

Habitabilité dans la Galaxie

Définition

- Zone Habitable Galactique : zone favorable à l'apparition et le développement d'une vie complexe.

Les différentes formes de vie

- Vie primitive : bactéries, algues microscopiques
- Vie complexe : tous les être pluricellulaires
- Vie complexe intelligente.

Paramètres

- Présence de supernovae
- Métallicité de l'étoile
- Formation possible de planètes
- Echelle de temps

Au début de l'Univers observable

- Pratiquement formé que de l'hydrogène et de l'Hélium : développement de la vie impossible.
- Il a fallu que des étoiles se développent et meurent pour que d'autres éléments apparaissent : Azote, Carbone, oxygène...
- D'où le rôle des supernovae

Les supernovae

- Nécessaires pour ensemenecer leur environnement en atomes nécessaires à la vie (au delà du Fer).
- Danger pour la vie sur les planètes proches des supernovae.
- D'où une question de temps très délicate...

SN Ia

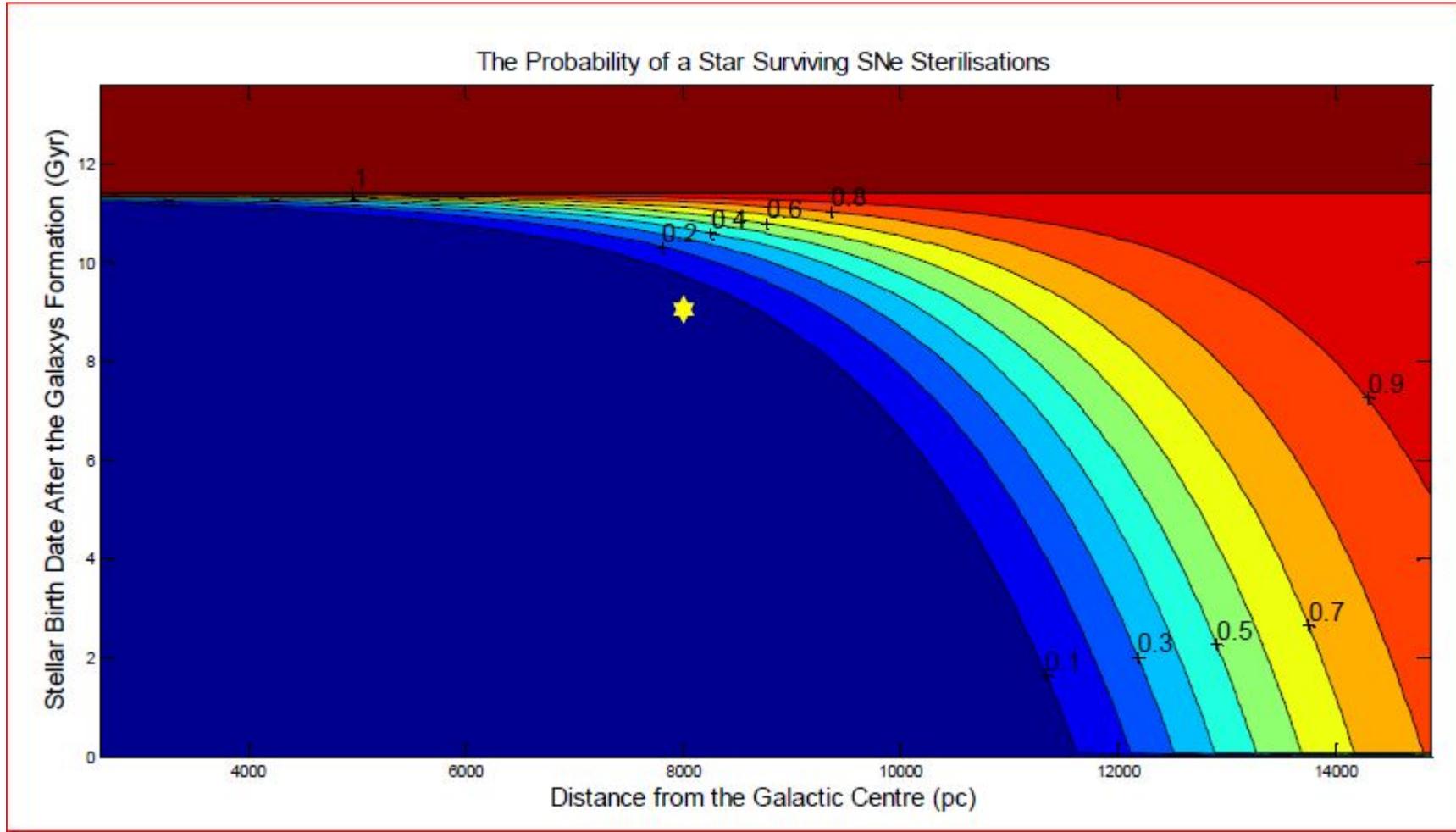
- Si une naine blanche accrète de la matière depuis un compagnon binaire, amenant sa masse au-dessus de la limite de Chandrasekhar de $1,4 M_{\odot}$, elle ne peut plus supporter son propre poids et implose. Cela chauffe l'intérieur, déclenchant une combustion nucléaire, qui détruit l'étoile. Il ne reste rien ; tout le fer, le nickel et les éléments d'une masse atomique similaire sont renvoyés dans le gaz interstellaire.
- .
- La plupart des étoiles qui explosent en tant que SNIa ne le font qu'à des âges d'un milliard d'années ou plus.

