

# Les exoplanètes en 2030 et au-delà

*Jean Schneider*

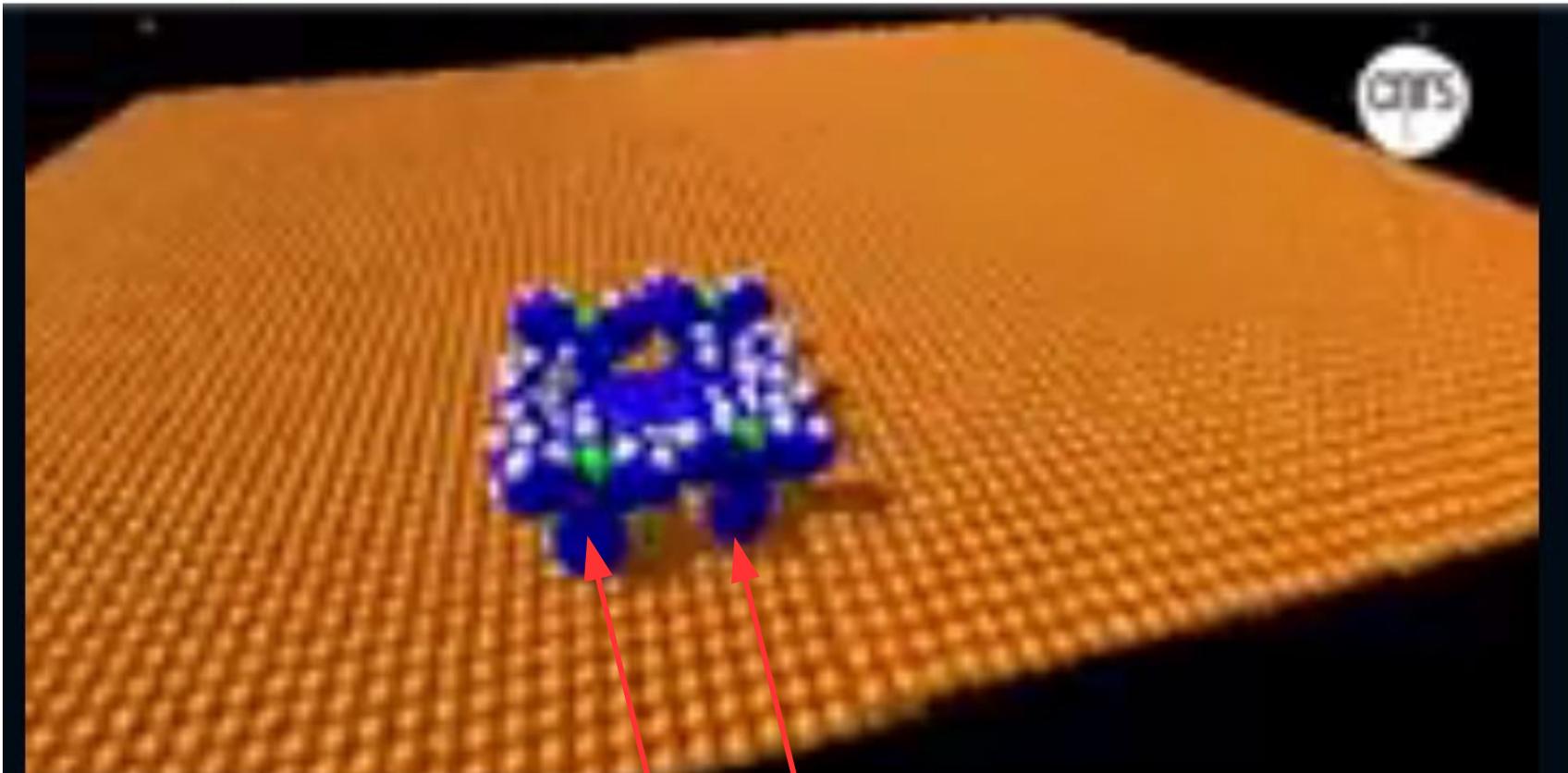
*Luth*

*Jean.schneider@obspm.fr*

# Motivations

- Explorer l'immense avenir pour les exoplanètes (et la recherche de vies qui peuvent s'y développer)
- « Avenir » : au-delà des instruments et missions déjà approuvés
- On n'est jamais trop spéculatif. Exemples :
  - 1959 Feynman : prédiction de la manipulation d'atomes individuels
  - 2010 : avènement des pico-technologies

