

# 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 grand 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

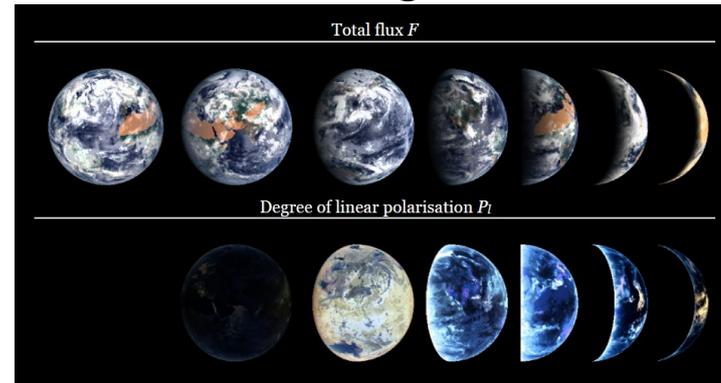
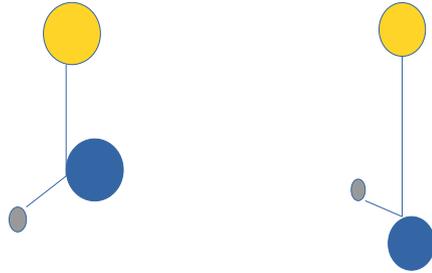


Exoplanète  
N X N pixels

# La Terre

La Terre en monopixel vue comme une exoplanète

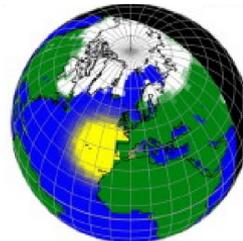
- Variabilité (rotation de la Terre, météo et saisons)
- Polarisation : variation en fonction de l'angle de réflexion



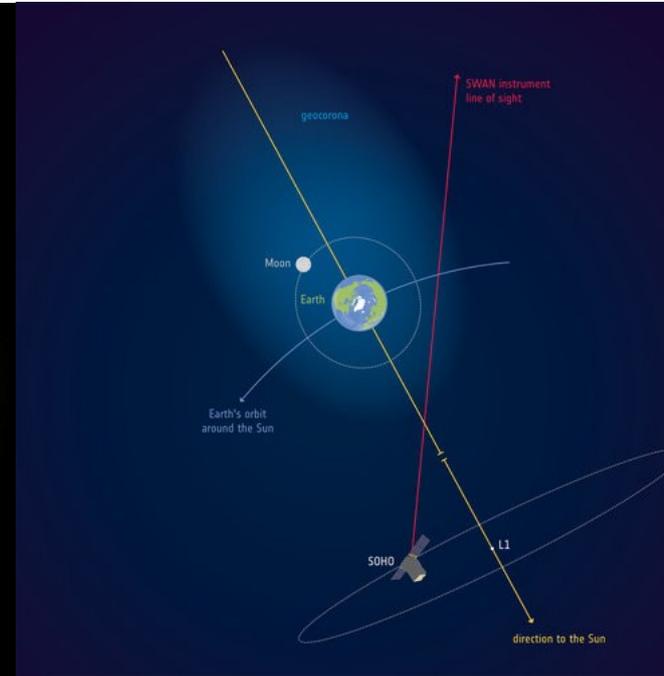
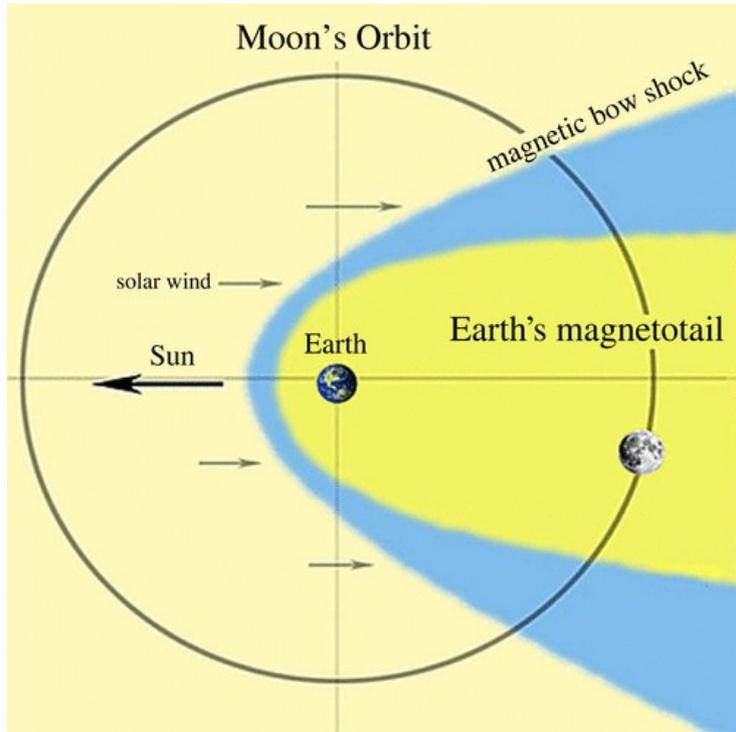
flux

polarisation

- Réflexion spéculaire du Soleil sur les océans



# Magnétosphère et « géocouronne » terrestres in situ



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

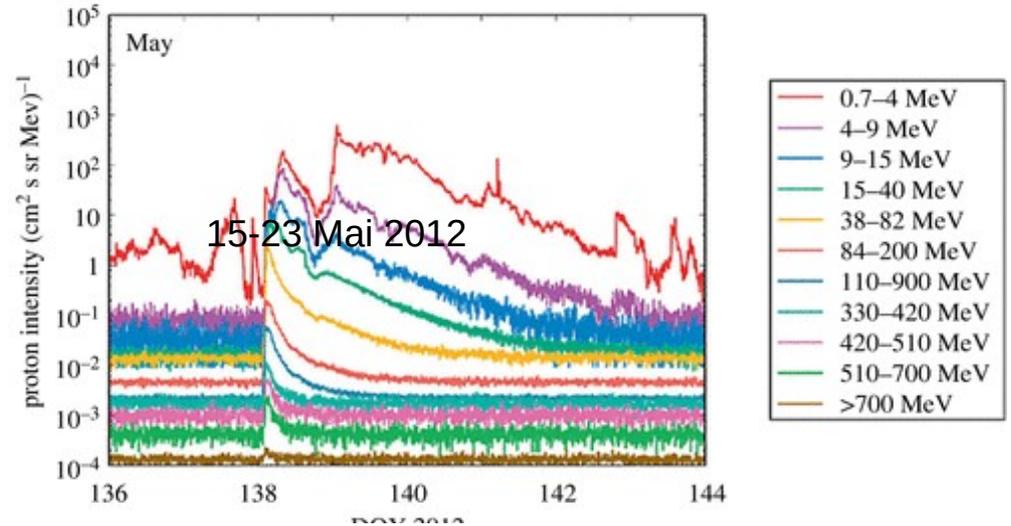
# Le Soleil

- 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

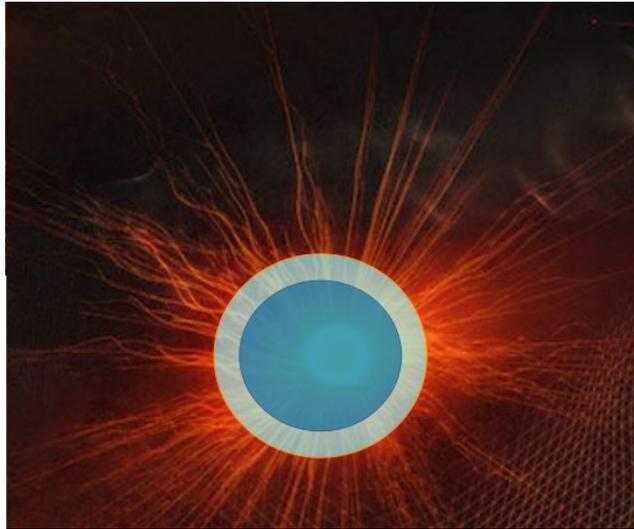
La surveillance du vent solaire :  
prédiction des impacts terrestres



# Eclipses du Soleil par la Terre

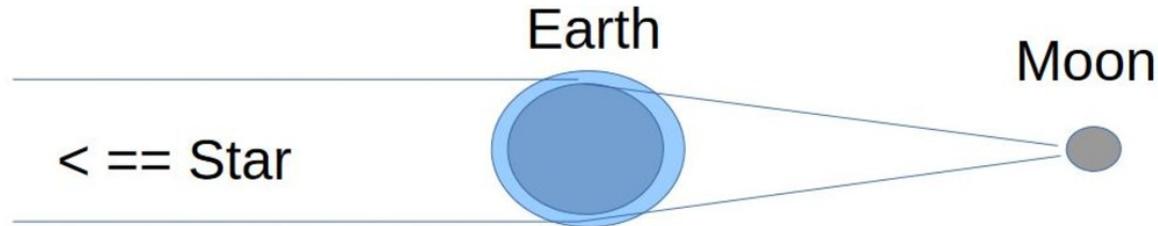
La Terre est 3,5 plus grande que la Lune

==> 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

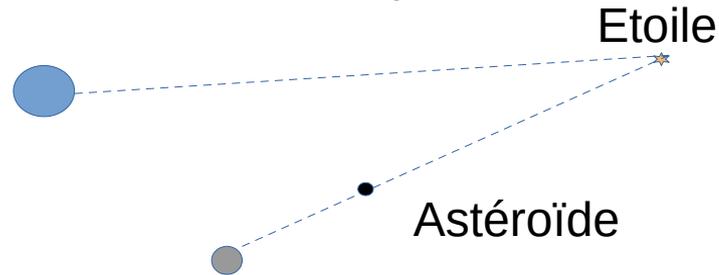


⇒ « Terrascope » Kipping (2019)

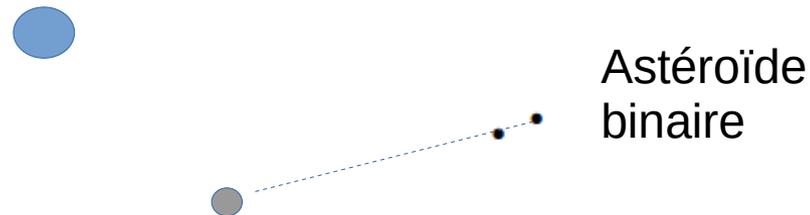
Amplification X 50.000 ⇒ Photométrie rapide (pulsars optiques ...)  
Spectroscopie très haute résolution

