

les nuits des étoiles

TERRES HABITABLES



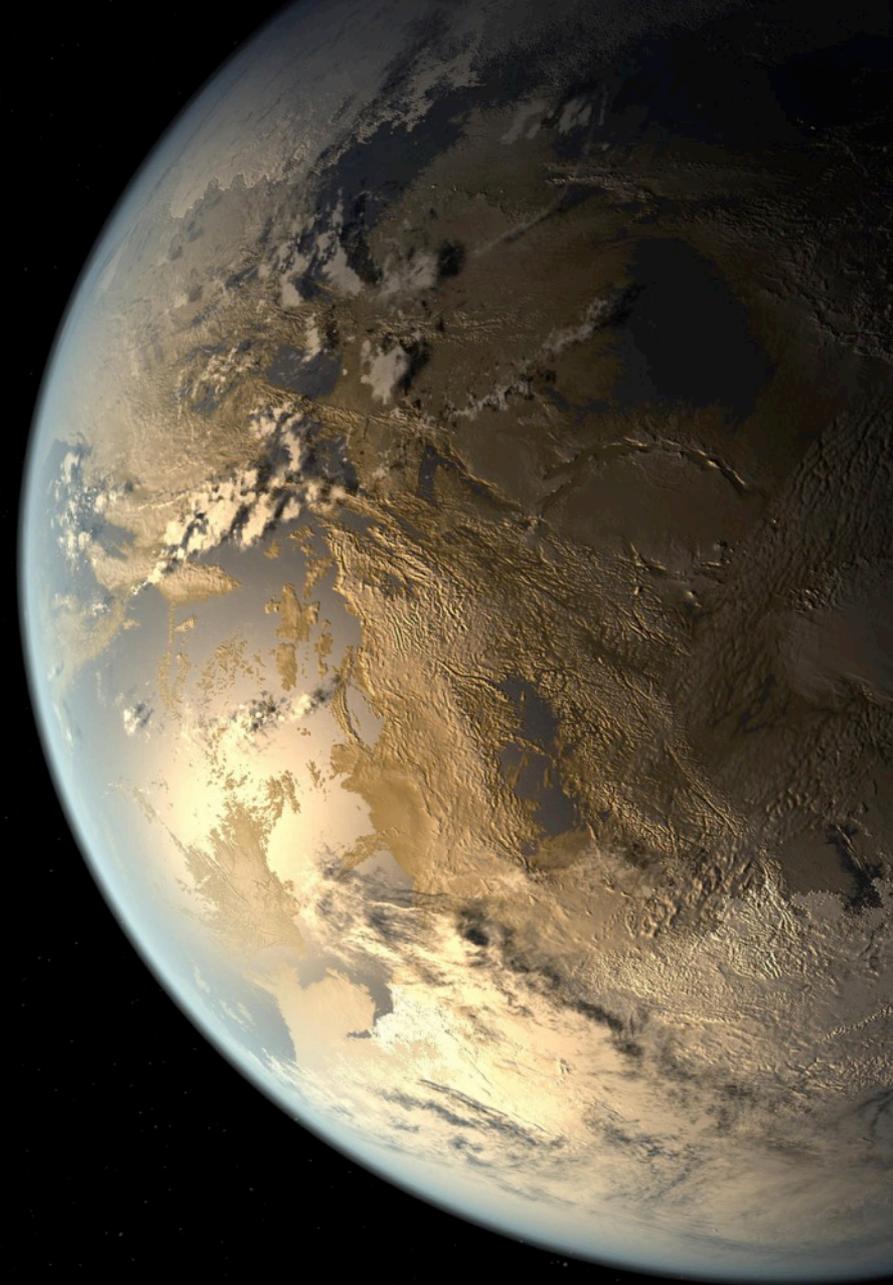
AIRBUS



Planète qui serait propice à l'apparition de la vie en surface

Kepler-186 f : 1^{ère} terre habitable, de taille comparable à la Terre découverte (17 avril 2014)

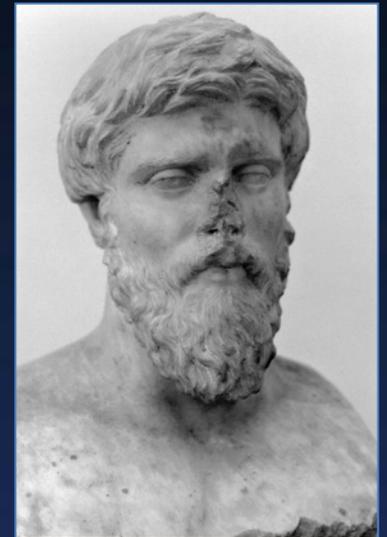
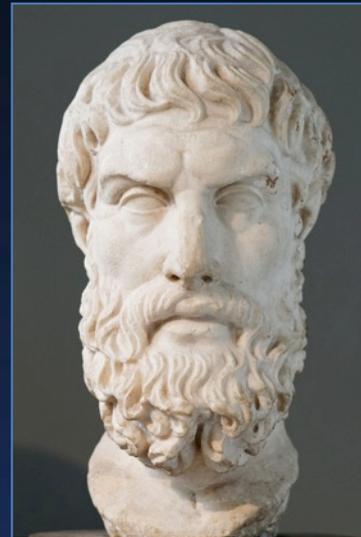
Proxima Centauri b : découverte de la terre habitable la plus proche de notre planète (24 août 2016)



Penser d'autres mondes

ANTIQUITÉ

- **Épicure** (342 – 270 av. JC)
 - « Il n'y a rien qui fasse obstacle à l'infinité des mondes » (Lettre à Hérodoté, ~290 av. JC)
- **Lucretius** (98 – 55 av. JC)
 - « Partout où la matière immense trouvera un espace pour la contenir [...], elle fera éclore la vie sous des formes variées » (De la Nature des choses, 1er s. av. JC)
- **Plutarque** (46 – 125)
 - Pense que la Lune est habitée (De la face qui paraît sur la Lune, 1er s.)

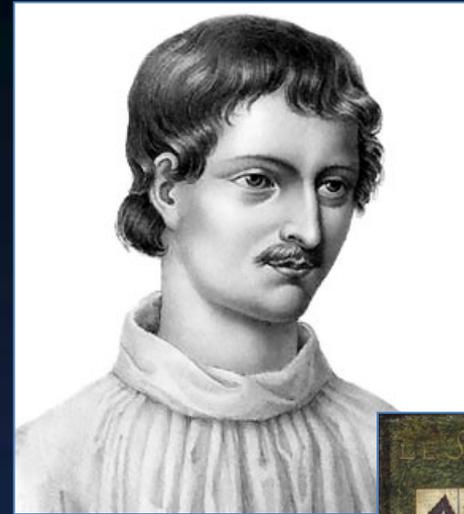


Épicure comme Plutarque pensaient déjà la pluralité des mondes durant l'Antiquité
© Marie-Lan Nguyen / © Zde

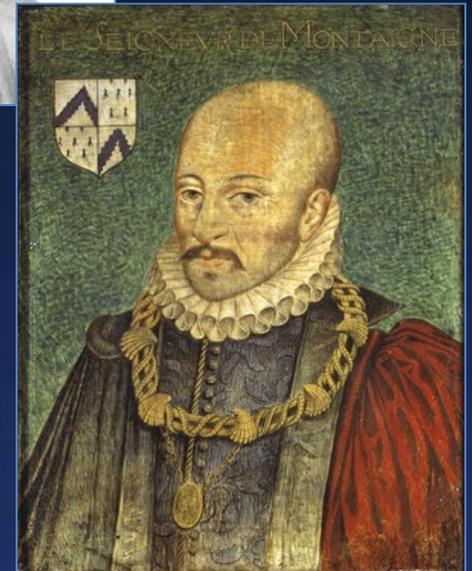
Penser d'autres mondes

RENAISSANCE

- **Nicolas de Cues** (1401 – 1464)
 - Parle des habitants d'autres étoiles (De la docte ignorance, 1440)
- **Giordano Bruno** (1548 – 1600)
 - « Il est impossible qu'un être rationnel suffisamment vigilant puisse imaginer que ces mondes [...] soient dépourvus d'habitants semblables et même supérieurs... » (L'Infini, l'Univers et les mondes, 1584)
- **Montaigne** (1533 – 1592)
 - Pourquoi Dieu aurait-il créé seulement la Terre, aurait-il « restreint ses forces à certaines mesures ? » (Essais, 1588)



G. Bruno défendait la pertinence d'un univers infini, peuplé d'une multitude de mondes



« Dieu s'est-il obligé à n'outrepasser les bornes de notre sciences ? »

Penser d'autres mondes

XVIIe siècle

•Galilée (1564 – 1642)

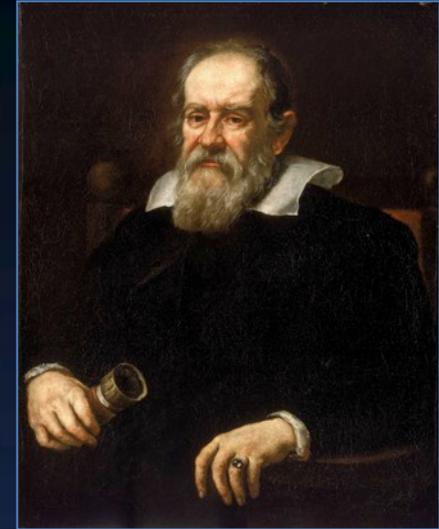
- Son personnage Sagredo ne pense pas que des arbres ou des Hommes peuplent d'autres mondes, mais une nature complètement différente (Dialogue sur les deux grands systèmes du monde, 1632)

•Johannes Kepler (1571 – 1630)

- Pense que les mers lunaires sont des régions où sont établies des villes (Le Songe ou l'Astronomie lunaire, 1634)

•Fontenelle (1657 – 1757)

- « Il serait bien étrange que la Terre fût aussi habitée qu'elle l'est, et que les autres planètes ne le fussent point du tout... » (Entretiens sur la pluralité des mondes, 1686). Il s'inspire des travaux de Copernic et Descartes.



Galilée par Justus Sustermans, 1636



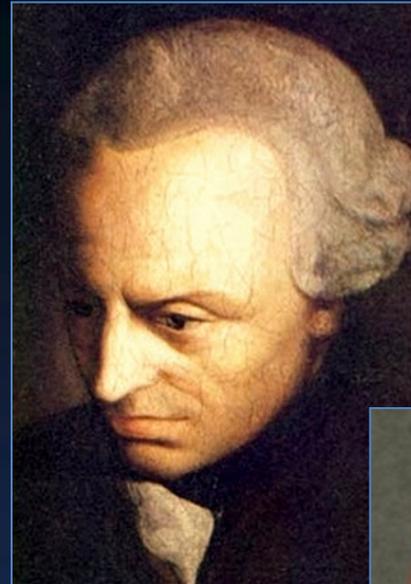
Fontenelle par Louis Galloche, 1723

Penser d'autres mondes

XVIIIe et XIXe siècles

•Emmanuel Kant (1724 – 1804)

- « Je suis persuadé qu'il n'est pas même besoin de soutenir que toutes les planètes sont habitées » (Histoire naturelle générale et théorie du ciel, 1755)



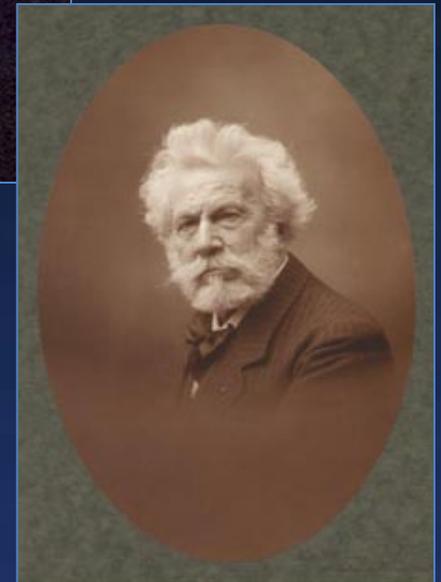
Portrait du philosophe
Emmanuel Kant

•Pierre-Simon Laplace (1749 – 1827)

- Pour chaque température à la surface des planètes, une vie différente s'y est adaptée (Exposition du système du monde (1796)

