

Le paradoxe de Fermi

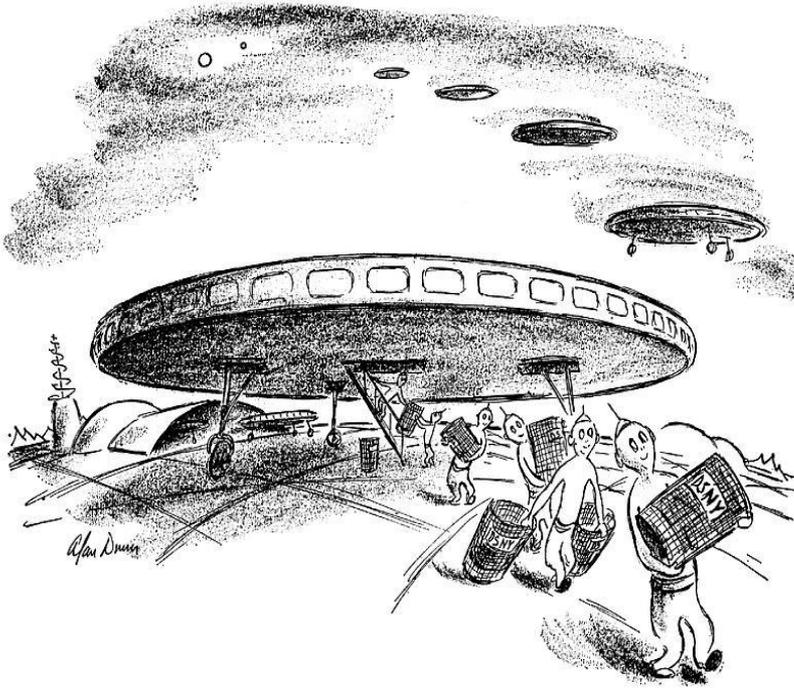
ou

« Le Grand Silence »

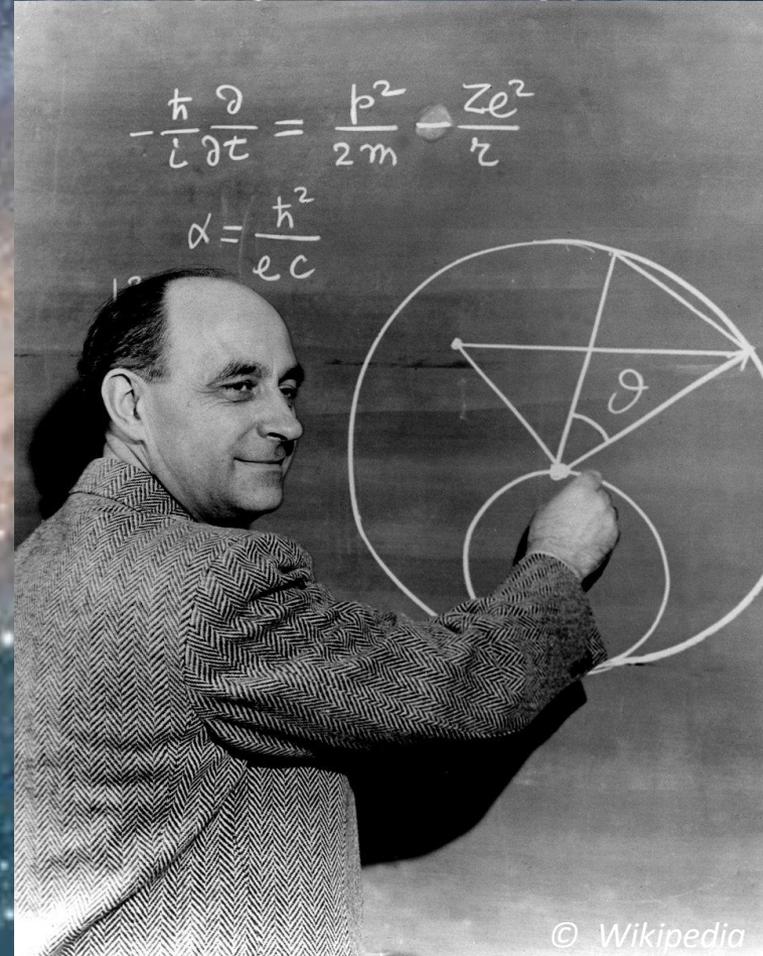
Sommes nous seuls

Dans l'Univers ?

E. Fermi ... Los Alamos 1950



© The NEW YORKER (1950)



© Wikipedia

Where is everybody? (où sont ils?)

Raisonner sur les ordres de grandeur :

Notre Galaxie la « Voie Lactée » :

- au moins 100 Milliards d'étoiles,
- diamètre : 100 000 Années-Lumière (AL)
- Age : environ 10 – 12 Milliards d'années – Terre : 4,6 Milliards d'années



Si on se déplace assez longtemps à une vitesse de l'ordre de 1/1000 de la vitesse de la lumière : 300 km/s

1/100 de la vitesse de la lumière : 3000 km/s

(ce qui semble faisable avec une technologie guère plus supérieure à la notre)

*Il ne faut « que » **10 Millions d'années** pour explorer la Galaxie, pourquoi pas la coloniser – éventuellement on peut utiliser des sondes robots auto-répliquantes (sondes de Von Neumann)*

10 Millions d'années c'est en gros **1/1000 de l'âge de la Galaxie**, donc un très grand nombre de civilisations technologiques extra-terrestres ont eu tout le temps pour émerger, **bien avant la nôtre**, et explorer la galaxie ...

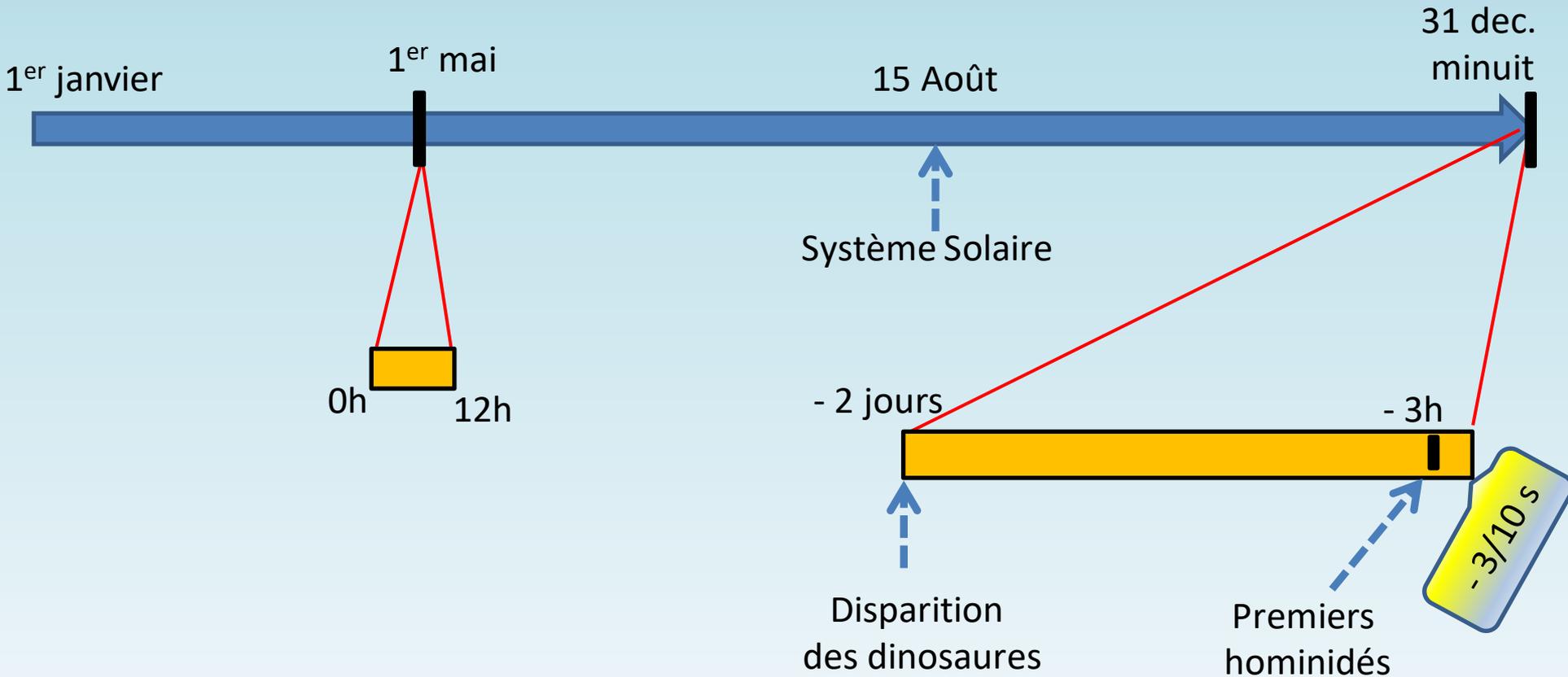
D'où sa question : où sont ils ??

ou, au minimum, où sont leurs traces (signaux radios ..)