# Petits corps

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



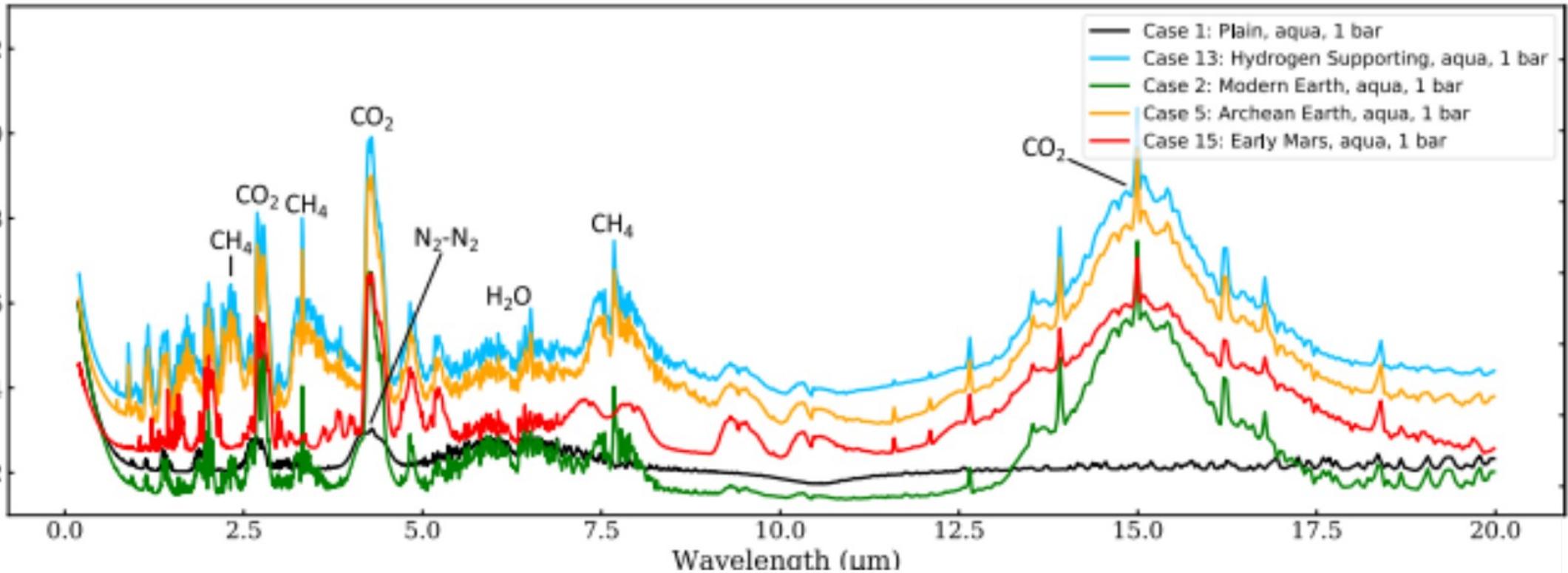
- Eclipses d'astéroïdes binaires



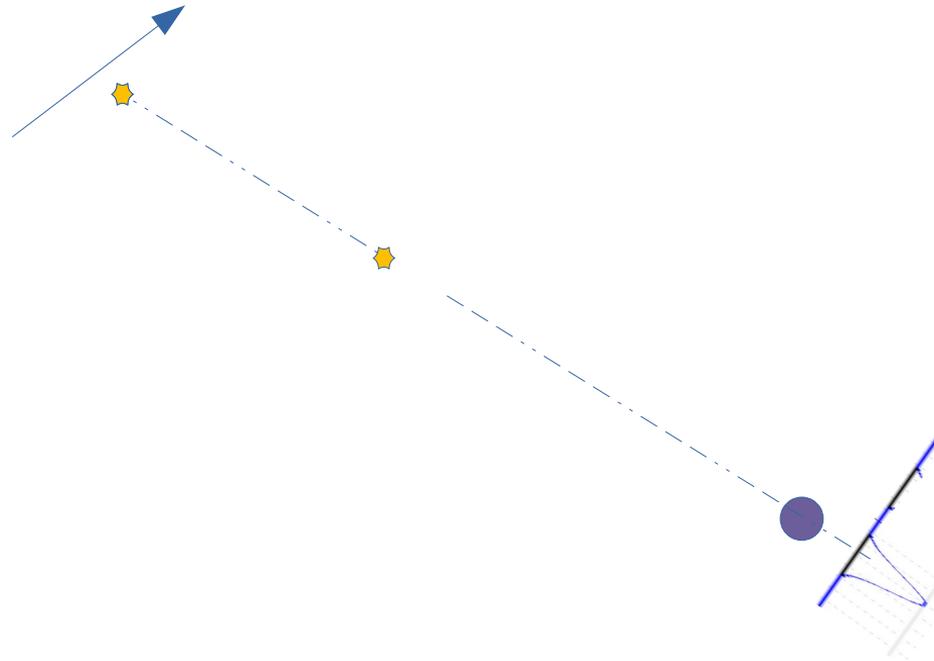
# Exoplanètes

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

# Spectroscopie des transits

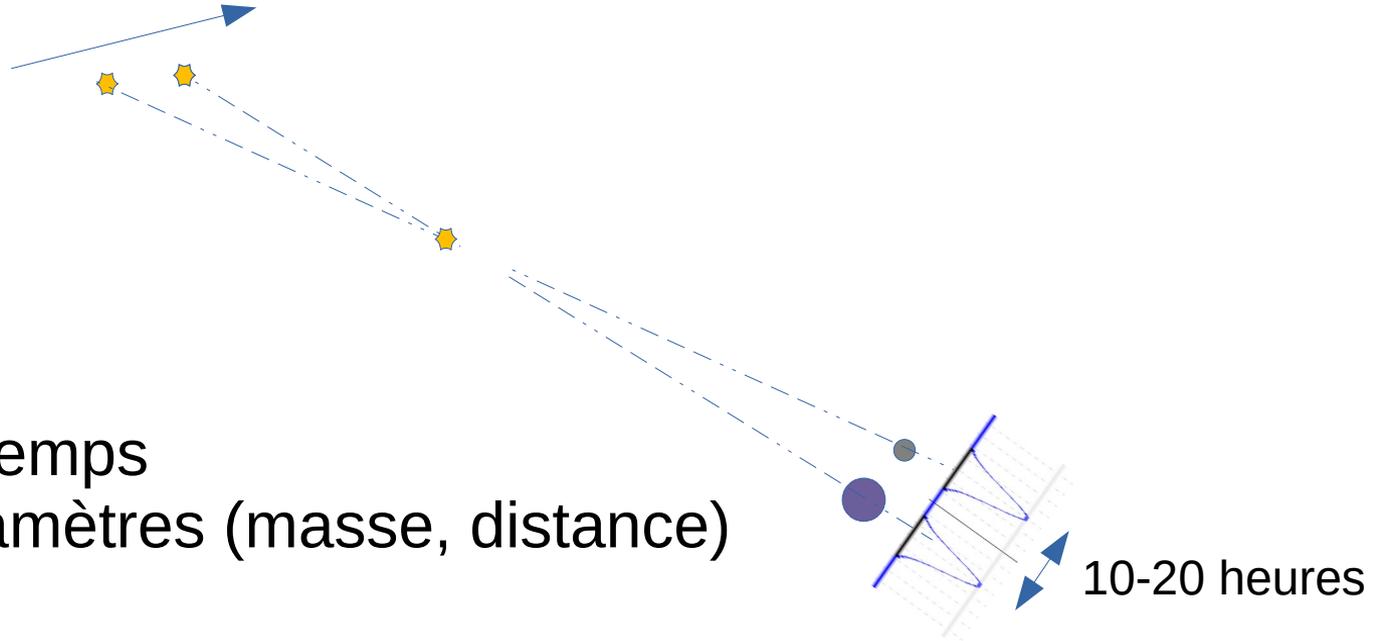


# Microlentilles gravitationnelles



# Microlentilles gravitationnelles

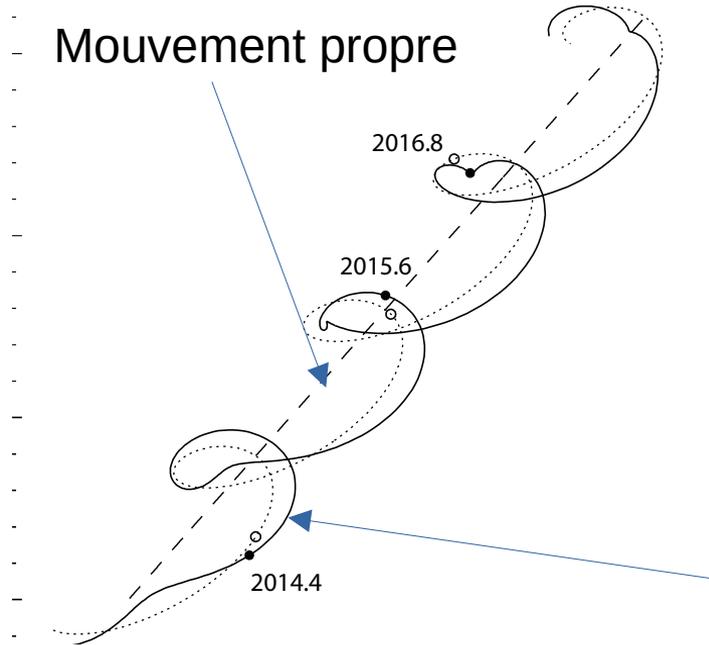
Effet de parallaxe Terre-Lune



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 :  $25 \mu\text{as}$

# 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)<sup>-2</sup> ⇒ gain x 10.000 par rapport à Soleil-Jupiter (Lecacheux, Zarka ..)

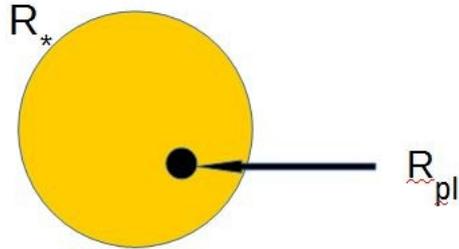
⇒ Favorise les «Jupiters chauds »

Permet d'aller plus loin que le système solaire

# Imagerie à haute résolution angulaire des transits

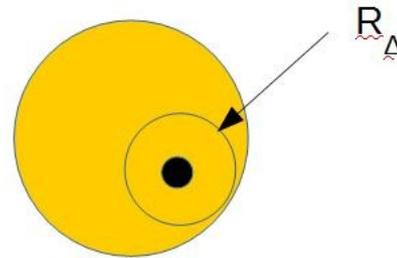
Baisse de flux de l'étoile

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



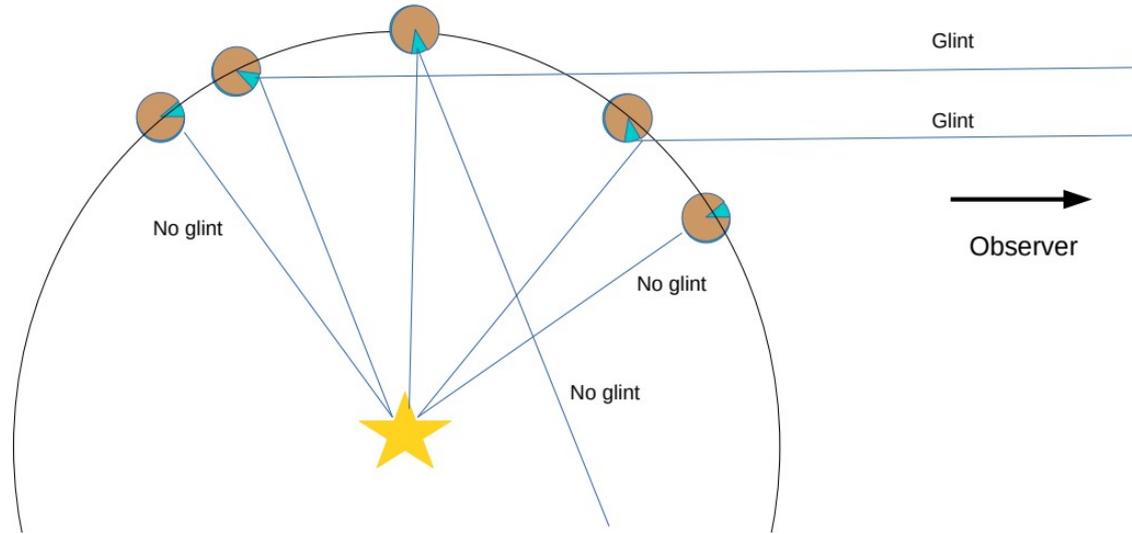
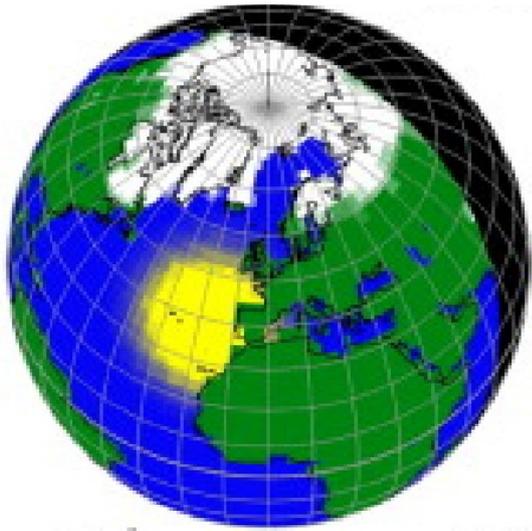
Baisse de flux dans un cercle de rayon  $R_\Delta$

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



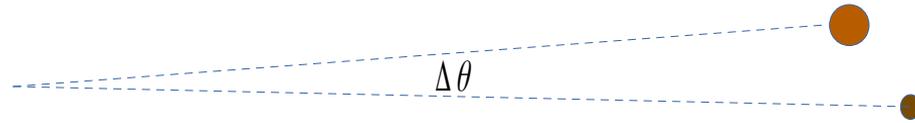
Gain en rapport signal à bruit :  $R_*/R_\Delta$

# Réflexion spéculaire des exo-océans



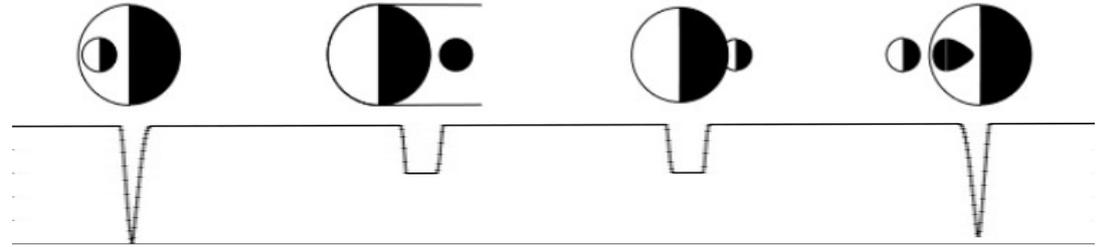
# Exolunes

- 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

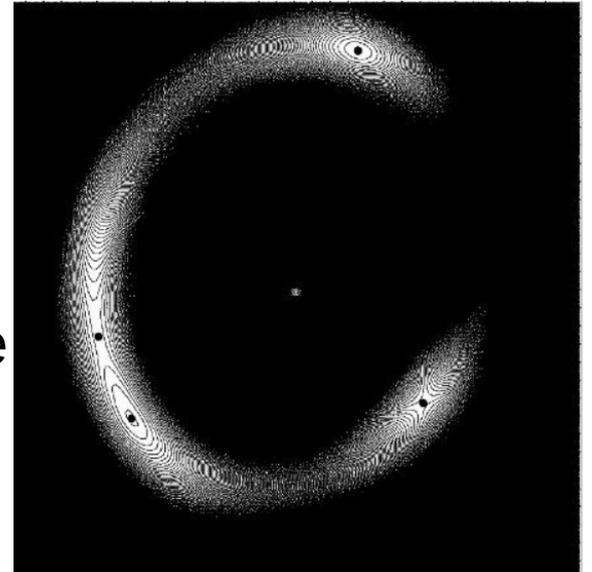


- Astrométrie de la planète parente

# Physique stellaire

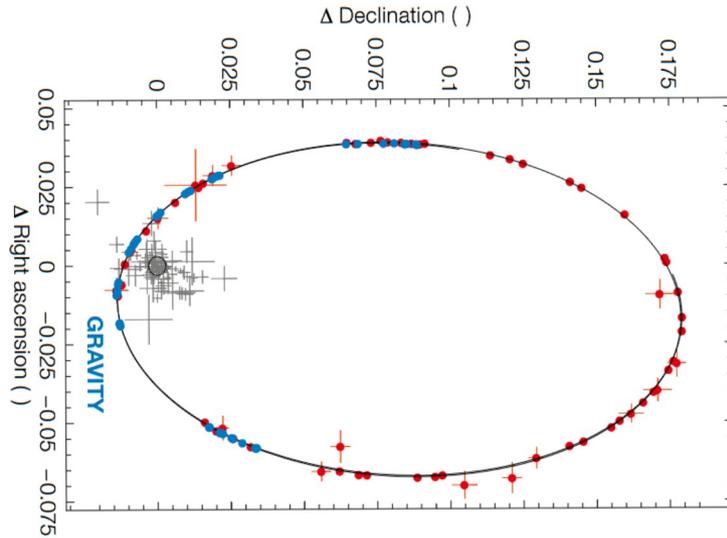
- Imagerie des disques circumstellaires
- Aplatissement des étoiles
- Lentilles gravitationnelles

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

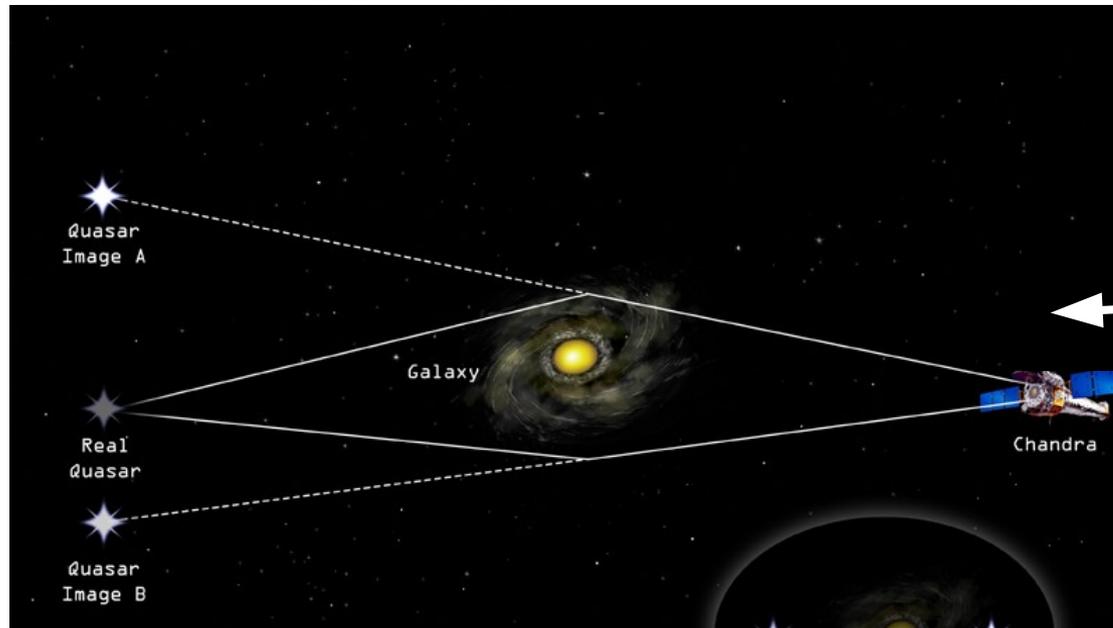


→ Propriétés du trou noir de Kerr

- Noyaux galactiques avec une resolution angulaire de 1 mas

# Extragalactique

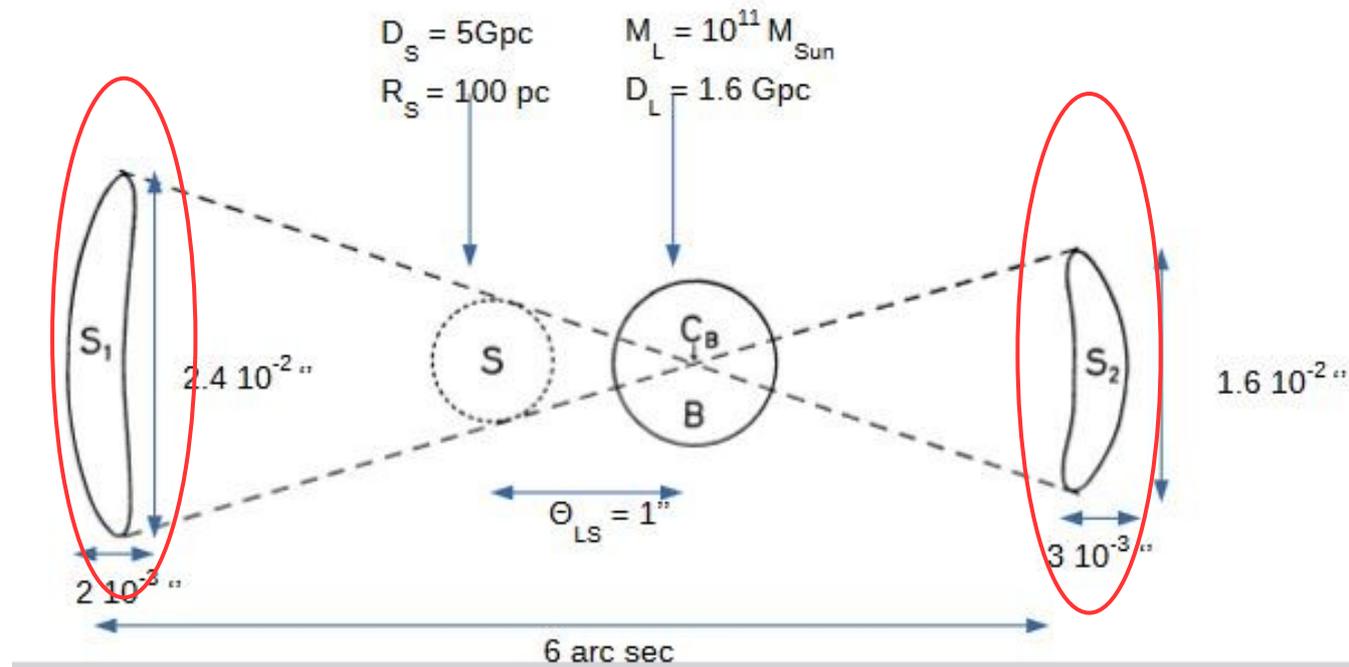
- Imagerie : Distribution de la matière noire
- Images dédoublées de quasars :  
Déviation gravitationnelle de la lumière par une galaxie interposée



# 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

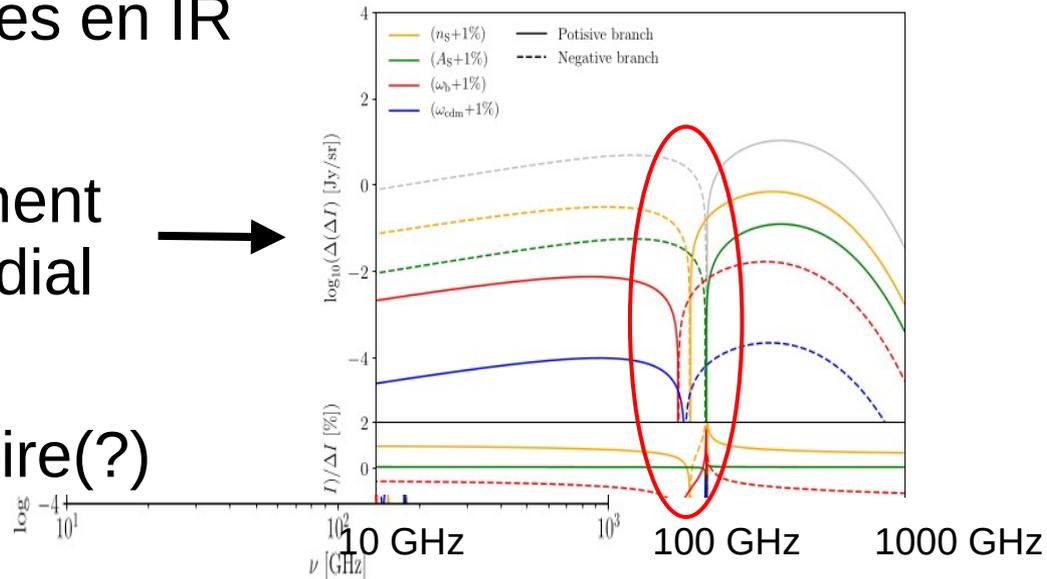
- Observer la raie à 21 cm (1.4 GHz) de l'hydrogène dans les galaxies primordiales.

