

# **Une nouvelle étape en exoplanétologie: les exo-lunes**

*Jean Schneider - LUTh*

- Introduction
- Pourquoi les exo-lunes
- Comment détecter les exo-lunes

- Introduction

- La recherche d'exoplanètes à l'Obs. Paris a démarré en 1988, contre l'avis des instances et de la communauté astro de l'époque.
- Plus de 1000 exoplanètes à ce jour
- Dans le système solaire des dizaines de lunes , dont 5 “géantes” (> la Lune)
- Donc il serait étonnant qu'il n'y en ait pas “beaucoup”  
autour des planètes à > 1 UA (~ 350 à ce jour)

- Pourquoi les exo-lunes

- Tests des théories de formation des systèmes planétaires
- Niches d'habitabilité
- Mesure des paramètres des exo-lunes <== nouveau  
et de la masse des exo-planètes <== nouveau

- Pourquoi les exo-lunes

- Théorie de formation des systèmes planétaires

- Contraintes a priori:  $L_{\text{Roche}} < a_{\text{lune}} < 1/3 R_{\text{Hill}}$

- Modèles:  $M_{\text{lunes}} / M_{\text{planète}} \sim \text{qq } 10^{-4}$

Vérifié pour Saturne et Jupiter

==> questions:

**1/** pour une planète de  $10 M_{\text{jup}}$ ,  $M_{\text{lunes}} = 1 M_{\text{Terre}}$  ?

**2/** un système lunaire de  $1 M_{\text{Terre}}$  peut-il consister en une lune unique?

**3/** peut-il exister des planètes binaires (comme les étoiles et petits corps binaires - Cabrera et al. 2007)? Ex: capture

- Pourquoi les exo-lunes

- Niches d'habitabilité (i.e. eau liquide en surface)

- Lunes de planètes géantes situées dans la zone d'habitabilité (ZH)
    - Lunes de planètes géantes froides, chauffées par effet de marée (ex: Io)

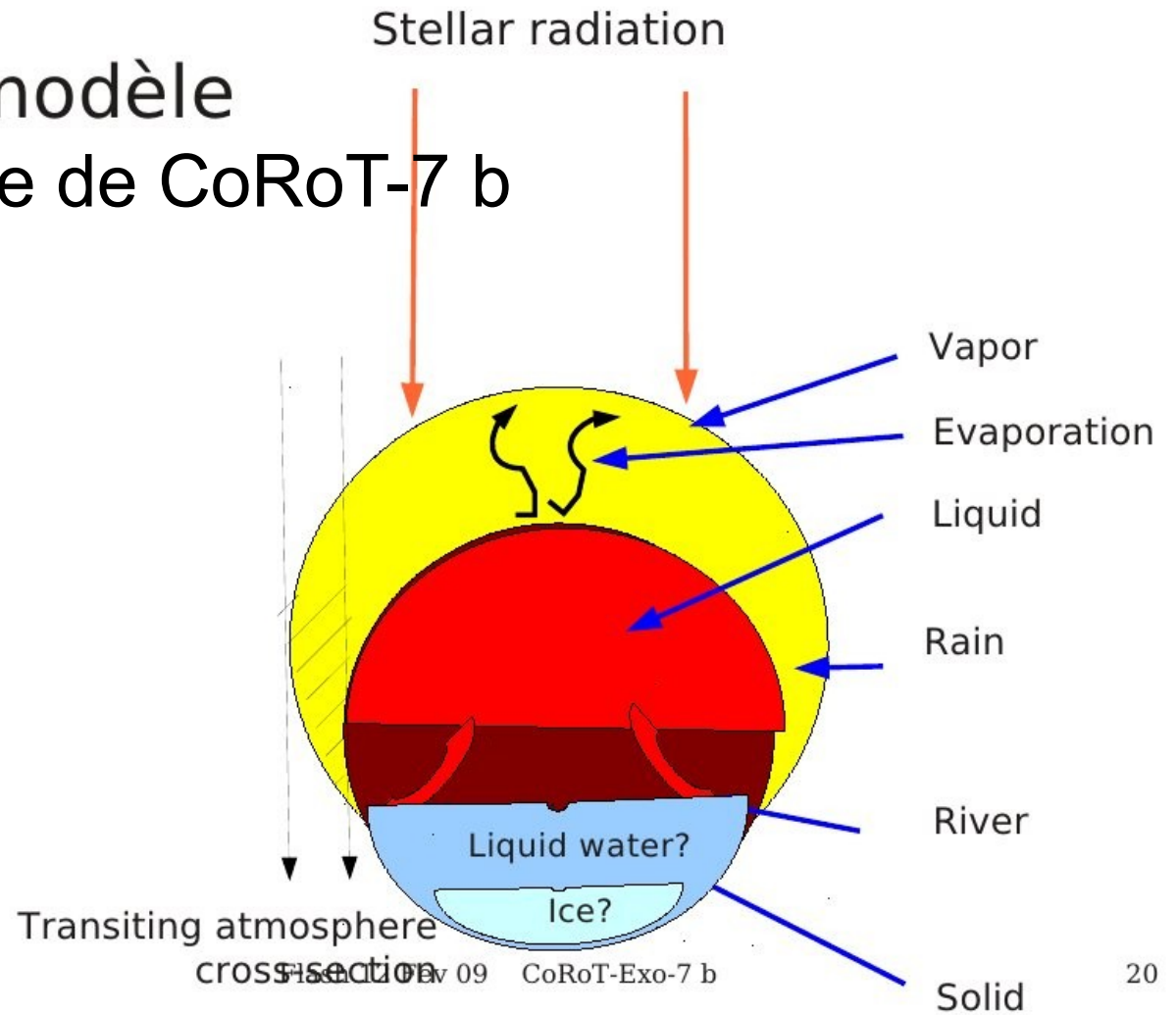
- Digression sur l'habitabilité (***valable pour les exoplanètes***)