Echelle de temps : ramenons 12 Milliards d'années à une seule « année »

1 Milliard d'années => 1 mois

1 Million d'années => $\frac{3}{4}$ h ~ 1h



Première conclusion possible :

Le raisonnement de Fermi est convaincant, donc « Nous sommes seuls dans l'Univers ».



*Une recherche de signaux extra-terrestres comme celle entreprise par le programme **SETI** (Search for Extra-Terrestrial Intelligence) est inutile, c'est de l'argent perdu...*



Cf. Carl Sagan – « Contact » – film 1997)

Peut-on s'arrêter là ? Le problème est suffisamment intéressant et même vertigineux pour que l'on cherche à approfondir la question !
On ne peut pas se contenter d'avoir une opinion sur la question : peut-on avancer vers une solution avec des arguments rationnels basés sur des faits assez solides ?

Nombreux articles scientifiques très sérieux sur la question ...

....Sujet riche et complexe

SETI

Technosignatures

Formule de Drake

Echelle de Kardashev

Sphère
de
Dyson

CETI

colonisation

LE GRAND FILTRE

Le
Grand
Silence

Nécessaire de mettre un peu d'ordre, d'avoir une méthodologie, en partant du concept de « paradoxe »

Paradoxe en science : « Affirmation qui est déduite d'un raisonnement basé sur des principes bien identifiés et sur des connaissances scientifiques et qui est en contradiction avec les faits d'observation ». (A distinguer de « affirmation qui va à l'encontre de l'opinion communément admise »)

Résoudre le paradoxe : trouver une explication rationnelle i.e. **trouver quels sont les présupposés qui sont faux** et qui ont conduit à l'énoncé de l'affirmation qui semble paradoxale. *Paradoxes dans l'histoire des sciences ? à prendre au sérieux !! (exemple : paradoxe d'Olbers pour la cosmologie)*

Formulation précise du paradoxe de Fermi :

« L'absence de signaux de la part de civilisations extraterrestres est incompatible avec la présence d'une multiplicité de civilisations extraterrestres dans la Galaxie et avec ce que nous pouvons supposer de leurs capacités »

Précisions :

On considère paradoxal de l'absence de signaux et non l'absence de visiteurs ou de leurs traces ..

Paradoxe de Fermi  **« Le Grand Silence »**

La Voie Lactée

~ 100.000 Années-Lumière

Bras de Persée

Systeme Solaire
Systeme Solaire

Bras d'Orion

X

*On reste au niveau
de notre Galaxie ...*

Bras du Sagittaire

Br
Bras du Centa

Systeme Solaire



Sur quels principes implicites s'appuie le raisonnement de Fermi ?..

Principe de Copernic ou « principe de modestie »

« Nous(la Terre) n'occupons pas une place particulière dans l'Univers »
ou « il n'y a rien de spécial en ce qui nous concerne en tant qu'observateurs :
ce que nous observons est typique et notre situation est banale »

Vision gradualiste de l'évolution des espèces vivantes vers la complexité et l'intelligence, processus universel d'une évolution aussi bien biologique que culturelle.

Vision scientifique « réaliste » de notre propre situation :
on évacue les OVNI, les « visiteurs », les théories du complot etc.

Plan ...

1) Actualiser **1950 (!!)** → 2019

Le paradoxe a-t-il disparu ou est-il encore plus fort ??

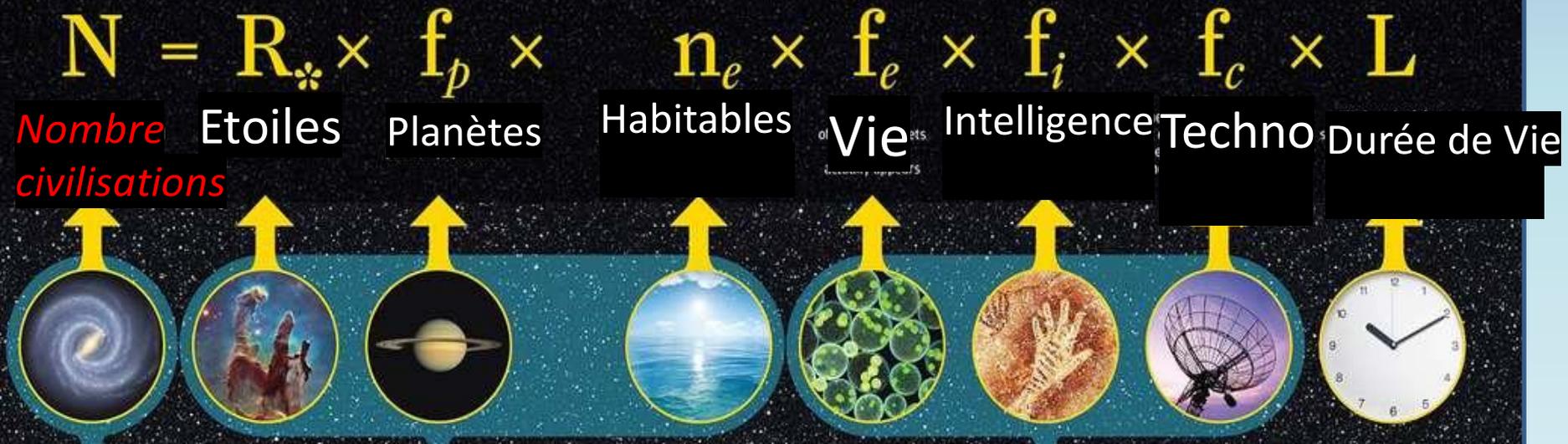
2) Conquérir la Galaxie ? **Ça coûte cher et ça se voit !!**

3) Quelles sont les **solutions** possibles au paradoxe ?

4) Peut-on **conclure** ? Peut-on attendre des **progrès** dans le futur ?

Formule de Drake (1961)

Frank Drake, astronome américain,
un des fondateurs du projet SETI



© Futura-Sciences

« Un cas unique où on concentre un maximum d'ignorance
dans une seule formule !! ... »

Des myriades de planètes !!

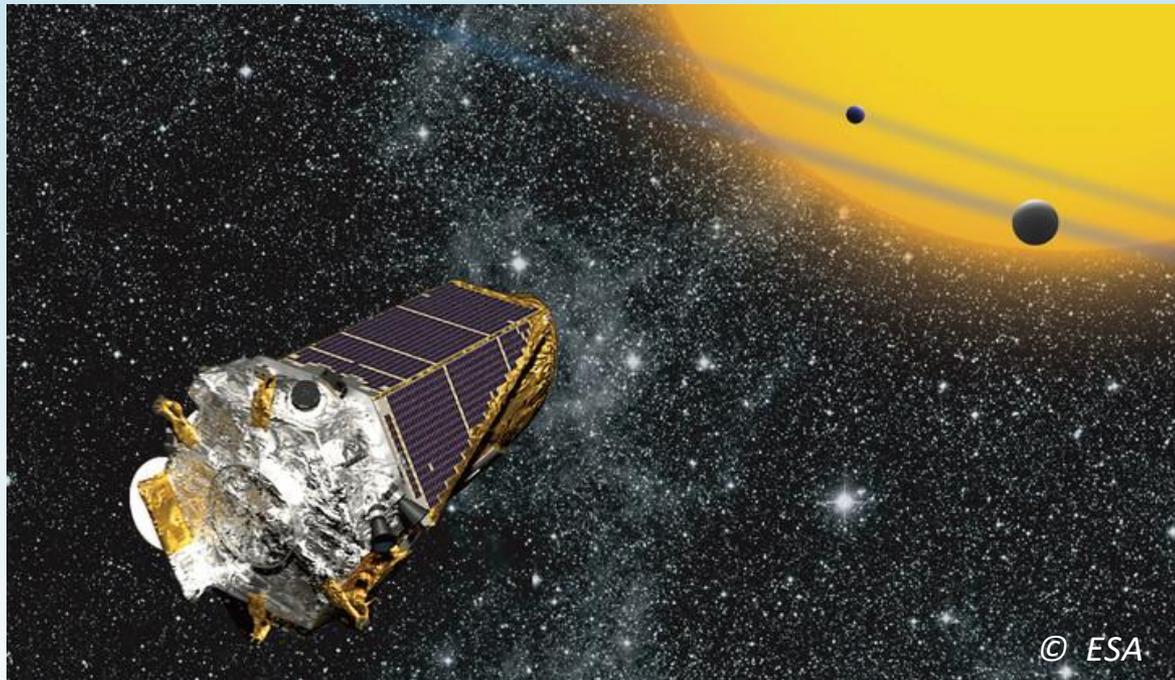
Succès du Principe de Copernic !!

