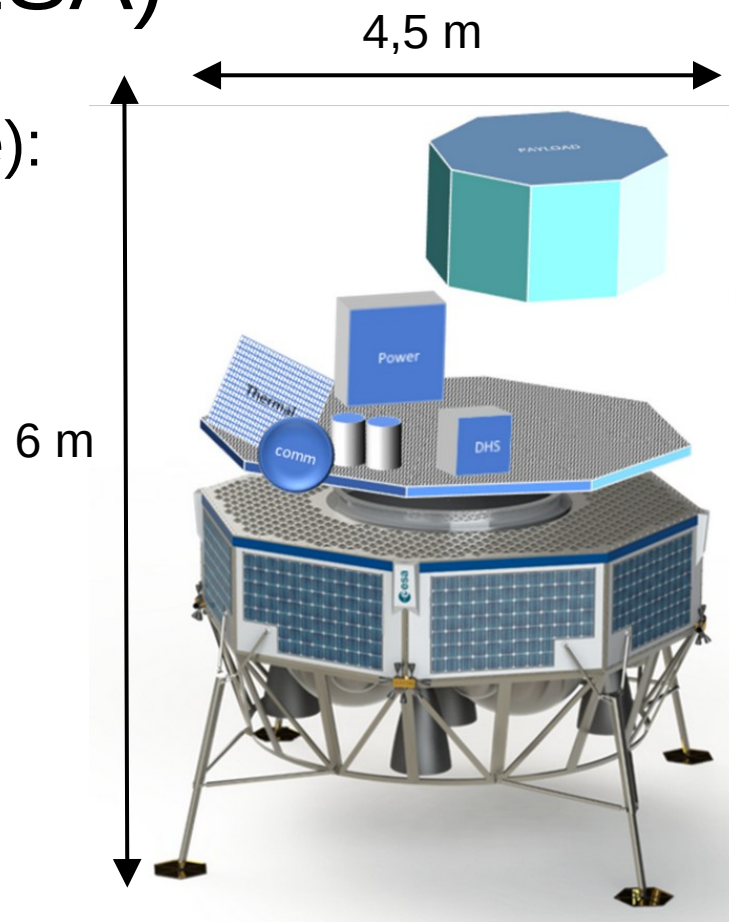


Argonaut (ESA)

Alunisseur multi charges utiles (1,5 tonne):

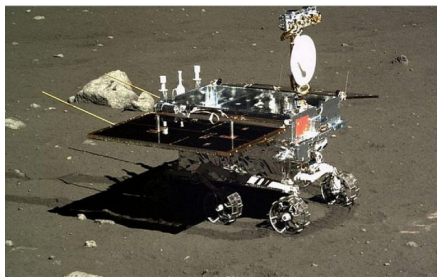
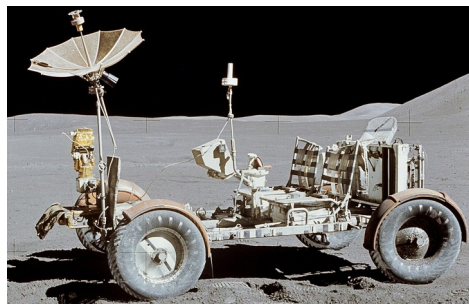
- Rover(s)
- Instruments d'analyse du sol
- Télescope(s)
- Sources d'énergie au sol
- Fourniture de carburant à Gateway
- ...

1^{er} lancement : 2031 avec Ariane 6



Rovers passés et existants

- Rovers Apollo
- Lunokhod
- Pragyana (Chandrayaan-3 rover)
- SLIM (Japon)
- Yutu-2 avec Chang'e 4.
A parcouru 1,5 km
- Jinchang (Chang'e 6)

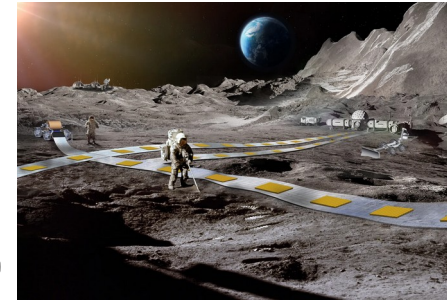


Rovers projetés et autres

- ESA : EMRS



- Japon pour Artemis 7

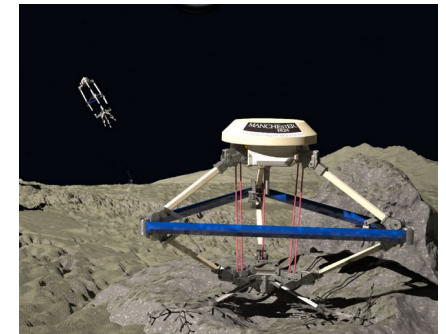


- Flexible Levitation On A Track (NASA)