•Camille Flammarion (1842 – 1925)

- « Ce que nous devons voir [...] c'est, parmi les milliards de planètes qui doivent graviter autour des innombrables soleils de l'espace, des millions de mondes habités [...], absolument différents de tout ce qui existe sur notre planète » (Les terres du ciel, 1884)



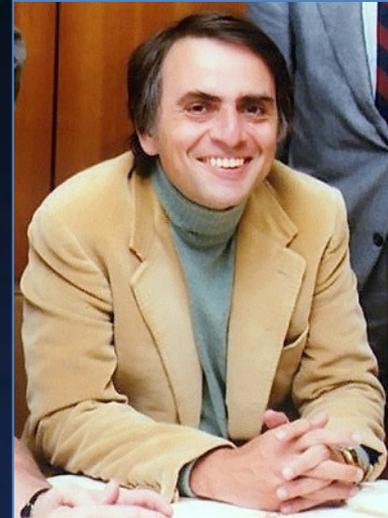
Portrait photographique
de l'astronome français
Camille Flammarion

Penser d'autres mondes

Du XXe siècle à nos jours

• Carl Sagan (1934 – 1996)

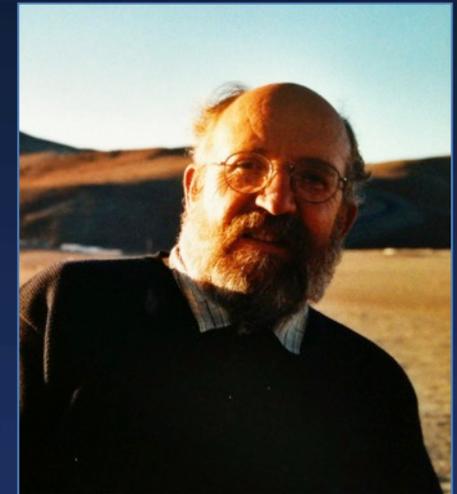
- « Après des siècles de conjectures boiteuses, de spéculations débridées, de conservatisme pesant et de désintérêt à courte vue, la notion de vie extraterrestre arrive enfin à maturité » (The Cosmic Connection, 1973)



L'astronome américain
Carl Sagan. © Nasa/JPL

• Michel Mayor (1942 -)

- « À la lumière de nos connaissances actuelles, il est de plus en plus difficile d'imaginer que la Terre soit le seul havre de vie du cosmos » (Les nouveaux mondes du cosmos, 2001)



L'astronome suisse
et découvreur de la première
exoplanète Michel Mayor
© Franck Schneider

Qu'est-ce qu'une « terre » ?

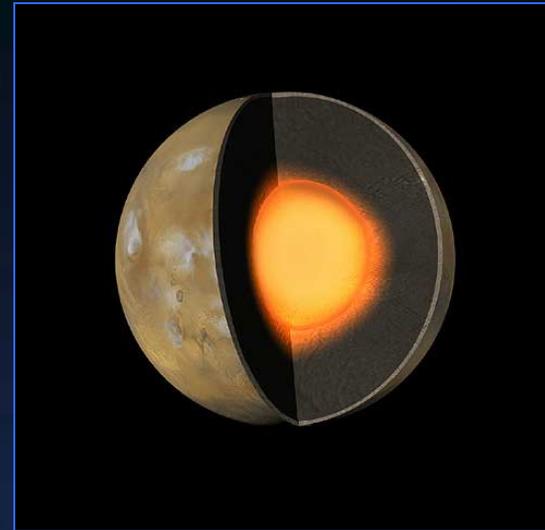
- **Une planète tellurique**

- Roche et métal
- densité élevée (+ de 4)
- surface rigide

- **Dans le Système solaire :**

- Mercure
- Vénus
- La Terre
- Mars

- **Formation** (accrétion + différenciation) en une centaine de millions d'années



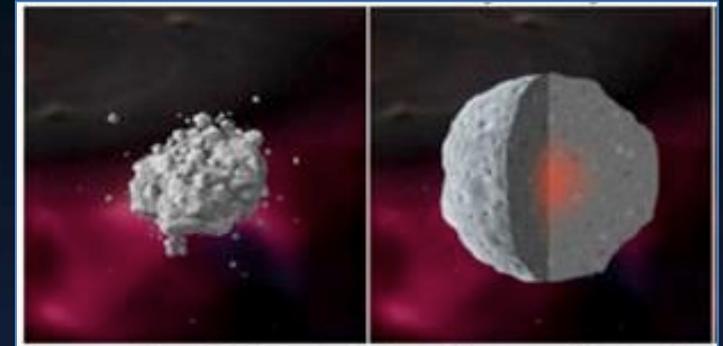
Intérieur de Mars. © Nasa



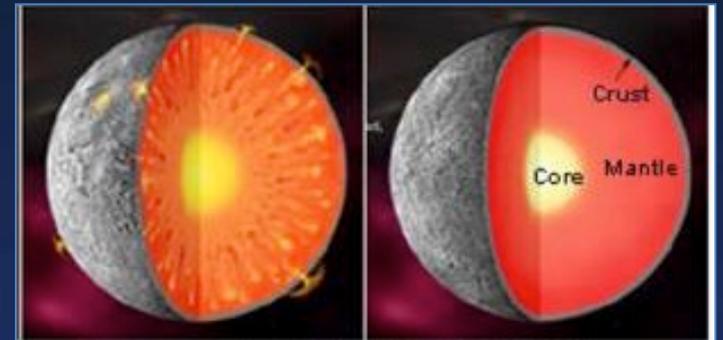
Les planètes telluriques du Système solaire. © Nasa

Formation des planètes

- **Accrétion**
 - la matière s'agglutine pour former les protoplanètes
- **Différenciation**
 - les éléments lourds plongent, les éléments légers restent en surface
- Les planètes **géantes** se forment en **~ 10 Ma**
- Les planètes **telluriques** se forment en **~ 100 Ma**



Phase d'accrétion planétaire

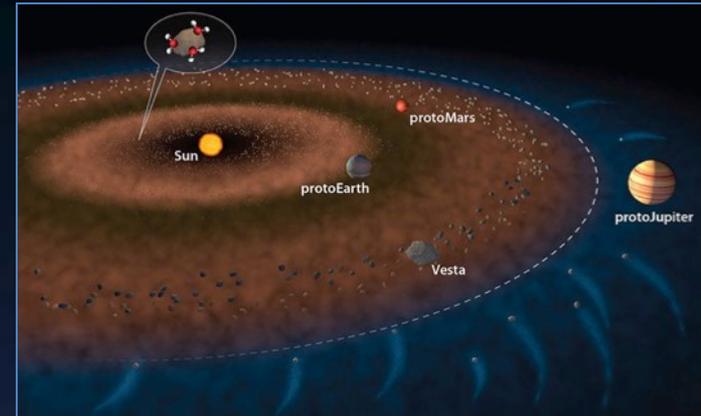


Phase de différenciation planétaire

© Smithsonian National Museum of Natural History

La ligne des glaces

- Ligne isotherme
 - marque la distance au Soleil à laquelle l'eau se solidifie en glace (~ 3 UA)
- Les planètes telluriques se forment entre le Soleil et la ligne des glaces
- Les géantes se forment au-delà de cette ligne
 - la glace d'eau, de nature collante, permet d'accréter plus de matière pour former les géantes
- Mais les planètes peuvent ensuite migrer !



La ligne des glaces se situe entre les orbites de Mars et Jupiter
© Woods Hole Oceanographic Institution



Tailles comparées de la Terre (plus grosse planète tellurique)
avec Jupiter (plus grosse planète gazeuse)

Les zones habitables

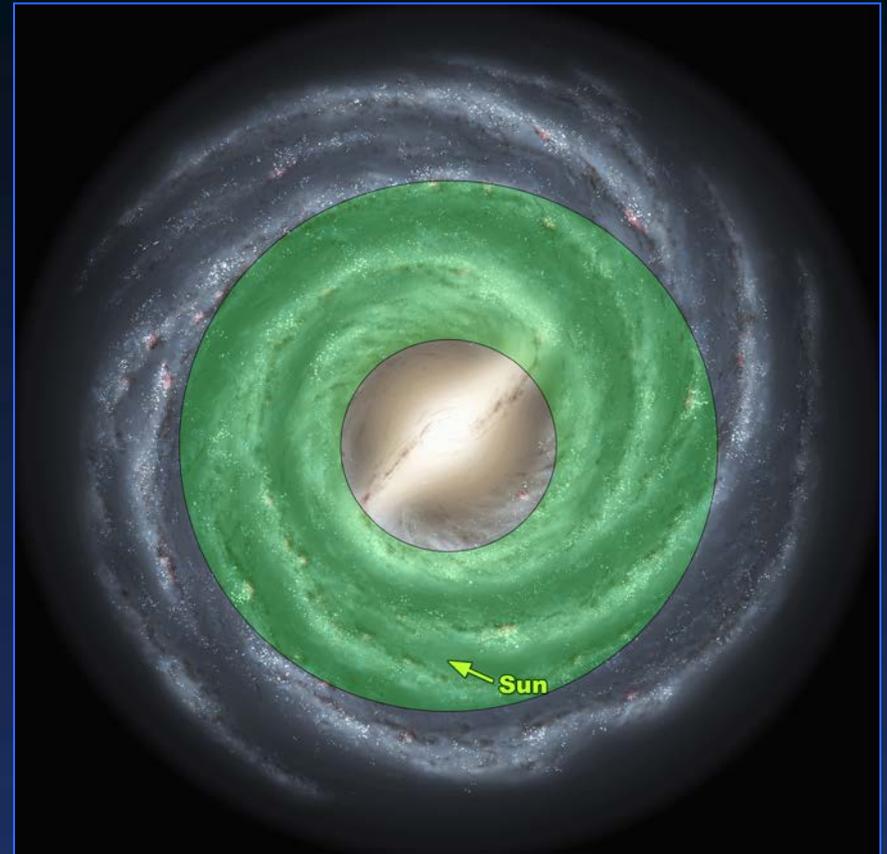
- Zones où les **conditions** sont **favorables à la vie**
 - source d'énergie
 - eau liquide
 - matière organique
 - ...
- **2 types** de zones habitables :
 - zones habitables galactiques
 - zones habitables circumstellaires (autour de l'étoile)



Vue d'artiste du système Gliese 667
© ESO/L. Calçada ([lien](#))

Zone habitable galactique

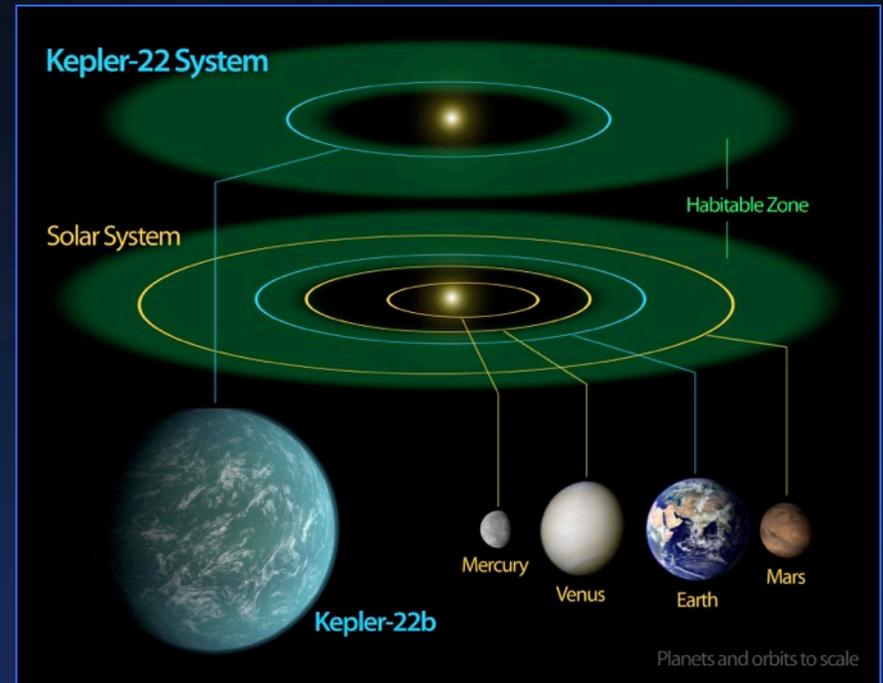
- **Pas trop proche** du centre galactique
 - densité d'étoiles pas trop importante (stabilité orbitale)
 - statistiquement moins de supernovæ
 - éviter les radiations émises par le centre galactique
- **Pas trop loin** du centre galactique
 - métallicité élevée (carbone, fer...) pour créer des molécules complexes



Zone habitable de la Voie Lactée. © Nasa/JPL-Caltech/R. Hurt (SSC/Caltech)

Zone habitable circumstellaire (ZHC)

- Hypothétiquement, **toutes les étoiles** possèdent une zone habitable
 - distance à laquelle l'eau peut être stable à l'état liquide
 - éviter les radiations stellaire destructrices
 - effets de marée pas trop importants
- Présence d'une **atmosphère requise** pour l'habitabilité de surface !