## Une pico-voiture moléculaire



Roues : molécules C60

# Motivations

- Explorer l'immense avenir pour les exoplanètes (et la recherche de vies qui peuvent s'y développer)
- « Avenir » : au-delà des instruments et missions déjà approuvés
- On n'est jamais trop spéculatif. Exemples :
  - 1959 Feynman : prédiction de la manipulation d'atomes individuels
  - 2010 : avènement des pico-technologies
  - 1610 Kepler : prédiction des voyages dans le système solaire

# Plan

- 1) Quelques grandes questions
- 2) Méthodes et instruments pour y répondre

# Quelques grandes questions

- Exo-géophysique :
  - Volcans
  - Océans (liquides)
  - Montagnes
  - Aurores
  - Queues cométaires d'exoplanètes
  - Glaciers et calottes glaciaires
  - Structure interne
  - Champs magnétiques des planètes

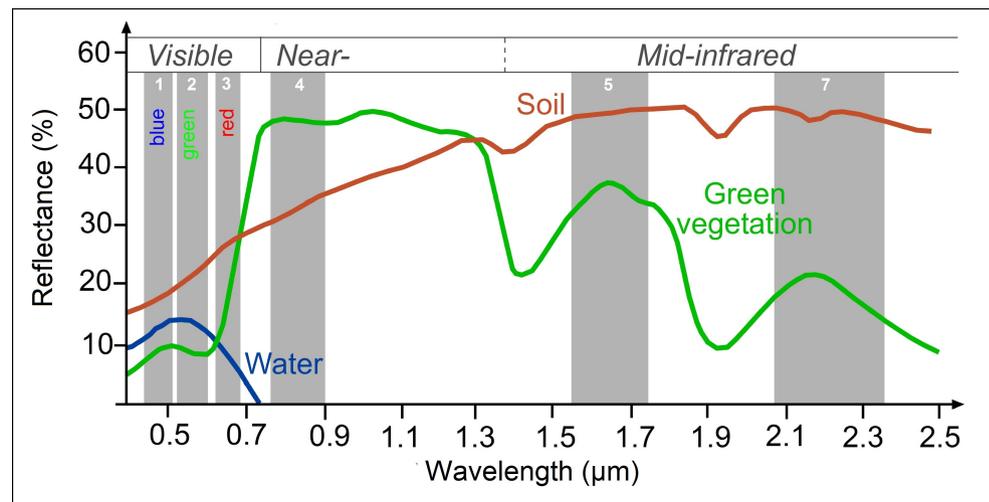
# Quelques grandes questions

- Objets particuliers :
  - Planètes binaires ? (Cabrera 2007)
  - Anneaux
  - Exo-petits corps : comètes, astéroïdes
  - Résonances 1:1 exo-lunes, planètes troyennes, ...
  - Planètes de naines blanches
  - Planètes extragalactiques
  - Planètes primordiales habitables (époque  $T = 300 \text{ K}$ ) ? (Loeb 2014)

# Quelques grandes questions

- Questions de biologie

- Robustesse des biosignatures (ex. O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>) ?
- « Végétation » : spectres stellaires favorables à une photosynthèse?



- Formes exotiques de vie ?

- Ribosomes ⇒ « Azotosomes » (eau ⇒ ammoniac liquide – Lunine 2015)
- Chimiotrophes
- Vie non chimique (cristaux liquides, plasmas, dislocations dans les cristaux ..)?