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

- Formation des galaxies en IR

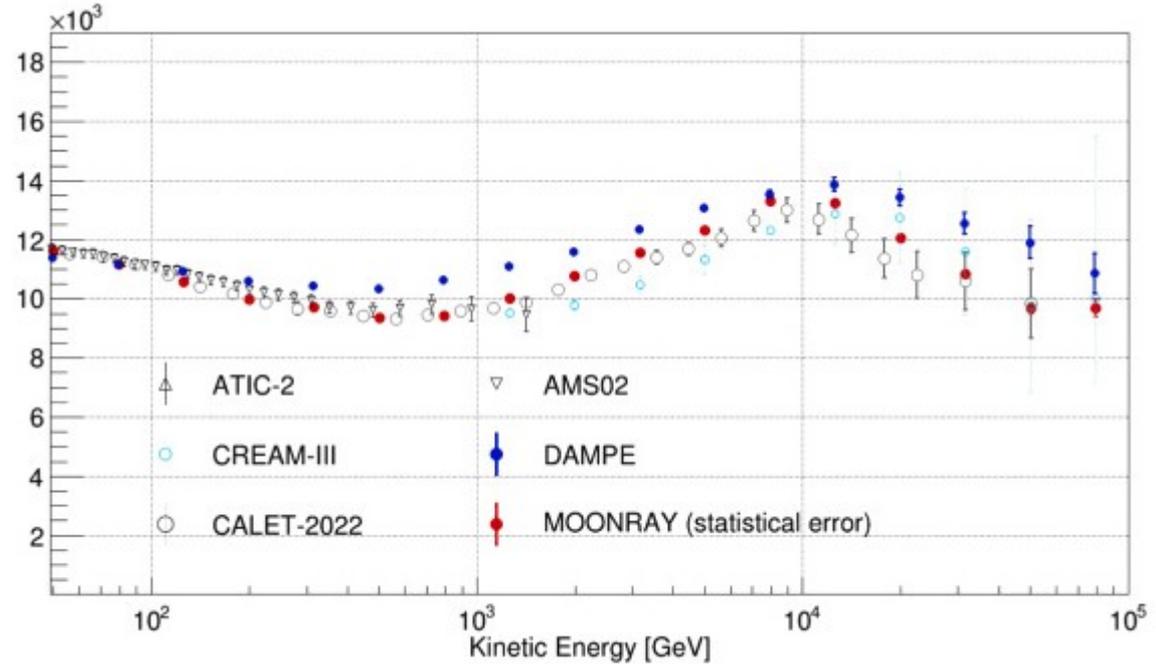
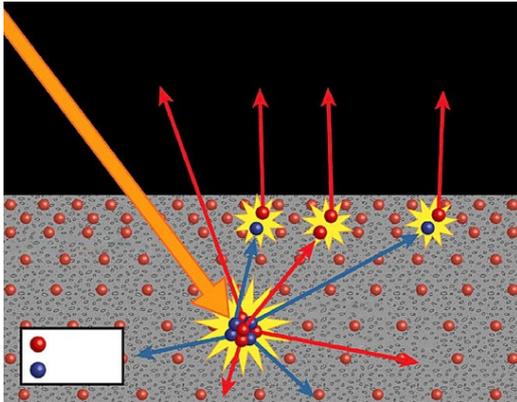
- Distorsion spectrale du fond du rayonnement cosmologique primordial à  $\sim 100$  GHz

- 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

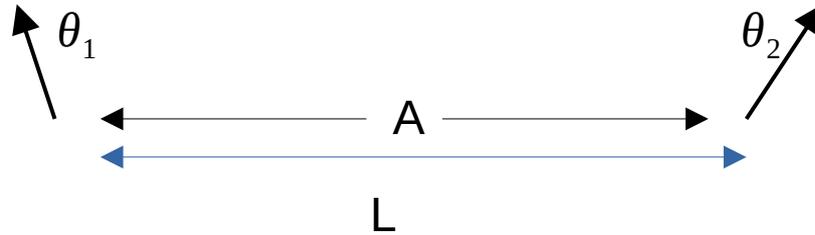
- Modèle « réaliste : distribution probabiliste sous-jacente :  
Une grandeur a une valeur bien définie avant la mesure
- **Mécanique Quantique** :  
Une grandeur ne prend une valeur qu'au moment de la mesure  
⇒ Pas de « réalité en soi »

# 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 :

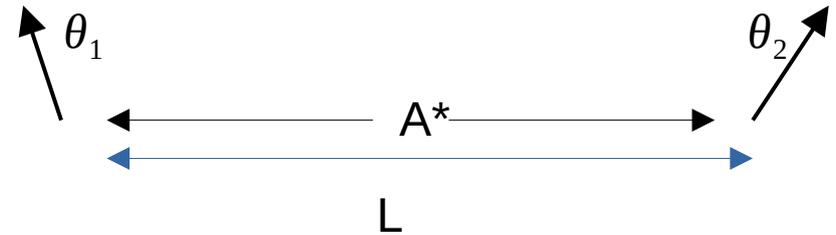
- Il existe une quantité  $F$  telle que :
- pour **tout** modèle réaliste :  $F < 2$
  - **MQ** :  $F = 2\sqrt{2}$  **quelle que soit L**

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

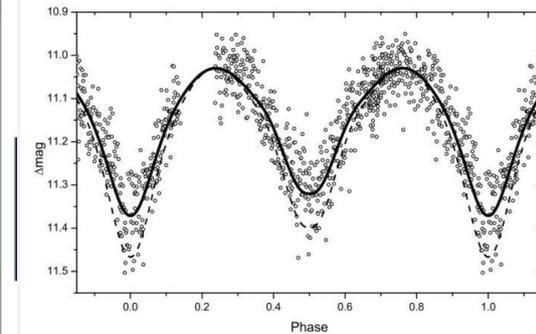
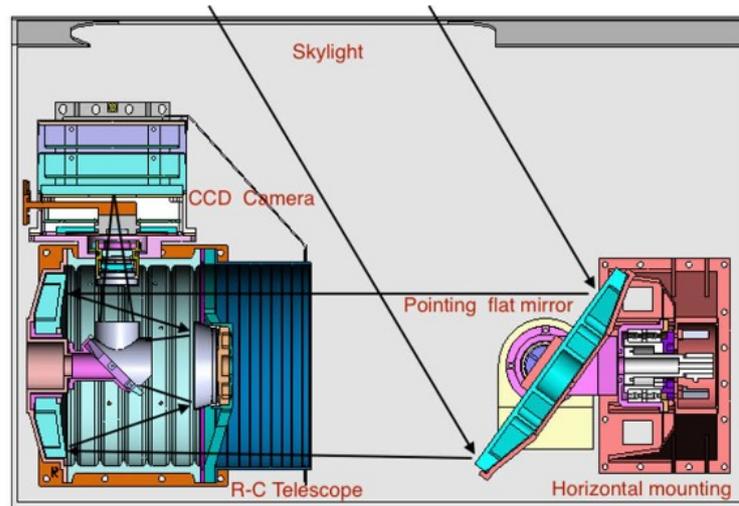
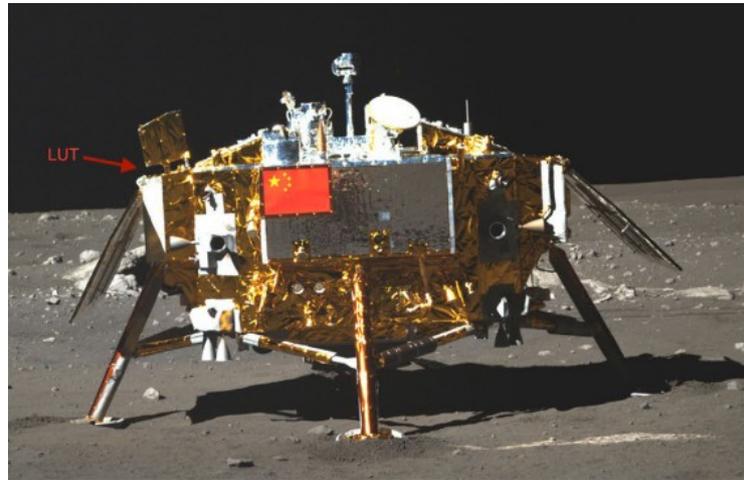
- Apollo : 1969 – 1972
- Luna : 1959 - 1976
- Chang'e 1 : 2007
- Cgang'e 2 : 2010
- Chang'e 3 : 2013
- Chang'e 4 : 2018
- Chang'e 5 : 2020 (retour d'échantillons)
- Artemis I : 2022
- SLIM (Japon) 2023 alunisseur
- Peregrine (Astrobotics) : 2023 alunisseur
- Chandrayaan (Inde) 2024 alunisseur
- ILO-X : 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 ?

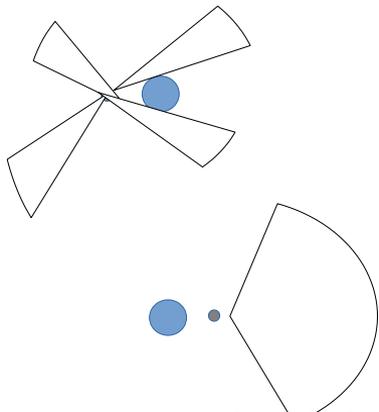
- La présence humaine apporte des complications ( $\Rightarrow$  coûts) : habitats etc
- Mais la présence humaine indispensable pour des opérations délicates
- Un fait : motivations de prestige et de goût de l'aventure

## 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

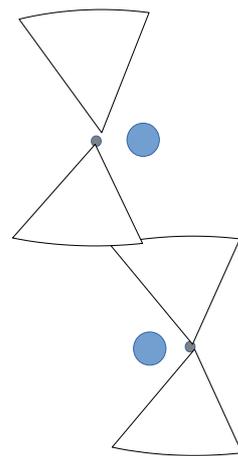
Télescope  
à l'équateur



Tout le ciel  
la moitié  
du temps



Télescope  
au pôle



Moitié du ciel  
Tout le temps



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

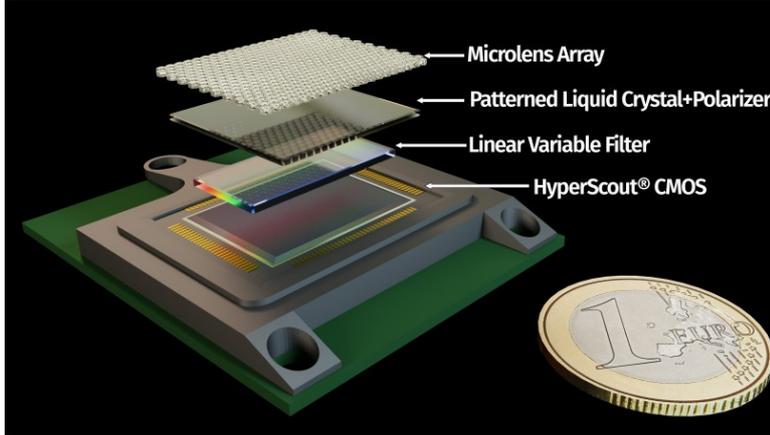
# Projets et idées de télescopes

- 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 cm<sup>3</sup> 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

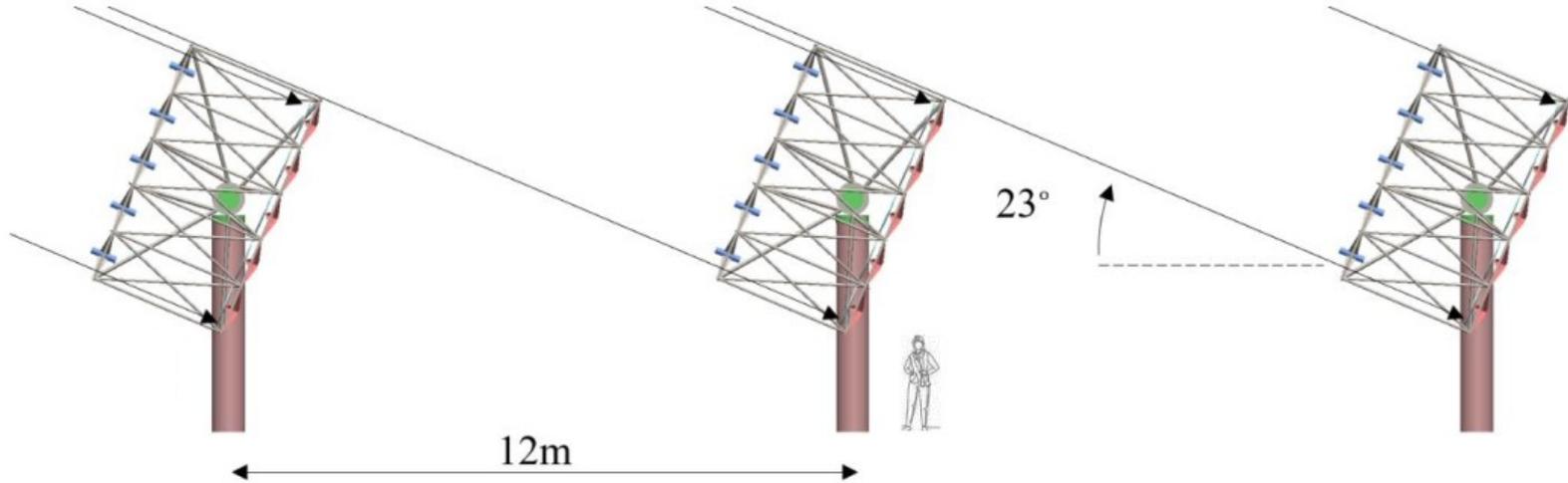
Soumis au programme  
« Payloads and Research  
Investigations on the Surface of  
the Moon » (NASA)

Candidat passager d'un lancement  
en 2028

# Large Fiber Array Spectroscopic Telescope

LFAST (R. Angel)

Spectroscopie des transits



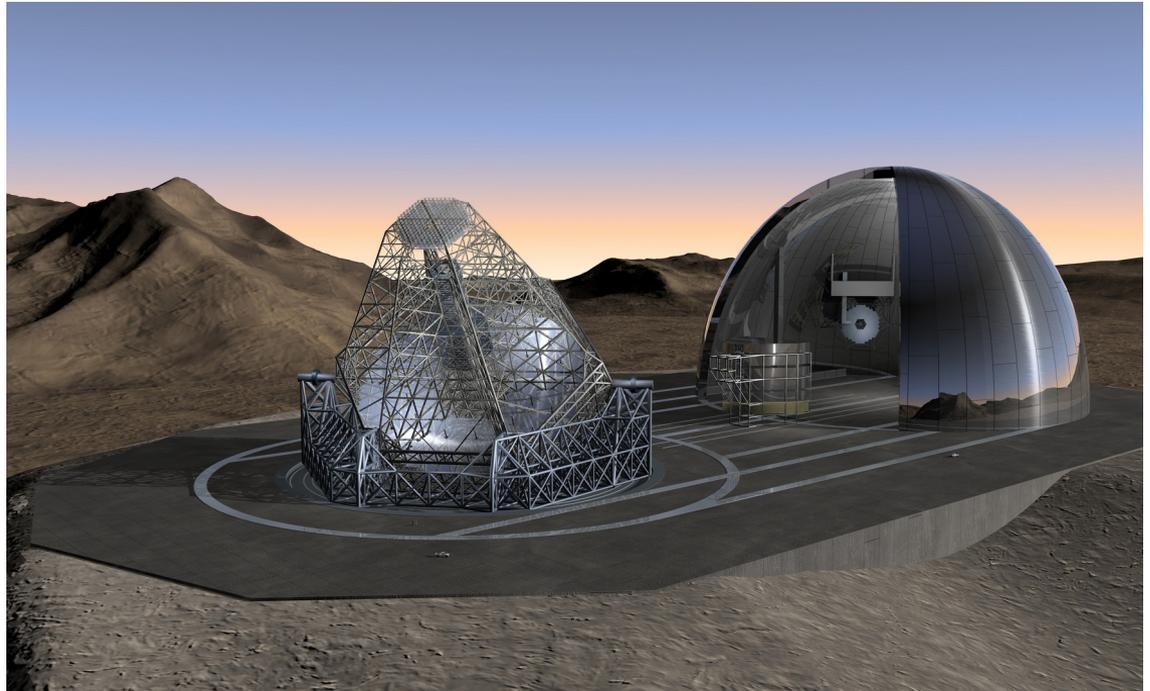
# Lunar-ELT (L-ELT)

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.)