Comparaison de la zone habitable solaire avec celle du système de Kepler-22. © Nasa/Ames/JPL-Caltech

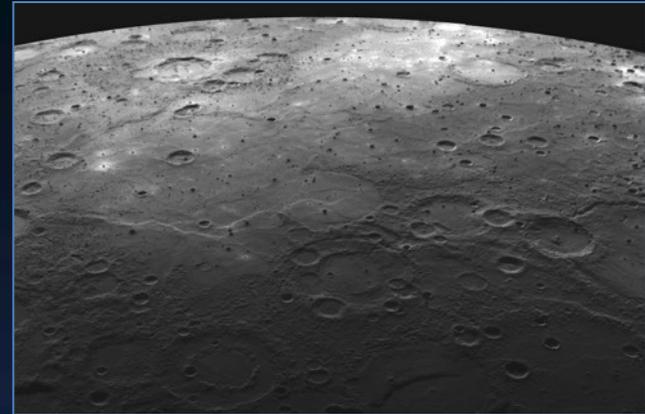
Température des planètes

- **Température effective**

- fonction de la luminosité stellaire (L), de l'albédo de la planète (a) et de la distance des deux astres (D)

$$T = \sqrt[4]{\frac{L(1-a)}{16\pi\sigma D^2}}$$

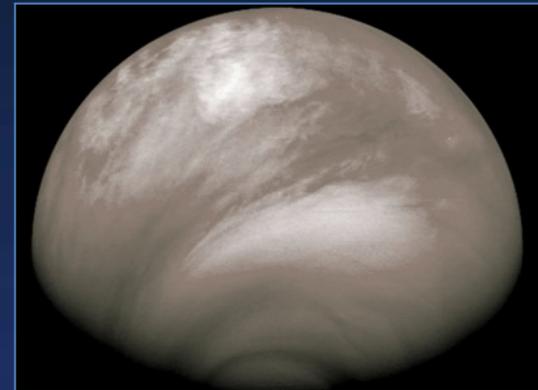
- Pour la Terre, $T_{\text{eff}} = -18^\circ \text{C}$
- À 3 UA (ligne des glaces) $T \sim -140^\circ \text{C}$



La température de Mercure, qui ne possède pas d'atmosphère, oscille entre -180°C la nuit et 430°C le jour. © Nasa/JHU APL/CIW

- **Température de surface**

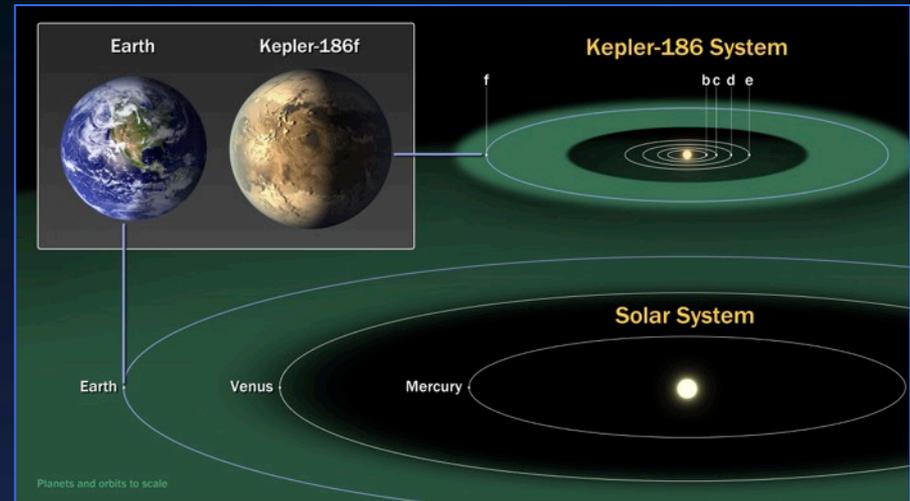
- Atmosphère → effet de serre
□ températures
- Pour la Terre $T_{\text{sur}} = 15^\circ \text{C}$
- $\text{H}_2\text{O} \sim +20^\circ \text{C}$
- $\text{CO}_2 \sim +10^\circ \text{C}$



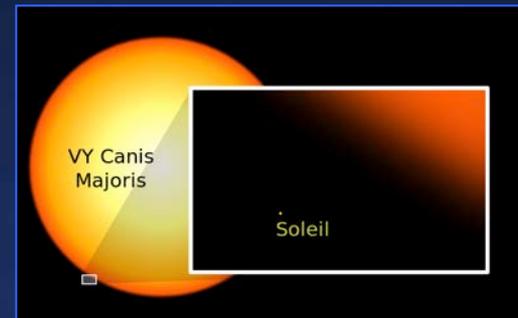
Pourtant plus éloignée du Soleil que Mercure, Vénus présente une température constante de 460°C . © ESA/MPS

Les types d'étoiles

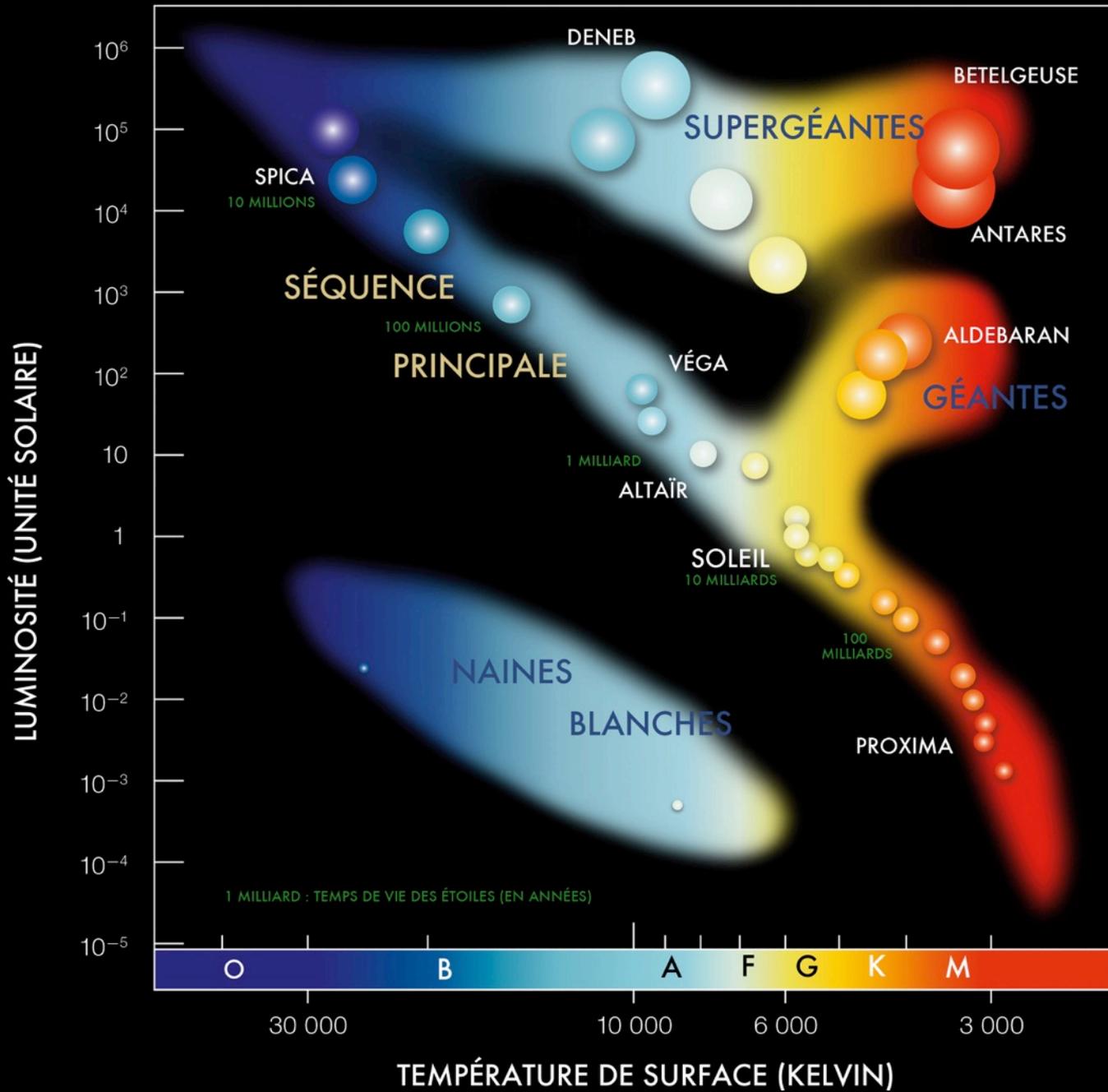
- **Séquence principale**
 - naines rouges, Proxima du Centaure ($d_{\text{ZHC}} \sim 0,05 \text{ UA}$)
 - type Soleil ($d_{\text{ZHC}} \sim 1 \text{ UA}$)
 - type A, Véga ($d_{\text{ZHC}} \sim 10 \text{ UA}$)
 - étoiles bleues, Spica ($d_{\text{ZHC}} \sim 100 \text{ UA}$)
- **Géantes et supergéantes**
 - très instables
 - la ZHC évolue trop rapidement
- **Naines blanches**
 - étoiles résiduelles passées par le stade de géante (survie du système planétaire ?)



Comparaison des zones habitables du Soleil et de Kepler-186 f
© Nasa/Ames/SETI Institute/JPL-Caltech



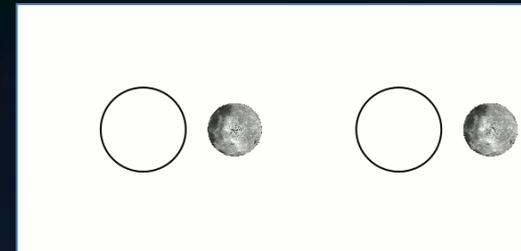
Taille relative du Soleil
par rapport à la supergéante rouge VY Canis Majoris.
© Mysid



Les effets de marée

- **Interaction gravitationnelle**

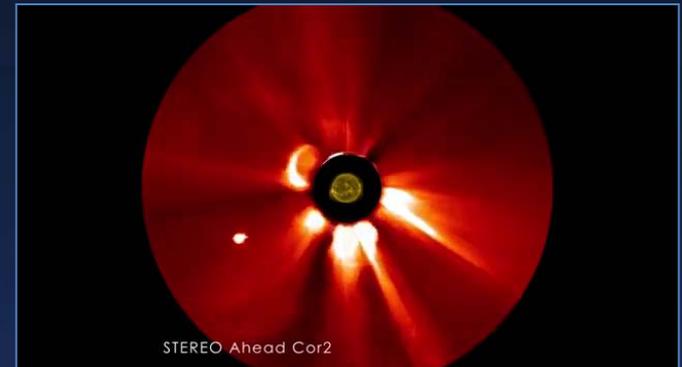
- agit lorsque deux astres orbitent à des distances réduites
- $F \propto 1/d^3$
- déformation des corps
- ex : la Terre et la Lune



Exemple de la Lune, verrouillée gravitationnellement à la Terre
© Stigmatella aurantiaca

- Si la planète est trop près de son étoile, elle peut être « **verrouillée gravitationnellement** »

- une seule face éclairée
- l'autre face plongée dans l'obscurité



Fragmentation de la comète ISON à l'approche du Soleil. © Nasa

- **Limite de Roche**

- distance à laquelle la planète se désagrège par effet de marée de son étoile

$$d_R = R_P \left(\frac{2\rho_P}{\rho_S} \right)^{1/3}$$

ρ : masse volumique (densité)
P : corps primaire (étoile)
S : corps secondaire (planète)

L'atmosphère

- Indispensable pour **générer une pression atmosphérique** en surface
 - l'eau ne peut se trouver à l'état liquide si $P=0$
- **Filtre les rayons** cosmiques et stellaires néfastes pour la vie (ex : ozone)
- **Permet la respiration** des êtres vivants en surface (ex : oxygène)



Coucher de Soleil au travers de l'atmosphère terrestre. © Expedition 15 Crew/Nasa

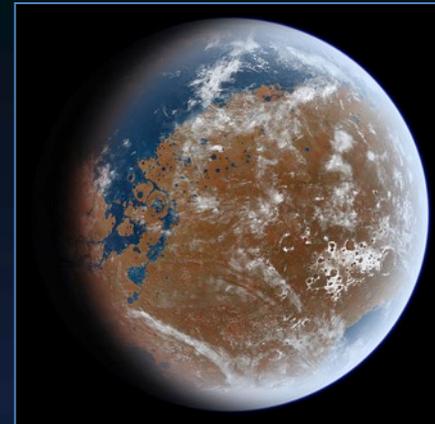


Les atmosphères dans le Système solaire : Vénus, Mars et Titan
© Nasa/JPL/Space Science Institute

Évolution de l'habitabilité

- **Évolution planétaire**

- une planète inhabitable peut devenir habitable
→ La Terre
- l'inverse est vrai aussi
→ Mars ?
→ La Terre ? (réchauffement climatique)



Mars était probablement habitable il y a 4 milliards d'années
© Ittiz

- **Évolution stellaire**

- le Soleil gagne 7% de luminosité par milliard d'années
→ La Terre, inhabitable dans un milliard d'année ?