# Quelques

- Questions de biologie
  - Robustesse des
  - « Végétation » : s
  - Formes exotiques
    - Ribosomes = (2015)
    - Chimiotrophe
    - Vie non chimique (cristaux ..)?

Schneider 1977

JEAN SCHNEIDER

symbolize this mechanism, named the Frank-Read sources, (Friedel, 1964) in the way shown in Figure 4. This mechanism is effective when  $\sigma > \mu b/l$  where  $l$  is the distance between the pinning points.



Fig. 4. Schematization of the Frank-Read source mechanism.

For the physiology I seek, I suggest in a first model the use of several kinds of complex interlocking chains of dislocation loops like that shown on Figure 5.

These chains could be the material for some kind of 'molecular biology'. Some of them could play the role of DNA, others that of 'proteins'. Then the information can be represented by the topological type of these chains; the precise shape of the loops is here of no importance.



Fig. 5. Complex chain of dislocation loops.

The 'dislocational' reactions can be made of the elementary reactions shown in Figure 6.

We thus have complex chains which

- are stable,
- can contain rich information,
- can diffuse it into the surrounding through complex sets of dislocational reactions

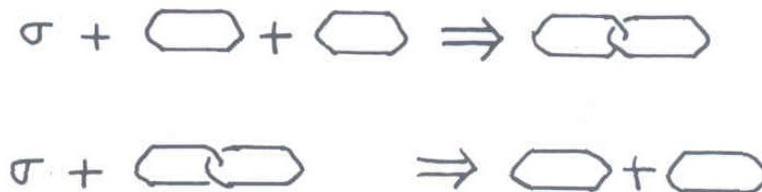


Fig. 6. Schematization of a 'dislocational' reaction.

This is a first model of physiology. Just to show the variety of models one can try, here is a second example: consider a network of dislocations for instance of the type shown in Figure 7. It can clearly contain a high degree of structural

# Quelques grandes questions

- Questions de biologie
  - Robustesse des biosignatures (ex. O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>) ?
  - « Végétation » : spectres stellaires favorables à une photosynthèse?
  - Formes exotiques de vie ?
    - Ribosomes ⇒ « Azotosomes » (eau ⇒ ammoniac liquide – Lunine 2015)
    - Chimiotrophes
    - Vie non chimique (cristaux liquides, plasmas, dislocations dans les cristaux ..)?
  - Organismes macroscopique nécessairement multi-cellulaires ?
  - Division végétal/animal pertinente ? (ex : animaux photosynthétiques?)
  - Panspermie ?
  - Habitabilité de planètes primordiales (époque T = 300 k) ?

# Quelques grandes questions

- Interactions étoiles planètes :
  - Effet retardé des vents stellaires sur les planètes:

$$\Delta T = a_{\text{planète}} / V_{\text{vent}}$$

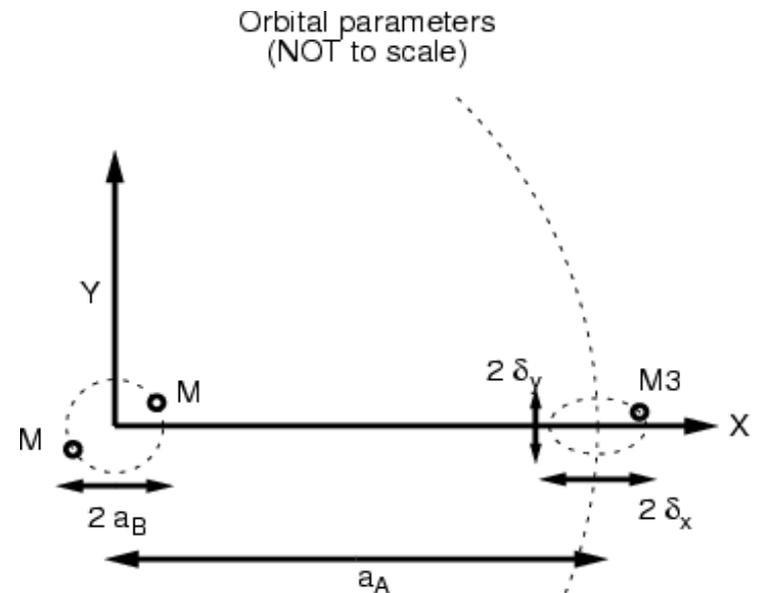
- Se prémunir d'artefacts . Exemples :