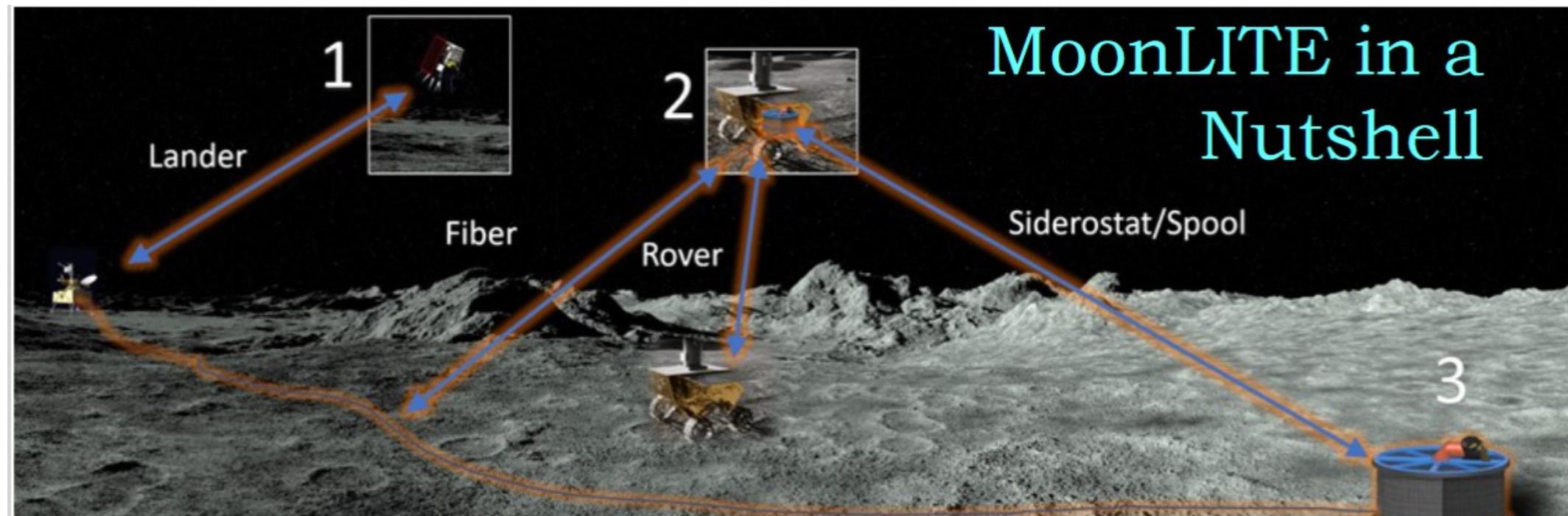
Héritage du projet OWL

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



# Interféromètres

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



# Interféromètres

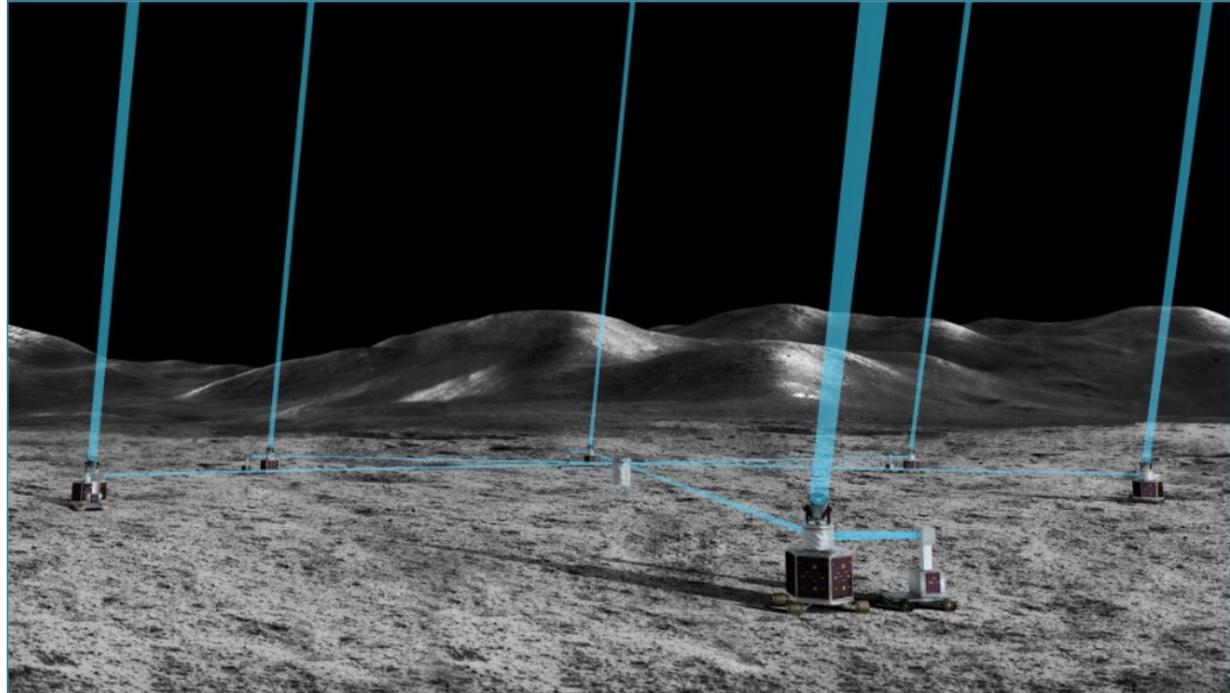
## **AeSI** : **A**rtemis-**e**nabled **S**tellar **I**mager

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  $1 \mu$  : 5 mas

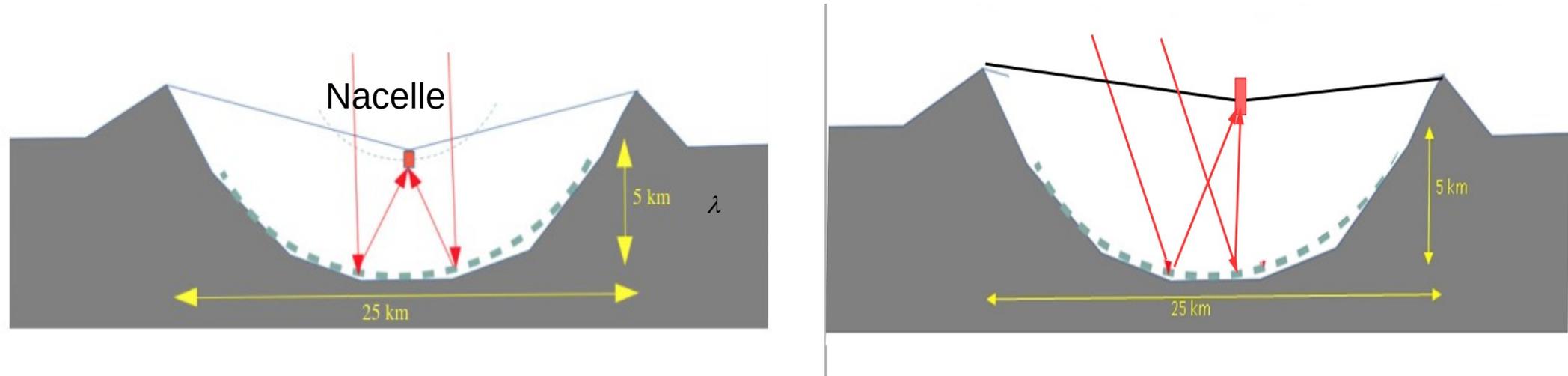
Pour l'imagerie des exoplanètes, élimination  
de l'éblouissement de l'étoile par auto-interférence destructive  
(« nulling »)

# 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)



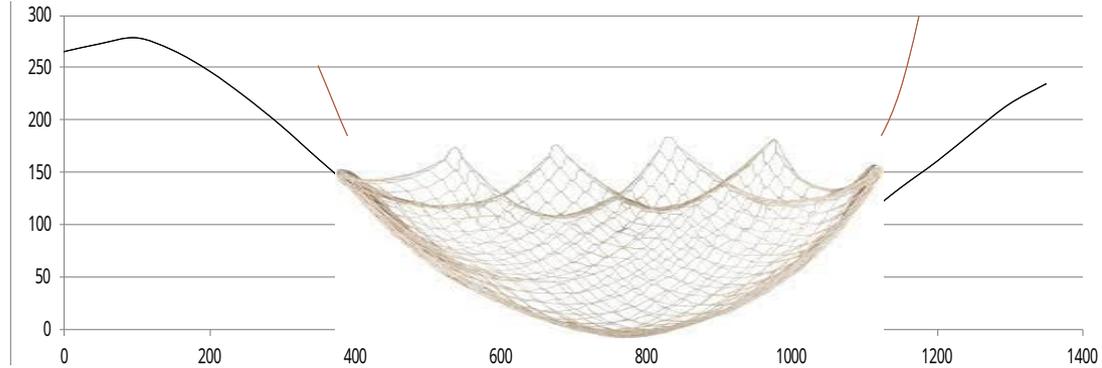
Avantages sur un interféromètre classique :

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

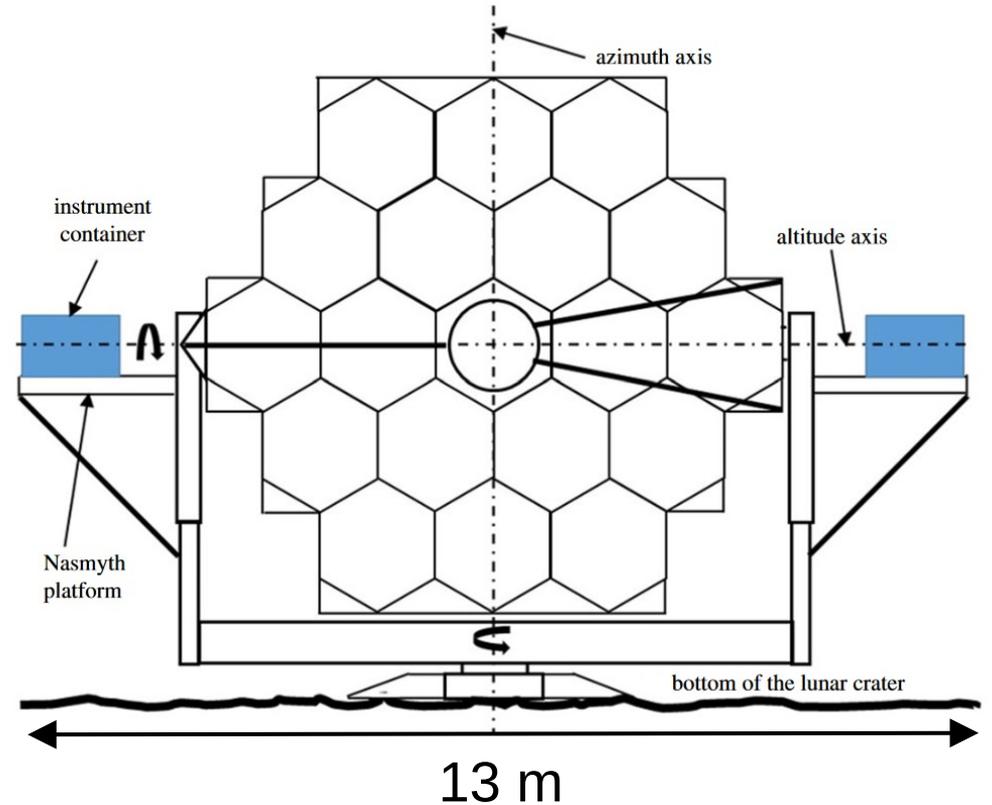
ALLURE

**Astronomical Large L**unar  
**E**xplorer

galaxies etc.

Au pôle sud (à l'abri du Soleil)

(J.-P. Maillard)



# Infrarouge

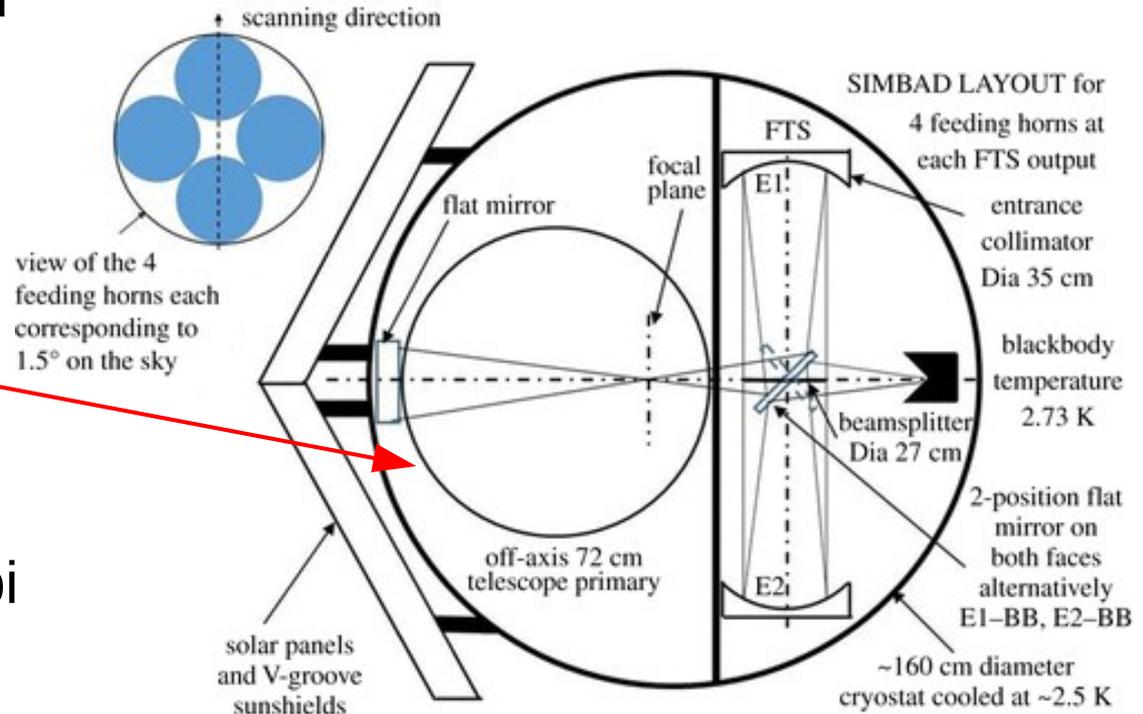
SIMBAD Spectroscopic Interferometer for Microwave **BA**ckground **D**istortions (J.-P. Maillard)