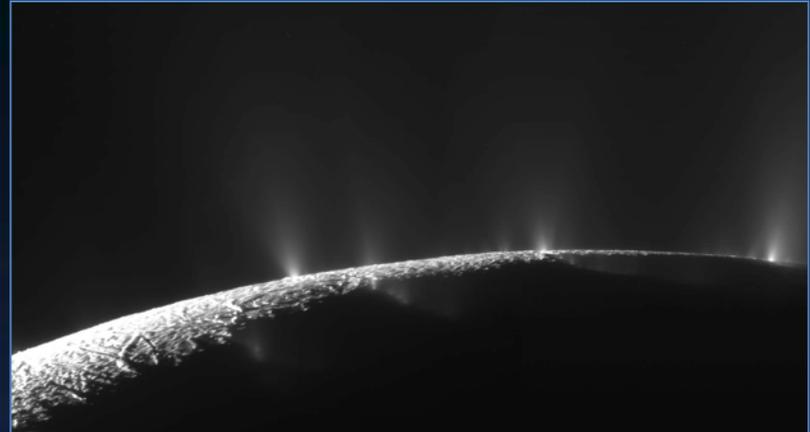
Tôt ou tard, la Terre ne sera plus habitable
© S. Numazawa/Ciel & Espace

- **Cataclysmes**

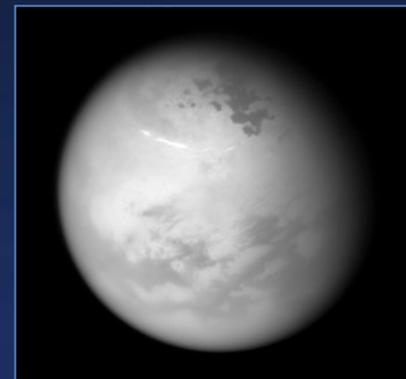
Autres cas d'habitabilité

- **Les océans sous-glaciaires des lunes de Jupiter et Saturne**
 - effets de marée des géantes
→ énergie interne
 - moins de roches, beaucoup de glaces
 - océans d'eau sous plusieurs km de croûte de glace
ex : Europe, Ganymède, Encelade

- **Titan**
 - atmosphère dense
 - composés organiques
 - lacs d'hydrocarbures
 - atmosphère d'azote
 - énergie interne ?



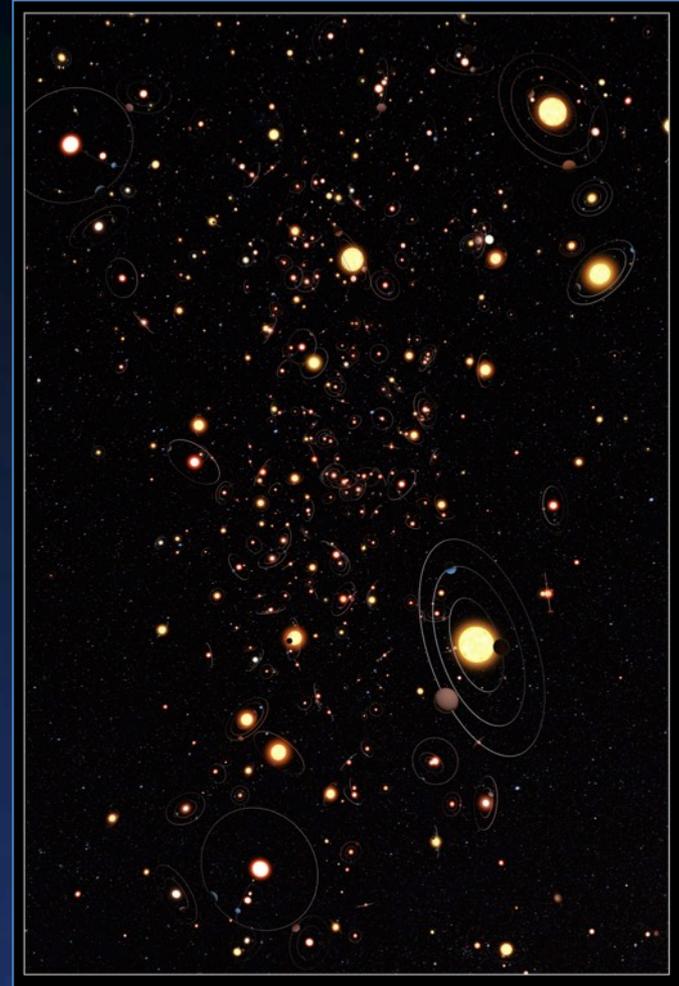
En 2005, Cassini découvre les geysers d'Encelade, indiquant la présence d'un océan d'eau sous-glaciaire
© Nasa/JPL/SSI



Titan et ses lacs d'hydrocarbures du pôle nord
© Nasa/JPL-Caltech/SSI

Les exoplanètes

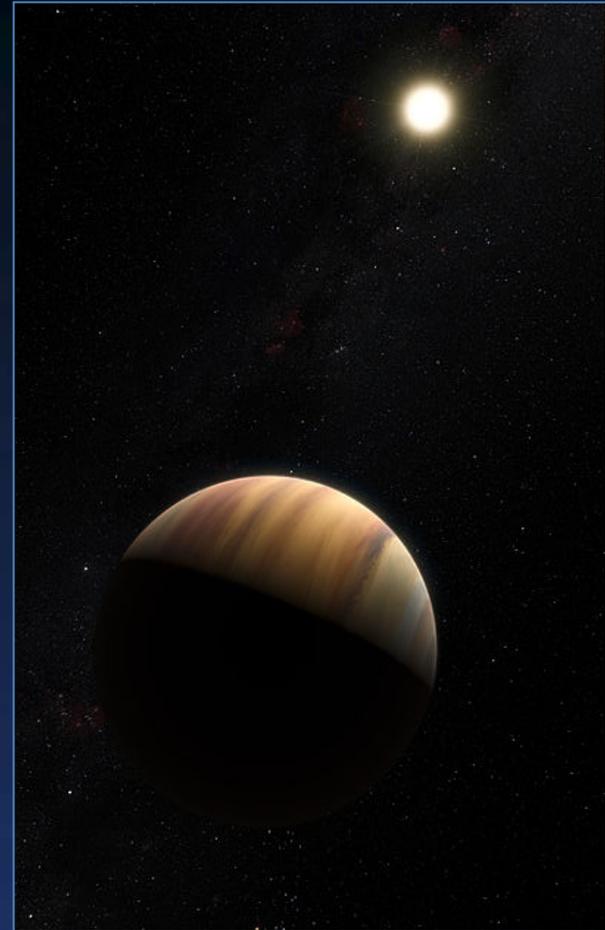
- Planète en orbite autour d'une autre étoile que le Soleil
- Telluriques (les **terres**), gazeuses (les **jupiters**), de glaces (les **neptunes**)
- Environ **100 milliards d'étoiles** dans la Voie Lactée
 - Plus d'une planète par étoile en moyenne
 - Il y aurait des **centaines de milliards d'exoplanètes** dans la Voie Lactée
 - dont une **dizaine de milliards de terres habitables**



Vue d'artiste montrant la multitude d'exoplanètes dans la Voie Lactée
© Nasa/ESA/M. Kornmesser (ESO)

Les exoplanètes en chiffres

- **3 498 exoplanètes confirmées**
 - 1 272 neptunes
 - 1 061 jupiters
 - 790 super-terres
 - 362 terres
 - 13 sans info
- **4 496 candidates**
- **2 608 systèmes planétaires**
- **1^{ère} exoplanète confirmée : 51 Pegasi b**, découverte par Michel Mayor et Didier Queloz en 1995



51 Peg b, un jupiter chaud situé à 50 années-lumière de la Terre, orbite autour de son étoile à seulement 0,05 UA
© ESO/M. Kornmesser/Nick Risinger ([lien](#))

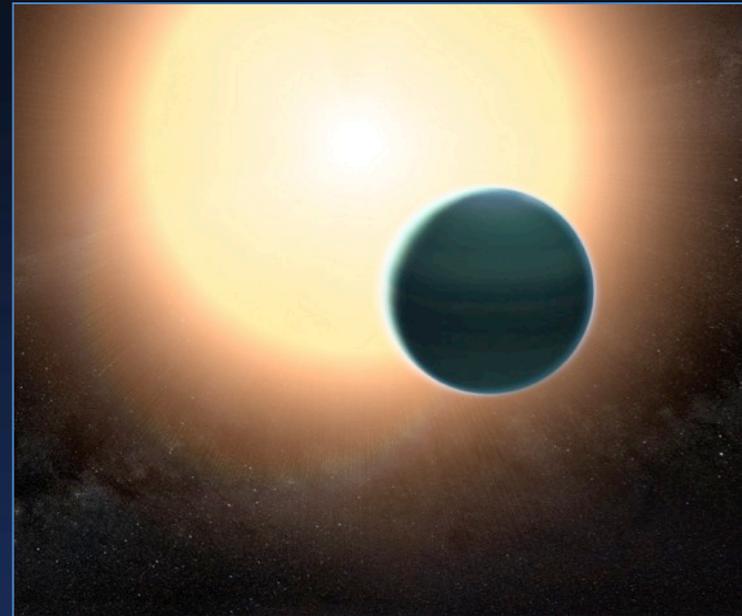
Types de planètes géantes

- **Les jupiters**

- composés à majorité d'**hydrogène** et d'**hélium**
- jupiters chauds : orbite proche de leur étoile
ex : 51 Peg b
- jupiters froids
ex : Jupiter, Saturne

- **Les neptunes**

- composés d'éléments plus lourds que H et He, mais plus légers que la roche
- neptunes chauds
ex : HAT-P-26 b
- neptunes froids
ex : Neptune, Uranus



Un exemple de neptune chaud, HAT-P-26 b,
fait le tour de son étoile en un peu plus de 4 jours