- VR et astrométrie :

Planète ou étoile triple ?

(Schneider & Cabrera 2006)

- Astrométrie : planète ou disque asymétrique ? (Kral et al. 2016)
- Fausses biosignatures (O<sub>2</sub> abiotique?) Harman et al. 2015



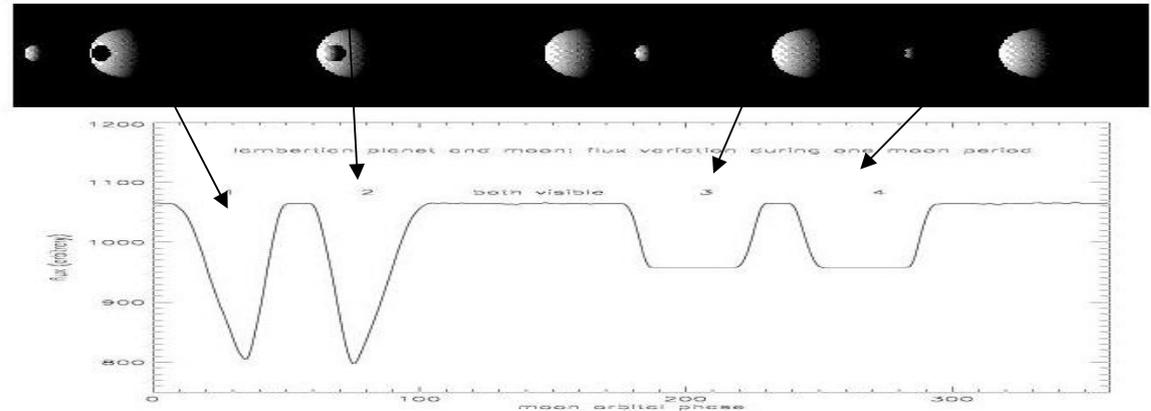
# Méthodes

- 1) Imagerie monopixel (rapide et/ou haute précision photométrique)
- 2) Spectroscopie très haute résolution des planètes
- 3) (Spectro - ) imagerie multi-pixel
- 4) Variations temporelles
- 5) Exploration in situ