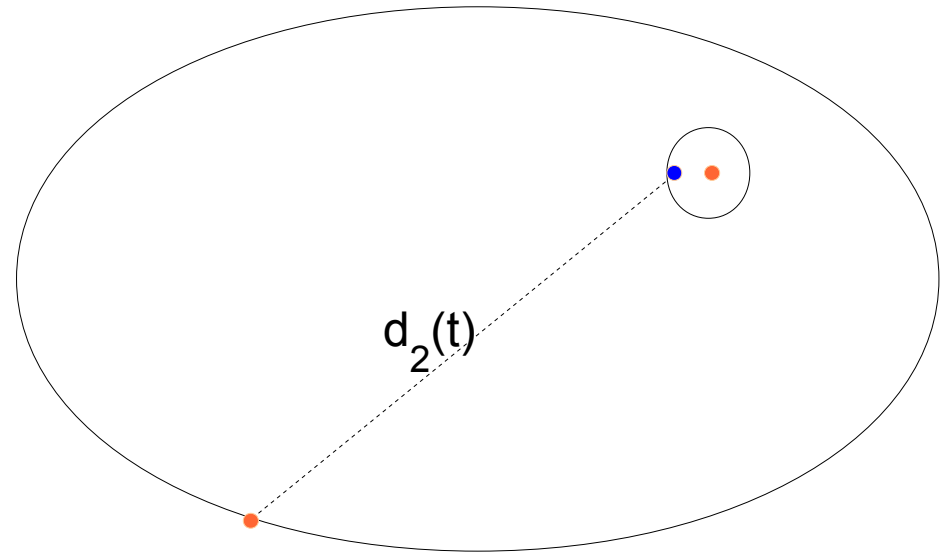
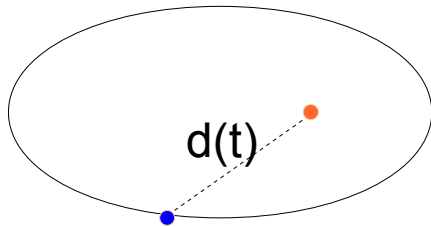
- Un corps (lune ou planète) peut être partiellement habitable, tout en produisant les mêmes biosignatures qu'une lune ou planète habitable:
      - Seule une zone du corps est habitable: ex: CoRoT-7 b?
      - Le corps n'est habitable que pendant une partie du temps.