1995

M. Mayor et D. Queloz Nobel 2019



Observatoire de Haute-Provence



© ESA

**COROT
KEPLER
TESS**

Méthode du transit

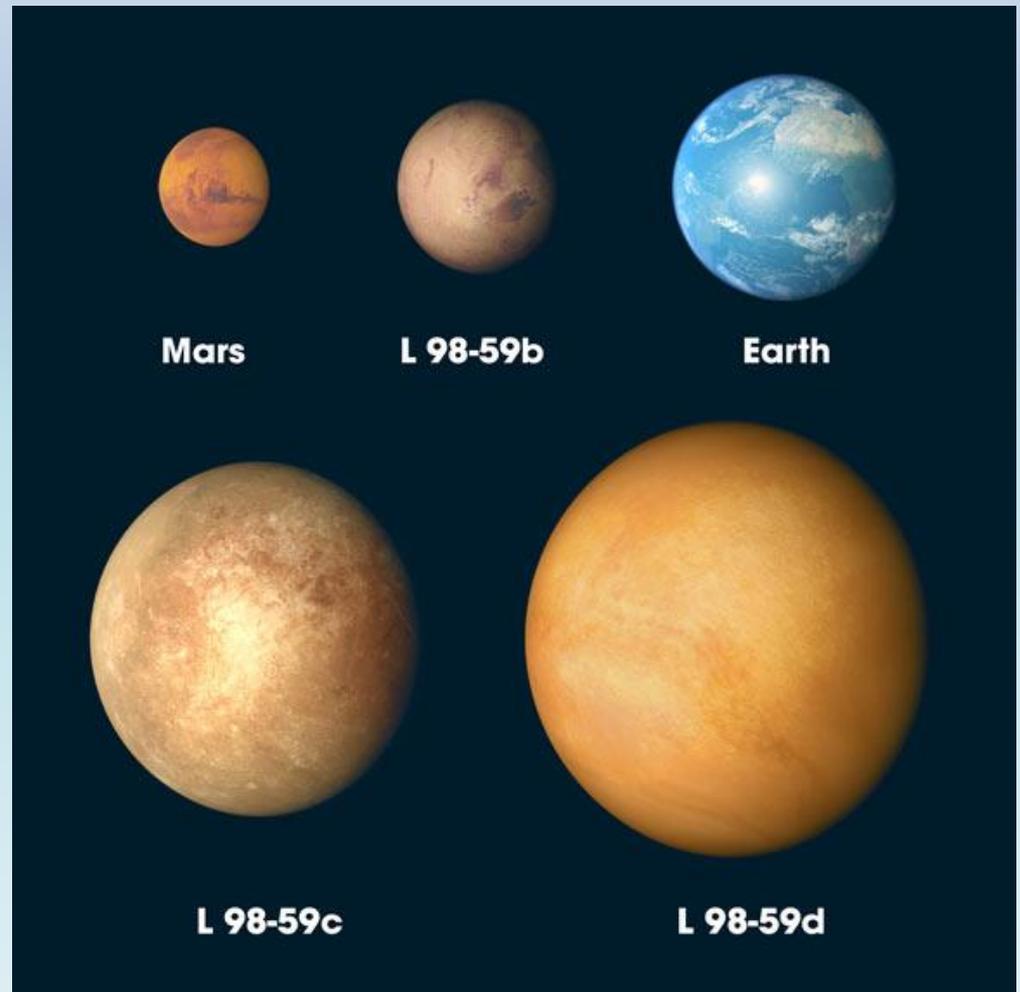
~ 4000 exoplanètes !

+ atmosphères ?!

Etat des lieux (2019) :

→ Les « petites » planètes sont beaucoup plus nombreuses que les géantes gazeuses

→ ~ 300 Milliards d'étoiles dans la Galaxie : la plupart sont entourées de systèmes planétaires



TESS 2019 (vues d'artiste)

Combien de planètes « habitables » dans la Galaxie – combien d'habitats ?

On distingue 3 notions de « Zone Habitable »

Zone Galactique Habitable (ZGH).