SN II

- Les étoiles plus massives que $8 M_{\odot}$ libèrent principalement des éléments plus légers avec environ 30 neutrons et protons, tels que l'oxygène, le silicium et le magnésium, de nouveau dans le gaz interstellaire. La plupart des noyaux plus lourds tels que le fer sont engloutis dans l'étoile à neutrons ou le trou noir restant.
- Ces étoiles massives traversent leur vie en 100 millions d'années

- **Question** : combien de systèmes stellaires ont été éventuellement stérilisés par l'explosion d'une SN et où ?
- Cela dépend de la position de l'étoile dans la Galaxie et de sa date de naissance.

Risque de stérilisation par les SN



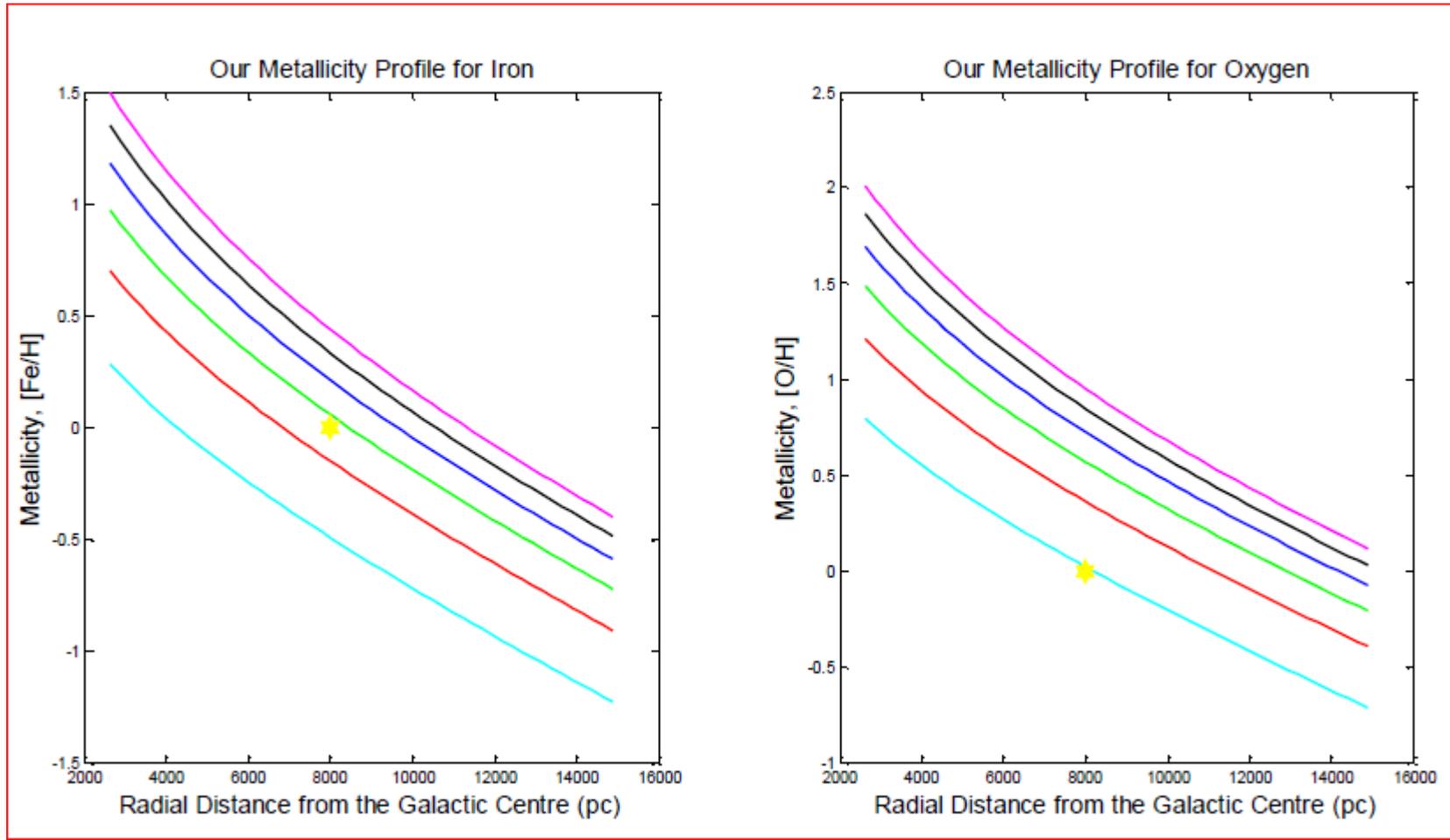
Métallicité

Peu de temps après la formation de la Galaxie, la métallicité globale en termes de fer et d'oxygène a augmenté rapidement, l'augmentation ralentissant avec le temps.