- PAVER (ESA)
route



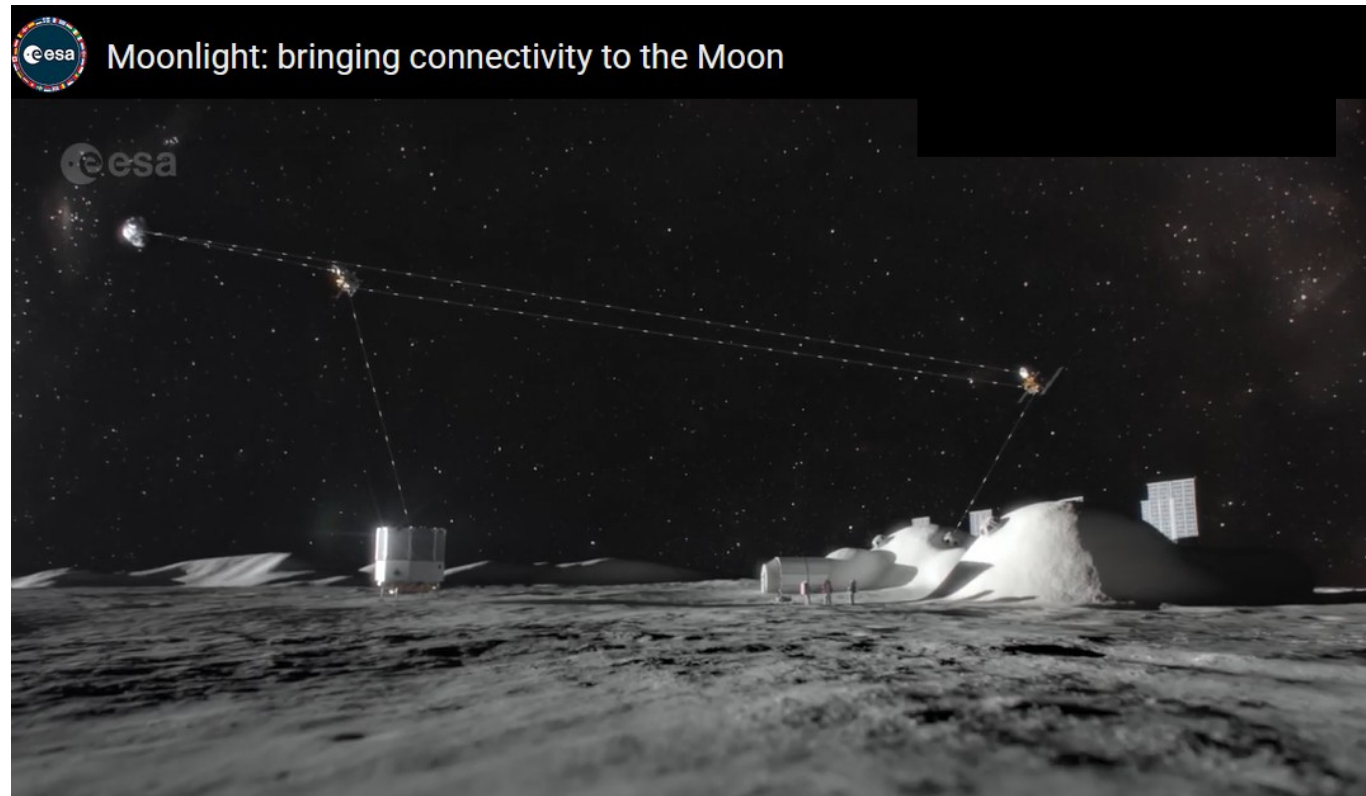
- Sauteur d'obstacles à ressorts (200 m)
Testé sur Terre
(U. Manchester)



Télécommunications

Moonlight (ESA)

Réseau de satellites
en orbite circum-lunaire
pour les communications
Terre-Lune
et intra-lunaires



