

# Zones d'habitabilité

*Jean Schneider – Observatoire de Paris*

- Qu'est-ce que la vie?
- Les sites potentiels
- Les biosignatures
- Prospective 2005 – 2035

Remarque préliminaire: les exoplanètes n'ont d'intérêt **majeur** que par la possibilité d'y détecter une exo-vie

# Qu'est-ce que la vie? (1/3)

- Plus de questions que de réponses
- Double difficulté:
  - Vie extraterrestre: objet mal défini
  - Objet encore à venir: aucun exemple concret connu
- Une occasion pour la science de réfléchir aux concepts fondamentaux.

Les occasions sont rares:

- Relativité: espace et temps
- Mécanique quantique: rôle de l'observateur dans l'expérience
- Physique statistique: origine de l'irréversibilité du temps

Leçon:

- Partir de l'expérience
- Se méfier des évidences

# Qu'est-ce que la vie? (2/3)

- Ambiguïté de la notion de « définition »:

Une définition, au sens de convention, est arbitraire.

C'est donc autre chose que l'on cherche: on part toujours d'une préconception.

- Le mot « vivant » renvoie à un *jugement* a priori,

La réponse à la question « cette chose est-elle vivante ? » **n'est pas oui ou non.**

Elle est arbitraire:

==> jugement subjectif ==>*relatif* à un critère (moral, bio-chimique ...)

==> une chose n'est pas vivante *en soi*

Le mot « vie » et ses résonances sont donnés a priori

# Qu'est-ce que la vie? (3/3)

- On peut partir de la question: « Y a-t-il de la vie dans cette salle ? »  
Pas besoin de faire votre analyse chimique pour décider que vous êtes vivants.
- Point de départ: Nous nous ressentons nous-mêmes comme vivants
- A partir de là nous déclarons vivant un "objet"
  - avec lequel nous pouvons avoir des relations riches et intéressantes.
  - Avec lequel nous pouvons suffisamment nous identifier

==> Pas d'organismes vivants *en soi*, mais seulement des relations vivantes à des organismes.

# Les corrélats physiques de la vie (1/9)

Une constatation empirique:

tout objet avec lequel nous entretenons une relation vivante a une architecture physico-chimique complexe:

organes, cellules, molécules ...

**Il n'y a aucune explication à cette corrélation:**

- Ni philosophique
- Ni psychologique
- Ni médicale
- Ni bio-chimique

**Nous ne pouvons que la constater**

# Les corrélats physiques de la vie (2/9)

Cette corrélation permet de faire le chemin inverse (à titre d'hypothèse méthodologique):

Attribuer, le caractère de biologiquement vivant à un objet

- dont l'architecture physico-chimique est complexe
- qui a des **caractéristiques physiques** semblables à celles des organismes terriens.

C'est la démarche suivie par les exobiologistes.

**Mais, danger:**

Est-ce que nous ne bâtissons pas des romans en faisant ce chemin inverse ?

(exepmle: longueur d'ondes <---> couleur)

**La question est alors celle du choix de ces caractéristiques.**

# Les corrélats physiques de la vie (3/9)

## Résumé:

- Soit un objet analysé en termes de structure complexe (chimique, reproduction et adaptation à l'environnement ...).
- Deux attitudes possibles:
  - 1) Il est « vivant » à cause de ses propriétés physico-chimiques
  - 2) Il est vivant si nous avons des relations vivantes avec lui.  
Sinon il n'est qu'une forme physico-chimique complexe, ce qui n'est pas du même ordre, du même registre

Problème: le mot « vivant » correspond dans les deux cas à des notions différentes.

Les tenants du réductionisme jouent sur les connotations psychologiques du mot vie.

**En toute rigueur il faudrait parler, pour 1), de « structures complexes », mais pas de « vie ».**

# Les corrélats physiques de la vie (4/9)

Hypothèse de travail pour la suite:

Vie = complexité physique

« *Ce qu'on ne peut atteindre en volant, il faut s'y diriger en clopinant* »

(Goethe)

**(Remarque:** ce n'est qu'une hypothèse

Contre-exemple: l'observation en Méc. Quantique **n'est pas**  
un phénomène physique complexe;  
c'est un phénomène élémentaire *sui generis*)



# Les corrélats physiques de la vie (5/9)

- Deux tâches:
  - Choix des caractéristiques physiques:
  - Quel support physique pour leur réalisation
- **Choix des caractéristiques:**
  - Objet relativement stable (éventuellement pouvant se reproduire)
  - Indépendant de son environnement (pouvant agir sur lui, autonomie etc)