Exemples:

- Corps sur une orbite très elliptique
      - Corps dans un système stellaire multiple

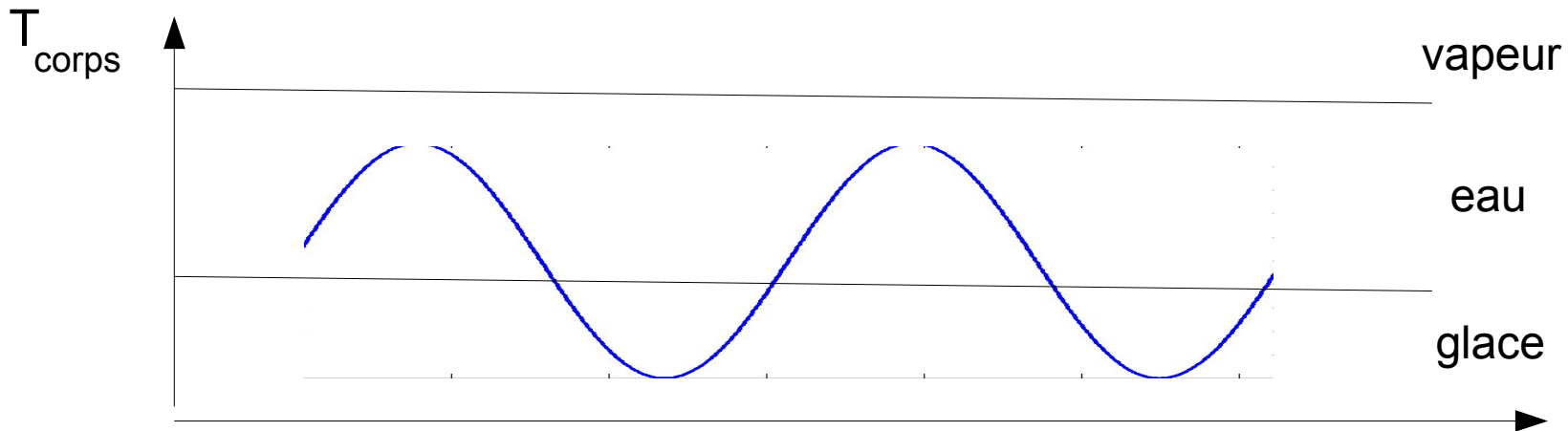
# Un modèle viable de CoRoT-7 b





$$T_{corps} = T_* \left( \frac{R_*}{2d(t)_{corps}} \right)^{1/2}$$

$$T_{corps} = \left( T_{*1}^4 \left( \frac{R_{*1}}{2d_1(t)_{corps}} \right)^2 + T_{*2}^4 \left( \frac{R_{*2}}{2d_2(t)_{corps}} \right)^2 \right)^{1/4}$$



- Pourquoi les exo-lunes

- Mesure de la masse des exo-planètes à partir de l'orbite d'une lune:

$$P_{lune} = 2\pi \sqrt{\frac{a_{lune}^3}{GM_{planète}}}$$

==> si  $P_{lune}$  et  $a_{lune}$  mesurables (voir plus loin), mesure de  $M_{planète}$

***Important pour les planètes détectées par imagerie si RV et astrométrie ne marchent pas.***

- Comment détecter les exo-lunes
  - Transits
  - Microlensing
  - Imagerie directe



- Comment détecter les exo-lunes

- Transits (Sartoretti & Schneider 1999)

- Time Transit Variation (TTV): instant du transit planétaire perturbé par la lune

$$\text{TTV} = \frac{P_{\text{planète}}}{\pi} \frac{a_{\text{lune}}}{a_{\text{planète}}} \frac{M_{\text{lune}}}{M_{\text{planète}}} \quad \implies M_{\text{lune}}$$

= 10 minutes pour un Titan autour d'un Saturne à 1 UA

- Transit produit par la lune  $\implies R_{\text{lune}}$

**Résultats CoRoT et Kepler: 0 lune pour  $R_{\text{lune}} > \sim 1 - 2 R_{\text{Terre}}$**

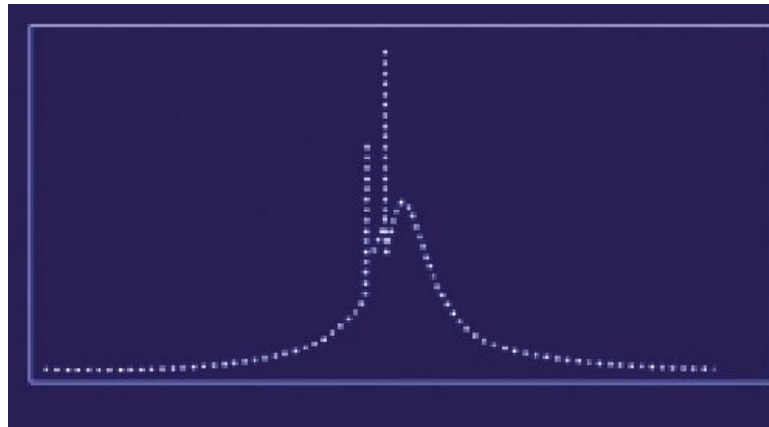
Mais détection par Kepler possible à tout instant

Cf “Hunt for Exomoons with Kepler”: <http://exomoon.eu>

$\implies$  pas de planètes binaires? Pourquoi?