Sources d'énergie

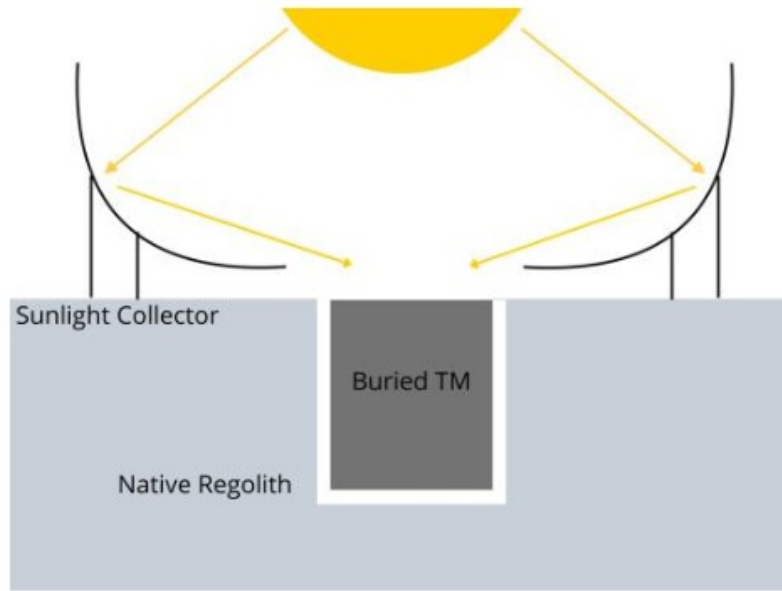
- Panneaux solaires (plus batteries pour les nuits lunaires)
- Générateurs radio-istotopiques
- Récupération de la chaleur stockée dans le régolithe
- Centrales nucléaires
- Transfert d'énergie par laser
- Utilisation de l'eau du régolithe comme carburant pour le retour sur Terre (entreprise Starpath) :
 - electro/thermolyse de la glace : O₂ et H₂ mis en réservoirs
 - O₂ et H₂ carburants pour le retour sur Terre