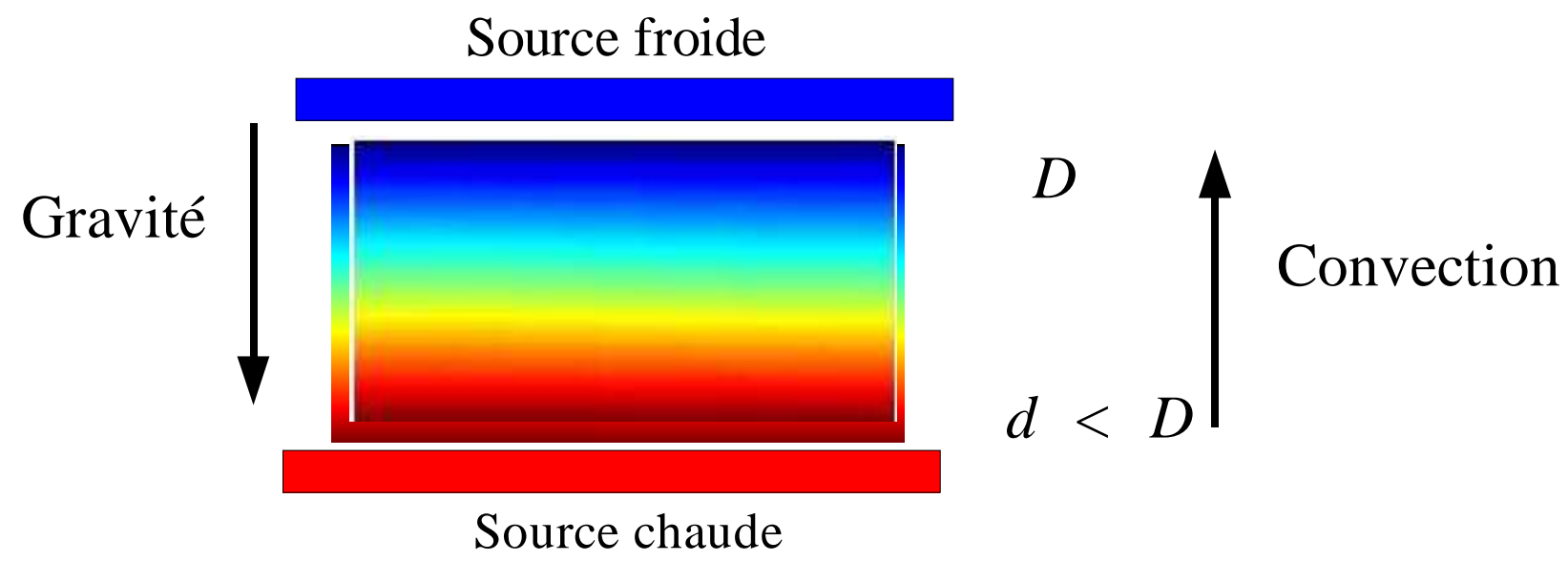
**2ème principe de la thermodynamique ==> objet hors équilibre thermodynamique**

- Une « source chaude » de température  $T_s$
- Une « source froide »  $T < T_s$

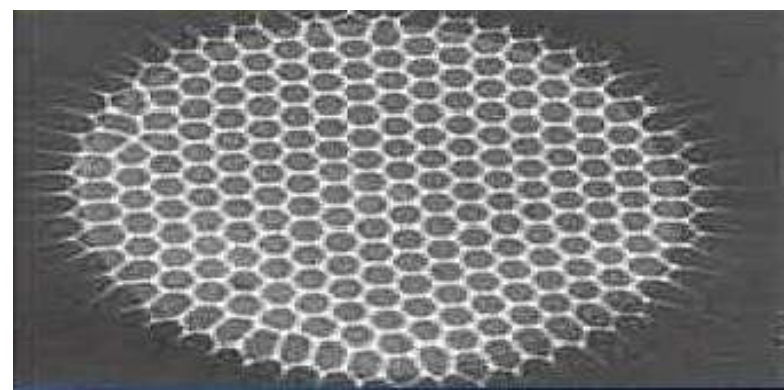
==> Structures dissipatives

# Les corrélats physiques de la vie (6/9)

- **Cellules de Bénard**



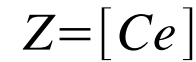
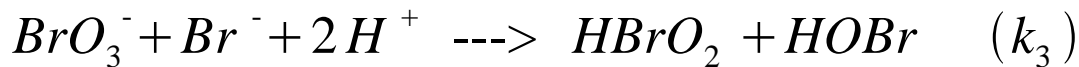
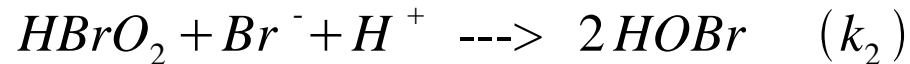
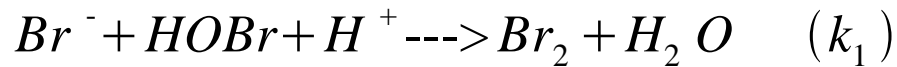
Résultat:



# Les corrélats physiques de la vie (7/9)

## • Réactions de Belusov-Zhabotinsky

Réactions couplées:

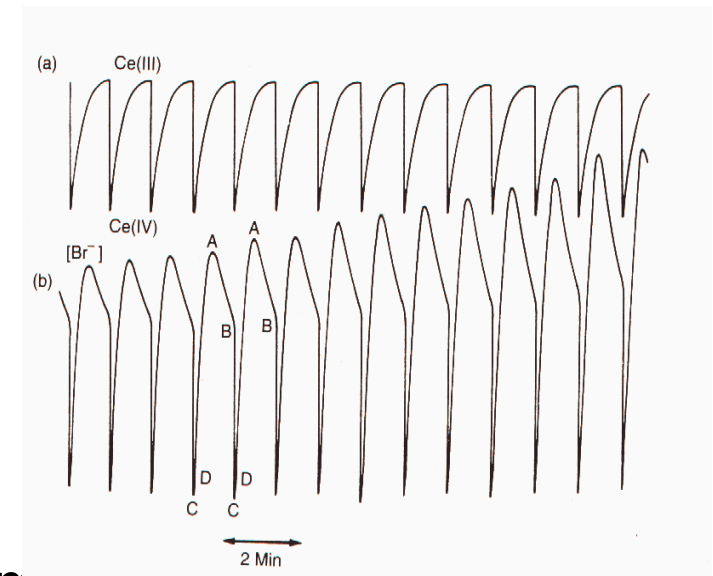


Evolution des concentrations:

$$\frac{dX}{dt} = k_3 AY - k_2 XY$$

$$\frac{dY}{dt} = -k_3 AY - k_2 XY + (f/2)k_0 BZ$$

$$\frac{dZ}{dt} = 2k_5 AX - k_0 BZ$$



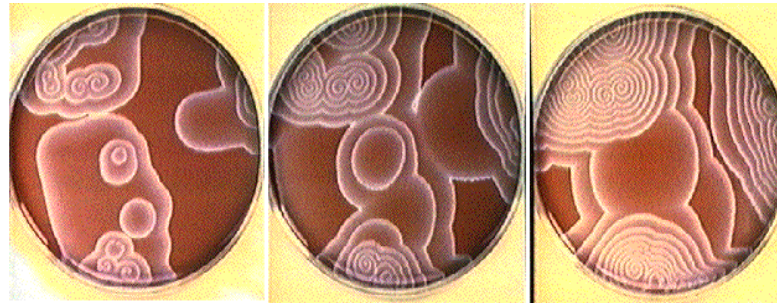
**Exemple: battements de coeur des mammifères:**  
Goutelas 2005

Zones d'habitabilité

# Les corrélats physiques de la vie (8/9)

- **Réactions de Belusov-Zhabotinsky**

Strucuration spatiale:



# Les corrélats physiques de la vie (9/9)

- **Implémentation (support physique):**

- Plasmas électromagnétiques? (exemple: « Le Nuage Noir »)
- Nanostructures auto-organisatrices ? (études balbutiantes)
- Molécules ? (structures complexes les plus compactes et les plus riches)

Lesquelles ?

- **Carbone** ==> chimie organique
- **Silicium:**
  - seulement 40 mol **Si** contre 150 mol carbonées; dans le milieu interstellaire
  - **SiO<sub>2</sub>** pas gazeaux

Autre condition favorisante:

Milieu liquide: tranport hydrodynamique des molécules plus efficace que le mouvement brownien (dans un gaz).

Quel liquide ?

$C_2 H_5 OH$  ?

Pas très bon solvant

$NH_3$  ?

Seulement à très basse température

$H_2 O$

Très abondante, très bon solvant, crée des ions  
Zones d'habitabilité

# Sites potentiels (1/6)

## Résumé:

- **Conditions de hors équilibre:** source de chaleur (si possible permanente).

Bon exemple: photons d'énergie  $E \gg \frac{kT}{h} \implies T_s \gg T$

- **Présence d'eau liquide**  $\implies T \sim 300 K$  et  $T_s \gg 300 K$

**Exemple répandu:** corps planétaires

- à la bonne distance d'une étoile pour  $T \sim 300 K$   
source permanente de photons énergétiques
- abondants en eau

# Sites potentiels (2/6)

## Remarque:

### Pourquoi les exo-planètes ?

- Dans le système solaire on est sûr d'une chose:

Il n'y a pas de vie évoluée

En dehors du système solaire, il y a place pour de la vie (très) évoluée

- Dans le système solaire il y a au mieux 2 ou 3 sites: Mars, Europe

En dehors du système solaire, il y a des milliards de planètes habitables et au minimum quelques dizaines observables d'ici ~2025

# Sites potentiels (3/6)

Planète chauffée par l'étoile.

Si en équilibre thermodynamique:

$$\text{Température d'équilibre: } T_{pl} = T_* \left( \frac{R_*}{2a} \right)^{1/2} (1-A)^{1/4}$$

$A$  = albedo de Bond

$\Rightarrow$  Rayon de la zone habitable (= distance étoile-planète pour orbite circulaire) pour laquelle  $T_{Fus} < T_{pl} < T_{Ebul}$  :

$$\left( \frac{T_*}{T_{Fus}} \right)^2 \frac{1}{2(1-A)^{1/2}} R_* < a_H < \left( \frac{T_*}{T_{Ebul}} \right)^2 \frac{1}{2(1-A)^{1/2}} R_* \sim 1 \left( \frac{T_*}{T_{Sol}} \right)^2 UA$$

$$T_{Fus} = 0 \text{ C} \quad T_{Ebul} = 100 (m_{Atm} R_{pl}^{+/-1})^{0.25} \text{ C} \quad (\text{Schneider et al})$$