300 Milliards d'étoiles



~ 1/3 des étoiles
dans ZGH



100 Milliards d'étoiles

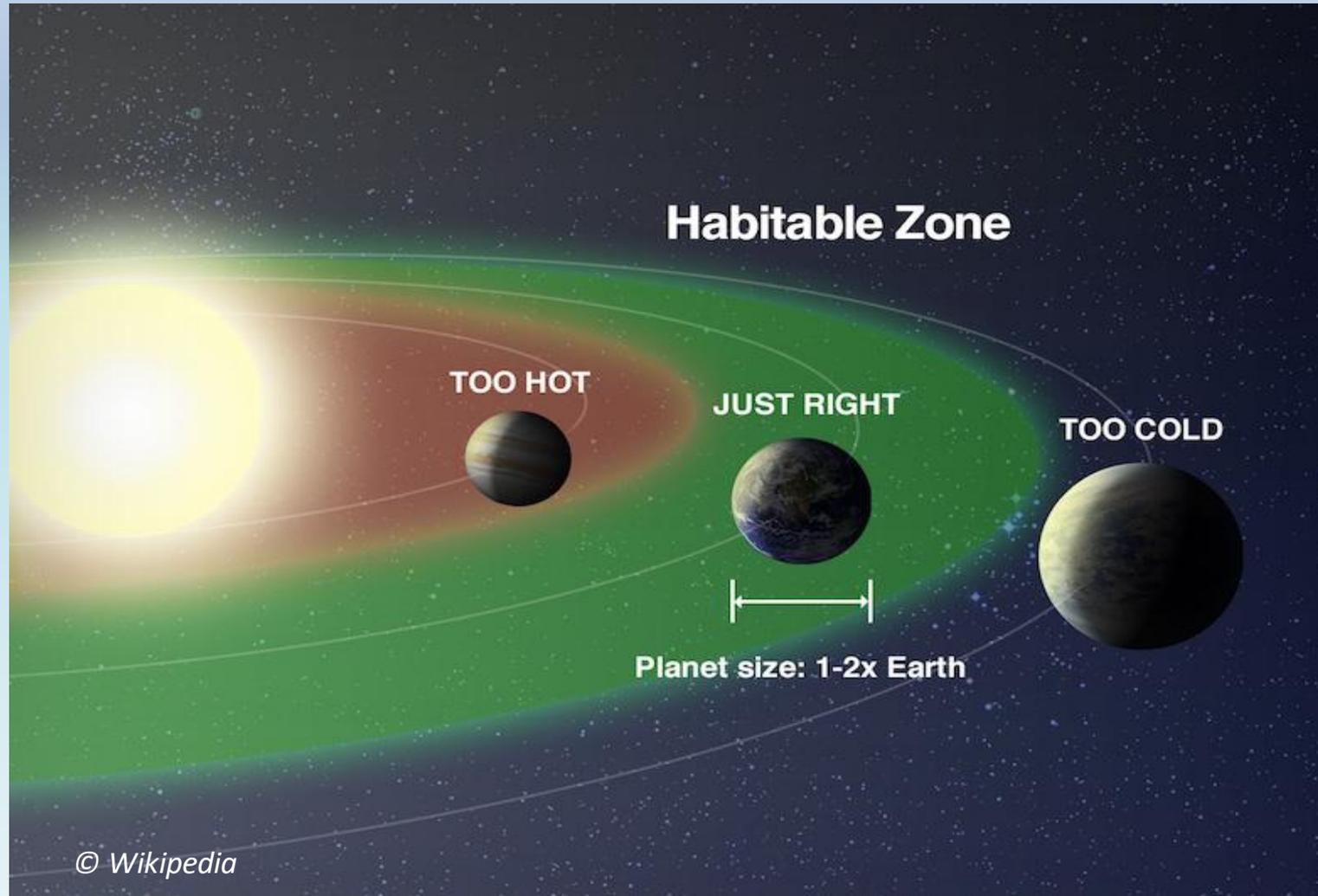


~ 100 Milliards
de Systèmes planétaires



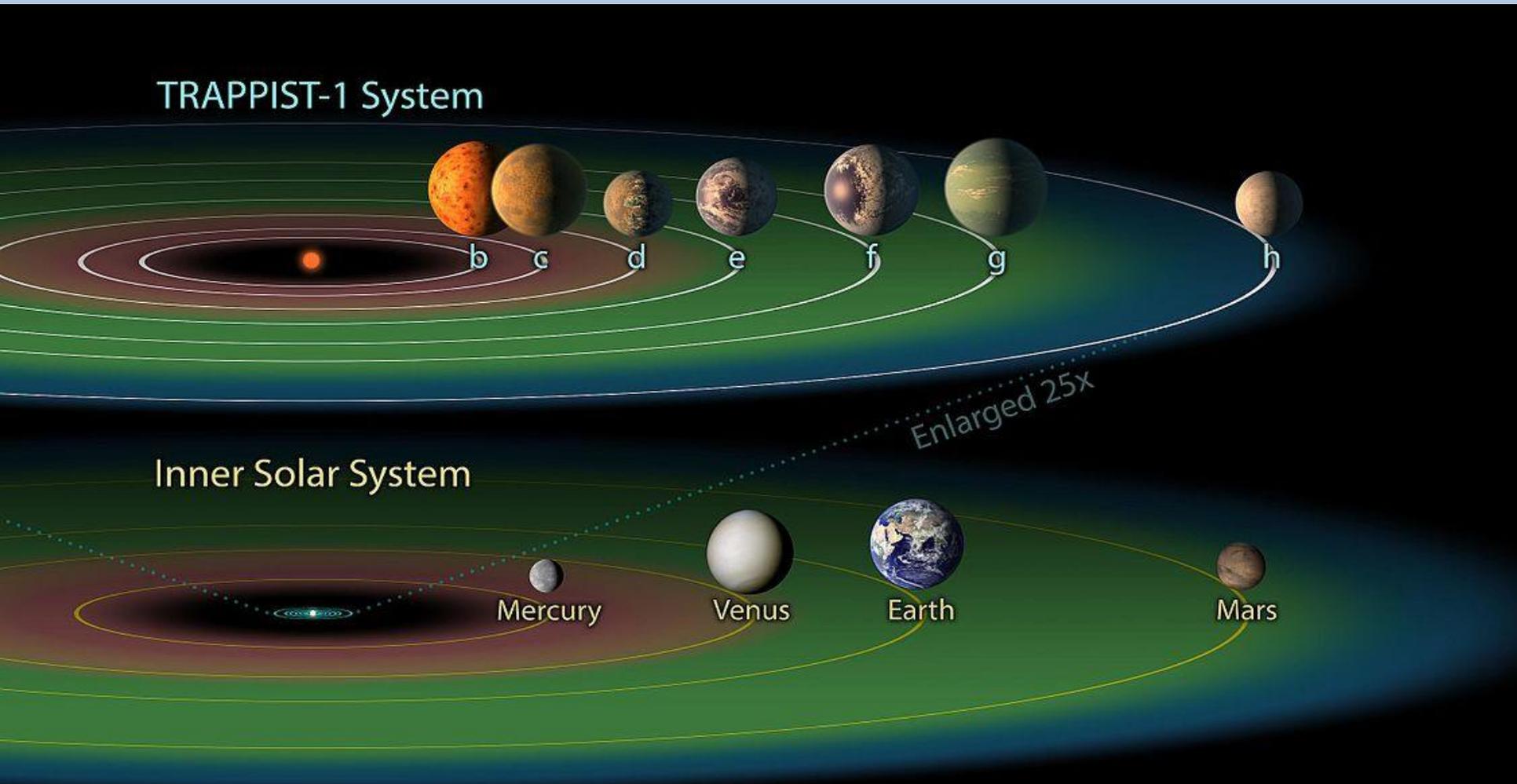
Zone Habitable Circumstellaire (ZH) .

Eau liquide !.



NB : vapeur d'eau détectée (2019) dans l'atmosphère d'une planète de type Super Terre (8 M Terre) à 110 A.L. dans ZH d'une naine rouge

TRAPPIST-1 à 39 AL de la Terre : 3 planètes rocheuses dans la Zone Habitable d'une étoile naine rouge



Etoiles « pas trop différentes du Soleil » (type F,G,K, étoiles calmes) = environ 40% des étoiles dont $\frac{1}{4}$ auraient des planètes de « type Terre » dans la ZH avec des périodes de révolution de 200 à 400 jours.

100 Milliards → 40 Milliards → 10 milliards de planètes type Terre, habitables

Zone Habitable pour la Vie Complexe (ZHVC -2019)

→ Simulations (primitives) d'atmosphères planétaires

Pour que de la vie complexe puisse se développer, il faut :

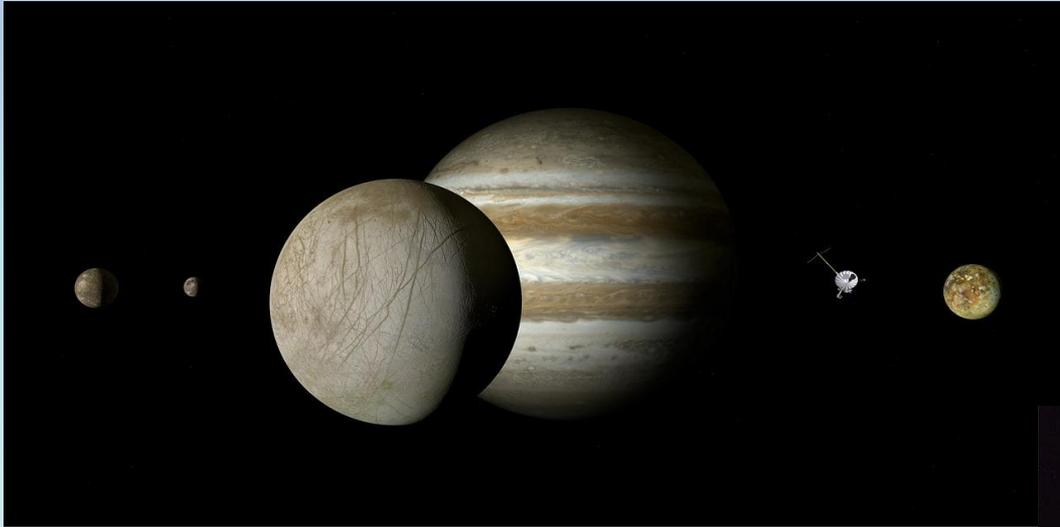
- De l'Oxygène O₂ et de l'Azote N₂
- De l'effet de serre, donc du CO₂, mais pas trop !
- Pas trop de CO : risque d'empoisonnement surtout si la température de l'étoile est faible

→ La chance d'avoir une ZHVC est réduite de 30% à 50% par rapport à la ZH

→ 5 Milliards de planètes type Terre habitables ?

→ (Très pessimiste) : 1 Milliards de planètes de Type Terre habitables par une Vie Complexe !..

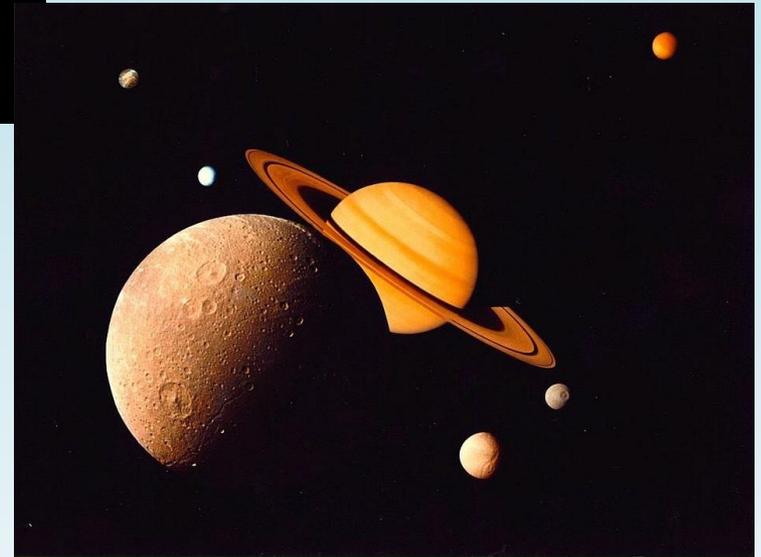
Autres habitats possibles = les gros satellites des planètes géantes = !!