Générateurs radio-isotopiques

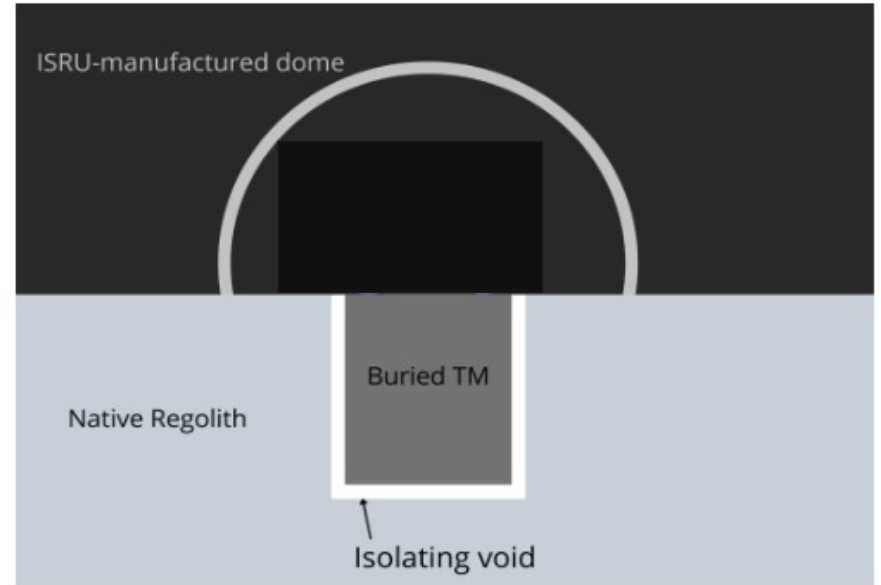
Exemple : Americium-241

- 250 W pour 1.6 kg
- Durée de vie 87.7 ans
- Volume 527 cm³

Stockage de la chaleur dans le régolithe



Jour

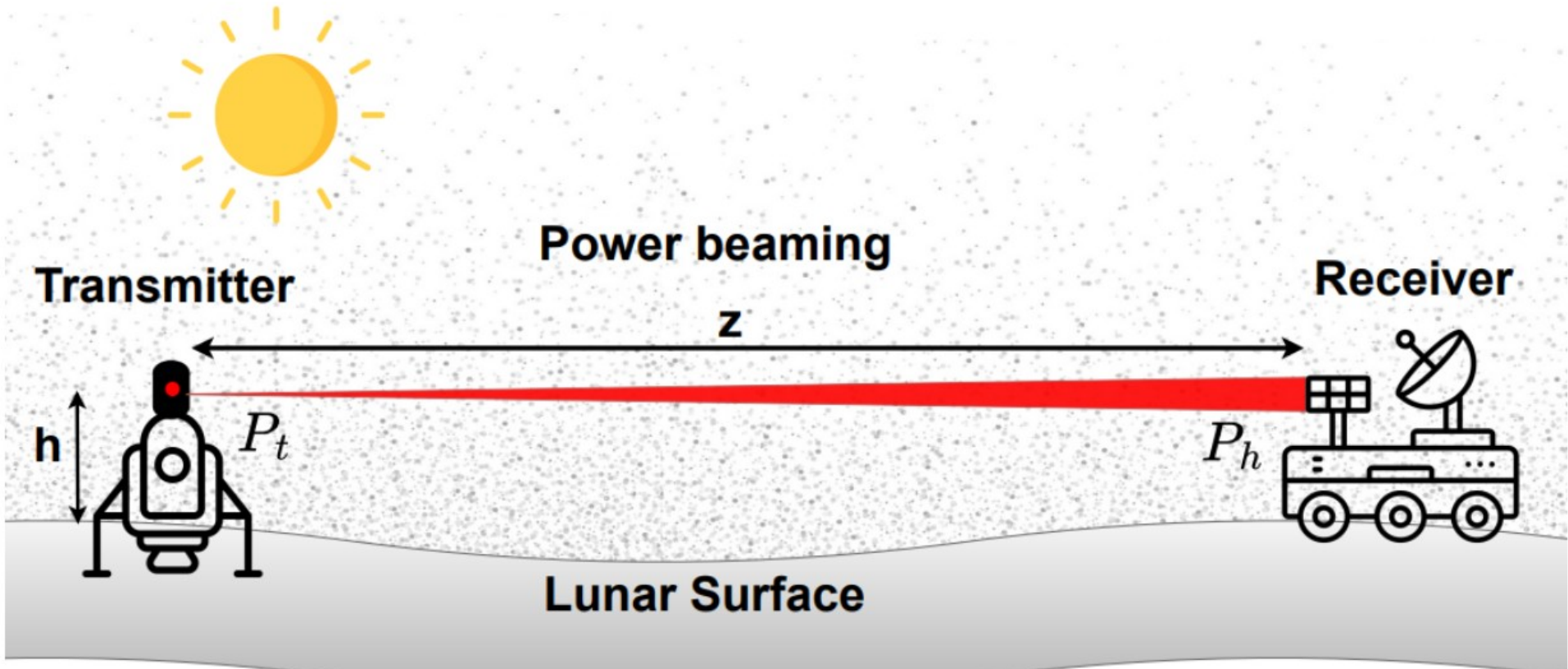


Nuit

Centrale nucléaire

- Contrat NASA Westinghouse : centrale à fission 40 KW
- Projet Indo-Chinois : 500 KW (2035)

Transfert d'énergie par laser



Eau du régolithe comme carburant pour le retour sur Terre

Entreprise Starpath (USA), étude en cours:

- electro/thermolyse de la glace lunaire : O₂ et H₂ mis en réservoirs
- O₂ et H₂ carburants pour le retour sur Terre

Problèmes

- Poussières
 - Pour les observations ? \Rightarrow sélection de sites les moins poussiéreux
 - Pour les miroirs
Remède : DUSTREM dépoussiérage électrostatique (Onera) –
poussière ionisée par les cosmiques
 - Toxique pour les humains
Remèdes : doubles combinaisons et sas.
- Chutes de météorites : statistiques par le projet LUMIO (ESA)
- Sismicité et tectonique : en discussion pour les interféromètres
- Choc thermique jour/nuit : de +12 à -173 °C
Remède : thermostatier les instruments

Problèmes

- Résistance des habitats aux séismes
- Faible gravité pour les humains : adaptation motrice en labo
- Objets dangereux (débris de fusées, ejecta, trafic circumlunaire)
- Conflits entre activités

Recommandations du WG Astronomy from the Moon (UAI) :

« Engage the astronomy community to

- Identify and prioritize sites of extreme scientific interest
- Initiate studies to define the distances between sensitive facilities and activities that create disturbances, such as mining
- Define the frequency ranges most necessary for scientific investigations »