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

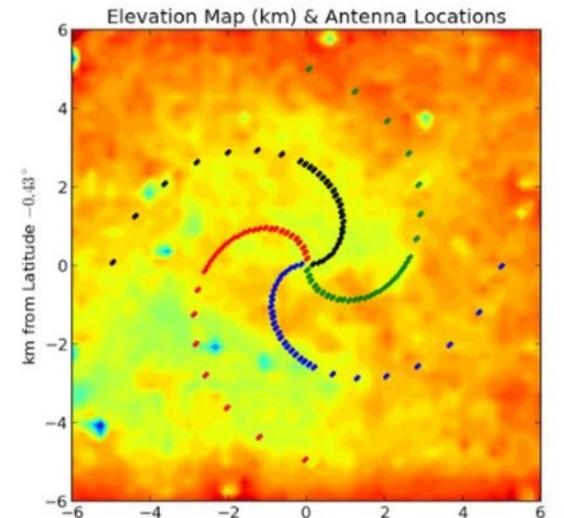
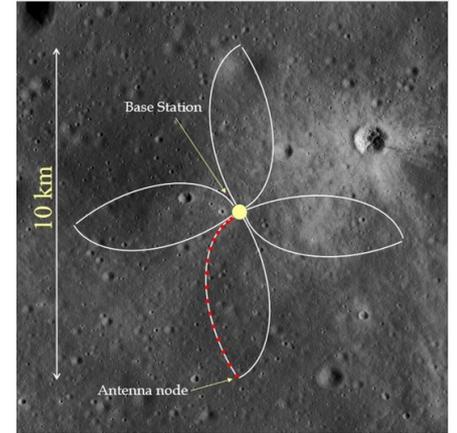


# Radiotélescopes

- **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

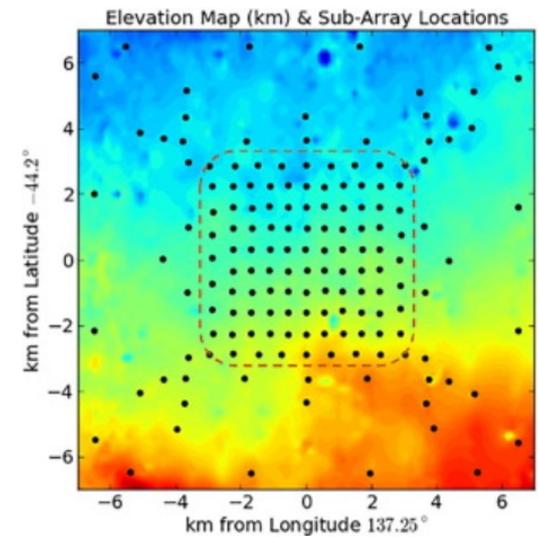


# FarView

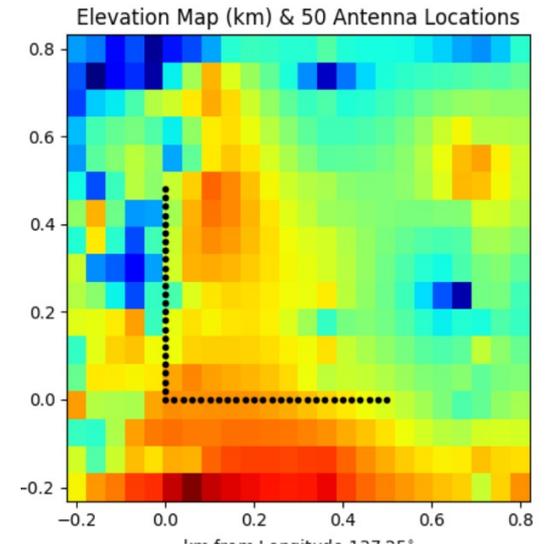
Un LOFAR lunaire

100.000 antennes sur 10 km x 10 km

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

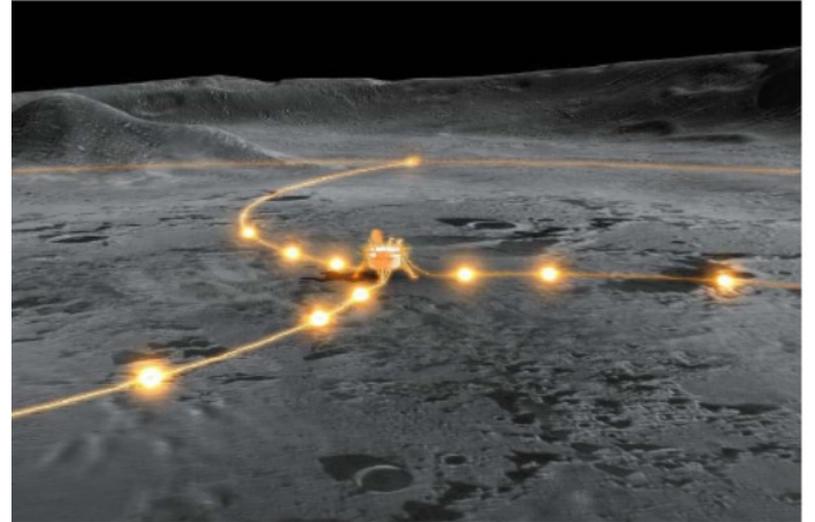


Précurseur



# ALO Astronomy Lunar Observatory

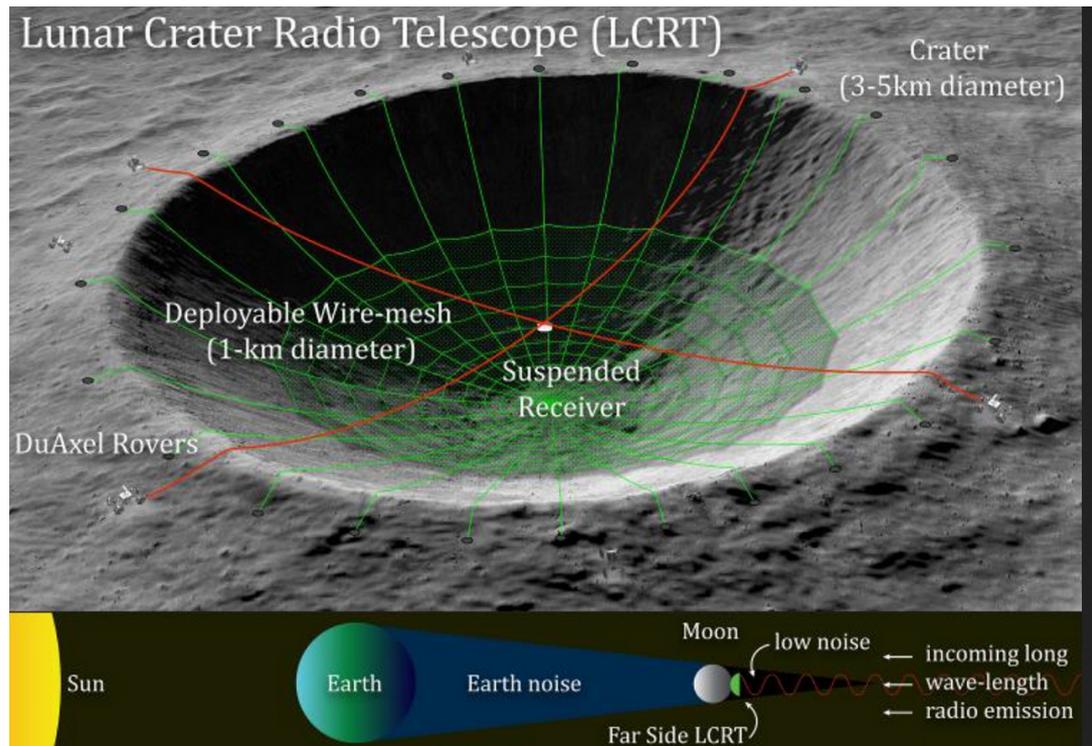
- Concept: Réseau d'antennes déployé sur la face cachée de la Lune. 100 antennes
  - Mise à poste avec Argonaut (ESA)
  - Etudes en cours
- Objectif scientifique principal: cosmologie (Univers jeune)



# Lunar Crater Radio Telescope (LCRT)

Projet NASA  
Face cachée de la Lune

Combiner avec l'hypertélescope ?



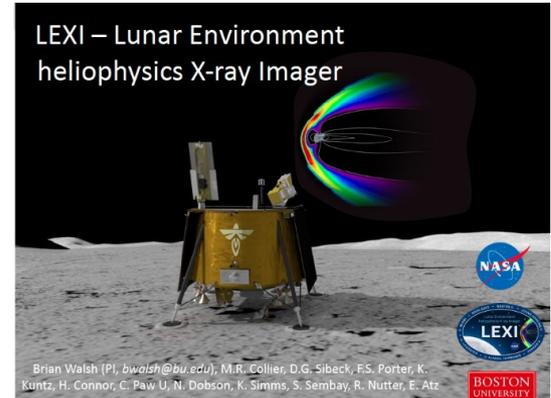
LUNES : **LUN**ar t**E**rahertz tele**S**cope (soumis à ESA Voyage 2050)

# Radio-interférométrie Terre-Lune

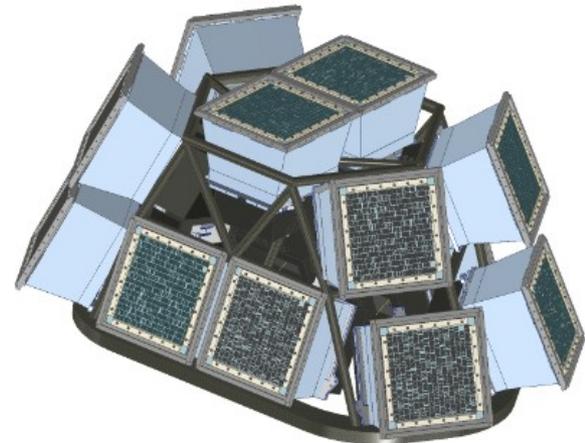
- Résolution angulaire  $\delta\lambda$  pour une longueur d'onde  $\lambda$  est  $\delta\lambda = \lambda/360.000$  km
  - $\delta\lambda = 10$   $\mu$ arcsec à 10 GHz
  - $\delta\lambda = 0.4$   $\mu$ arcsec à 300 GHz

# Astronomie X

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



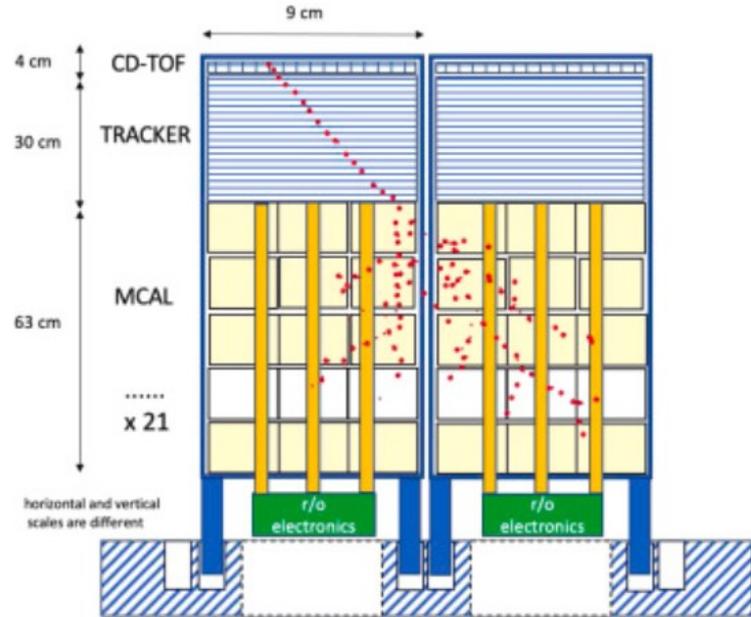
LEM-X (Italie) 2-50 keV  
Tests labo en cours



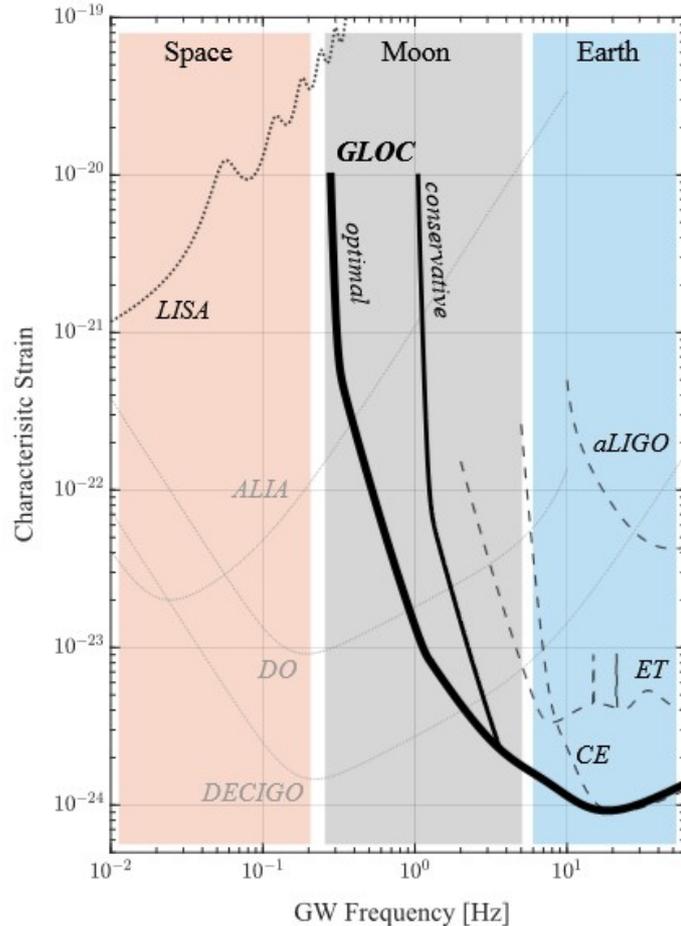
# Rayons cosmiques

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

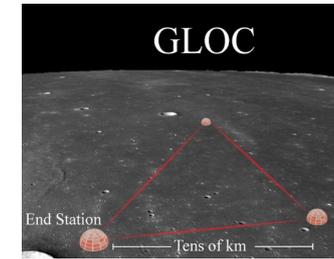
- Réseau de 100 détecteurs : 9cm x 9cm x 1m
- Exemple : 2 détecteurs adjacents



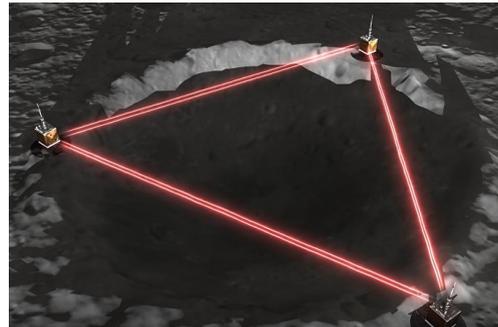
# Détecteurs d'ondes gravitationnelles



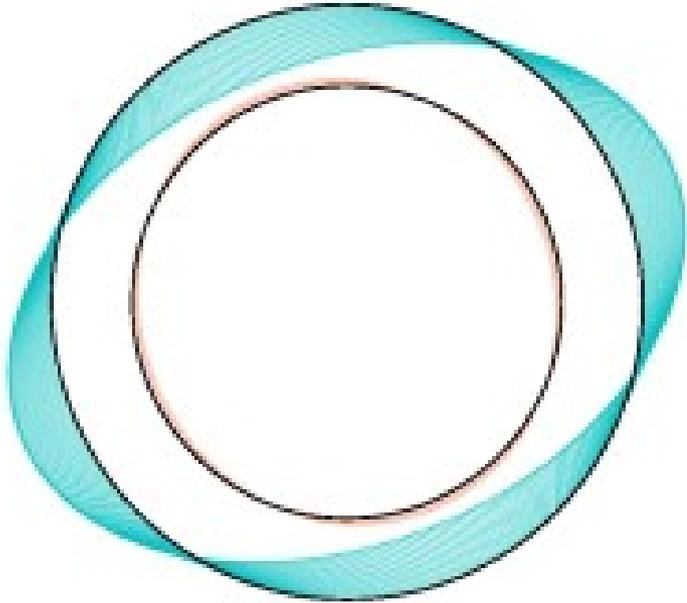
**GLOC** (A. Loeb)  
**G**ravitational-wave  
**L**unar **O**bservatory  
for **C**osmology