Europe



Titan (atmosphère !)



Ganymède

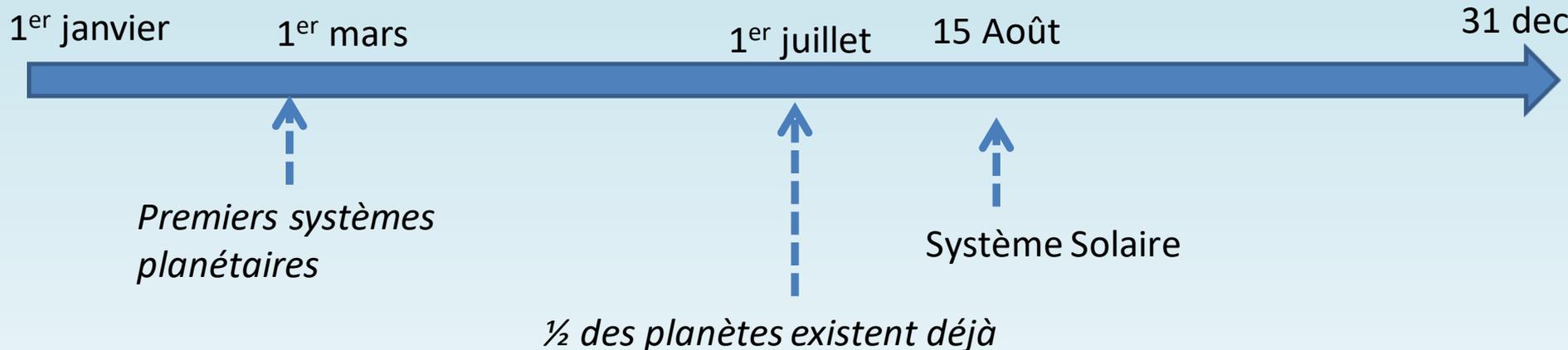
Un point important : depuis quand ces systèmes planétaires sont-ils là ?

.... Et si nous étions dans la « première vague » ?

Non !

Modélisations → 80% des planètes de la Galaxie sont là au moment de la formation du Système Solaire

- + 2 milliards d'années pour les premières planètes (1^{er} mars) car il faut des éléments lourds
- + 4 Milliards d'années : la moitié des planètes sont là (1^{er} juillet)
- + 1,5 Milliards d'années : Système Solaire (15 Août)



Conclusion (préliminaire) 2019 = Le paradoxe est fortement renforcé !

L'expansion spatiale : *Un prix à payer ... difficile à cacher...*

- Echelle de Kardashev (1964)-

Nikolai Kardashev
1932 – 2019



*Démarche de physicien : pour décrire un système complexe,
chercher LE paramètre pertinent !
Réducteur ? Mais toujours instructif, toujours en considérant
les ordres de grandeur..*

L'énergie dépensée/disponible

***Echelle de Kardashev se situe dans le dans le contexte de SETI
où il faut essayer de classifier les cibles potentielles***

- Signaux radios ? Pas seulement !
- Une civilisation a un impact sur l'environnement de par sa dépense d'énergie :

Cela doit se voir ... de loin !



La dépense d'énergie dans le contexte de la glorieuse conquête de l'espace par Homo Sapiens ... :

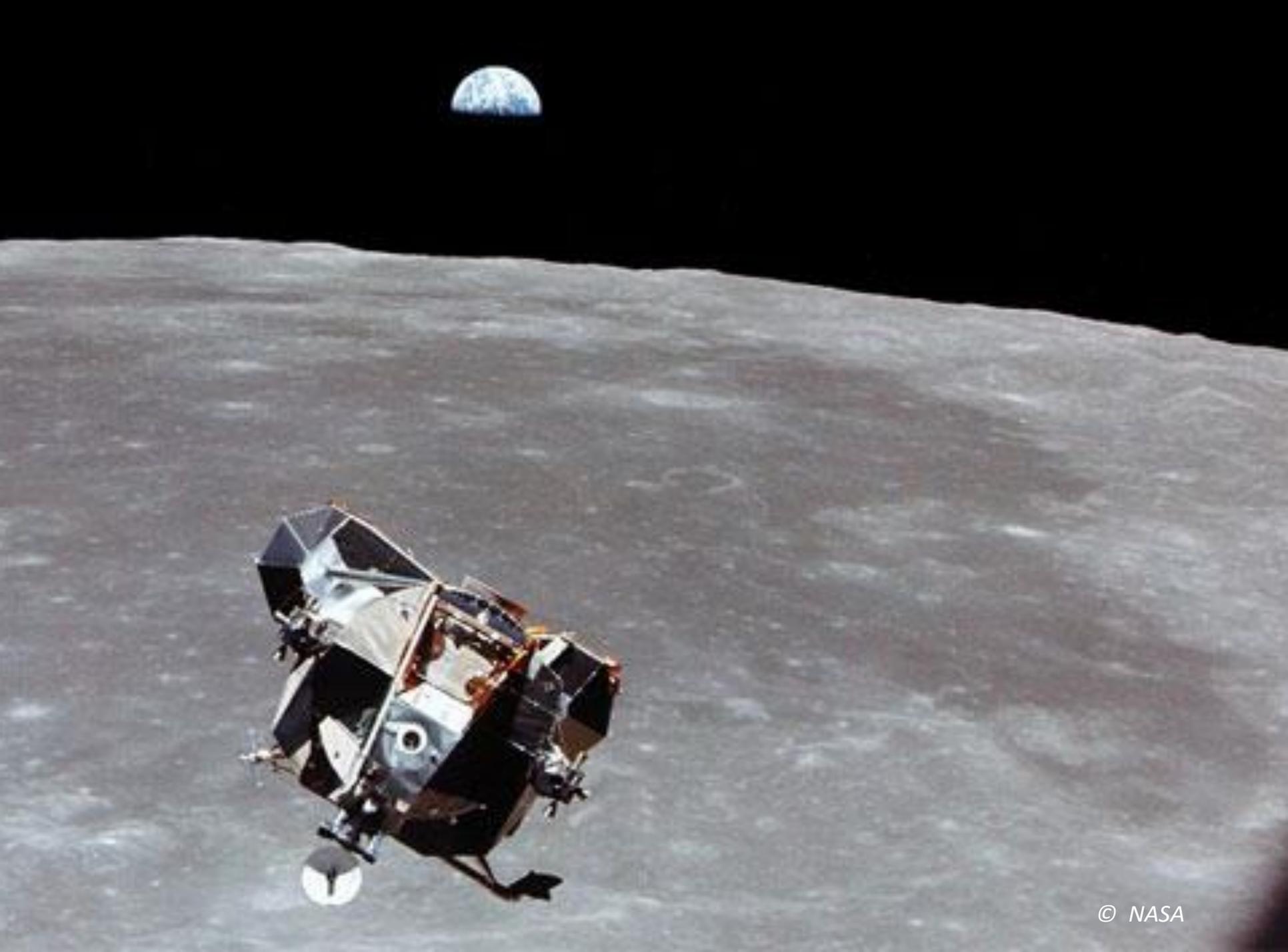


SATURN V au décollage :

120 GW

=

*1% de la puissance
du parc de centrales nucléaires
de 1969*



Voyage interstellaire vers Proxima du Centaure (4,37 AL)



Vaisseau de 1000 t à 10% de la vitesse de la lumière (44 ans de voyage)
=
1 an de la la consommation totale actuelle d'énergie de la Terre
(C - Roland Lehoucq)