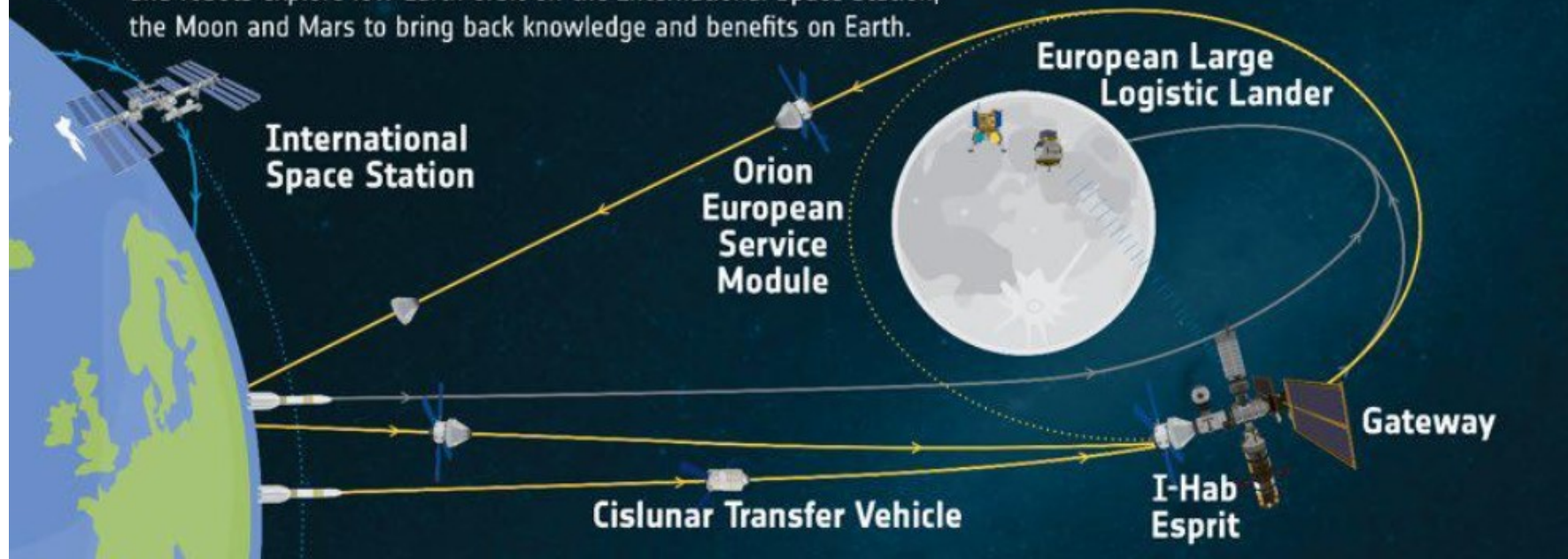
Les acteurs

- ESA
- France
- Allemagne
- Arabie Saoudite
- Brésil
- Canada
- Chine
- Corée du Sud
- Etats Arabes Unis
- Hongrie
- Inde
- Italie
- Japon
- Luxembourg
- Pays-Bas
- Russie
- Turquie
- Ukraine
- USA
- Organisations internationales
- Entreprises privées

ESA

ESA'S HUMAN AND ROBOTIC EXPLORATION DESTINATIONS

ESA's Human and Robotic Exploration programme will see astronauts and robots explore low Earth orbit on the International Space Station, the Moon and Mars to bring back knowledge and benefits on Earth.



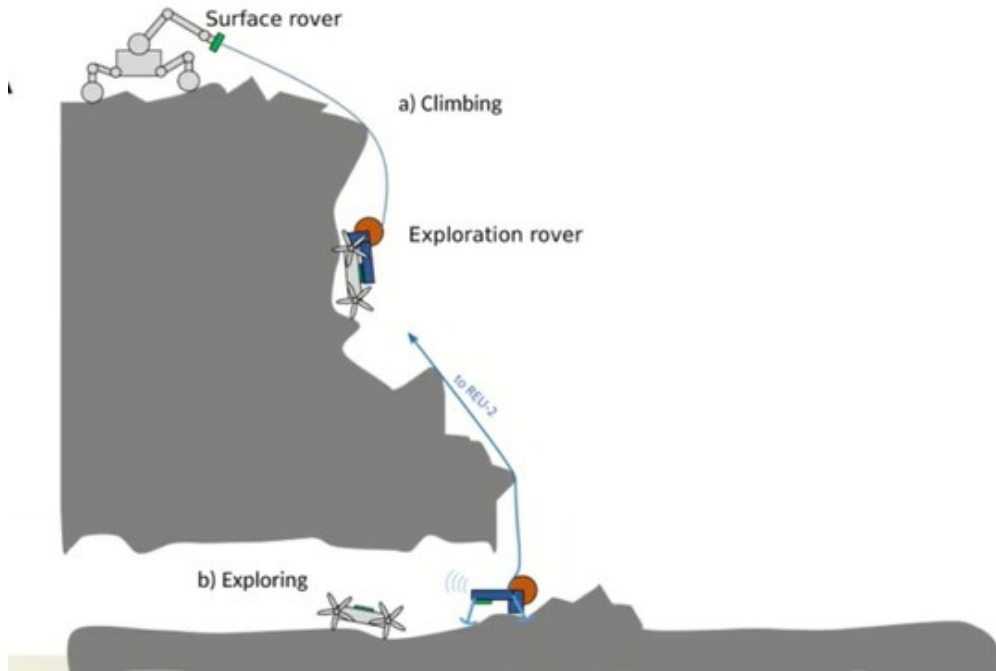
ESA

- Capsule Orion pour les Astronautes sur Artemis
- Participation à Gateway (NASA)
- LunarView : fourniture de carburant à Gateway
- Moonlight : constellation de satellites pour les communications et la navigation lunaires
- Argonaut : transports entre Gateway et le sol lunaire
- Plusieurs études de connaissance et d'exploitation du terrain Prospect, rover EMRS (European Moon Rover System) tests en cours
- Entraînement des astronautes pour la Lune