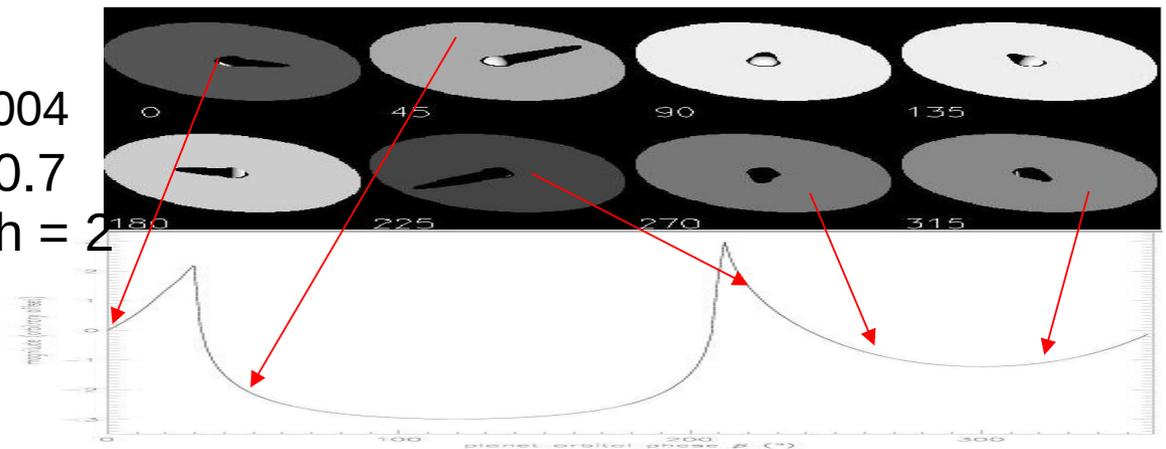
# Méthodes

- Imagerie monopixel (rapide et/ou haute précision photométrique)

- Détection d'exo-lunes  
(Cabrera 2007)



- Détection d'exo-anneaux  
Arnold et al 2004  
Albedo = 0.7  
Opt. Depth = 2



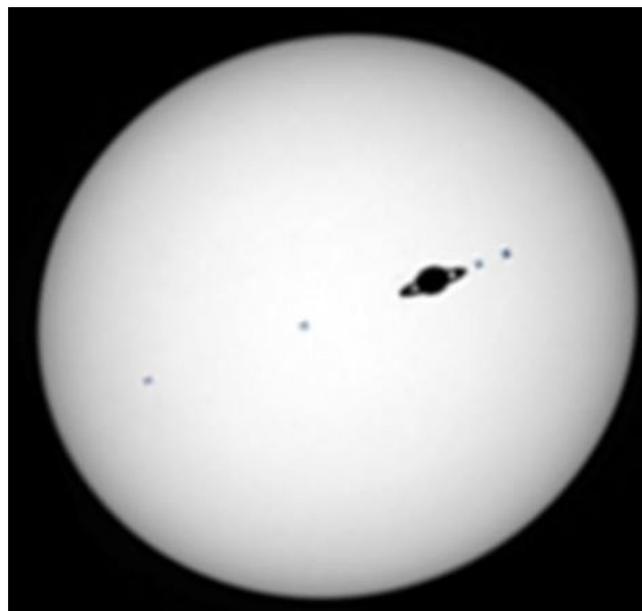
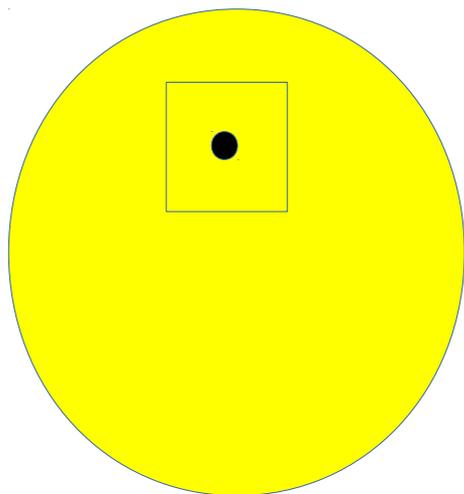
- Sismologie (structure interne)

# Méthodes

- Spectroscopie très haute résolution des planètes
  - Vitesse radiale des planètes: détection d'exo-lunes
  - Détection de gaz industriels et fuites technologiques

# Méthodes

- (Spectro - ) imagerie multi-pixel
  - Spectro-imagerie multi-pixel des transits – imagerie d'anneaux et lunes