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



# La Lune comme résonateur gravitationnel

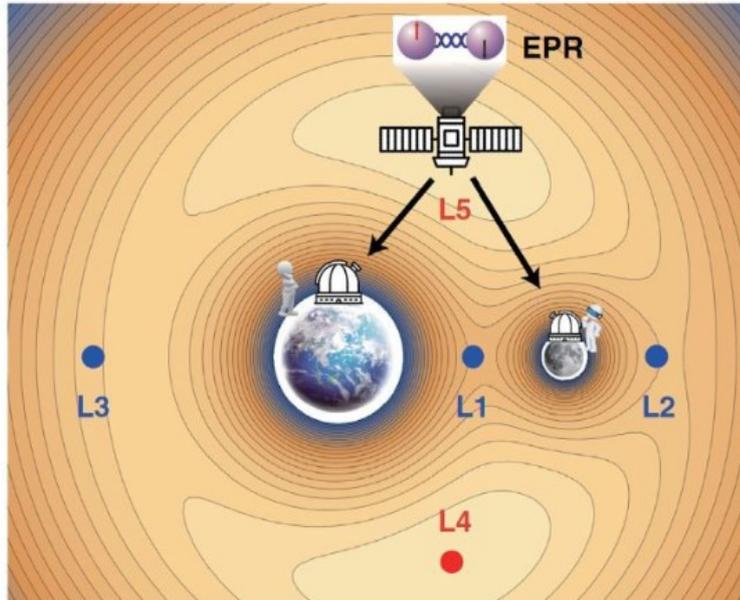


Déformation à 1 mHz pour 2 trous noirs:  $10^{-11}$  cm  
Virgo : détection à  $10^{-21}$  cm de la variation  
de la distance entre miroirs

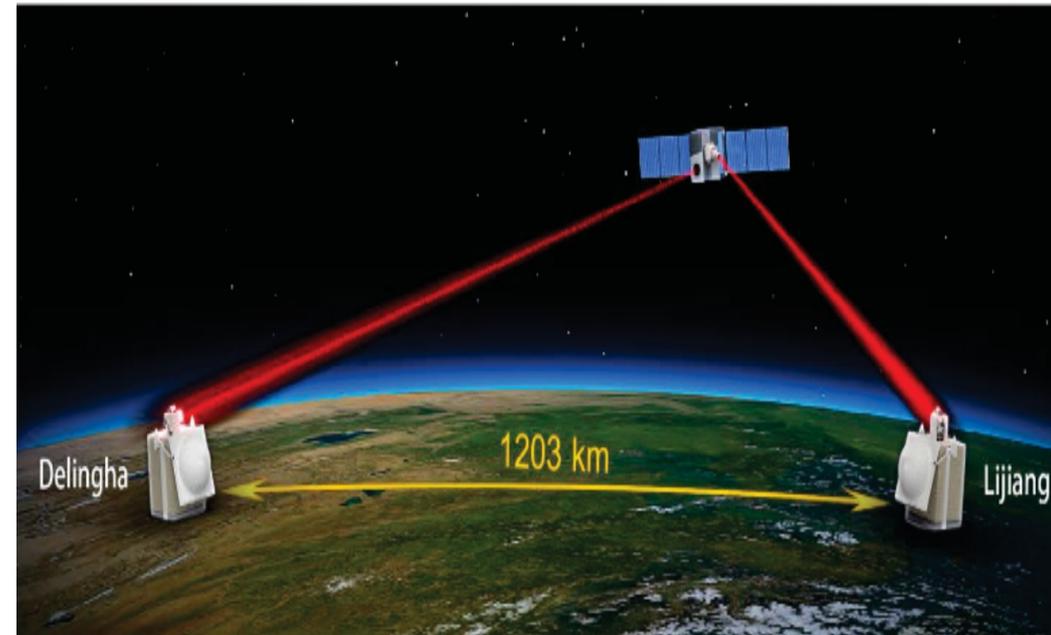
Problèmes : bruits (sismique, mouvements  
de la Lune)

# 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

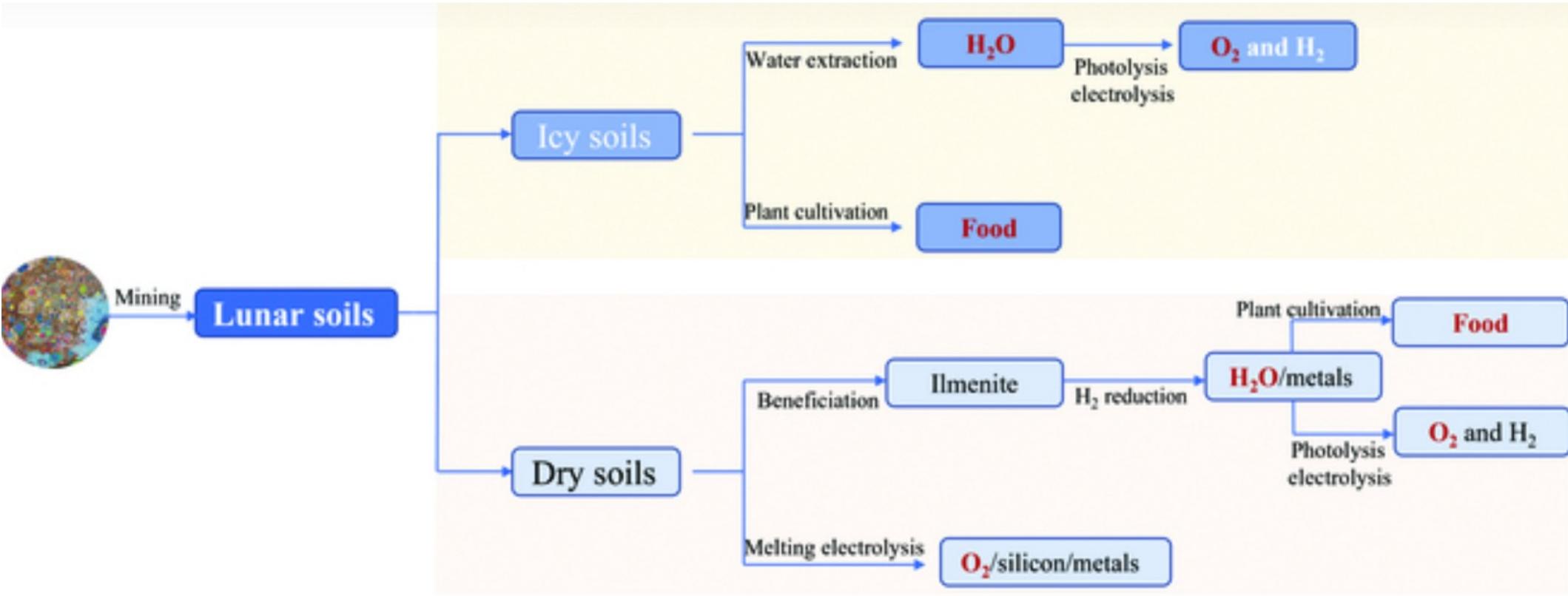
# Connaissance du terrain

- 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

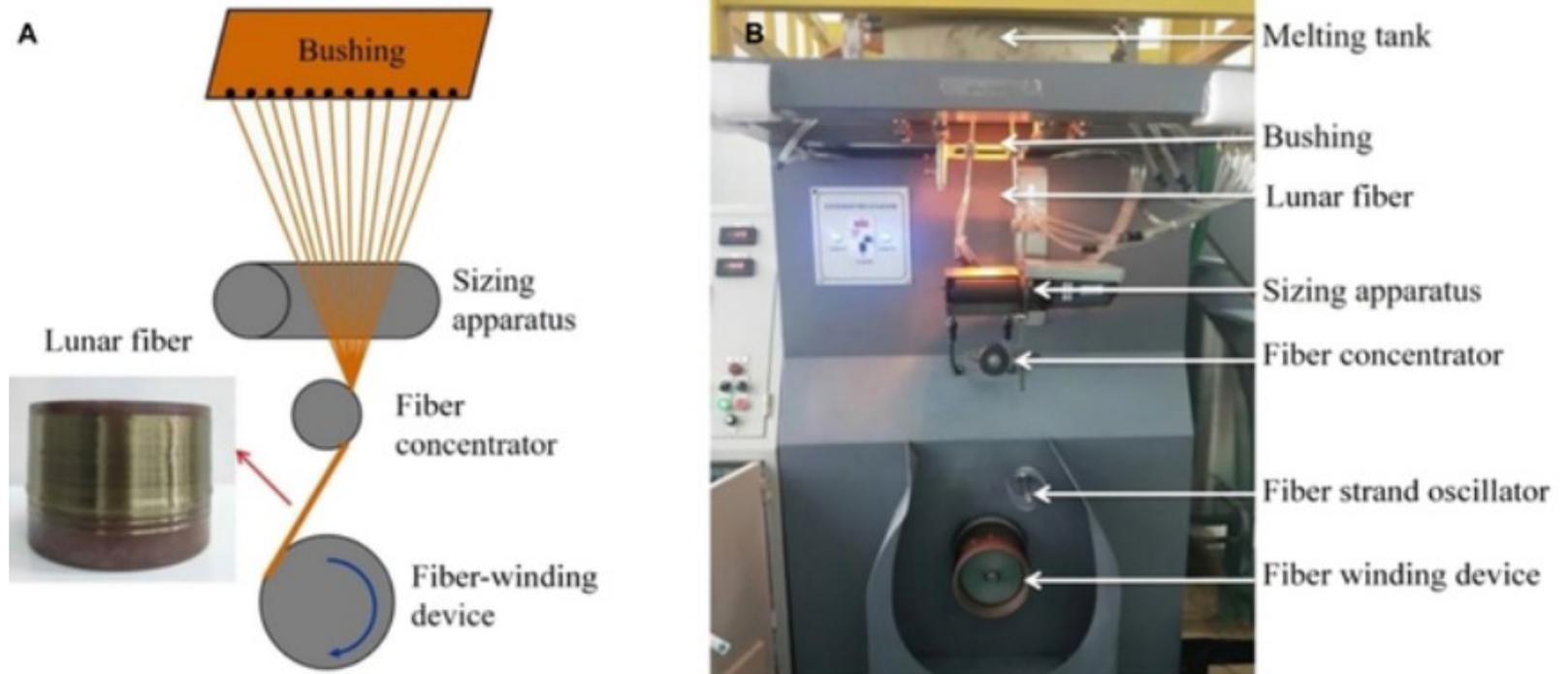
- Eau
- Hydrogène
- Minéraux : silicium, métaux
- Fibres
- Volatiles
- Energie solaire (rayonnement lumineux, rayons cosmiques)
- Leur distribution sur la surface
- Leur distribution en profondeur

# 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)

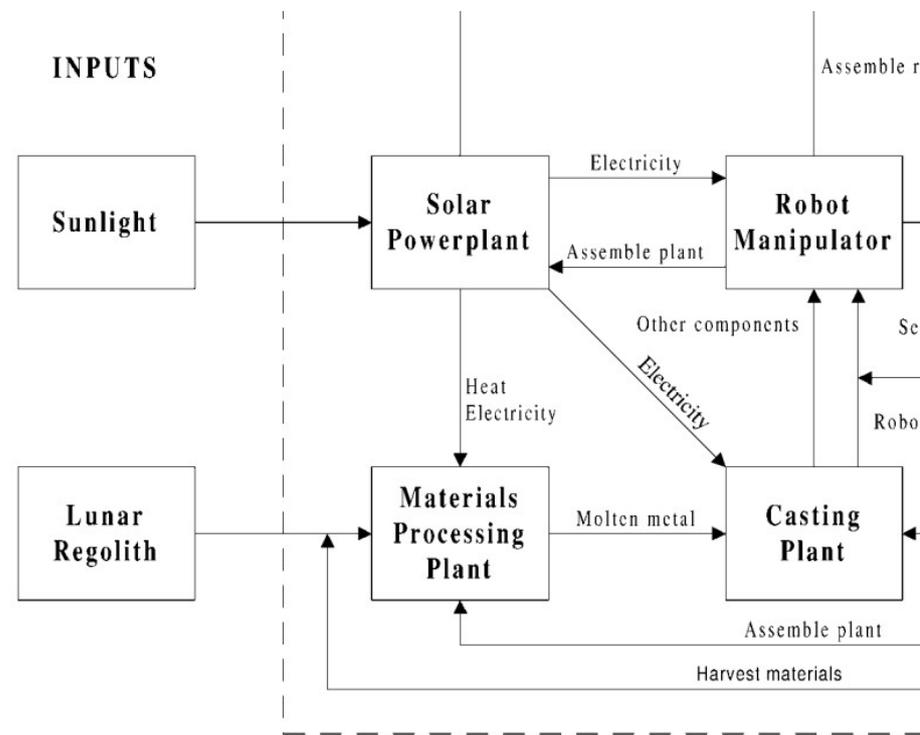
# Fabrications in situ

## Que construire

- Habitats
- Objets courants pour les astronautes
- Equipements scientifiques

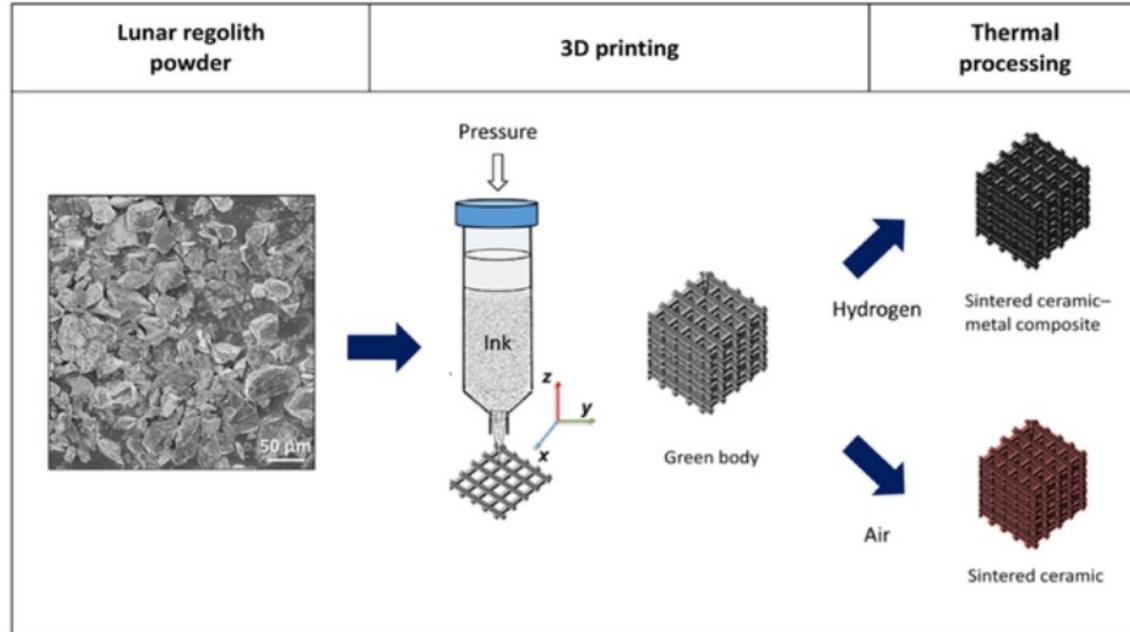
## Comment construire (tests labo en cours)