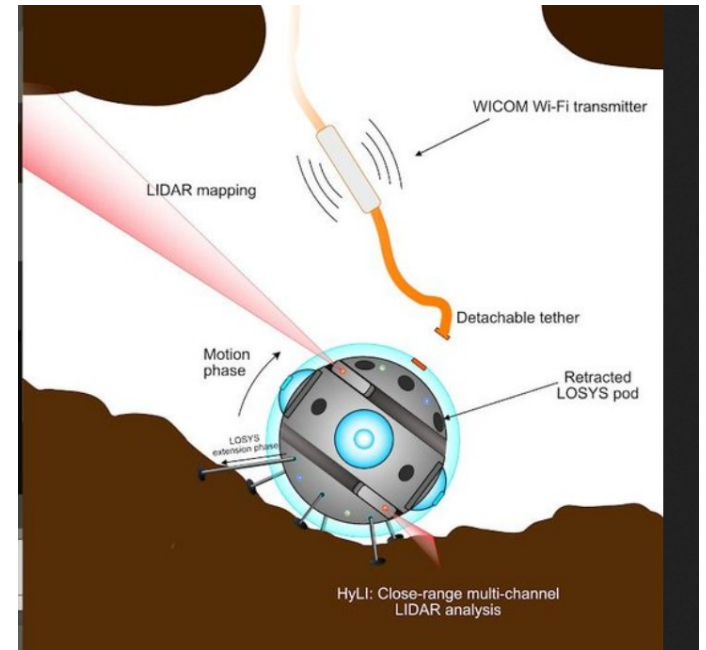
ESA

Exploration des fosses lunaires

Skylight



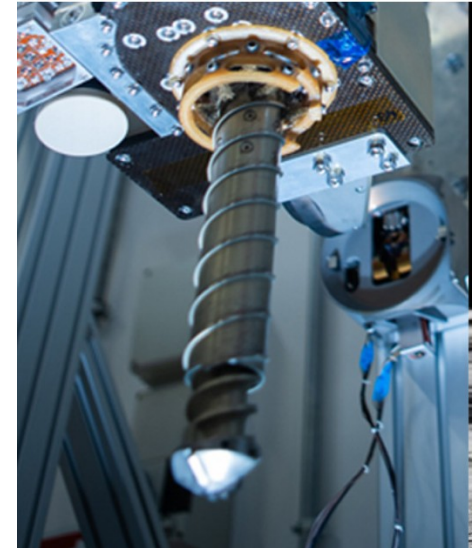
Daedalus



ESA

PROSPECT

- Forage sur 1m par ProSEED
- Matériel recueilli amené dans le labo ProSPA où on extraira l'eau et autres éléments utiles
- Test en labo avec du régolithe simulé en cours
- Embarquement prévu sur Intuitive Machine sous contrat NASA – lancement 2027



France

- CNES : Surface lunaire et présence humaine
 - Dorn sur Cheng'e 6 : mesure du radon (2024)
 - V88 : sismomètre sur la face cachée (2026)
 - Rashid-2 : géologie, Instrument WISDOMoon (2027)
 - Physiologie humaine : toxicité de la poussière, faible pesanteur
 - Spaceship.FR : Logistique
 - Tourisme ?
 - Astronomie depuis la Lune pas prioritaire (Séminaire de Prospective 2024)
- Observatoire de Paris : radiotélescope, science de la Lune, prospective, physique fondamentale
- IAP : télescope infrarouge

France

- Université de Lorraine : géologie avec Rashid-2 Université de Toulouse : logistique, Dorn
- SupAero Toulouse : instrument pour l'activité sismique Institut de Minéralogie – Sorbonne (PROSPECT)
- Université Paris-Cité : ondes gravitationnelles
- Institut de Physique du Globe de Paris : sismologie, ondes gravitationnelles
- Thales : interféromètre précurseur, rover EMRS de l'ESA
- ANRT : Groupe de Travail « Objectif Lune »
- Une demi-douzaine de PME

Allemagne ... Chine

Allemagne : Participation à l'European Moon Rover System (EMRS)