© Nasa/GSFC

Types de planètes telluriques

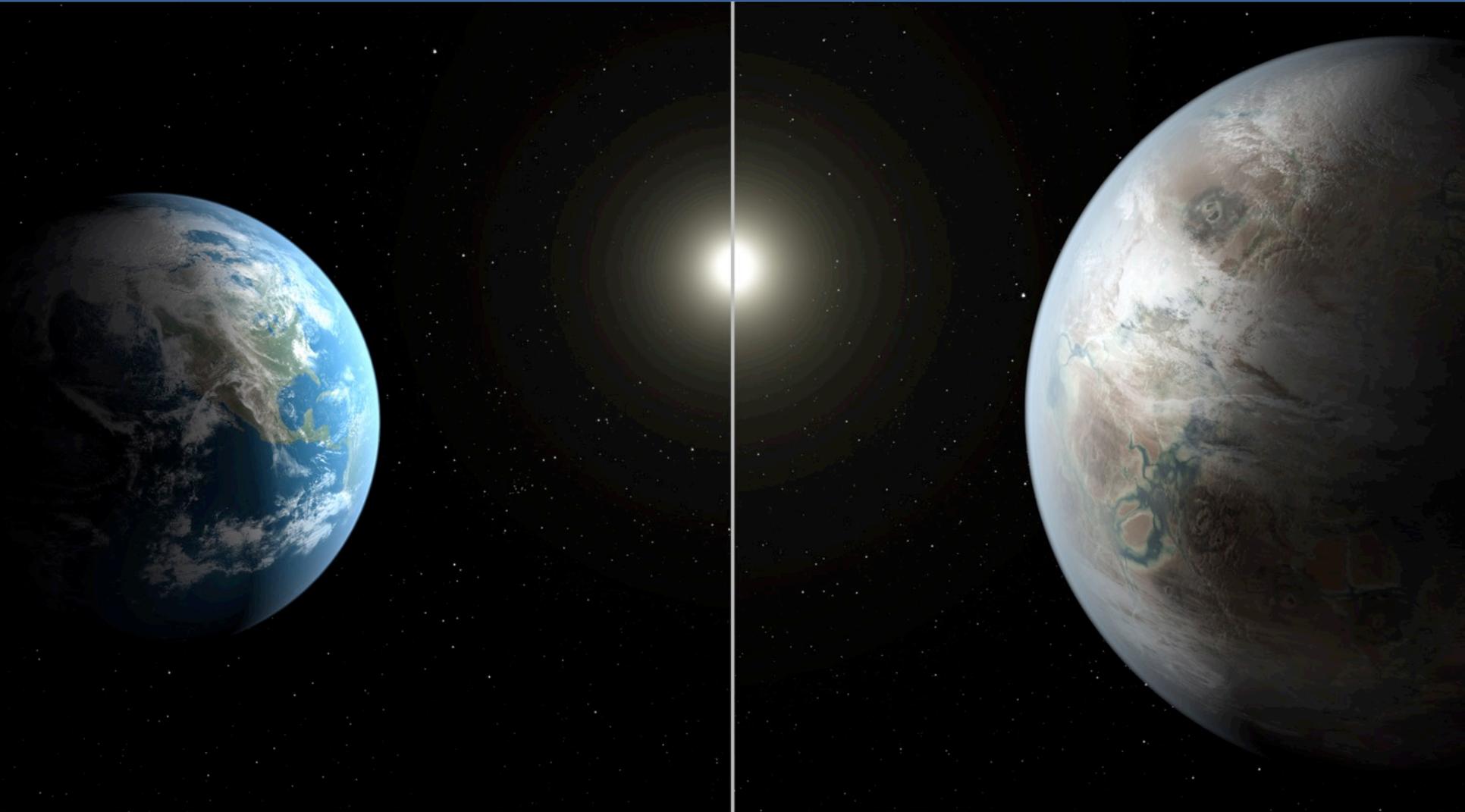
- **Planètes de silicates**
 - noyau métallique
 - manteau rocheux
 - ex : Vénus, Terre, Mars, Mercure (?)
- **Planètes métalliques**
 - petit rayon
 - large noyau métallique
 - ex : Mercure (?)
- **Planètes de diamant**
 - concentration élevée en carbone
 - ex : 55 Cancri e (?)
- **Planètes océan**
 - taille similaire à la Terre
 - faible densité
 - ex : Gliese 1214 b (?)



Vue d'artiste d'une planète océan. © Merikanto



55 Cancri e serait peut-être une planète de diamant
© U. Texas/NSF/Nasa



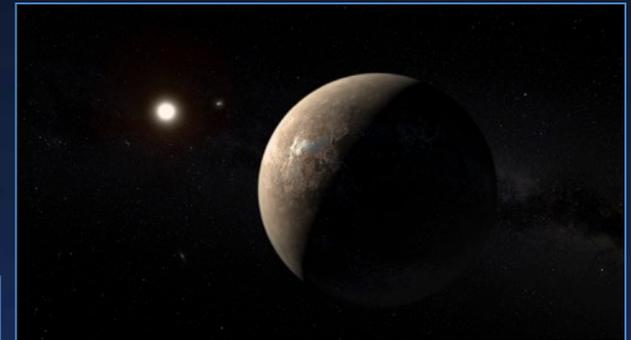
Super-terres : l'exemple de Kepler-452 b

Les terres habitables en chiffres

- **52 terres potentiellement habitables confirmées**
 - 30 super-terres
(5 à 10 M_T / 1,5 à 2,5 R_T)
 - 21 terres
(0,5 à 5 M_T / 0,8 à 1,5 R_T)
 - 1 planète subterrestre
(0,1 à 0,5 M_T / 0,4 à 0,8 R_T)
- **Terre habitable la plus proche de la Terre**
→ Proxima Centauri b (4,2 années-lumière)



Kepler-62 f est la super-terre à l'indice de similarité avec la Terre le plus élevé
© Nasa/Ames/JPL-Caltech



Proxima Centauri b est la terre habitable la plus proche de notre Système solaire
© ESO/M. Kornmesser ([lien](#))



TRAPPIST-1 d est la seule exoplanète subterrestre habitable découverte à ce jour
© Nasa/JPL-Caltech

Indice de similarité (IST)

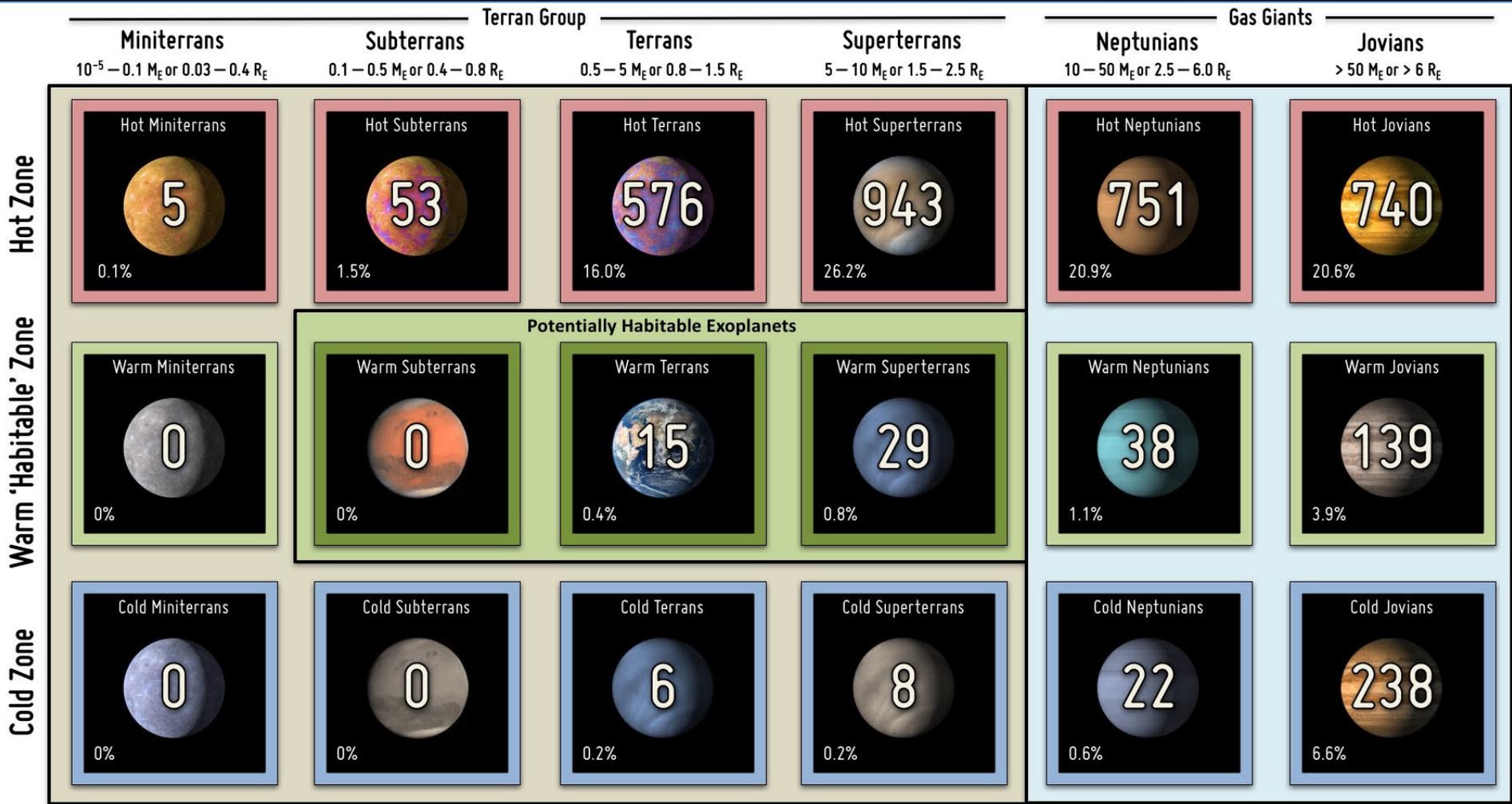
- **4 paramètres**
 - le rayon moyen
 - la masse volumique
 - la vitesse de libération
 - température de surface
- **Indice compris entre 0** (très différent de la Terre) **et 1** (parfaitement similaire à la Terre)
- **Entre 0,6 et 0,8** : habitable par des extrêmophiles ?
- **Entre 0,8 et 1** : capable de retenir une atmosphère pour un climat relativement tempéré



Dans le Système solaire, c'est Mars qui possède l'indice de similarité avec la Terre le plus élevé (0,797). © Nasa



Indice de similarité pour les 40 planètes et exoplanètes les plus habitables. © PN84100RAUL84100



* number includes a few exoplanets still unconfirmed. M_{\oplus} = Earth Mass, R_{\oplus} = Earth Radius

CREDIT: PHL @ UPR Arcibo (phl.upr.edu) Oct 2016

« Tableau périodique des exoplanètes », développé par l'université de Puerto Rico à Arcibo

Des terres « super-habitables » ?

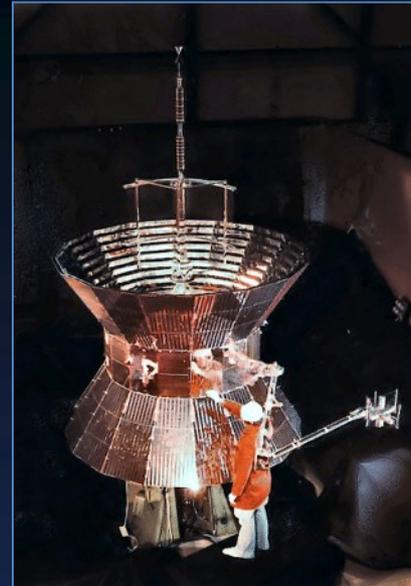
- Présente des **conditions plus favorables que la Terre** pour l'émergence de la vie
- **Plus grande que la Terre :**
 - masse optimale = $2 M_{\text{T}}$
 - permet de **mieux retenir son atmosphère**
 - aplanit les reliefs → meilleure **répartition de l'eau** à la surface
 - océans moins profonds
 - énergie interne dure plus longtemps
 - champ magnétique puissant
 - légèrement **plus chaude**, mais aussi **légèrement plus loin de l'étoile**
- **Étoile de type K** (naine orange)



De prime abord, la planète Kepler-442 b semble présenter les caractéristiques d'une planète potentiellement super-habitable. © Ph03nix1986

Explorer les terres habitables ?

- **Impossible** avec la technologie actuelle
- **Hélios 2 : sonde la plus rapide** (250 000 km/h, soit 70 km/s)
 - le voyage pour Proxima Centauri b durerait **18 000 ans**
- **Pas de plan B** pour la Terre, il faut la préserver !