- 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



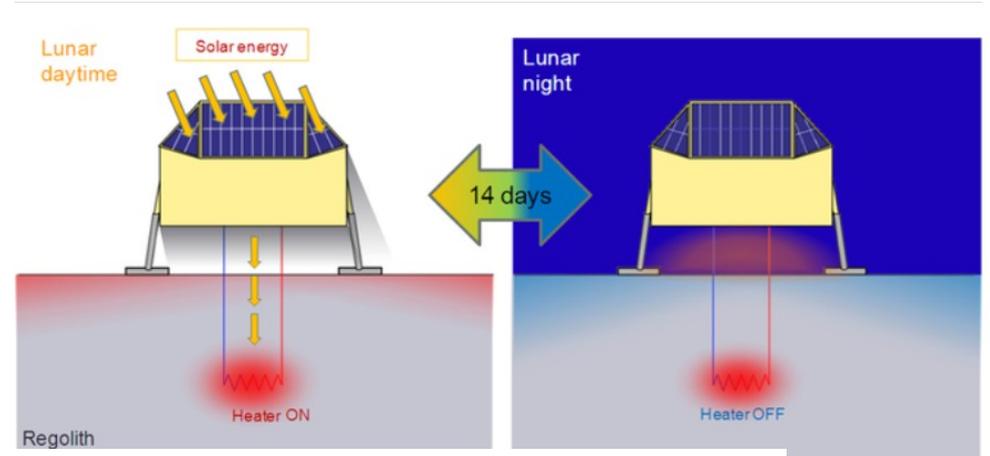
# Fabrications in situ

- |

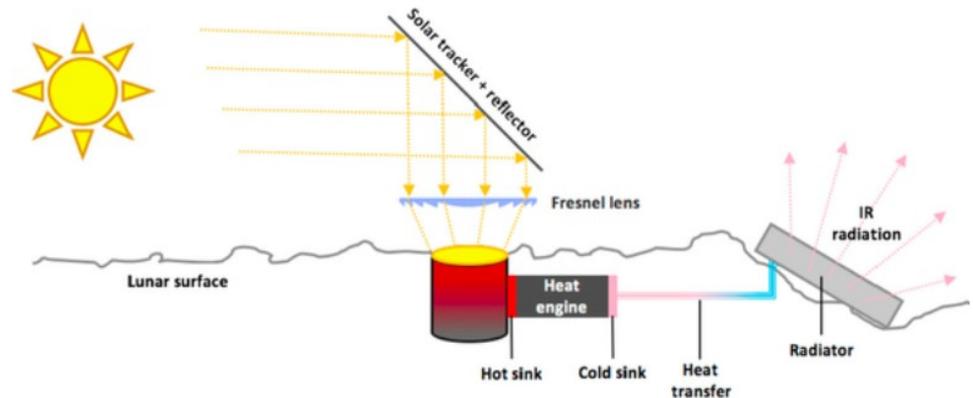


# Conversion in situ de l'énergie

- Stockage de l'énergie solaire



- Conversion de l'énergie solaire



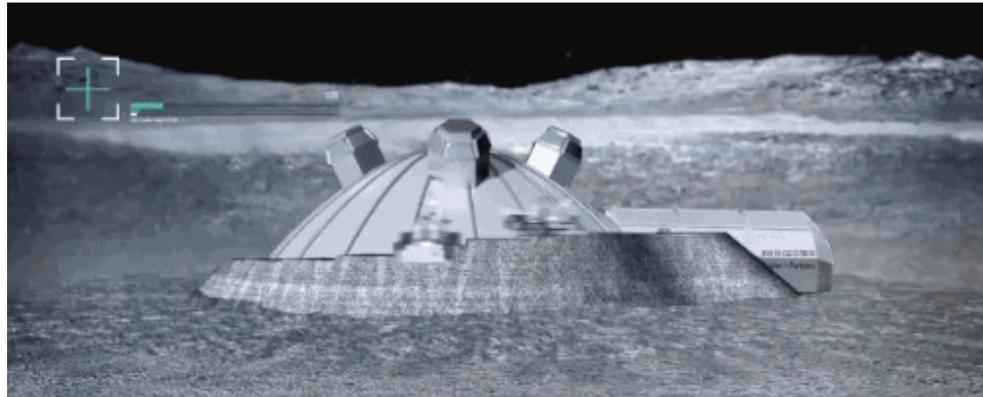
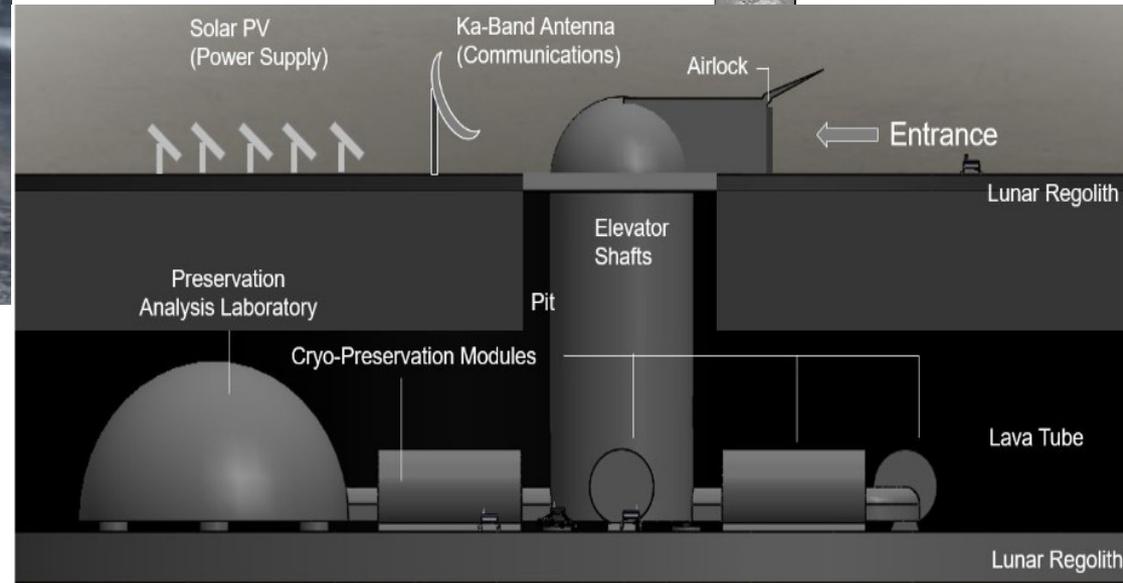
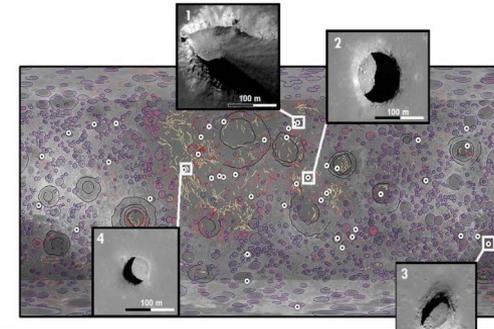
# Habitats et conditions de vie

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

# Habitat

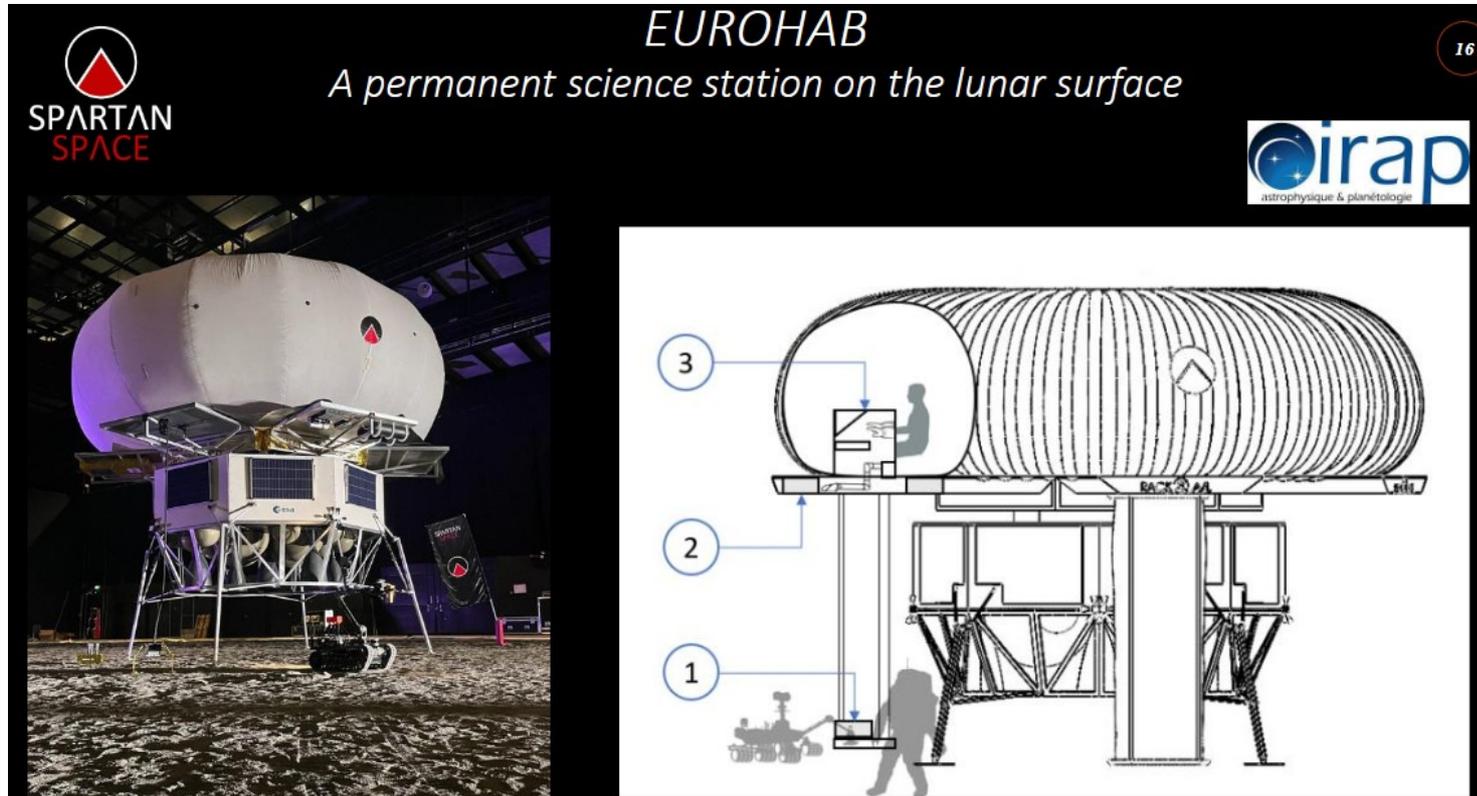
Projet de construction  
À partir du régolithe (ESA)

## 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



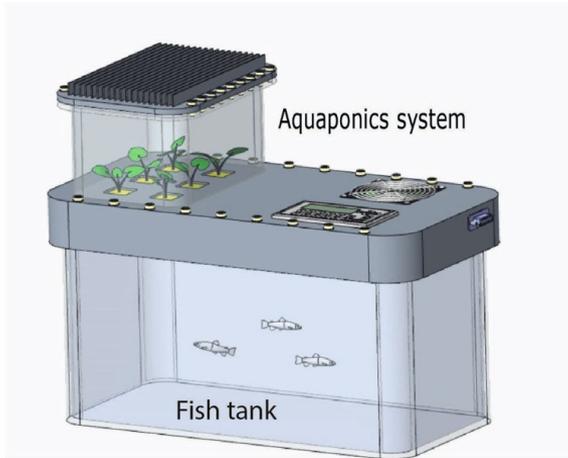
# Aquaculture

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

- Programme **LA**unch **V**ibration on fish **E**mryo - U. Montpellier
- Programme Lunar Hatch - Ifremer
- Etude BioMoon (UK)



**Aquaculture lunaire**



- Plus bas consommateur d'énergie
- Moins producteur de CO<sub>2</sub> qu'un mammifère
- Meilleur producteur d'énergie

# Transports

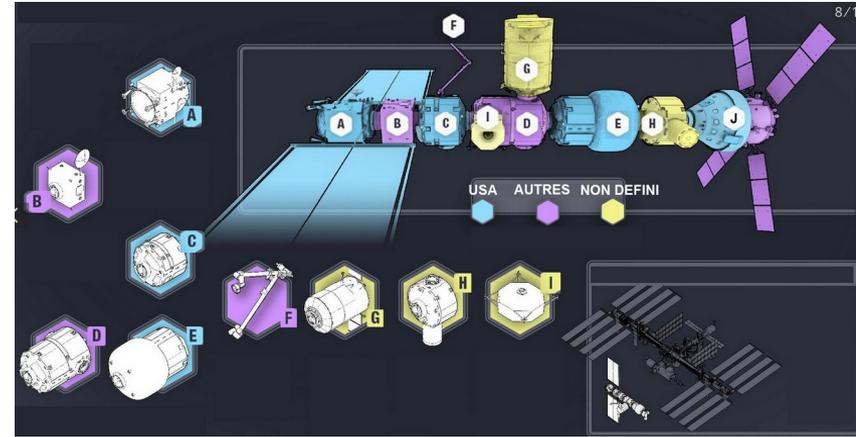
- Lanceurs depuis la Terre
  - StarShip (SpaceX) : charge utile 100 tonnes
  - Space Launch System (NASA) : charge utile 38 tonnes
  - Longue Marche 9 (Chine)
  - Blue Moon sur New Glenn (Blue Origin) charge utile 13 tonnes
- Station relai circum-lunaire Gateway (NASA)
- Transfert vers le sol lunaire : 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)

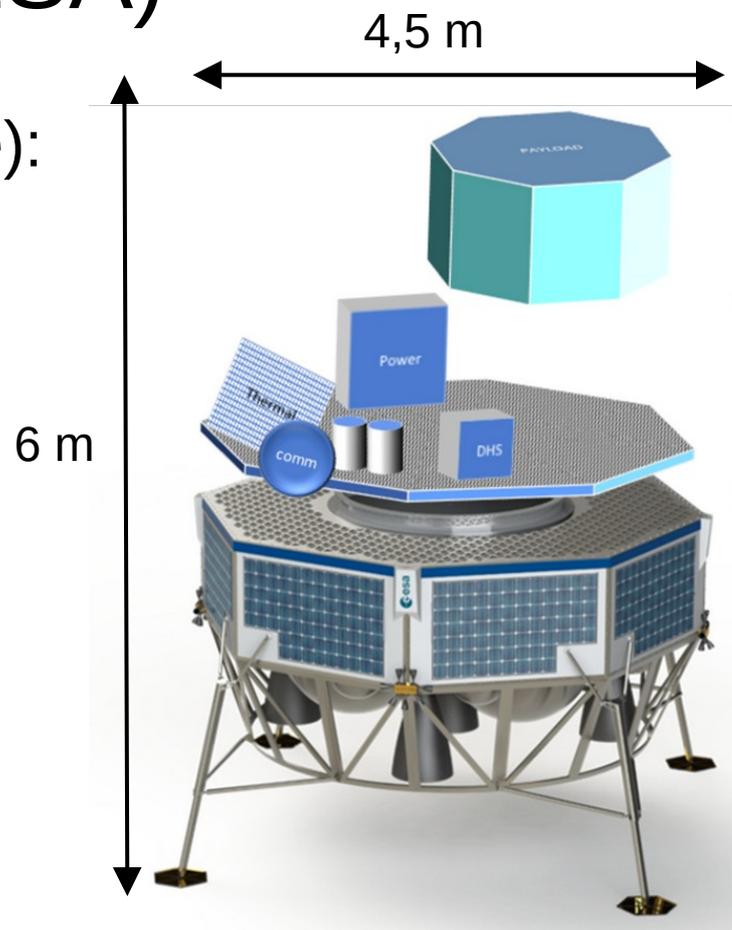


# Argonaut (ESA)

Alunisseur multi charges utiles (1,5 tonne):

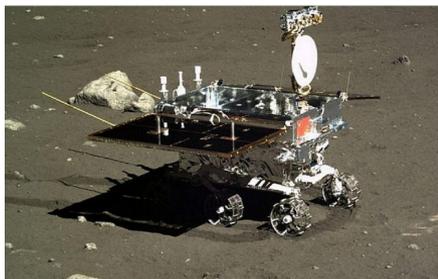
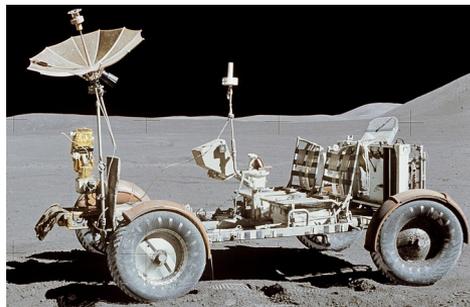
- Rover(s)
- Instruments d'analyse du sol
- Télescope(s)
- Sources d'énergie au sol
- Fourniture de carburant à Gateway
- ...