Arabie Saoudite : Rovers, Astronaute en 2030

Brésil : Mission Garatea-L

Canada : Rover

Chine : Missions Chang'e

International **Lunar Research Station** (ILRS) : 7 pays

Corée du Sud ... Italie

Corée : Korea Pathfinder Lunar Orbiter 2022

6 instruments d'analyse du terrain (2 en imagerie, magnétomètre, polarimètre, spectromètre γ , communications)

Etats Arabes Unis : Rover Rashid-2 (sur Chang'e 7) 2027

Hongrie : Détecteur d'eau

Inde : Moon Impact Probe (MIP) 2009 : détection d'eau

Chandrayaan-3 : alunisseur en 2023

Israël : Rover en 2025

Italie : Etude d'un réacteur nucléaire sur la Lune

MoonRay : détecteur de cosmiques

détecteur de rayons X

LEM-X :

Japon ... Ukraine

Japon : SLIM: alunisseur test (2023)

JAXA : rover pour Artemis 7

Toyota : Lunar Cruiser – Rover habité

Komatsu : pelleteuse lunaire

Luxembourg : Entreprises privées pour la logistique

Tenacious : Rover Lancé le 15 Janvier

Pays-Bas : Instrument Loupe d'observation de la Terre

Russie : Missions Luna

Véhicule entre la station circum-terrestre ROSS et la Lune

Turquie : Simulant du régolithe

Ukraine : Membre de l'Association Moon Village

Observation de la Terre

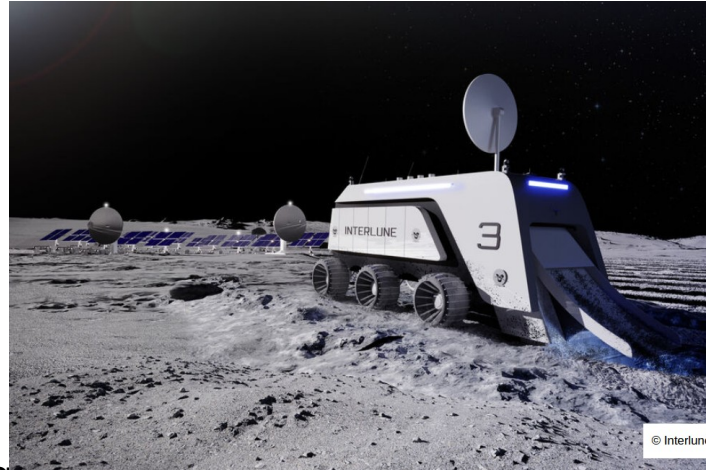
USA

- NASA
 - Artemis : Missions et Accords Artemis - 53 pays signataires dont la France
 - CLPS (Commercial Lunar Payload Services)
- Entreprises privées

Incertitudes : Trump-Musk – menaces sur la NASA et Artemis ?

Entreprises privées

- Blue Origin : alunisseurs
- Astrobotic : rovers
- Interlune : collecte de He3
2030 14M€
- Spartan Space : habitat
- Toyota : Lunar Cruiser
- Monolite : impression 3D avec le régolithe
- Firefly : alunisseurs (15 Janvier 2025 : Alunisseur Blue Ghost)
- Draper : soutien technologique
- Interstellar Lab : habitat
- Lockheed-Martin : logistique
- Thalès AleniaSpace : Argonaut



Entreprises privées

- Komatsu : pelleteuse
- Ispace
- Lonestar



Organismes

- UAI : WG Astronomy from the Moon
- ONU : Office for Outer Space Affairs (économie lunaire)
- International Lunar Year 2028
- ISECG : International Space Exploration Coordination Group
- COSPAR
- Accords Artemis, pilotés par les USA. Ratifiés par ~20 pays
- International **Lunar Research Station** (ILRS), pilotée par la Chine. ratifiée par ~10 pays
- EuroMoon (AirBus, CEA etc)
- International Lunar Observatory Association (ILOA)
- Moon for Mankind
- Moon Village Association
- International Space Exploration Coordination Group (ISECG)
- International MoonBase Alliance

Ce que peut faire l'Observatoire

(seul ou en collaboration)

- Science de la Lune (LTE)
 - Sismologie
 - Orbite et autres mouvements
 - Analyse d'échantillons ... (LTE et MNHN)
 - Temps relativiste lunaire
- Petits corps (LTE LIRA) Sujet de thèse :
 - Adaptation des logiciels de prédiction d'occultation stellaires
 - Eclipses mutuelles
- Ondes gravitationnelles (LTE, LUX)
- Astrométrie- Interférométrie (LIRA)
- VLBI Terre-Lune (LIRA)

Ce que peut faire l'Observatoire

(seul ou en collaboration)