- Spectroscopie des transits lunaires:  $\implies$  atmosphère de la lune (Kipping et al. 2010)

- Comment détecter les exo-lunes
  - Microlensing

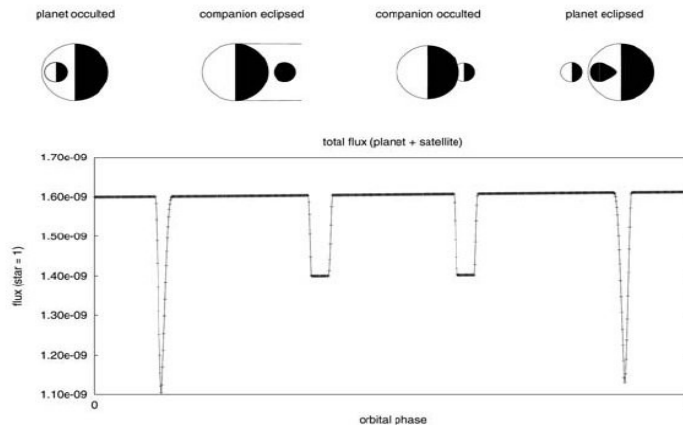


- Comment détecter les exo-lunes
  - Imagerie directe
    - Phénomènes mutuels lune/planète
    - Emission IR de la lune
    - Astrométrie de la planète
    - Vitesse radiale de la planète

- Comment détecter les exo-lunes

- Imagerie directe

- Phénomènes mutuels lune/planète (Cabrera & Schneider 2007)



==>  $R_{lune}$

**Application à la mesure de  $M_{planète}$**  (pour les planètes vues en imagerie directe Schneider 2013, soumis)

$$a_{lune} = \frac{R_{planète}}{\pi} \frac{P_{lune}}{durée_{transit}}$$

$P_{lune}$  = période des transits

$$P_{lune} = 2\pi \sqrt{\frac{a_{lune}^3}{GM_{planète}}} \quad \left. \right\} \Rightarrow M_{planète}$$