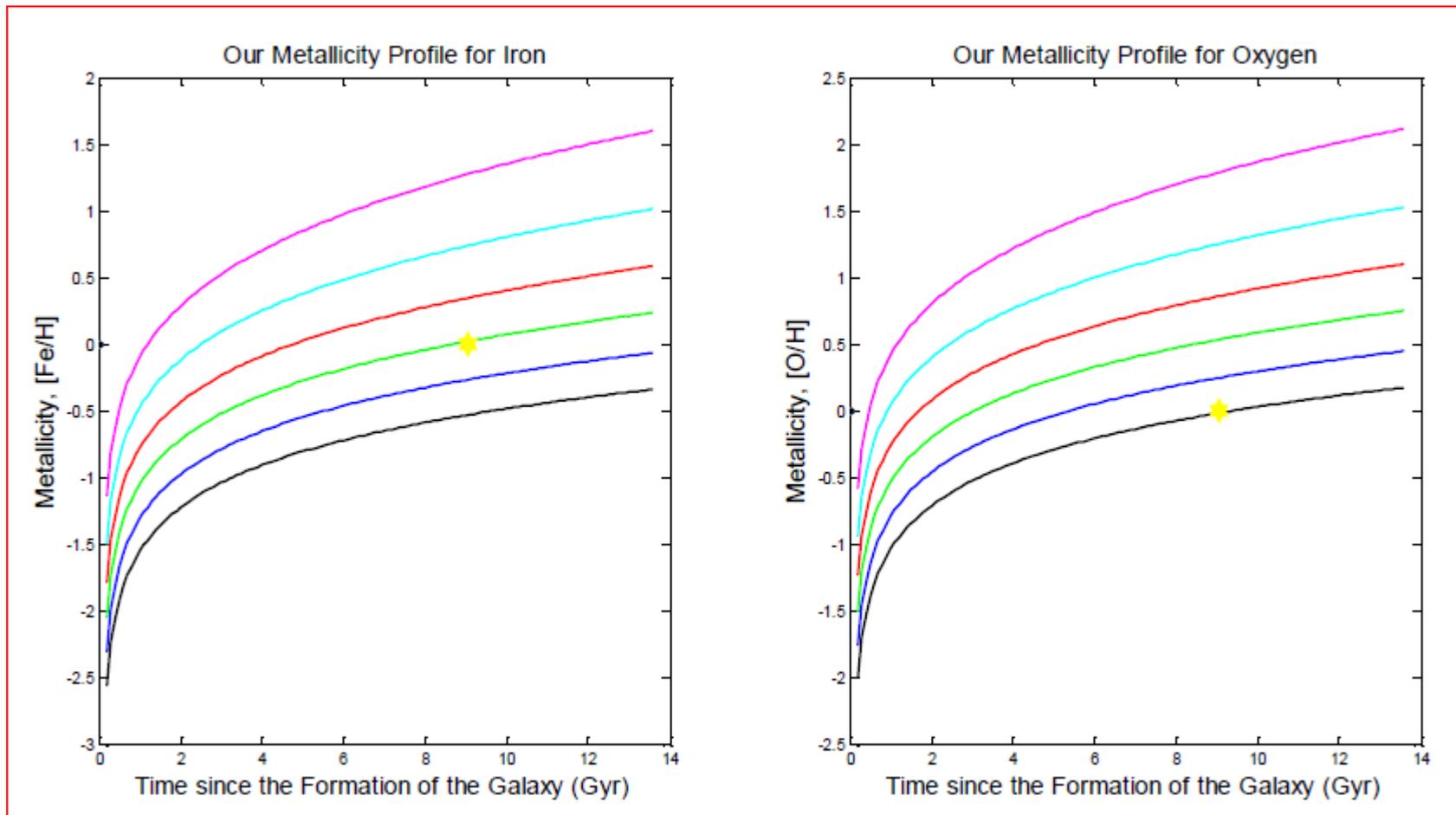
La métallicité du gaz à la position radiale du Soleil à sa naissance, Il y a 4,55 milliards d'années, était d'environ 0,28 et 0,79 en termes de fer et d'oxygène.

Dans l'ensemble, les abondances de métallicité en termes d'oxygène sont supérieures à celles du fer d'environ 0,5 à tout moment. Ceci est normal car les SNII libèrent beaucoup plus d'oxygène que de fer et sont 10 fois plus fréquents que les SNIa.