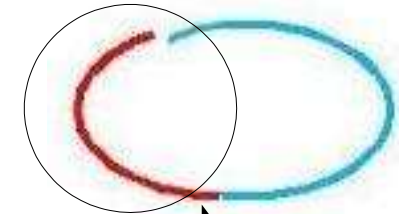
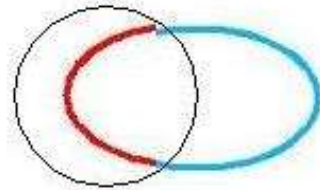
(Géantes rouges:  $a_H = 10 \text{ UA}$  )



# Sites potentiels (4/6)

## Complications:

- Orbites elliptiques
- Rotation de la planète
- Chaleur interne (radioactivité etc)
- Circulation atmosphérique
- Activité stellaire (UV, X, gammas etc)

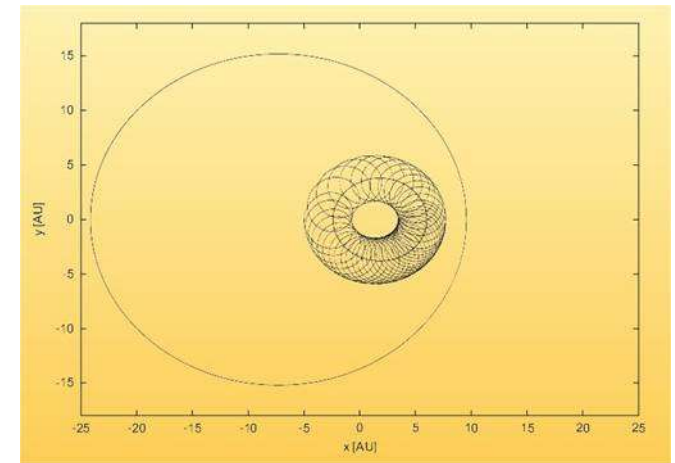
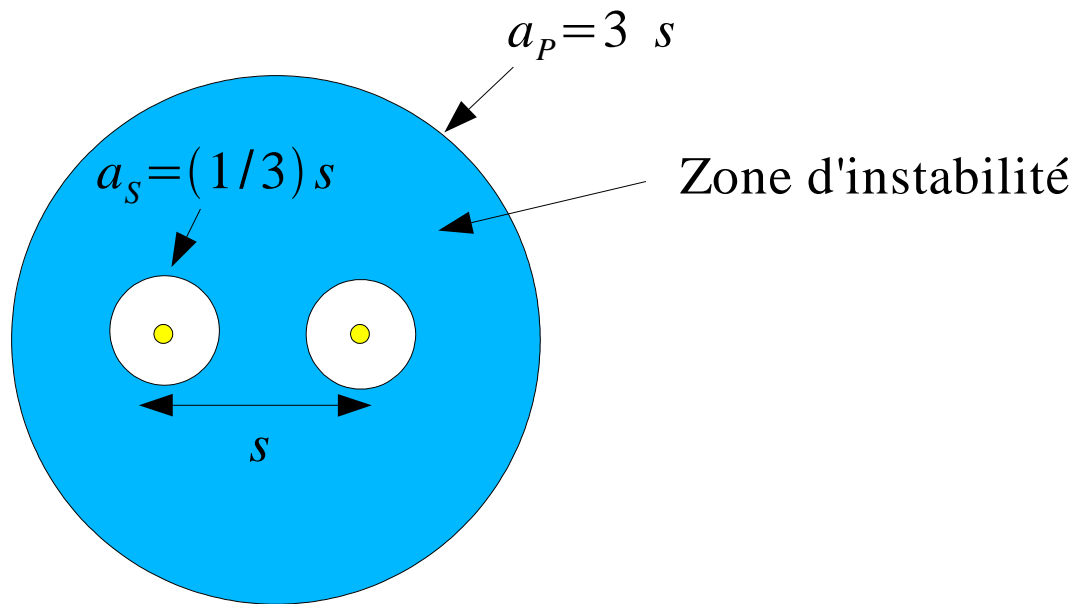


Inertie thermique

# Sites potentiels (5/6)

Stabilité des orbites dans la ZH en cas d'objets multiples.

- Etoiles binaires



$\gamma$  Ceph ( $d \sim 20$  UA)

# Sites potentiels (6/6)

Stabilité des orbites dans la ZH en cas d'objets multiples.

- Objets planétaires multiples

- 2ème planète

$$a_I < a_H (1 - (M_{pl}/M_*)^{1/3})$$

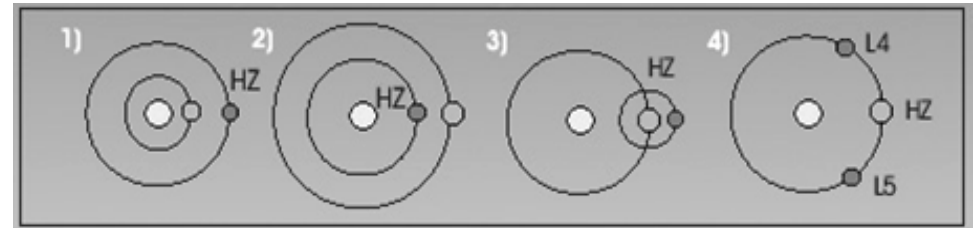
$$a_E > a_H (1 + (M_{pl}/M_*)^{1/3})$$

- Satellite

$$a_S < a_H (M_{pl}/M_*)^{1/3}$$

- Planètes troyennes (solution exacte)