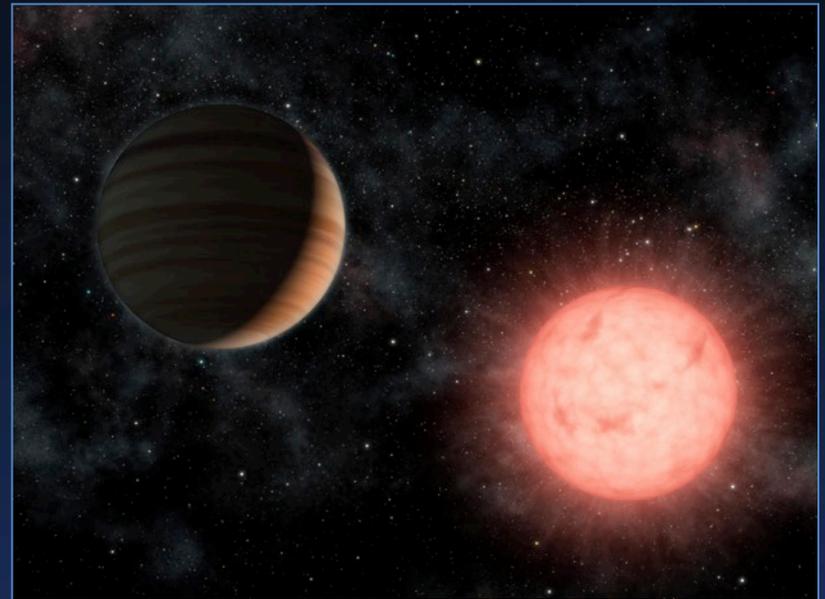
Test de la sonde Hélios
© Nasa/Max Planck



Il n'existe pas d'autre havre de vie que la Terre à proximité ! © Nasa

Les méthodes de détection

- Transit astronomique (78,1 %)
- Vitesses radiales (18,3 %)
- Microlentille gravitationnelle (1,3 %)
- Imagerie directe (1,2 %)
- Variations du moment de transit (0,43 %)
- Astrométrie (1 exoplanète)



VB 10b est la seule exoplanète découverte par astrométrie. Elle gravite autour d'une naine rouge, plus petite étoile découverte possédant un système planétaire. © Nasa/JPL-Caltech

Le transit astronomique

- La planète passe **entre son étoile et l'observateur** (téléscope)
- Lors du transit, la planète fait **baissier la luminosité** de son étoile
- C'est cette baisse de luminosité qui permet de détecter l'exoplanète
- Permet de définir la **taille de la planète et de l'orbite**



Le transit astronomique est une méthode de détection indirecte, la plus usitée pour trouver des exoplanètes
© Nasa/JPL-Caltech

Les vitesses radiales

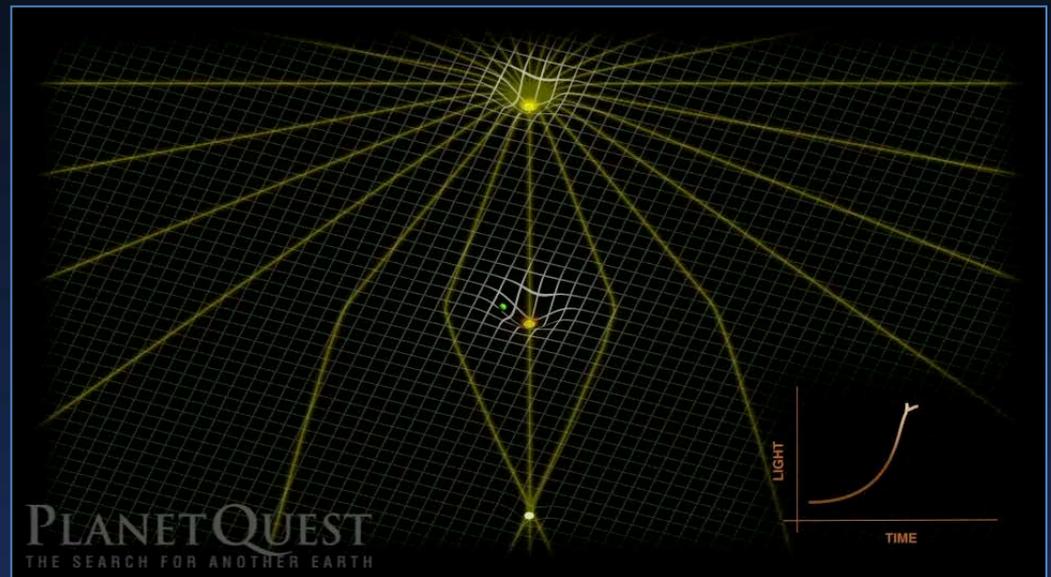
- La planète **perturbe gravitationnellement** son étoile
- **L'étoile oscille** autour du centre de masse du système
- En oscillant, **la lumière de l'étoile varie** (+ rouge en s'éloignant, + bleue en s'approchant)
- Permet de **déterminer la masse** de l'exoplanète



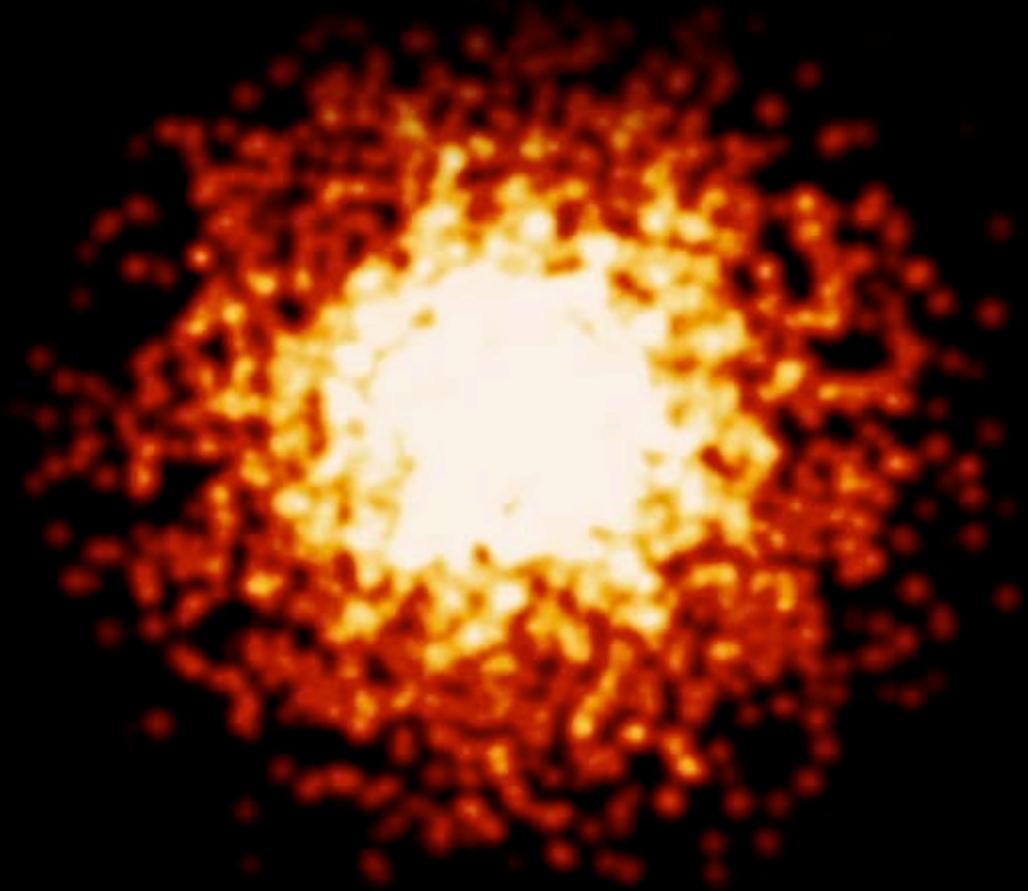
Le décalage de la fréquence lumineuse émise par l'étoile est appelé effet Doppler
© Nasa/JPL-Caltech

Micro-lentille gravitationnelle

- La masse d'un système exoplanétaire va déformer l'espace-temps et **dévier la lumière** d'une étoile lointaine
- Les rayons de l'étoile lointaine vont être **concentrés** en direction de l'observateur (même principe que la lentille)
- La lumière reçue de l'étoile lointaine va être momentanément **plus intense**
- **Un mini pic de magnitude** va être observé si une planète est en orbite autour de l'étoile au premier plan



Le pic de lumière permet de détecter l'existence d'une exoplanète
© Nasa/JPL-Caltech



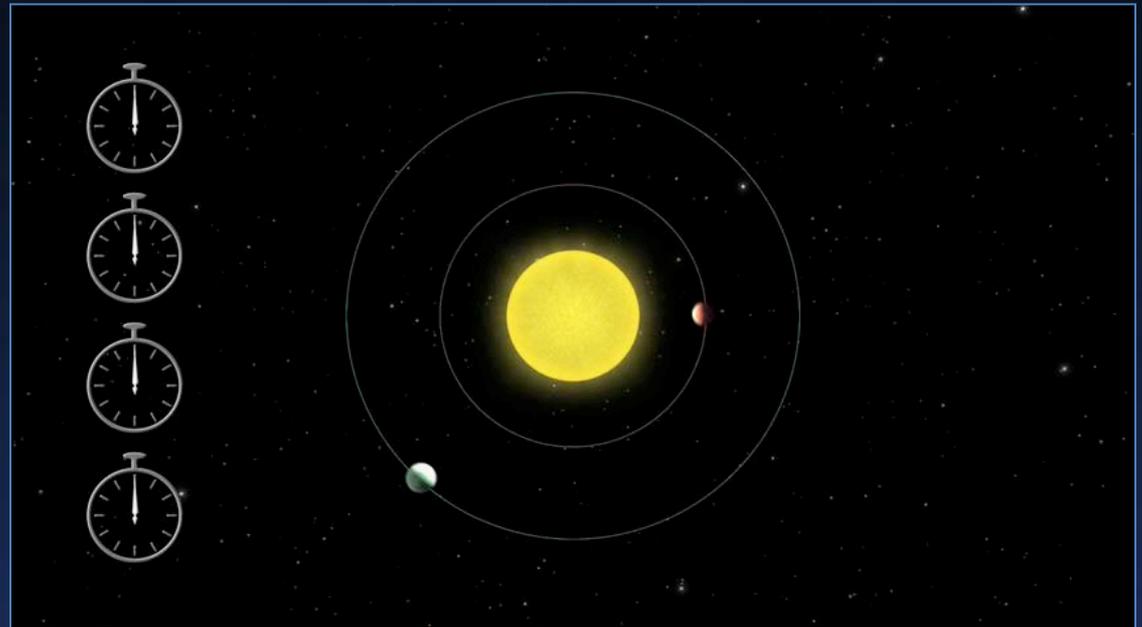
PLANET QUEST
THE SEARCH FOR ANOTHER EARTH