1<sup>er</sup> 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



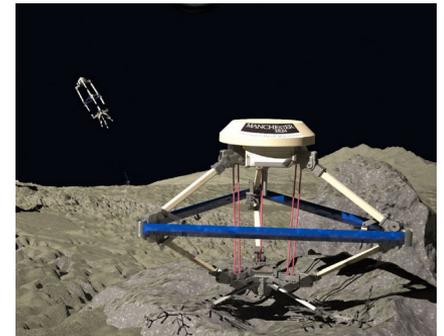
- Flexible Levitation On A Track (NASA)



- 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

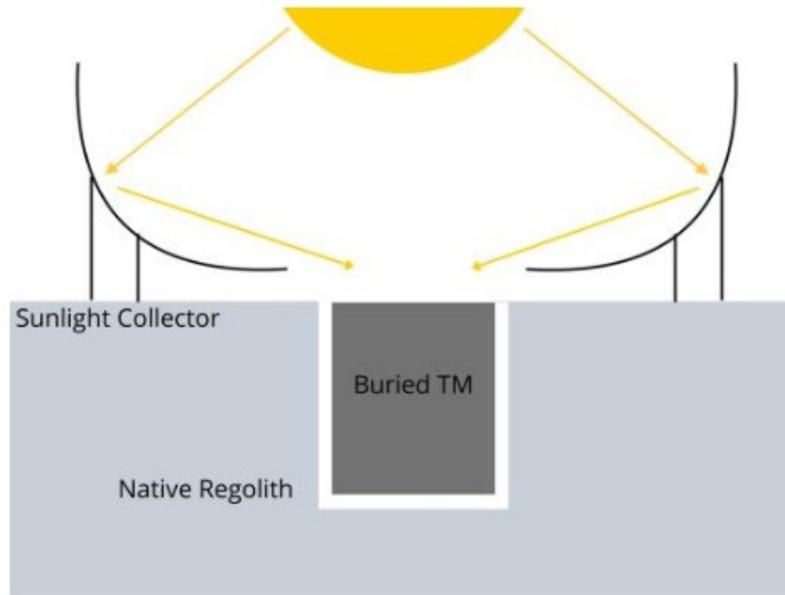
- Panneaux solaires (plus batteries pour les nuits lunaires)
- Générateurs radio-istotopiques
- Récupération de la chaleur stockée dans le régolithe
- Centrales nucléaires
- Transfert d'énergie par laser
- Utilisation de l'eau du régolithe comme carburant pour le retour sur Terre (entreprise Starpath) :
  - electro/thermolyse de la glace : O<sub>2</sub> et H<sub>2</sub> mis en réservoirs
  - O<sub>2</sub> et H<sub>2</sub> carburants pour le retour sur Terre

# Générateurs radio-isotopiques

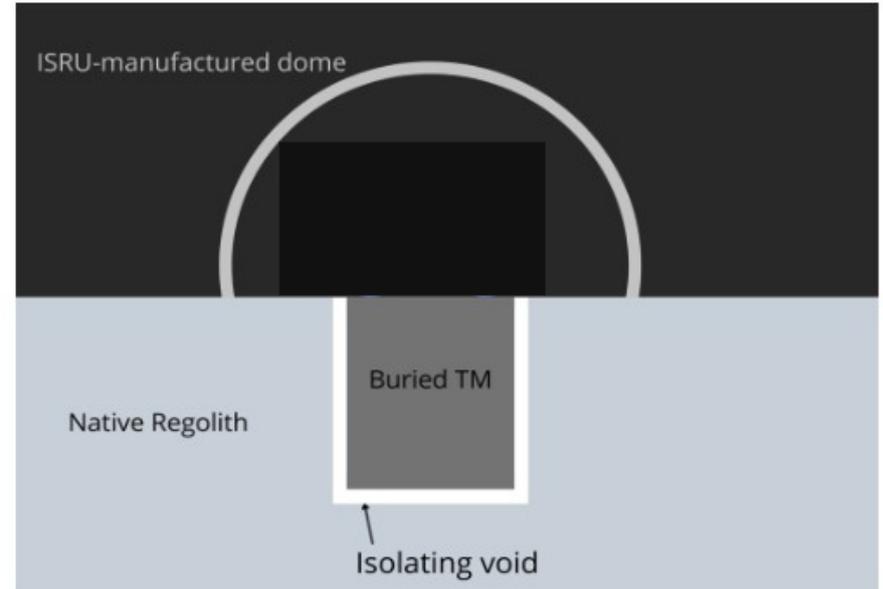
Exemple : Americium-241

- 250 W pour 1.6 kg
- Durée de vie 87.7 ans
- Volume 527 cm<sup>3</sup>

# Stockage de la chaleur dans le régolithe



Jour

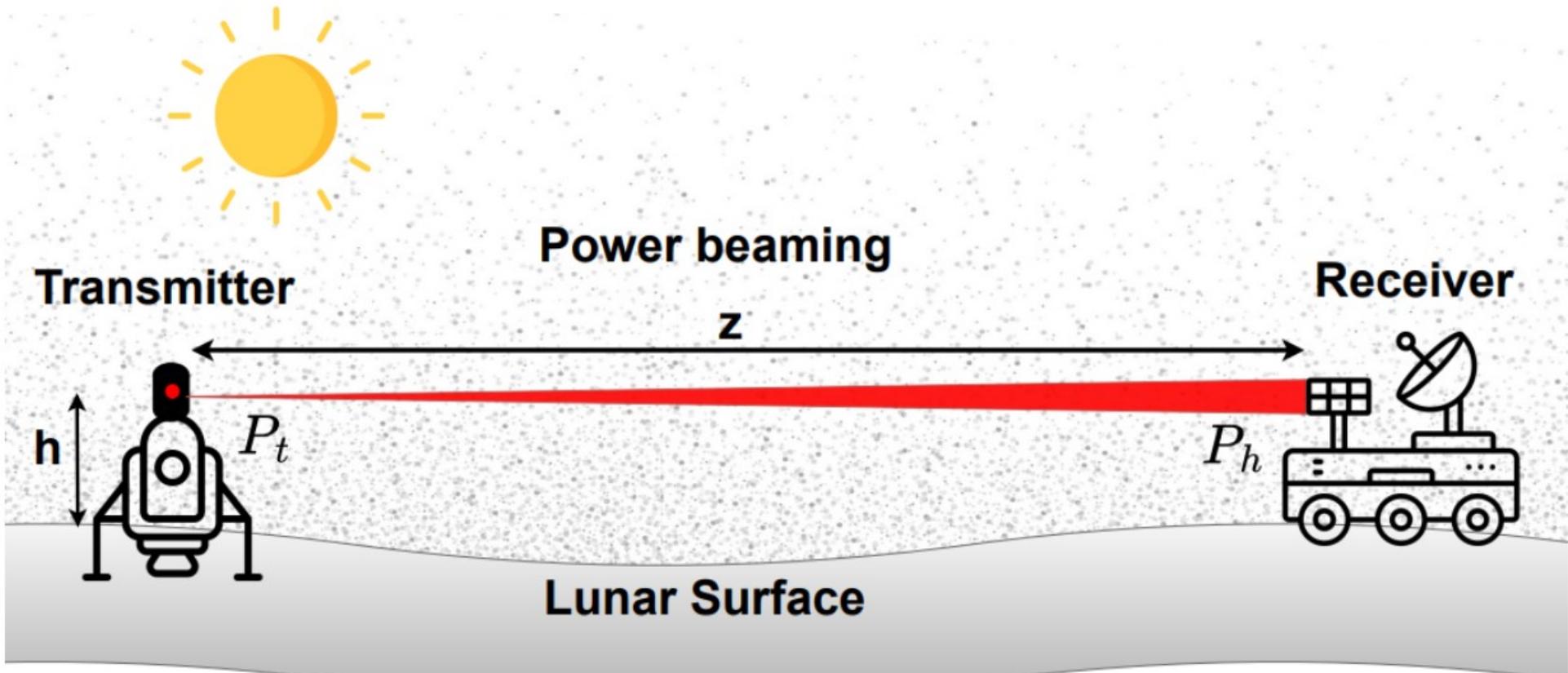


Nuit

# 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 : O<sub>2</sub> et H<sub>2</sub> mis en réservoirs
- O<sub>2</sub> et H<sub>2</sub> 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 »

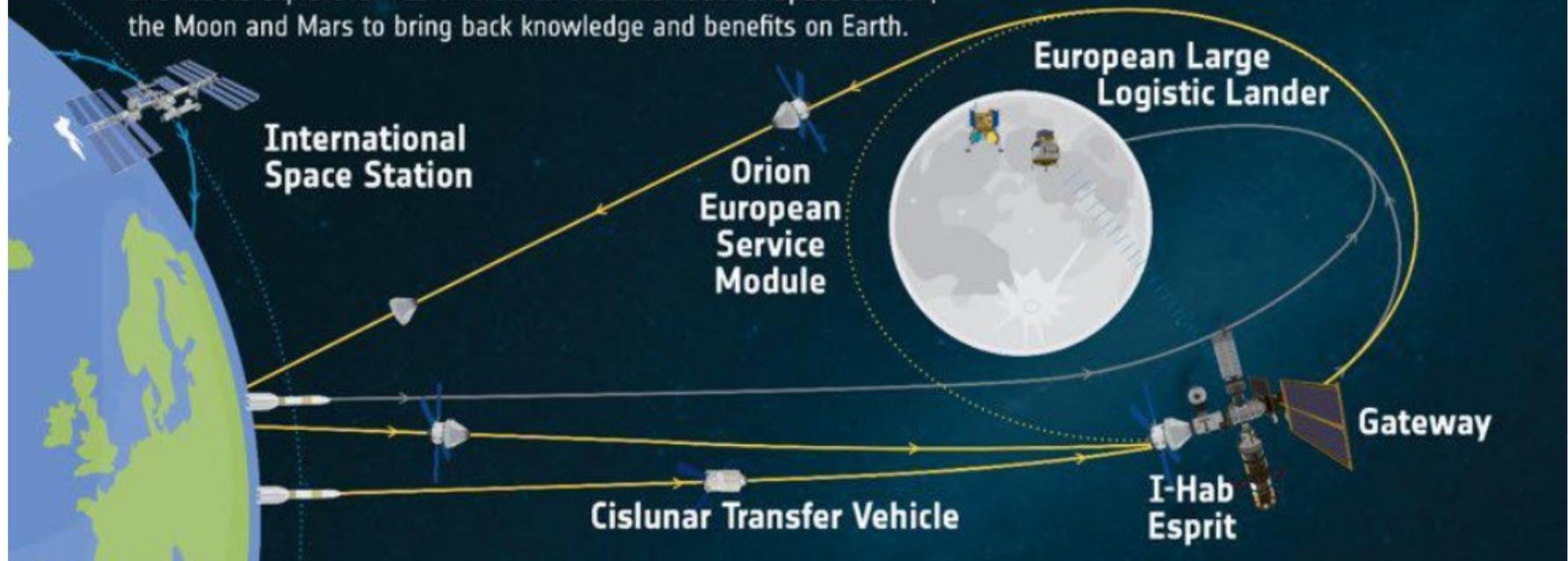
# Les acteurs

- 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.



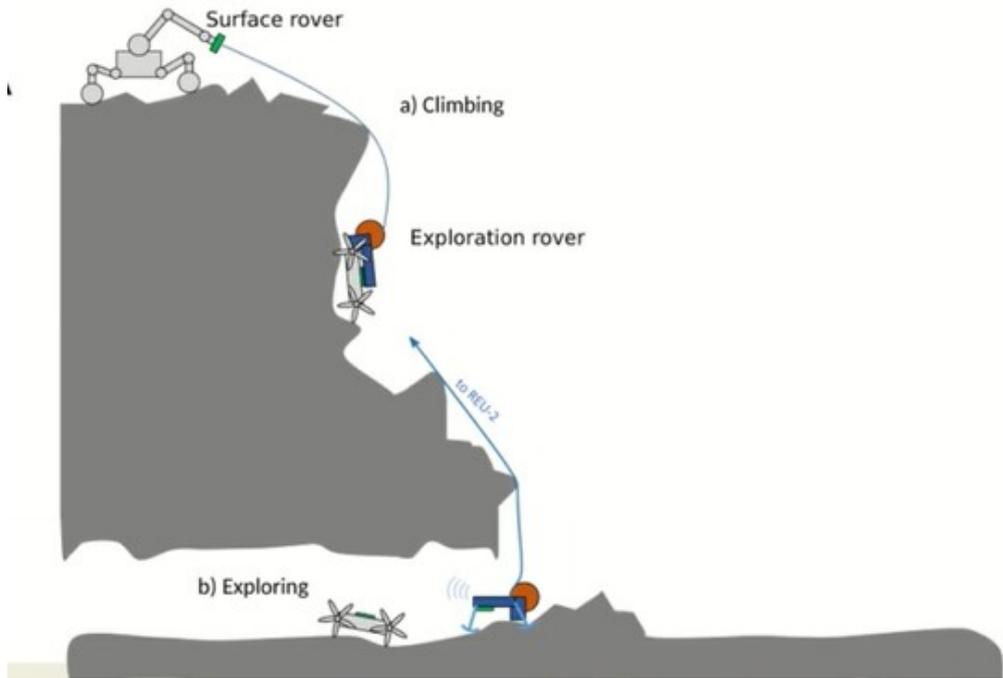
# ESA

- 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

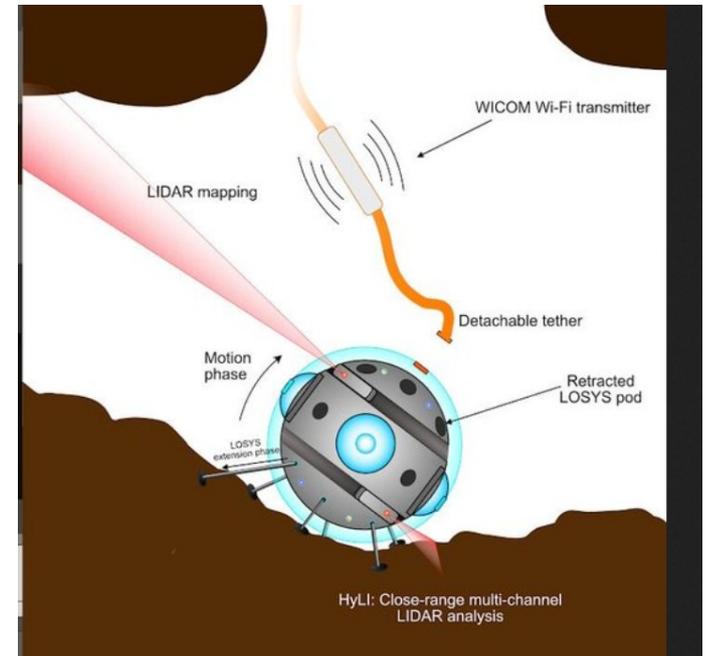
# ESA

## 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  $\gamma$ , 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](mailto:liste.lune@sympa.obspm.fr)

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

# Spéculations

- Electro-agriculture ?
  - « Electro-synthèse » de molécules biologiques à partir de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O 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

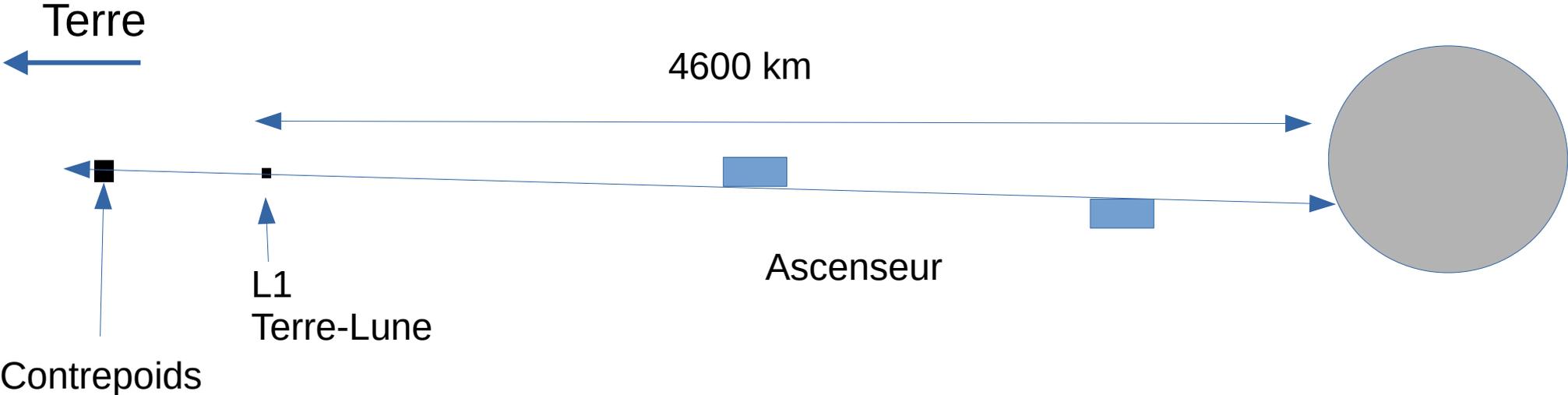
à Joseph Silk et Farrokh Vakili pour m'avoir initié au sujet

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>