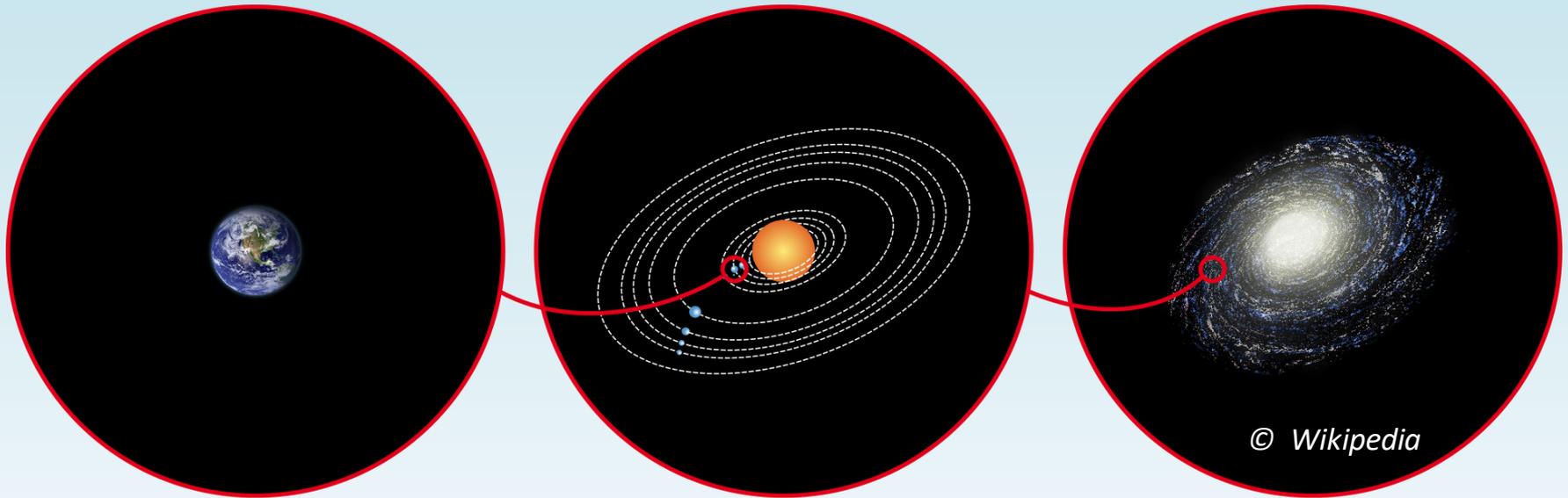
Echelle de Kardashev :

Une civilisation technologique en expansion :

Type I : exploite toute les ressources de sa planète d'origine

Type II : exploite toute les ressources de son système planétaire, en particulier toute l'énergie de son étoile

Type III : exploite toutes les ressources de sa Galaxie



Type I : 10^{16} W

Type II : 10^{26} W

Type III : 10^{36} W

Notre (pas si humble) civilisation ... n'est pas encore au niveau I, mais ...

Puissance actuelle consommée : 20 000 Milliards de Watts



L'énergie totale reçue par le Soleil sur Terre/s

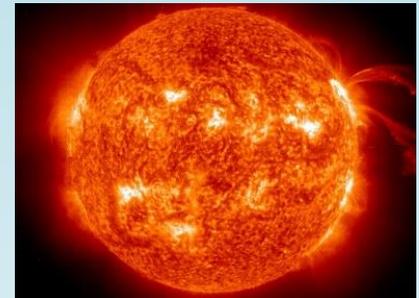
→ 10 000 fois la consommation actuelle (1300 W/m²) → type I

Entre 1750 et 2000 consommation multipliée par 100

À ce rythme : Kardashev **Type I** atteint dans 500 ans

Totalité de l'énergie émise par le Soleil

= 1 Milliard de fois celle reçue par la Terre (10²⁶ W)



On aurait besoin de toute cette énergie
dans moins de 2000 ans (Type II atteint)

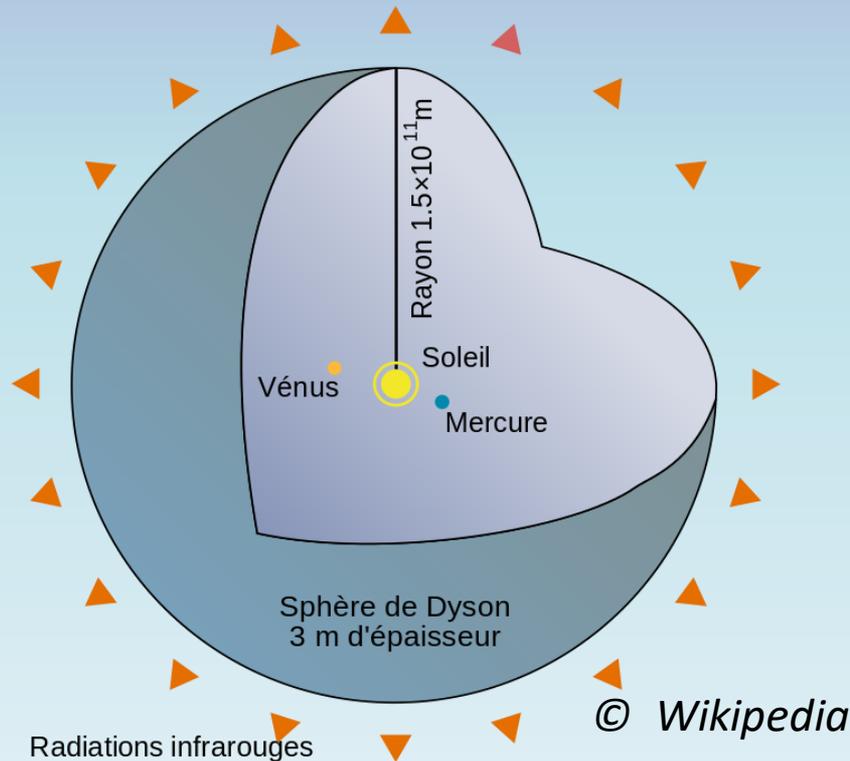
Type III : utiliser toute l'énergie des étoiles de la Galaxie
dans moins de 5000 ans !



Très risqué d'extrapoler des courbes exponentielles dans un habitat limité !
Mais ici il s'agit d'expansion dans un environnement de plus en plus vaste !!

Type II et SETI :

hypothèse de la « sphère de Dyson » (1960)

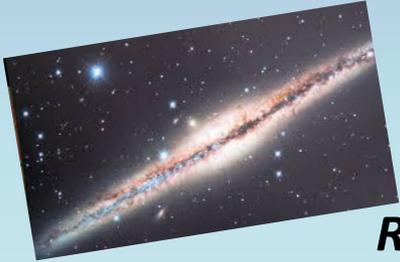


Recherche dans l'Infra-Rouge : aucune cible trouvée dans la Galaxie

→ Excitation sur « l'Étoile de Tabby » (KIC 8462852) étoile blanc-jaune à 1500 AL (2015) Variations importantes de luminosité en quelques jours ou semaines mais sans doute due aux débris d'une grosse lune captée par l'étoile
(les baisses de luminosité dépendent de la longueur d'onde...)

Type III : au moins une conclusion ...

« Il n'y a pas de civilisation de Type III dans notre Galaxie »



***Recherches dans les observations d'autres galaxies
(2015)***

*1300 Galaxies proches étudiées,
recherche l'effet sur la luminosité attendue
par la présence d'un grand nombre de
Sphères de Dyson*



... une dizaine de candidats

Pas convaincant ... (pas d'émission IR suffisante)



Les solutions possibles ??

Nombreuses* ... Classification ? Critère de « qualité » ?

On peut décider de préférer les explications « universelles, **non-exclusives** » aux explications « exclusives : singulières, spécifiques »

Principe de « Non exclusivité » : (David Brin)

« La diversité l'emporte à moins qu'il n'existe un mécanisme universel pour assurer la conformité ».

**Stephen Webb « 75 solutions to the Fermi paradox » (2015)*

Une solution « très spécifique » :

« *La Terre est dans une situation exceptionnelle* : **Rare Earth Hypothesis** »

Grosse Lune qui stabilise l'axe de la Terre donc le climat sur le long terme

(évite le chaos)

Lune créée par un événement rare : collision de la Terre primitive avec un très gros planétoïde



Jupiter : planète géante située juste à la bonne distance pour nous protéger d'impacts fréquents de comètes grâce à son pouvoir attracteur

Collision « proche » de deux étoiles à neutrons (?) 80 Millions d'années avant la formation du Système Solaire aurait donné tous les éléments lourds nécessaires ..



Plusieurs classes de solutions « catastrophiques » :

« **Le Grand Filtre** »

(Robin Hanson – 1998)

Solutions catastrophiques « naturelles »

Événements d'origine « locale » au niveau de la planète d'origine :



Collisions avec astéroïdes ou comètes venant du système planétaire

C'est arrivé sur Terre et cela arrivera encore ... mais **Objections :**

- cela n'a pas détruit toute vie
- si se produit tardivement : une civilisation technologique peut y faire face
- si de nombreux habitats existent, pas de problème global

Événements d'origine galactique :

Un système planétaire est un système ouvert qui interagit fortement avec son environnement galactique or cet environnement est source de graves menaces

Événements très violents : Supernovae, Sursauts Gamma (GRB) susceptibles d'affecter toutes les formes de vie sur une planète située « au mauvais endroit ».