Imagerie directe

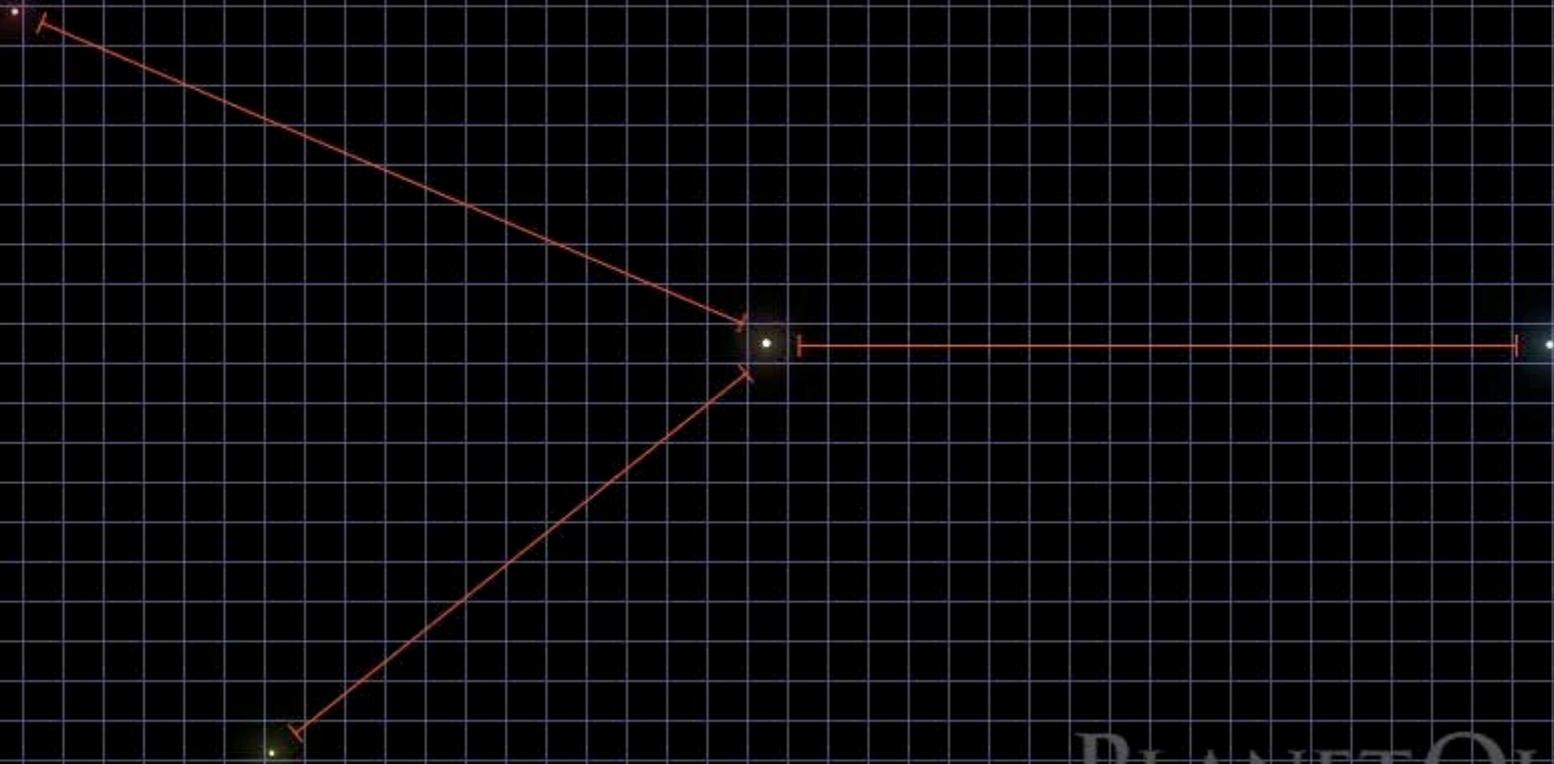
© Nasa/JPL-Caltech

Variations du moment de transit

- Une exoplanète a déjà été découverte par la méthode du transit
- Si de légères variations de période sont mesurées → présence d'une autre planète



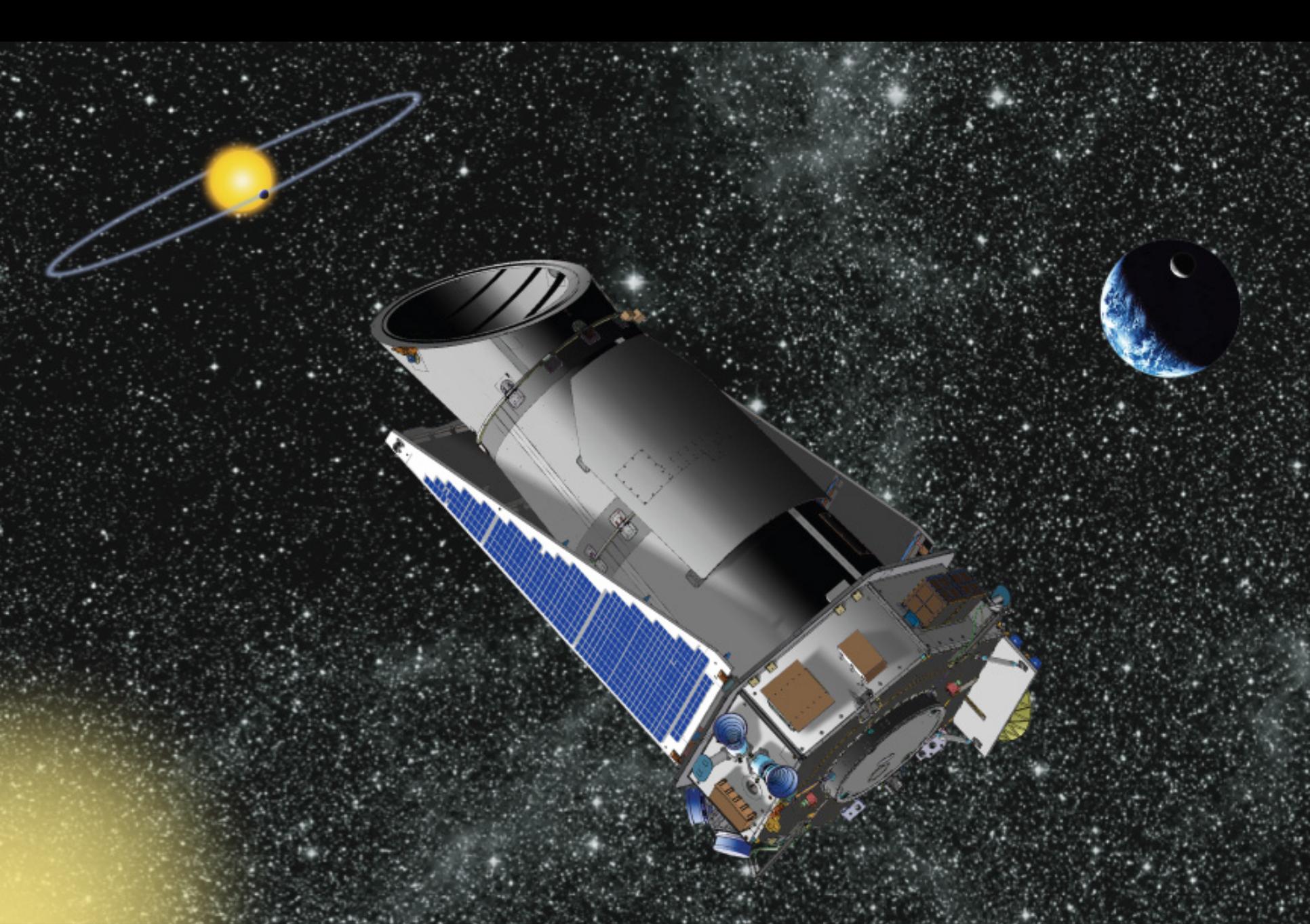
Si la période de révolution d'une exoplanète évolue la présence d'une deuxième exoplanète est soupçonnée
© Nasa/Ames/Kepler Mission



PLANET QUEST
THE SEARCH FOR ANOTHER EARTH

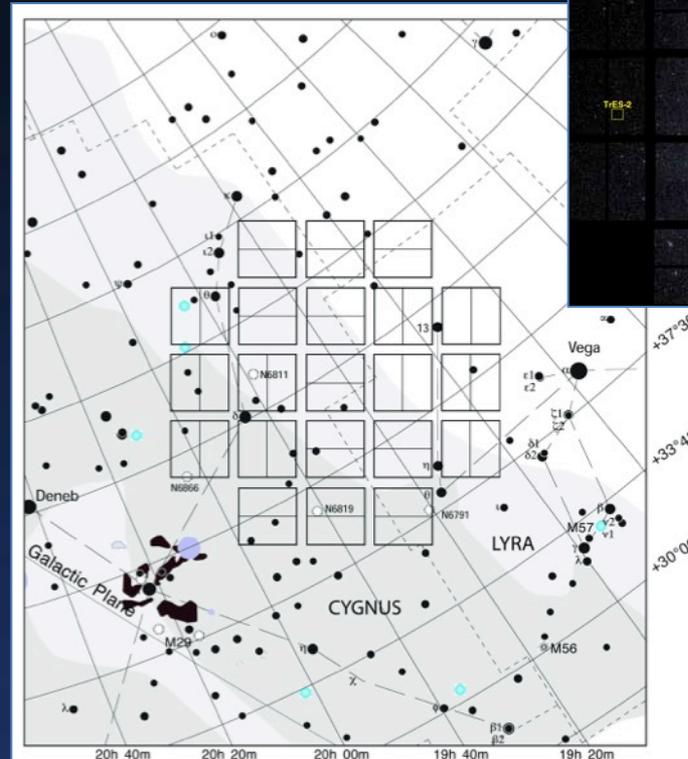
L'astrométrie permet de mesurer de tous petits déplacements par rapport à des étoiles références, fixes

© Nasa/JPL-Caltech

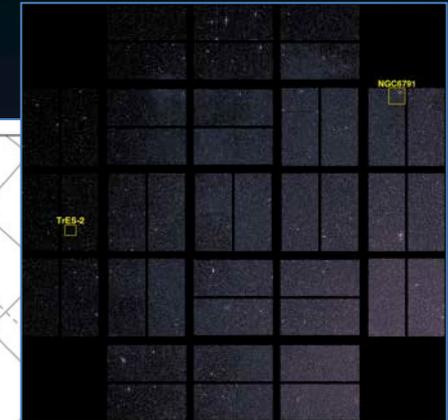


Télescope Kepler (Nasa)

- Lancé le 7 mars 2009
- **Orbite héliocentrique** (suit la Terre sur l'orbite)
- **Méthode des transits**
- Étude de la luminosité de **145 000 étoiles**
- Champ d'observation de **115 degrés carrés** (0,28 % du ciel)
- **2 493 exoplanètes confirmées**



Fenêtres d'observations du télescope spatial Kepler
© Nasa/Ames/JPL-Caltech



CoRoT (ESA)

- Lancé le **27 décembre 2006**
- Désactivé le **17 juin 2014**
- **1^{er} télescope** en orbite destiné à la **recherche d'exoplanètes**
- **Orbite polaire**
- Méthode des **transits**
- Découverte de la **première exoterre confirmée**, Corot-7 b ($1,7 R_{\text{T}}$ pour $7,3 M_{\text{T}}$)



Le télescope CoRoT a permis de détecter 30 exoplanètes lors de sa mission de 8 ans
© Cnes/D. Ducros



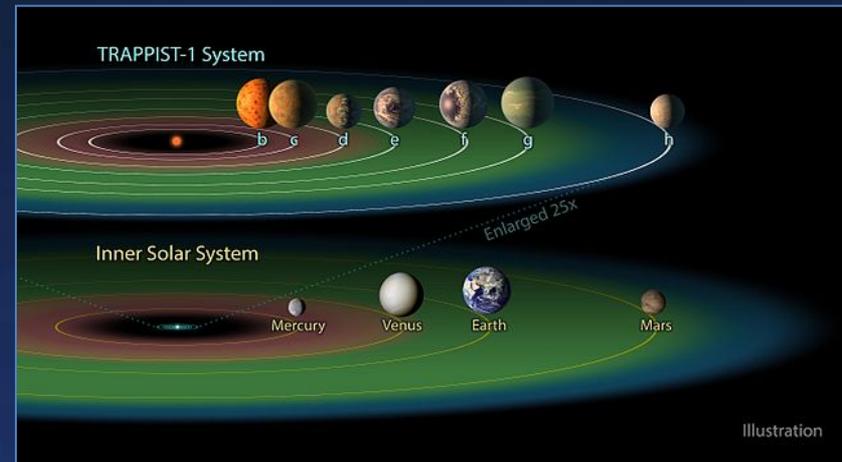
L'exoterre Corot-7 b est bien trop proche de son étoile (0,017 UA) pour être habitable. © ESO/L. Calçada ([lien](#))

TRAPPIST

- réseau de **2 télescopes**
- Université de Liège et Cadi Ayyad de Marrakech
- Observatoire de La Silla (Chili) et observatoire de l'Oukaïmeden (Maroc)
- **Méthode des transits**
- Découverte du système **TRAPPIST-1**
 - étoile naine ultra-froide
 - 7 planètes en orbite
 - 3 habitables