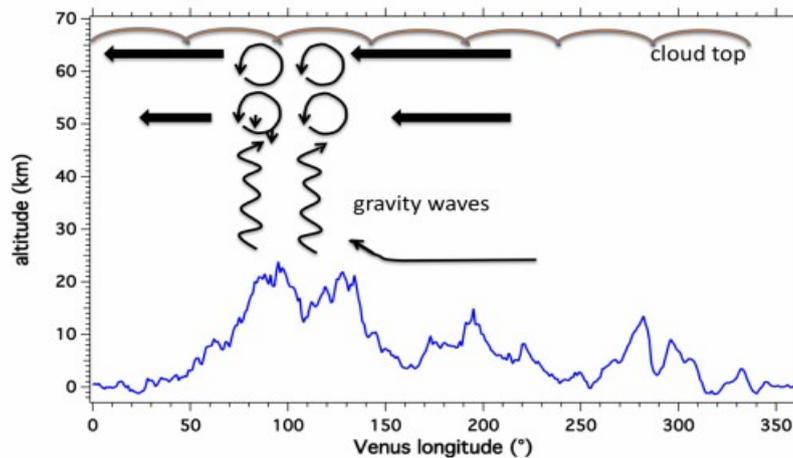


Dravins et al. 2015

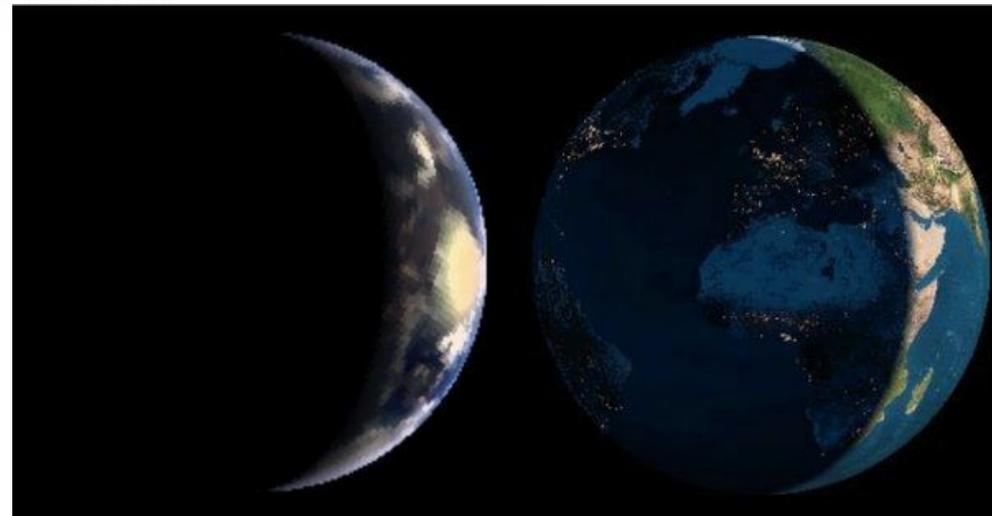
- Imagerie des spots stellaires induits par un Jupiter chaud

# Méthodes

- (Spectro - ) imagerie multi-pixel
  - Vitesse locale des vents  $\Rightarrow$  hauteur des montagnes (Bertaux et al. 2016 – cas de Vénus)