Pour les planètes géantes:  $R_{planète} = 0.9-1.1 R_{Jup} \Rightarrow a_{lune}$

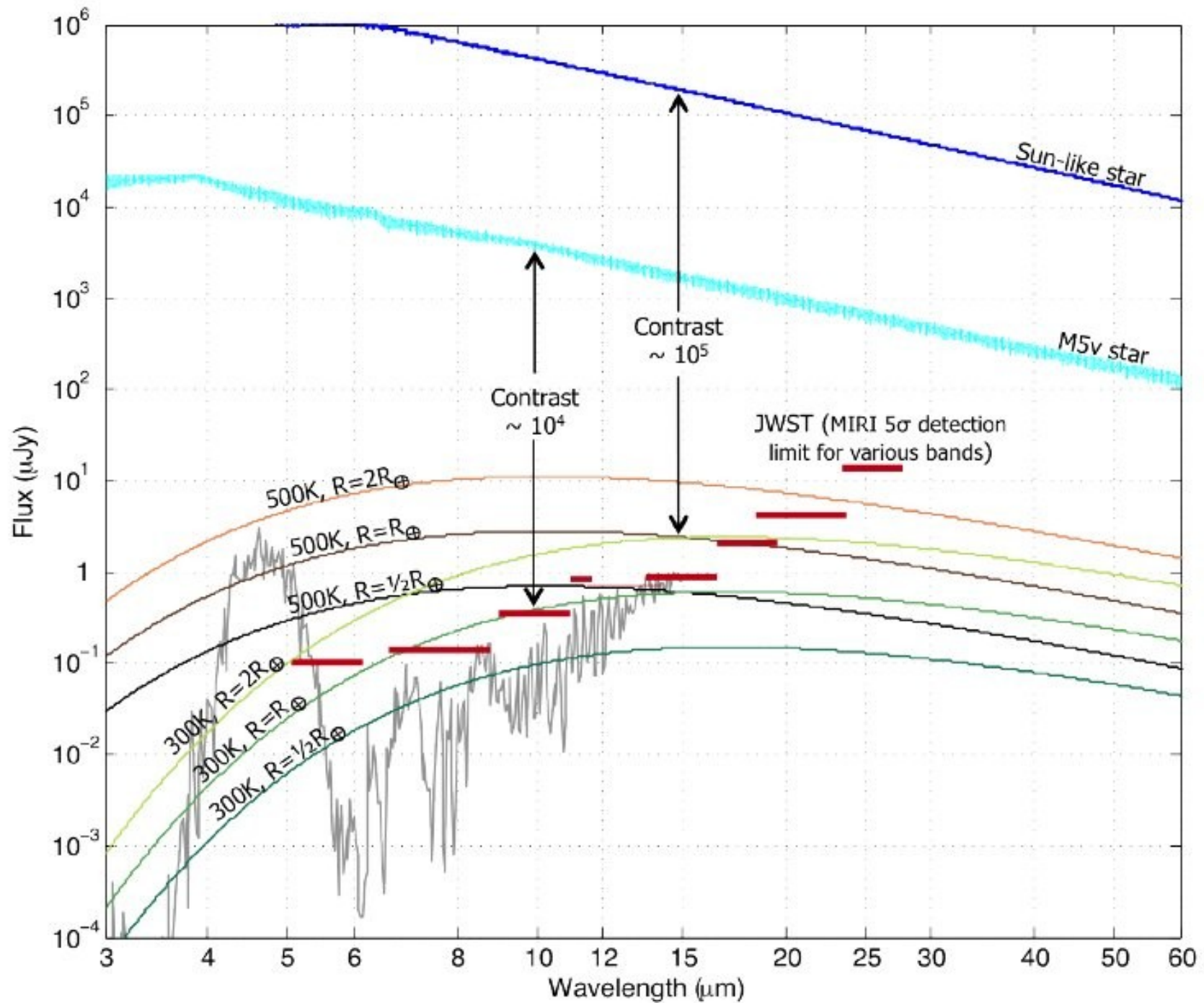
- Comment détecter les exo-lunes

- Phénomènes mutuels lune/planète

Autre application: inclinaison de l'orbite de la lune

- Imagerie directe

- Emission IR de la lune chauffée par effet de marée (Peters & Turner 2012)



- Comment détecter les exo-lunes

- Imagerie directe

- Espoirs avec un E-ELT de  $D = 100$  m (Hook et al. 2005):

- Astrométrie de la planète

- Déplacement de la planète par rapport au barycentre planète-lune:

$$\Delta_{bary} = a_{lune} (M_{lune} / M_{planète}) \sim a_{lune} (R_{lune} / R_{planète})^3$$

- Pour une lune à 10 pc de  $1 M_{Terre}$  dans une configuration de Titan,

$$\Delta_{bary} = 0.5 \text{ mas} = 0.25 \lambda / D$$

- Comment détecter les exo-lunes

- Imagerie directe

**Espoirs** avec un E-ELT de  $D = 100$  m (Hook et al. 2005):

- Astrométrie de la planète

Déplacement de la planète par rapport au barycentre planète-lune:

$$\Delta_{bary} = a_{lune} \left( M_{lune} / M_{planète} \right) \sim a_{lune} \left( R_{lune} / R_{planète} \right)^{\sqrt[3]{3}}$$

Pour une lune à 10 pc de  $1 M_{Terre}$  dans une configuration de Titan,

$$\Delta_{bary} = 0.5 \text{ mas} = 0.25 \lambda / D$$

Mais:

déplacement du photocentre

$$\Delta_{photo} = a_{lune} \left( F_{lune} / F_{planète} \right) \sim a_{lune} \left( R_{lune} / R_{planète} \right)^{\sqrt[2]{2}}$$

$$= \Delta_{bary} \left( R_{planète} / R_{lune} \right) \sim 10 \Delta_{bary}$$



- Comment détecter les exo-lunes

- Imagerie directe

Espoirs avec un E-ELT de 100 m (Hook et al. 2005):

- Vitesse radiale de la planète, perturbée par une lune

$$V_{pl} = \frac{M_{lune}}{M_{planète}} \sqrt{\frac{GM_{planète}}{a_{lune}}}$$

Pour une lune de  $1 M_{Terre}$  sur une orbite de 10 autour d'un Saturne, l'amplitude de perturbation est 100 m/sec

==> avec un ELT de 100 m, 10 nuits de pose avec R = 5000 à 5 pc

Avec un E-ELT de 39 m, pas réaliste