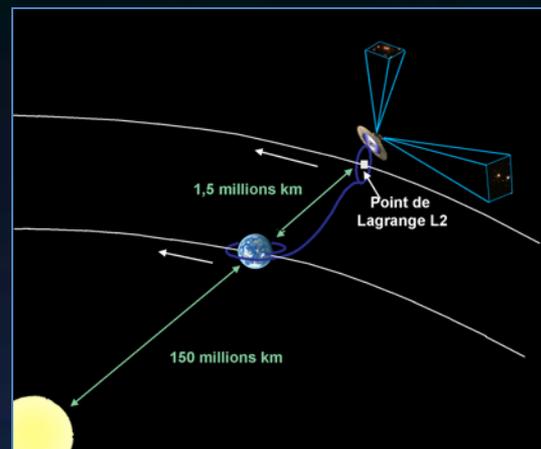
Le dôme de TRAPPIST à La Silla au Chili
© ESO/E. Jehin ([lien](#))



Comparaison du système TRAPPIST-1 avec le Système solaire interne
© Nasa/JPL-Caltech

Gaïa (ESA)

- Lancé le **19 décembre 2013**
- Contribution du Cnes et de Airbus Defence & Space
- **Point de Lagrange L2** (1,5 millions de km de la Terre, à l'opposé du Soleil)
- Méthode des **transits et astrométrie**
- Plusieurs dizaines de milliers d'exoplanètes potentielles



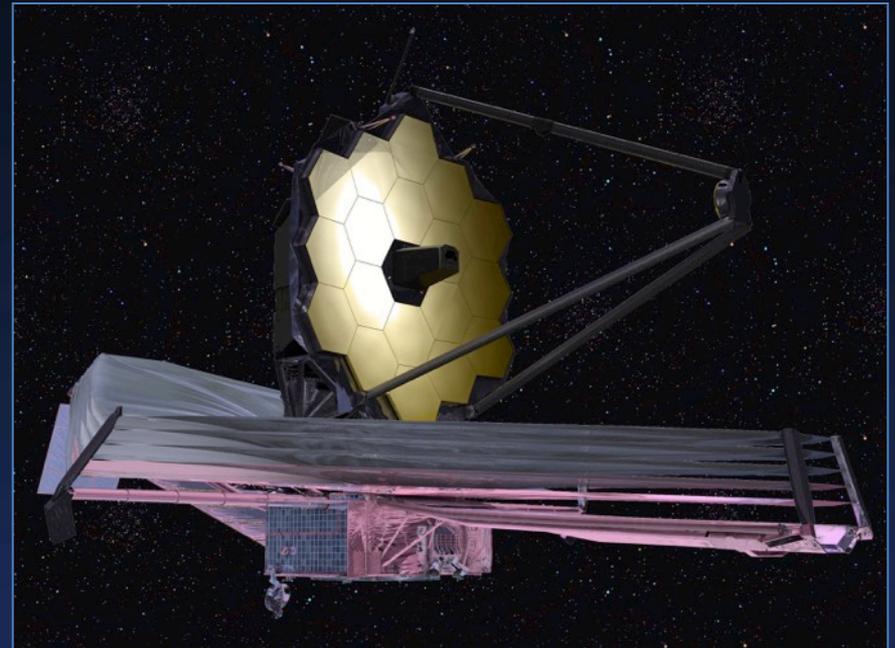
Le télescope spatial suit la Terre à 1,5 millions de km. © Plaine



Gaïa doit livrer son catalogue à l'horizon 2020. © ESA

Le télescope James Webb

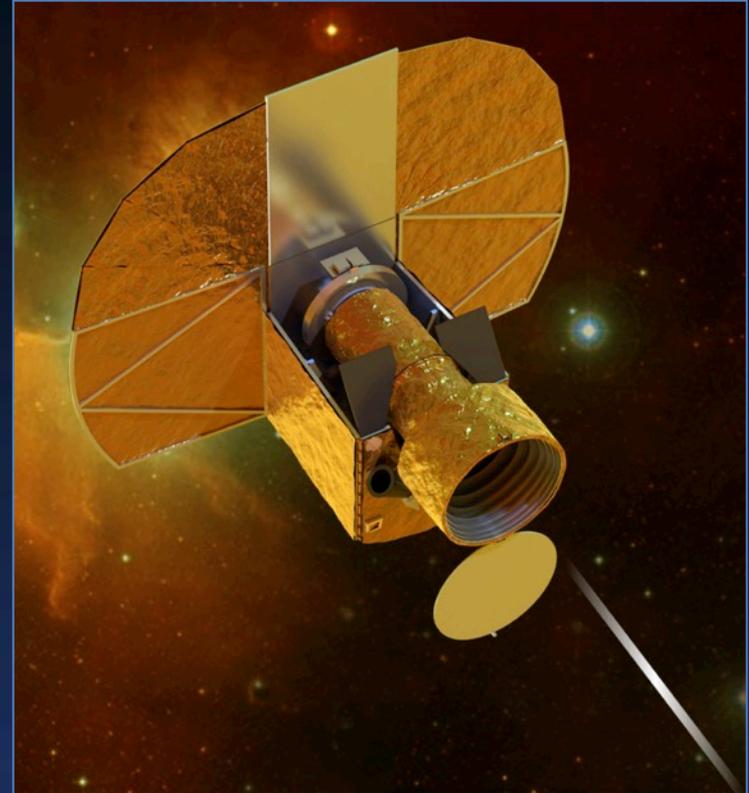
- Nasa, avec l'ESA et ASC (Agence spatiale canadienne)
- Prévu au lancement en **octobre 2018**
- Observations dans l'infrarouge
- **Imagerie directe et transit** pour la détection des exoplanètes
- Étudier **les atmosphères des exoplanètes**
 - couleur
 - saisons
 - végétation...



Le télescope James Webb étudiera les atmosphères des exoplanètes, sur lesquelles on ne sait pour l'instant presque rien. © Nasa

CHEOPS (ESA)

- Prévu au lancement en **décembre 2017**
- Contribution du Cnes et de Airbus Defence & Space
- Méthode des transits
- Étude d'**exoplanètes déjà confirmées**
 - taille
 - masse
 - atmosphères ?
- Entre **500 et 1 000** systèmes **d'étoiles proches**

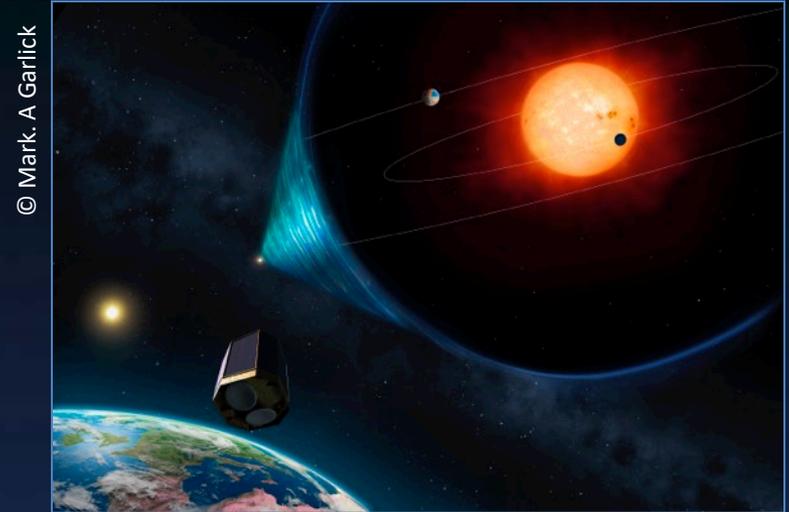


CHEOPS ne découvrira pas de nouvelles exoplanètes.
Il étudiera les caractéristiques des exoplanètes déjà découvertes

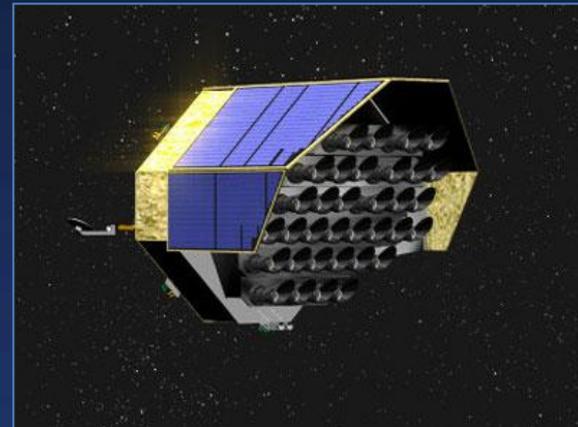
© Université de Bern

PLATO (ESA)

- Lancement prévu pour **2024-2026**
- Contribution du Cnes et de Airbus Defence & Space
- Point de Lagrange L2
- Quelle est **la proportion de terres habitables** parmi les exoplanètes ?
- **Objectifs :**
 - détection, taille et masse des exoplanètes
 - taille, masse et âge des étoiles
 - sélection de planètes favorables pour l'étude de leur atmosphère

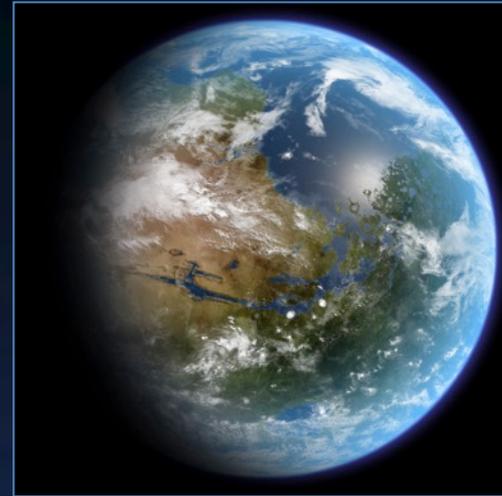


PLATO a pour but de fournir un catalogue complet sur les exoplanètes confirmées



Habitable = habitée ?

- LA question
 - Mars était potentiellement habitable il y a 4 milliards d'années. Mais aucune trace de vie passée pour l'instant
 - Problème de temps pour Mars ?
- Habitée = habitable ?
 - À l'inverse, la Terre était bien moins hospitalière qu'aujourd'hui lorsque la vie est apparue
 - atmosphère épaisse de CO₂, méthane, azote, et pas d'oxygène...
 - température beaucoup plus élevée (+ de 40 ° C)
 - bombardement météoritiques
- La vie a rendu la Terre habitable
 - sans oxygène, pas de vie ?
→ sans vie, pas d'oxygène !



Mars pourrait très bien avoir été une planète habitable sans jamais avoir été habitée



Les algues bleues sont des cyanobactéries à l'origine de notre oxygène atmosphérique. La « grande oxydation » eut lieu il y a 2,4 milliards d'années

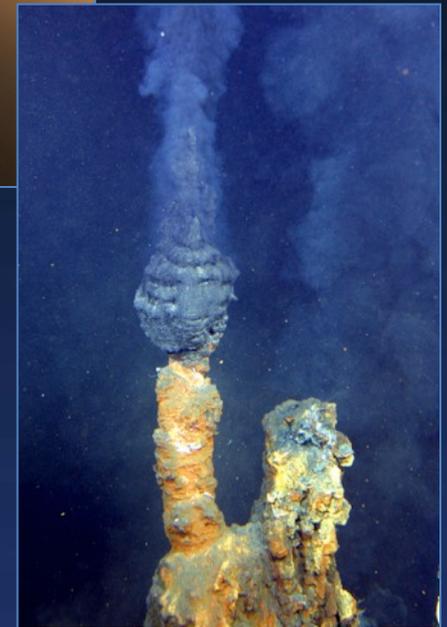
© Lamiot

Habitable... mais pour qui ?

- Anthropocentrisme
- Pourrait-on imaginer une forme de vie basée sur un autre élément que le carbone ?
- L'eau est-elle indispensable ?
- Respiration = oxygène ?
- La vie est-elle apparue sur la terre ferme ou dans les abysses océaniques ?
- Sommes-nous seuls dans un Univers peuplé de terres habitables ?



Une autre chimie, basée sur d'autres éléments que le carbone et l'oxygène est-elle concevable ?
© Nasa



Si la vie est d'abord apparue au niveau des sources hydrothermales, Encelade serait-elle une bonne candidate ?
© NOAA



C. Dhanraj

Merci !

Les Nuits des étoiles sont organisées par l'Association française d'astronomie (AFA), en partenariat avec le ministère de la Transition énergétique et solidaire, le ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation, le Centre national d'études spatiales (Cnes), Airbus Defence and Space, le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) et la revue Ciel & Espace