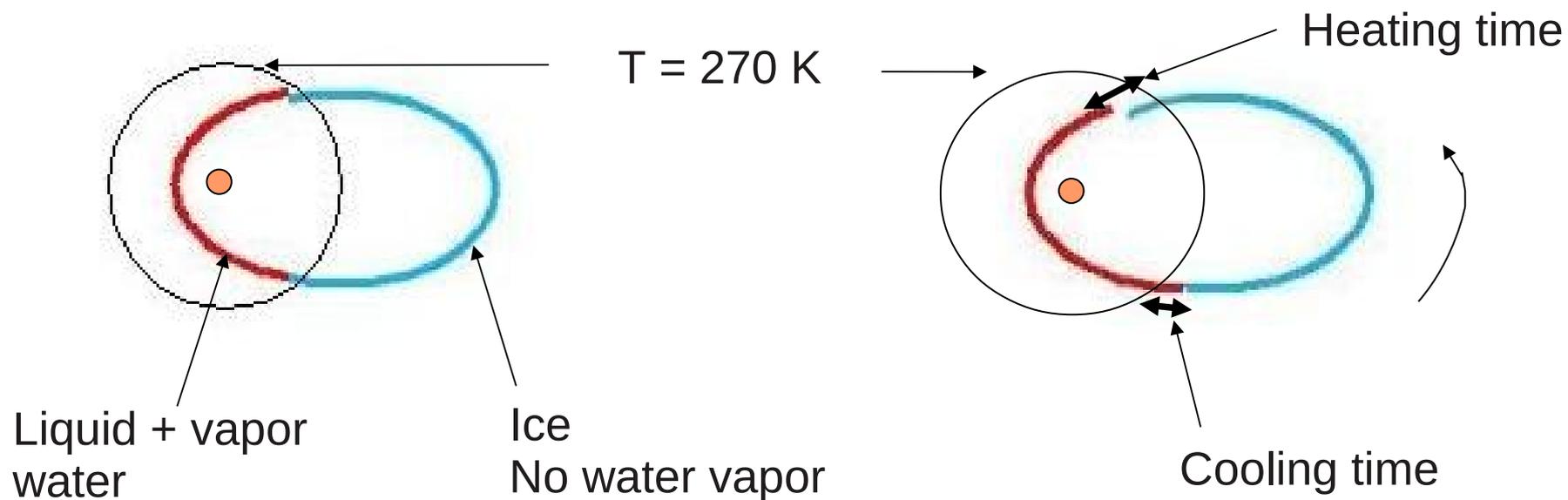
- Réflexion de l'étoile sur un océan



# Méthodes

- Variations temporelles

Exemple : gel des océans et fonte des glaciers



# Méthodes

- Exploration in situ (cf [breakthroughinitiatives.org/Initiative/3](http://breakthroughinitiatives.org/Initiative/3) )
  - Géophysique
  - Végétation
  - Composition atmosphérique
  - Météo
  - Climat

Incontournable pour observer la morphologie des organismes (Schneider 2010)

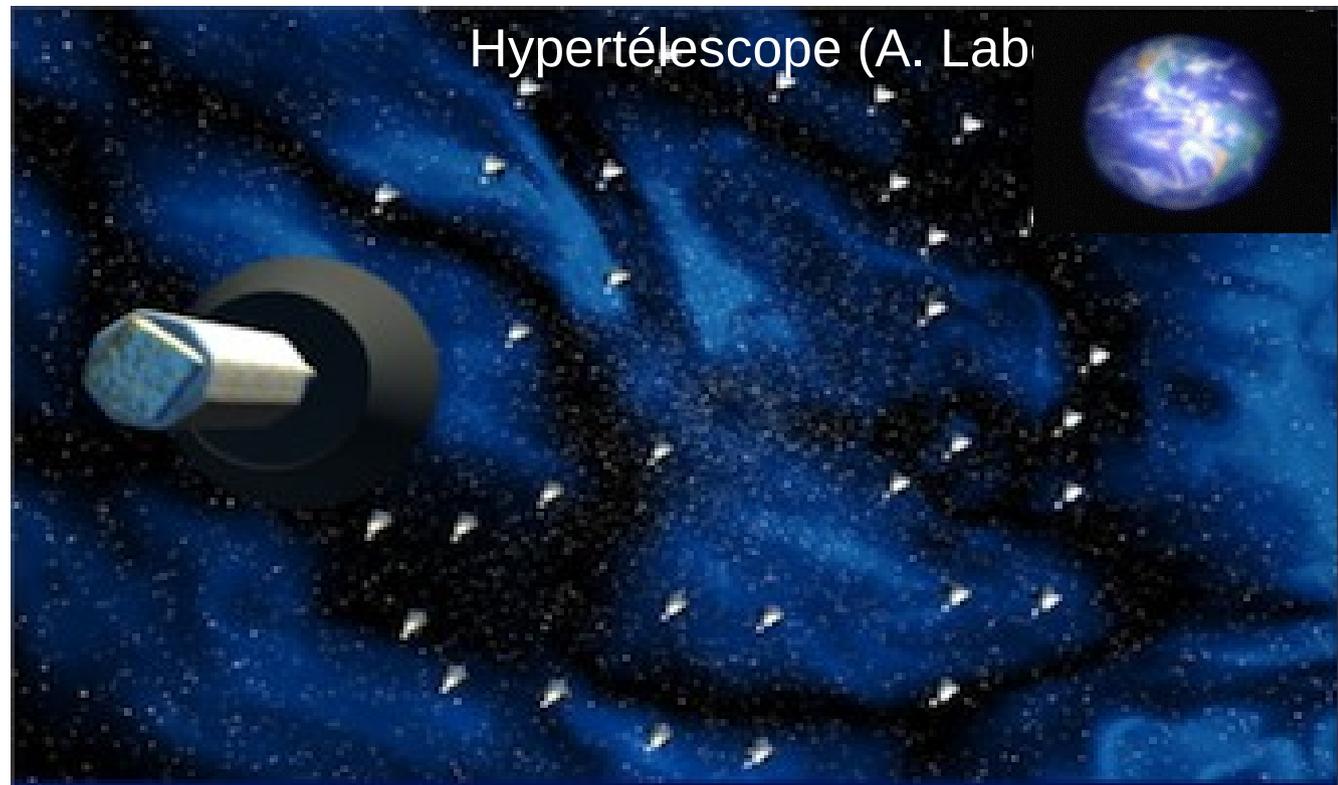
Problème : si  $V = 0.1c$  dégâts par les poussières interstellaires