- Idées de télescopes (LIRA, LUX, UNIDIA)
- Groupe de travail pour optimiser les télescopes (taille du miroir, ouverture, résolution spectrale, localisation) en fonction des objectifs et contraintes (coût) (LIRA, LUX, UNIDIA)
- Réflexion logistique (UNIDIA)
- Petite instrumentation lunaire (détecteurs ...) (UNIDIA)
- Prospective (tous)
- Autres ? Appel à idées liste.lune@sympa.obspm.fr

⇒ une recommandation : une **Action Pluriannuelle Incitative** dédiée

Spéculations

- Electro-agriculture ?
 - « Electro-synthèse » de molécules biologiques à partir de CO₂, H₂O et N
 - Plus efficace que la photo-synthèse (tests en labo)
 - Fonctionne coté nuit et au fond des cratères à l'ombre de la Lune
- Data Center Lunaire (DCL) ?
 - Thalès : **ASCEND** (**A**dvanced **S**pace **C**loud for **E**uropean **N**et zero emission and **D**ata sovereignty) « **S**pace **D**ata **C**enter » en orbite
- Fronde lunaire ?

Spéculations

Dernière minute

Data Center Lunaire « Freedom » de Lonestar



Lancement d'un premier module par Falcon 9 en Février 2025

Fronde lunaire ?

Lancements par force centrifuge
Entreprise SpinLaunch

Tests en cours :

- lancement à 3 km d'altitude
- accélération 10.000 g



Sur Terre, vitesse de libération 11.2 km/s.
la Lune, 2.4 km/s

- Transport balistique à grande distance sur la Lune
- Lancements vers la station circum-lunaire Gateway

Sur

Conclusion

L'Astronomie sera un bénéficiaire de la colonisation en marche
Encore beaucoup de travail préparatoire

Un bon créneau pour l'Observatoire de Paris

Mise à jour étendue, sources et bibliographie :

<https://luth7.obspm.fr/Moon.html>

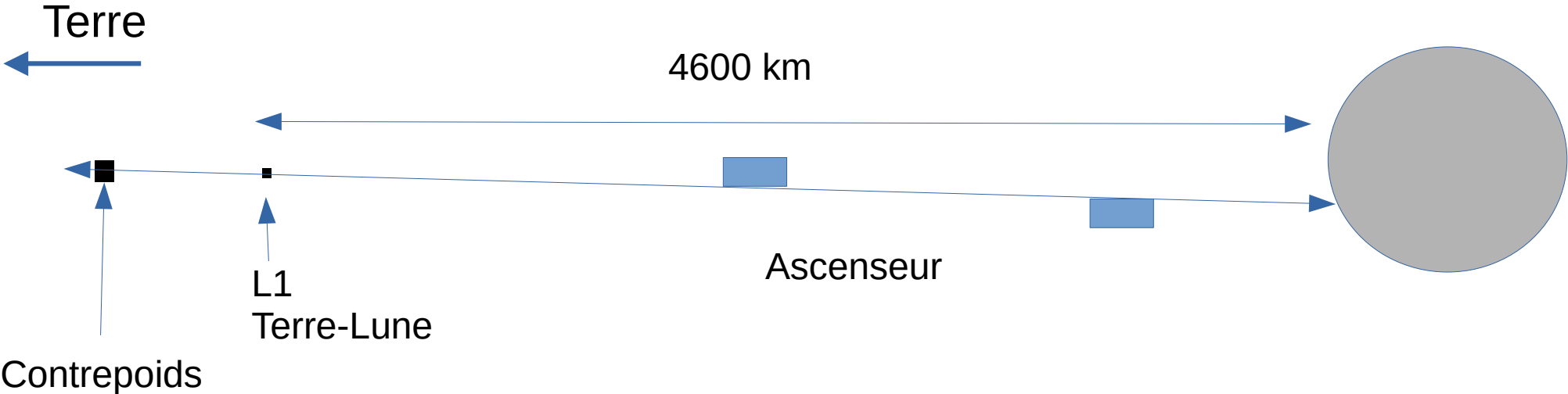
Remerciements

à Joseph Silk et Farrokh Vakili pour m'avoir initié au sujet

à Josselin Desmars, Pierre Kervella, Jean-Pierre Maillard,
Hélène Sol, Damya Souami, Daphne Stam et Philippe Zarka
pour des discussions

Elévateur à câbles

Aller retour sol lunaire \longleftrightarrow Gateway



Un bonus

«Frau am Mond » de Fritz Lang (1929)

Conseiller scientifique :

Hermann Obert, patron de thèse de Wernher von Braun

<https://m.ok.ru/video/1852215659188>