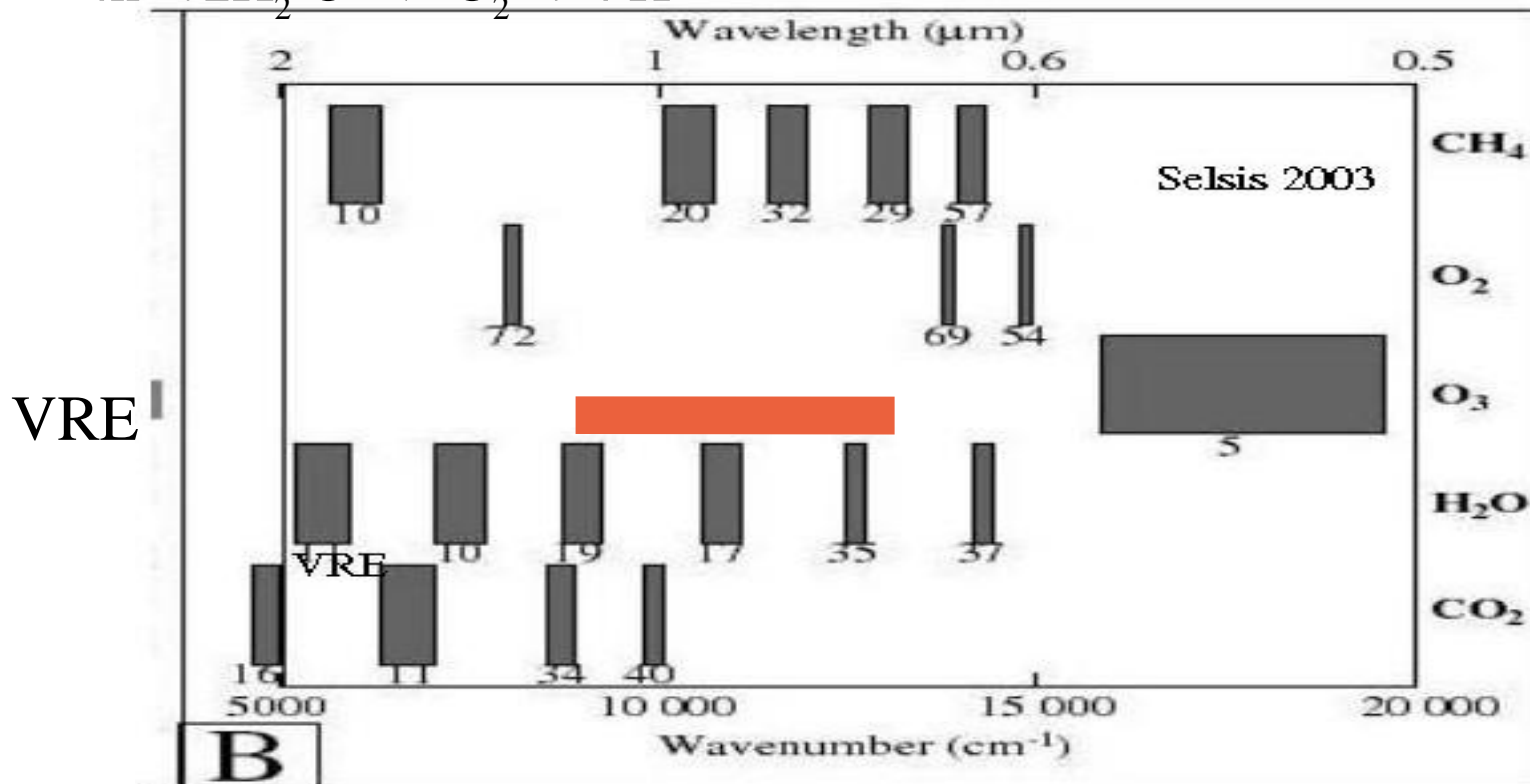
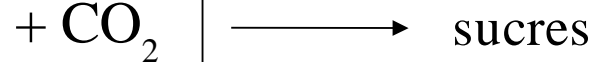
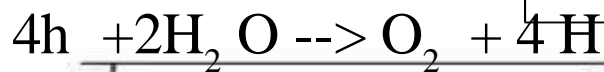
$$d(L4,5, HZ) = a_H$$