Métallicité en fonction de la distance au centre galactique



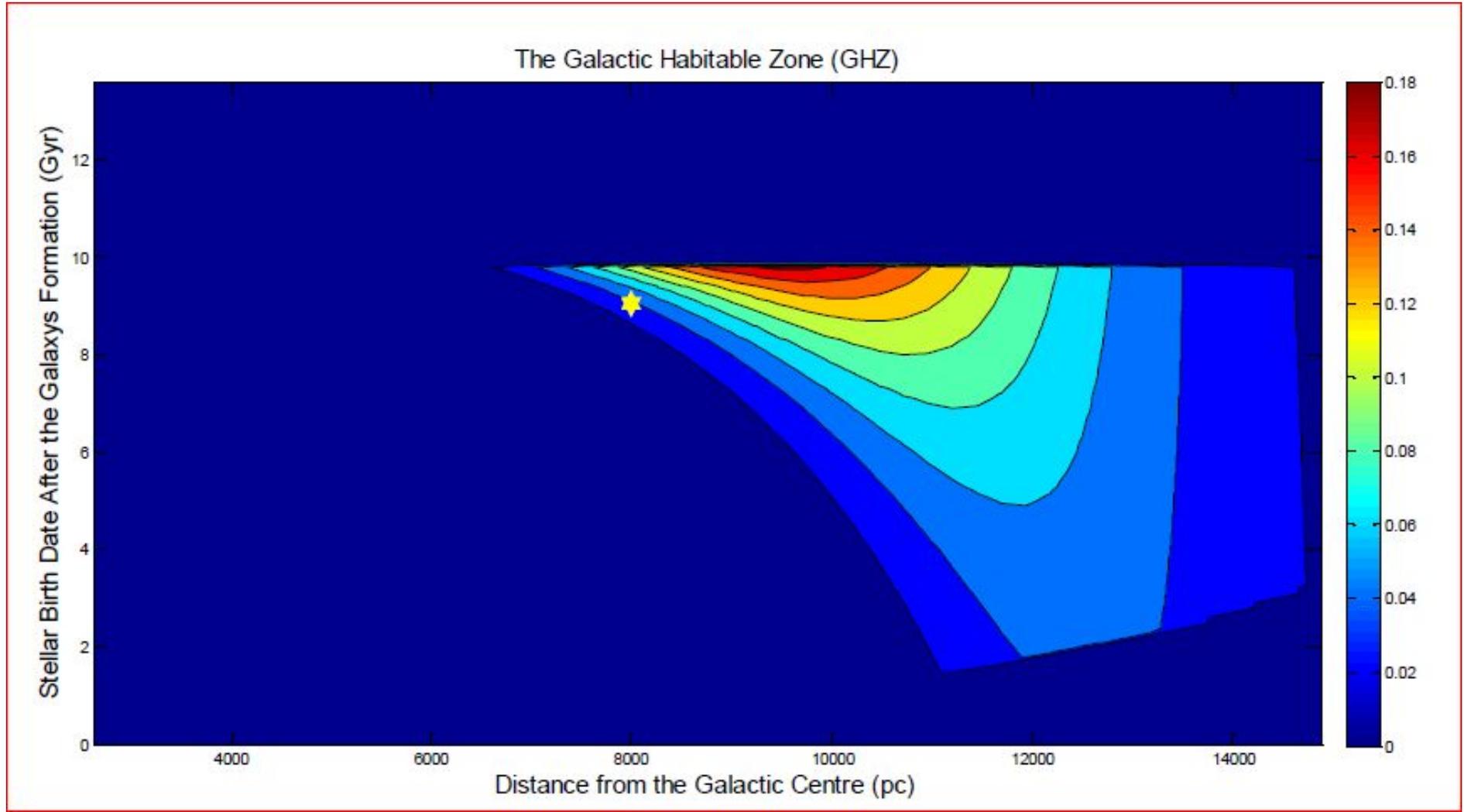
Métallicité en fonction du temps



Zone(s) habitable(s)

- 2,3 milliards d'étoiles de type G.
 - 10 % ont une métallicité insuffisante.
 - 6 % ne sont pas assez vieilles pour que la vie complexe ait eut le temps de se développer.
 - 96 % ont été stérilisées par des SN trop proches.
- Il reste 6 millions de système stellaires potentiellement habitables.

% de zones habitables



La Zone Habitable Galactique en fonction de la distance radiale du centre galactique et du temps de formation. Elle contient tous les Systèmes stellaires potentiellement habitables formés au cours de la vie de la Galaxie.

L'étoile jaune représente le temps de formation du Soleil (9,05 Gyr) et sa position radiale (8 kpc).