Une piste à suivre : flottille de nombreuses microsondes

# Instruments

- Après ELTs : Colossus (74 m) <http://the-colossus.com/>
- Interférométrie d'intensité (Dravins et al. 2015)
- Interférométrie interplanétaires
- Hypertélescope

<http://hypertelescope.org/>



<-----100 km----->

## Références :

- Arnold L. & Schneider J. 2004 The detectability of extrasolar planet surroundings: I. Reflected light photometry of unresolved rings *Astron. & Astrophys.*, 420, 1153
- Bertaux J.-L. et al. 2016. Influence of Venus topography on the zonal wind and UV albedo at cloud top level: the role of stationary gravity waves. *Journal of Geophysical Research paper 121*, 1087
- Cabrera J. & Schneider J. 2007 Detecting companions to extrasolar planets using mutual events *Astron. & Astrophys.*, 464, 1133
- Dravins et al. 2015 Long-baseline optical intensity interferometry - Laboratory demonstration of diffraction-limited imaging *Astron. & Astrophys.*, 589, A99
- Feynman R. 1992 There's plenty of room at the bottom. *J. Microelectromical Syst.* 1 : 60  
(reprise de l'article de 1959)
- Harman C. Et al. 2015 Abiotic O<sub>2</sub> Levels on Planets around F, G, K, and M Stars: Possible False Positives for Life? *ApJ*, 812, 137
- Kepler J. 1610 *Dissertatio cum nuncio siderio* p. 39
- Kral Q. Et al. 2016 Effects of disc asymmetries on astrometric measurements - Can they mimic planets? *Astron. & Astrophys.*, 592, A39
- Loeb A. 2014 The Habitable Epoch of the Early Universe *Int. J. Astrobiol.*, 13, 337

Schneider J. The future of exoplanets : science questions *À paraître*

Schneider J. 2010 Reply to 'A Comment on "The Far Future of Exoplanet Direct Characterization" - the Case for Interstellar Space Probes' *Astrobiology*, 10, 857

Schneider J. 1977 A model for a non-chemical form of life: crystalline physiology *Origins of Life*, 8, 33

Schneider J. & Cabrera J. 2006 Can stellar wobble in triple systems mimic a planet? *Astron. & Astrophys.*, 445, 1159

Stevenson J., Lunine J. et al. 2015 Membrane alternatives in worlds without oxygen: Creation of an azotosome *Science Advances*, 1, 1400067

*Toute question ou discussion sont les bienvenues*