# Biosignatures (1/4)

- **Sous-produits d'une activité bio-chimique.**

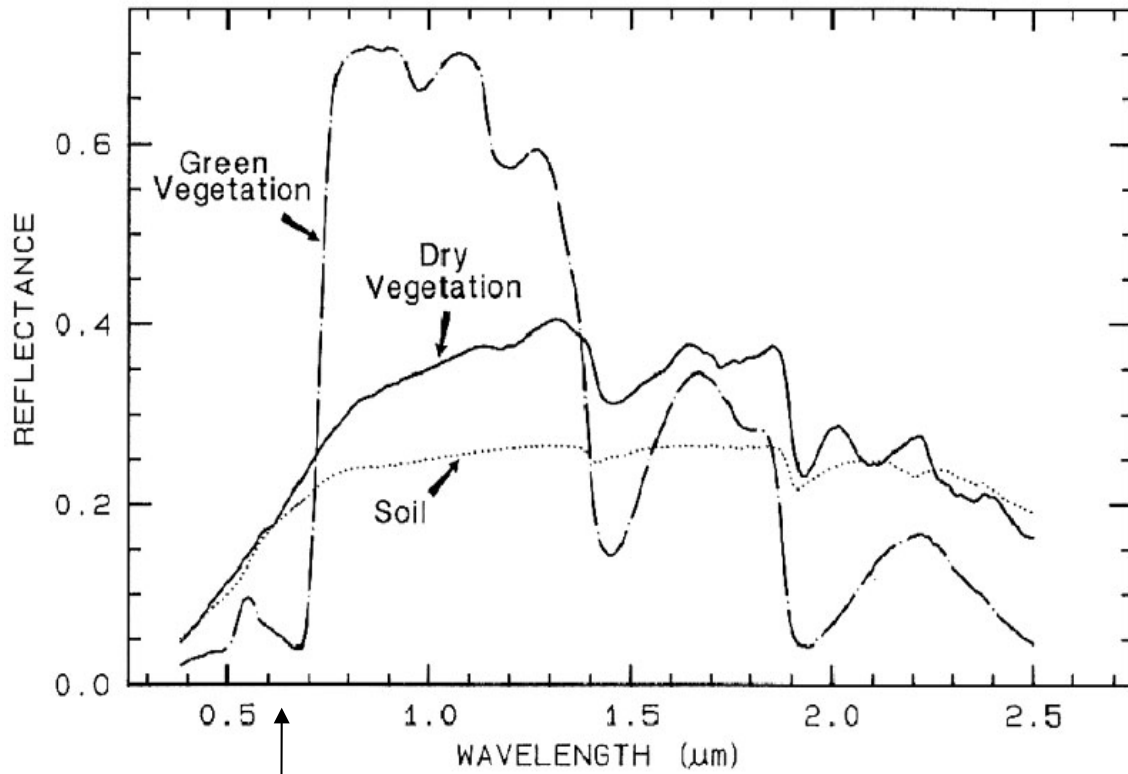
Exemple: production de  $O_2/O_3$  atmosphérique accompagnant la photosynthèse:



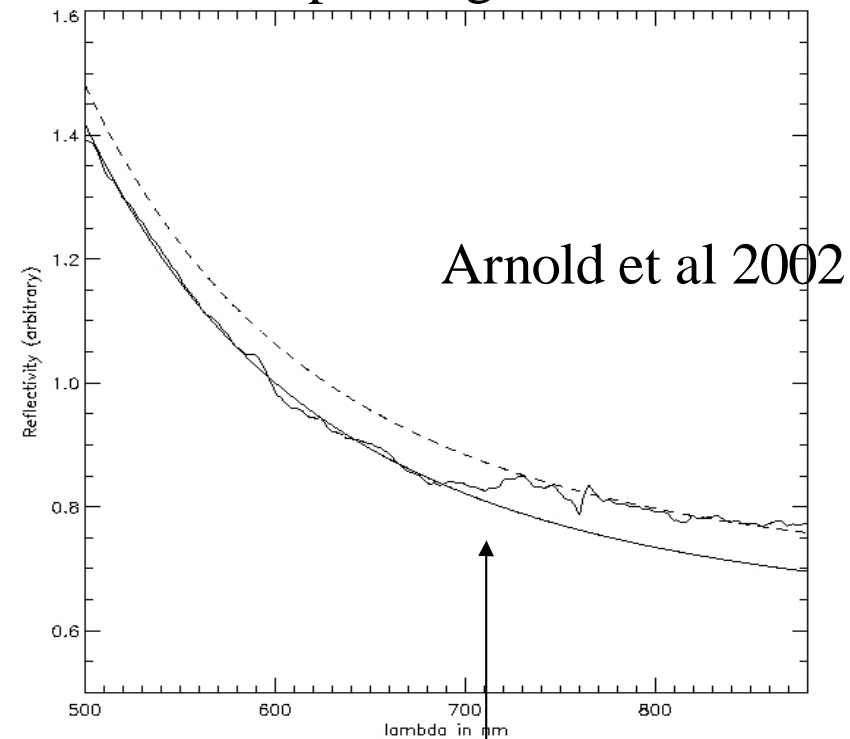
# Biosignatures (2/4)