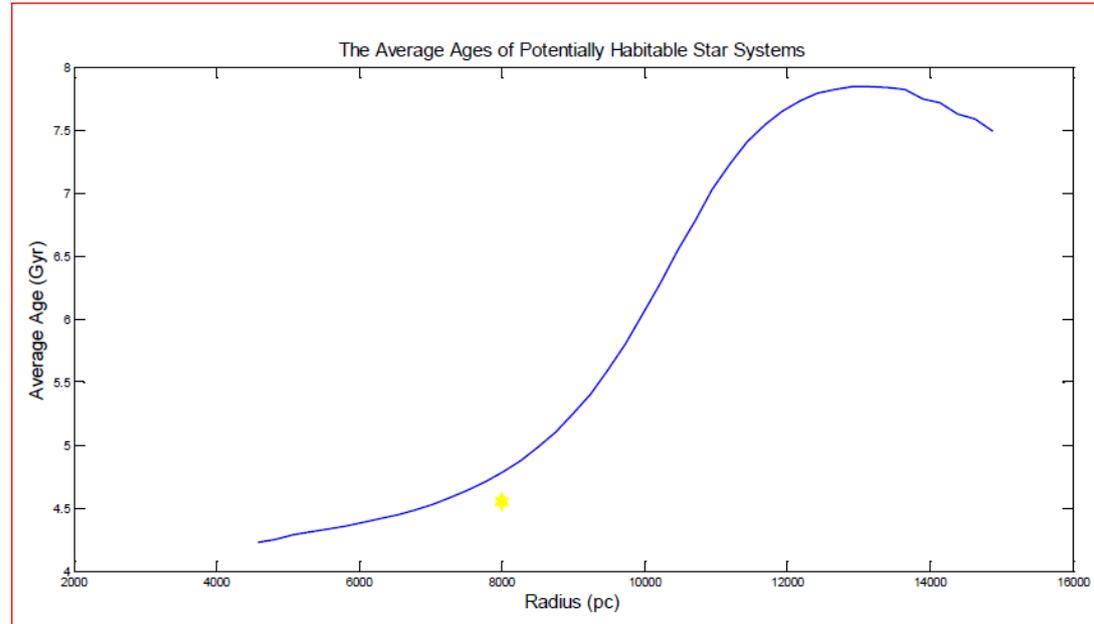
Les courbes de niveau représentent le pourcentage de PHSS nés dans chaque région.

La majorité des PHSS sont beaucoup plus anciennes et situées beaucoup plus loin du centre galactique que le Soleil.

Age des systèmes stellaires potentiellement habitables.

Ils sont situés plus loin du centre galactique que le Soleil et sont en moyenne beaucoup plus âgés que le Soleil.

Les plus anciens sont situés à 13 kpc où leur âge moyen est de 7,8 Gyr, beaucoup plus vieux que le Soleil.



Conclusions

- Il existe un grand nombre de systèmes stellaires potentiellement habitables et plus vieux que le Soleil.
- Ils peuvent donc héberger des civilisations plus évoluées que la notre !

Limitations

- Le temps nécessaire à l'apparition de la vie est-il le même que sur Terre dans toute la Galaxie ?
- A-t-il existé des événements d'extinction (qui peuvent aider ou entraver le développement de la vie) ?
- Quel est l'emplacement d'une planète potentiellement habitable dans la zone habitable ?
- Quels sont les mécanismes et échelles de temps qui régissent l'oxygénation des atmosphères exoplanétaires ?
- Dans l'ensemble, nous estimons qu'environ 0,06 % des étoiles de type G pourraient abriter une planète habitable de la taille de la Terre, ce qui correspond à environ 1,4 million de foyers potentiels pour la vie. Il serait intéressant de voir comment l'inclusion d'étoiles de type K et M affecterait les résultats de cette étude.

Le paradoxe de Fermi

S'il y a autant de civilisations extraterrestres, alors « où sont-elles ? » (Fermi, 2007).

Deux groupes d'explications :

Explications sur les raisons pour lesquelles les civilisations extraterrestres sont très rares ou inexistantes

Explications sur les raisons pour lesquelles les extraterrestres existants ne sont pas venus jusqu'à nous.