GRB très étudiés : on les voit dans toutes les Galaxies, plusieurs par jour
Pas (encore) rencontrés dans notre galaxie mais cela arrivera un jour :

Eta-Carinae A à 7500 AL, étoile supermassive env. 200 Masses solaires, qui brille comme 5 millions de Soleils :

→ explosion en « hypernovae » ?!

→ Au niveau de la Terre on recevrait l'équivalent de 4000 fois l'énergie reçue par le soleil , ce en quelques secondes

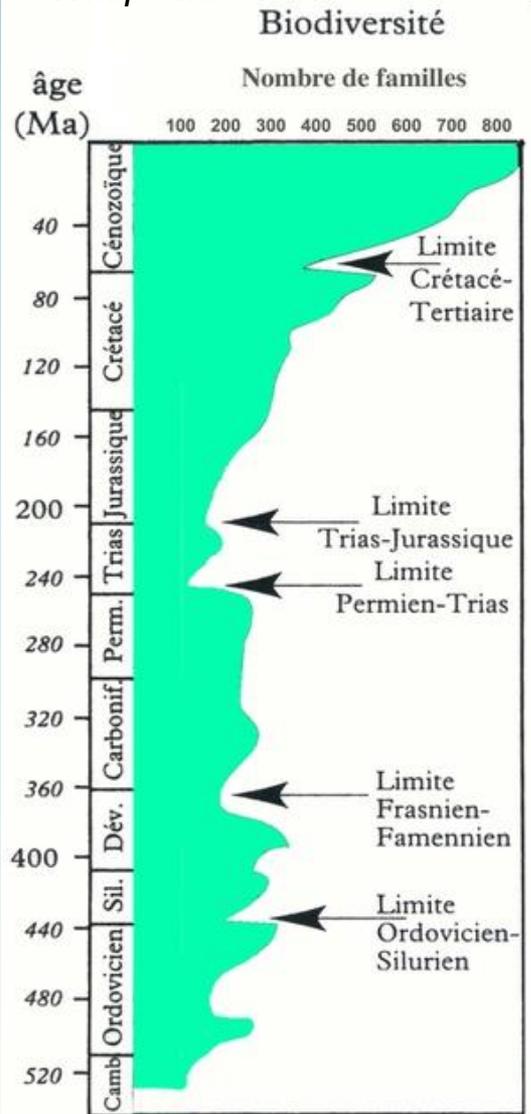


Energie émise dans un cône très étroit ... (ouf !)

Un GRB très violent peut avoir un effet dévastateur sur la vie planétaire (au minimum destruction de la couche d'ozone, au pire ...)

Fréquence ? Une planète prise au hasard se trouverait dans le collimateur d'un GRB galactique environ tous les 100 Millions d'année en moyenne.

© Wikipedia



Estimation (2014) Il est très probable (non certain) qu'un GRB ait affecté la Terre dans les derniers 5 Milliards d'années,

50% de chance qu'une au moins des 5 grandes extinctions depuis 500 Ma ait été causée par un GRB.



Fin de l'Ordovicien vers – 453 Ma ?

C'est un *Filtre* qui a un aspect universel (non-exhaustif) :

Paradoxe de Fermi résolu ? on aurait survécu,
mais pas la plupart des autres Habitats dans la galaxie (?)

Objections :

- Pas de raison qu'on soit les seuls dans ce cas ...
- Une civilisation technologique peut se protéger ou survivre si elle a quitté sa planète d'origine
- *Un événement cosmique peut avoir un « effet positif » !!
disparition des dinosaures (-65 Ma) (comète + volcanisme)
a laissé la place aux mammifères !*

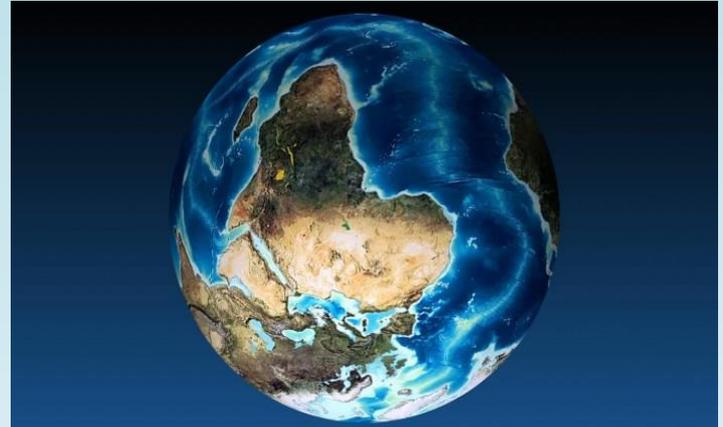
Solutions catastrophiques « culturelles » :

Autodestruction d'une société technologique évoluée ...

- Autodestruction assurée dès que les armes nucléaires sont découvertes ?
- Autodestruction par le mauvais usage des nanotechnologies ou de l'Intelligence Artificielle ... ?

Catastrophe écologique :

Destruction de l'environnement avant de coloniser le système planétaire et d'exploiter ses ressources ?



« Le *Grand Filtre* ?? Universel » ??

- 1) Soit, existence d'une barrière (naturelle) à l'évolution vers une vie intelligente,
- 2) Soit une grande probabilité d'auto-destruction de cette vie intelligente »



1) 😊 *Il est derrière nous !*

2) *Il est devant nous ...* 😞

Autres Solutions (*amusantes ou farfelues*)

- *qui dépendent d'hypothèses sur la « mentalité ou la politique alien »*
- *qui sont « non-universelles, spécifiques »*
- *qui sont en général invérifiables (non-invalidables)*



« **Ermites** » : ils ne veulent pas communiquer ni se répandre dans la galaxie
« **Transcendance** » : ils ont atteint un niveau de conscience très élevé qui nous échappe

« **Voyageurs éternels** » : ils se déplacent dans d'immenses vaisseaux spatiaux en exploitant le milieu interstellaire et les planètes ne les intéressent pas



« **Paranoïa galactique** » :

*Nombreuses civilisations (**Universalité**) mais il en existe une plus avancée que les autres et qui décide d'éradiquer toutes les autres ... et a réussi ... et ils sont à l'affut des nouveaux arrivants*



« **Solution** » *inspirée par la forte tendance d'Homo Sapiens à l'agressivité envers les inconnus, ou les autres espèces, proches ou non*

« **Hypothèse du Zoo** » :

Nous sommes dans un Zoo ou réserve naturelle qu'il ne faut pas déranger pour des questions d'éthique ou de sécurité ...

(règles transgressées parfois par quelques aliens trop curieux ...)

« **Hypothèse du planétarium** » : l'Univers est une illusion construite par les aliens ...

Panspermie « artificielle » :

Nous sommes des aliens !!! grâce à un ensemencement dans des temps très anciens

- Si c'est universel, cela ne résout pas le paradoxe : autres systèmesensemencés ..
- Contredit par ce que l'on sait de l'origine probable de la vie sur Terre et de son évolution

(Solution qu'il est possible d'invalider)

Solution plus « réaliste » :

« Il y a des signaux mais nous sommes incapables de les détecter car d'une nature très différente de ce que l'on connaît »

« **Problématique SETI** » !

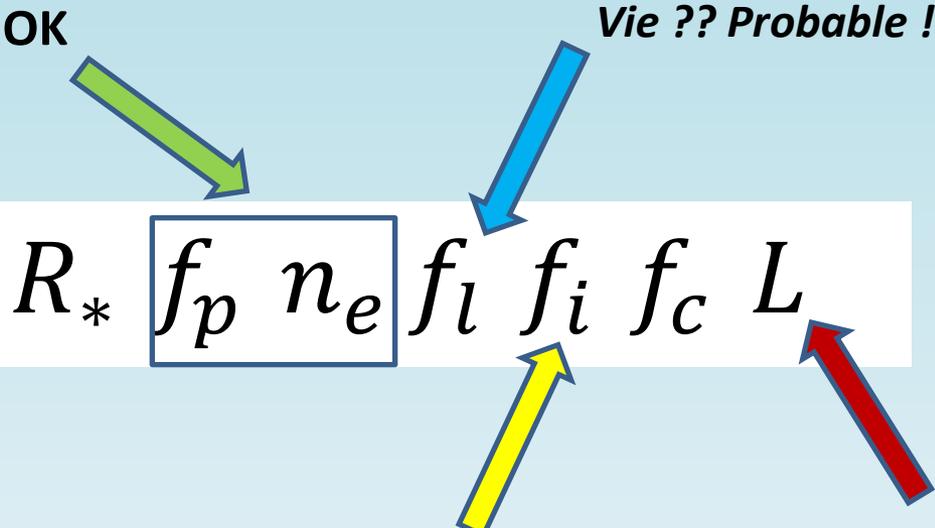


Comment avancer sur cette question ???