- **Spectres des organismes eux-mêmes.**

Exemple: « Végétation » en surface



Test de détectabilité dans le spectre global de la terre



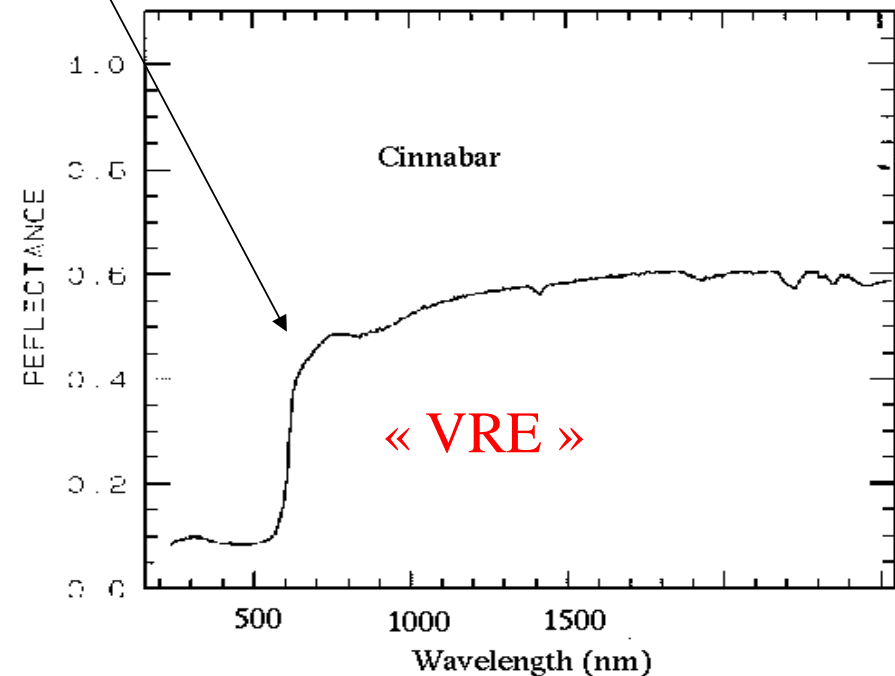
«Veget. Red Edge »  
Goutelas 2005

Zones d'habitabilité

# Biosignatures (3/4)

## Ambiguïtés et artefacts

- Interprétation des spectres (e.g. végétation)
- Interprétation de l'origine de  $O_2/O_3$   
(e.g.  $h\nu + 2H_2O + Cat \rightarrow O_2 + 4H + Cat$ )



# Biosignatures (4/4)

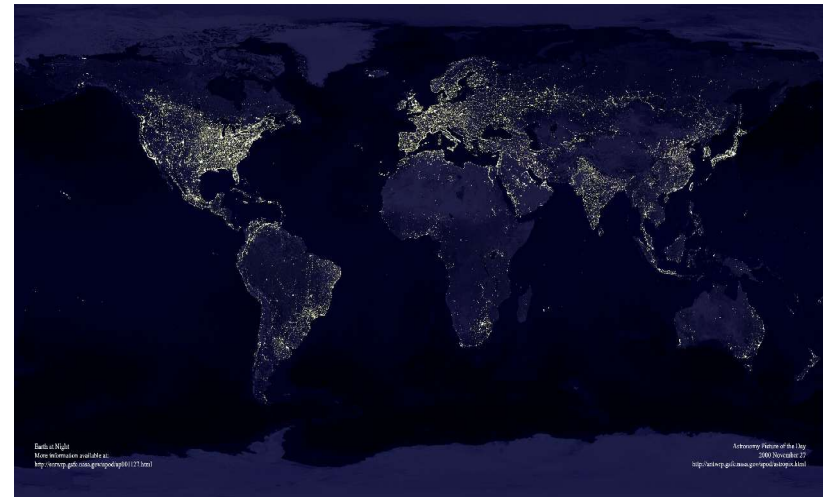
## Autres Biosignatures

Emissions d'origine « technologiques »:

- « Fuites technologiques » non intentionnelles

Exemples:

- Emissions TV
- « Lumières des villes »



- Emissions « intentionnelles » (optiques ou radio): SETI

# Détection (1/3)

- Nécessité de séparer la planète de l'étoile (*cf Malbet*)

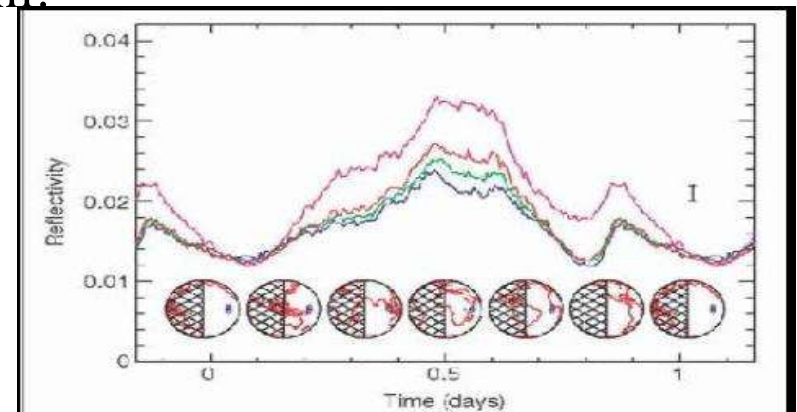
Deux approches (voir figure page suivante):

- Lumière réfléchie
- Emission thermique

- Caractérisation de la planète

- Spectrale ==> Biosignatures spectrales
- Variations temporelles du flux réfléchi:

- Diurne
- Saisonnière

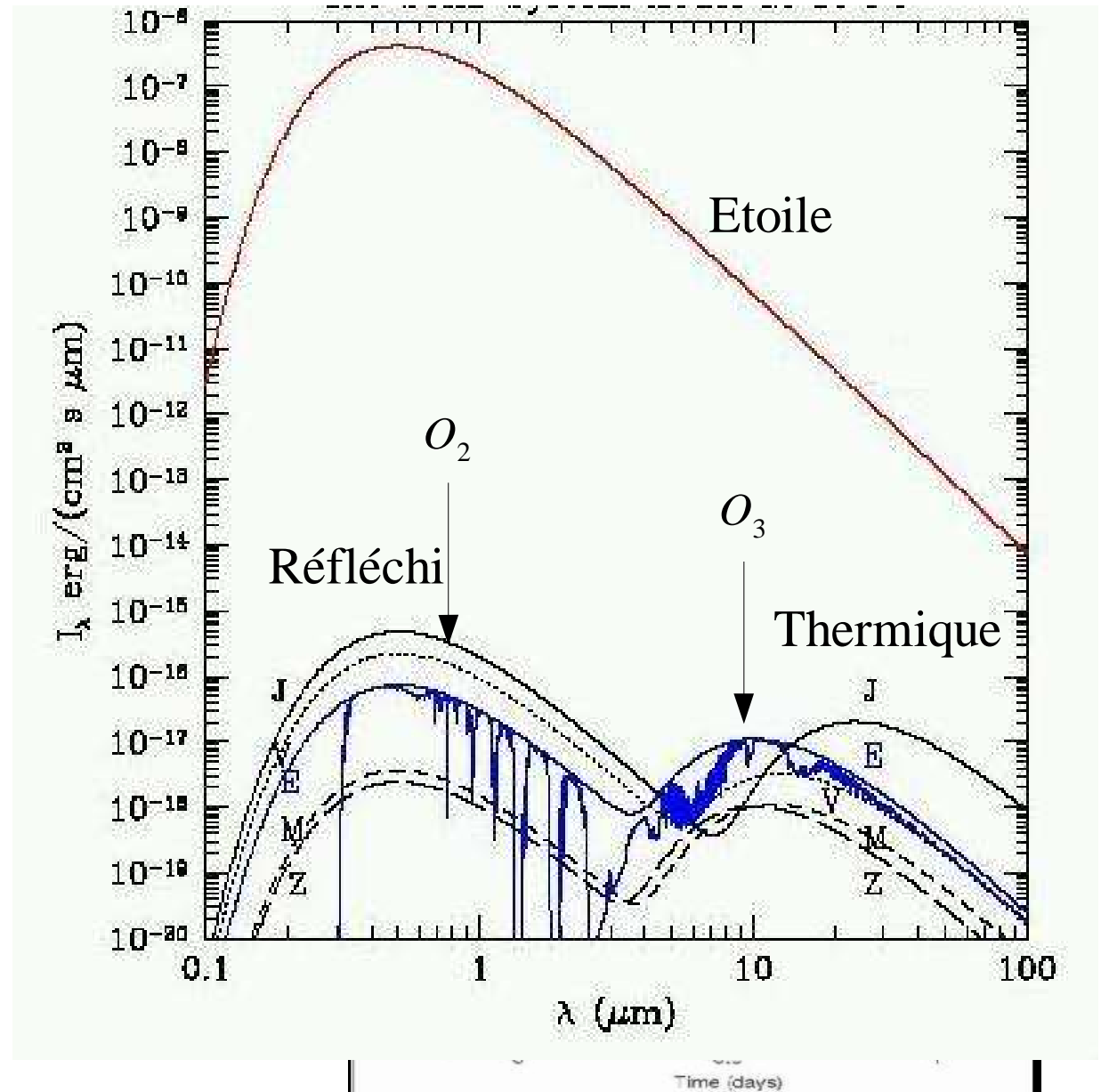




# Détection (2/3)

Les deux approches:

- Lumière réfléchi
- Emission thermique



# Détection (3/3)

- Détection au sol?
  - O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>: contamination par O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub> terrestres
  - « Végétation » avec ELT, Antarctique?
- Détection dans l'espace: TPF (C et I), Darwin ~2017 - 2020
- A long terme:
  - Interféromètre dans le visible (ESA, 2025): O<sub>2</sub>, « végétation », satellites habitables
  - Cartographie spectroscopique des exo-Terres: spectres des « forêts »

# Prospective (1/2)

- Panspermie interstellaire ?
- Quelques questions de biologie:
  - Vie autre que carbone+eau ?
  - Quantité minimum d'eau, de carbone etc ?
  - Hiérarchie cellule-organismes pluricellulaires universelle ?
  - autres...

# Prospective (2/2)

Seule la morphologie ou des signaux artificiels apprendront quelque chose sur un type de vie **évoluée**.

Limitations sévères à l'observation d'une morphologie:

- Télédétection:: Résolution angulaire limitée

$$L = \lambda \frac{D}{d} = 10^6 \text{ km} \quad \text{pour } d = 100 \text{ m} \text{ à } 3 \text{ pc} \text{ et à } 0.5 \mu$$

- Détection in situ: durée de la mission

**==> Conclusion pessimiste:**

**sauf technologie basée sur une nouvelle physique, nous n'apprendrons rien d'essentiel pendant des centaines d'années**