...Est il possible de conclure ??.....

OK Vie ?? Probable !

$$N = R_* \boxed{f_p n_e} f_l f_i f_c L$$


Intelligence ???

→ Durée de vie d'une civilisation
« fenêtre d'observation »

Hypothèse : durée de vie civilisation 1 Ma →

2 Milliards d'années
2000 « créneaux » de 1Ma



Vie intelligente – Emergence civilisation techno.



1/2 des planètes
existent déjà



Système
Solaire

Vie intelligente Terre – Emergence civilisation techno.

1 Milliards

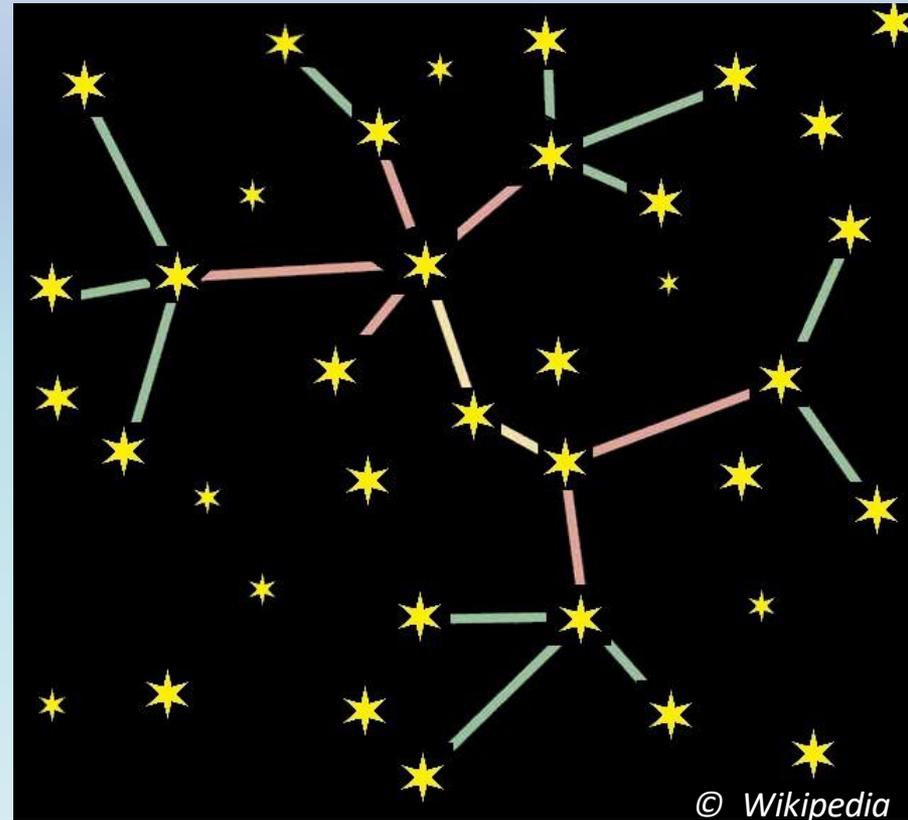
D'habitats → Vie : Une chance sur 100 → Vie intelligente : 1 chance sur 1 000
→ 10 000 civilisations technologiques

10 000 / 2000 → 5 civilisations en moyenne
dans la galaxie pour le dernier million d'années ??

1 million d'années → 3/4 h → notre « fenêtre d'observation » = 3/10 de seconde

*Si la colonisation est importante et
durée de civilisation >> 10 Ma ...
les conclusions sont différentes*

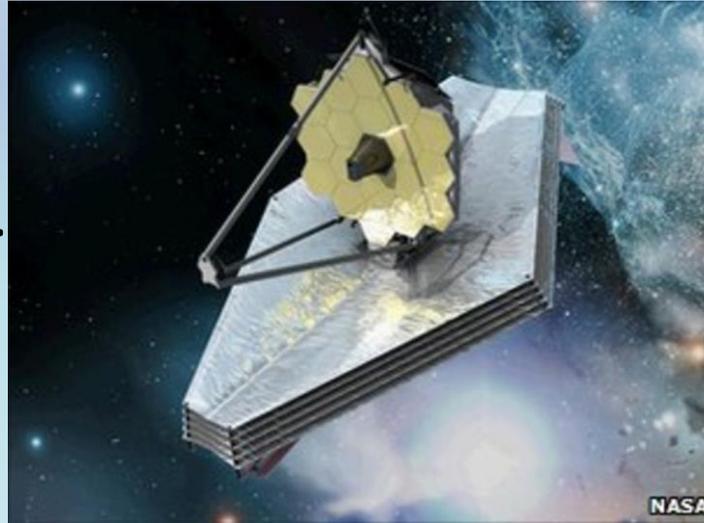
*Simulations récentes (2019)
de processus de colonisation qui
prennent même en compte
les vitesses propres des étoiles ...
très probable qu'il reste des zones inexplorées pendant plusieurs
Millions d'années...*



...Des progrès dans le futur ??.....

Sur la recherche de la vie,

- dans le Système Solaire .
- Sur les exos planètes.



JWST (mars 2021)
analyse
d'atmosphère
d'exoplanètes
en quelques heures !

- Emergence de l'intelligence ?
Neurosciences ?

***Dans l'attente de signaux
(SETI)***

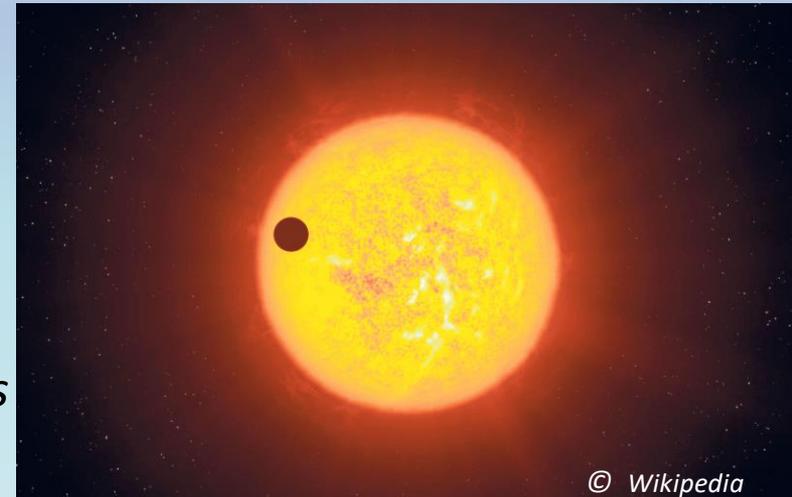


...Et nous ? Sommes nous visibles des voisins (potentiels) ???...

Estimation (2017) :

Parmi les (4000) systèmes d'exoplanètes connus, *pour 70 d'entre eux*, les « habitants » éventuels seraient en mesure de détecter la Terre par la méthode des transits

(mais ces systèmes ne sont pas de bons candidats pour abriter la vie telle qu'on la connaît ...)



Nos propres signaux électromagnétiques naviguent depuis environ 100 ans et ont donc atteint toute étoile située à 100 AL : approximativement cela correspond à 15 000 étoiles ... attendons l'accusé de réception ...



***« Si vous ne vous attendez pas à l'inattendu,
vous ne le trouverez pas »***

***Héraclite d'Ephèse
(500 ans avant JC)***

Bibliographie (succincte)

Livres :

Milan Cirkovic « The great Silence » Oxford University Press , 2018

Stephen Webb : « *Where is everybody ? 75 solutions to the Fermi paradox* », Copernicus ed. (2015)

Agelou, Chardin, Duprat, Delaigue, Lehoucq : « Où sont-ils ? Les extraterrestres et le Paradoxe de Fermi » CNRS Editions, 2019

Articles classiques que l'on peut trouver sur Internet assez facilement (au moins en anglais ...)

David Brin « The great silence, The controversy concerning extraterrestrial intelligence » *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society* (1983)

Carl Sagan : On the detectivity of advanced Galacic civilizations, *Icarus*, 1973
Communication with extra-terrestrial intelligences (MIT Press – 1973)

Franck Tipler : « Extraterrestrial being do not exist »
Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society (1980)