Les civilisations extra-terrestres seraient rares ?

- Peu vraisemblable aux vues des études récentes.
- il pourrait y avoir plusieurs millions de planètes capables de soutenir une sorte de vie biologique dans notre seule Galaxie :
 - 0,06 % des étoiles (Legassik 2020),
 - 0,3% des étoiles (Gowanlock et al. 2011),
 - 10% des étoiles (Lineweaver et al. 2004).

Ils ne seraient pas venus ?

- Difficultés des voyages interstellaires.
-
- Ou choix de civilisation de ne pas venir.

Difficultés des voyages interstellaires

- Nous avons vu que la planète habitable moyenne devrait avoir des milliards d'années de plus que la Terre
- On peut donc imaginer qu'elle aurait atteint un niveau de développement supérieur au notre.
- Il nous est difficile d'imaginer ce qu'elle aurait pu construire en matière de technique. Dans quelle mesure un hominidé primitif (vivant il y a environ 8 millions d'années) serait-il capable d'envisager la société humaine d'aujourd'hui ?

- En outre, un certain nombre de moyens potentiels de voyager plus vite que la vitesse de la lumière ont déjà été proposés, sur la base de notre compréhension actuelle des lois de la physique. Avec la NASA et d'autres qui commencent déjà à se pencher sur ces technologies, il est parfaitement raisonnable de penser que nous pourrions en fait voyager vers les étoiles les plus proches dans les 1000 prochaines années. (et presque certainement dans le prochain million d'années).
- On s'attendrait donc à ce que des civilisations extraterrestres, des milliards d'années plus avancé que nous ne le sommes actuellement, se soit engagé dans des voyages interstellaires et ait commencé à explorer et à coloniser la Galaxie il y a très longtemps (probablement avant même que la vie animale n'apparaisse ici sur Terre, il y a 750 millions d'années).

Conclusions finales

- Un groupe de zones habitables est apparu pour la première fois **il y a environ 11 milliards d'années**, cette zone s'est élargi avec le temps à mesure que la métallicité a augmenté dans la galaxie externe et que le taux de SNe a diminué Il est maintenant centré à environ 10 kpc.
- La région de notre Galaxie la plus susceptible de supporter l'évolution de la vie complexe est située plus **loin du centre de la galaxie** qu'on ne le pensait auparavant.

- La majorité des zones de vie potentielle sont beaucoup plus anciennes que notre Soleil, nous prévoyons que 77% de ces zones sont en moyenne **3.13 milliards d'années plus vieux que le Soleil**.
- Cela signifie que la majorité de la vie intelligente dans notre Galaxie est susceptible d'être des milliards d'années plus avancée que nous, ce qui implique que nous sommes **l'une des plus jeunes civilisations de la Voie lactée**.
- Il est probable que l'ETC serait immensément différent de notre propre civilisation et leurs technologies nous apparaîtraient probablement comme de la magie.
- On pourrait conclure que des civilisations intelligentes existent très probablement dans notre Galaxie et, en raison de leur âge prévu par rapport à nous, sont susceptibles d'être **immensément plus avancé sur le plan technologique que nous** ne le sommes actuellement. Par conséquent, ils auraient presque certainement la capacité de s'engager dans des voyages interstellaires s'ils choisissaient de le faire.

Autre possibilité

- L'absence de preuves n'est pas une preuve d'absence de civilisation ET.
- Par conséquent, les possibilités que nous sommes ignorés, évités ou surveillés discrètement sont très plausibles.
- Étant donné que ces ETC sont susceptibles d'être de l'ordre de milliards d'années plus avancés que nous, il semble injustifié de spéculer sur les raisons.
- Au lieu de cela, on pourrait conclure qu'ils ne souhaitent probablement pas que leur présence nous soit connue, peut-être pour des raisons dépassant notre niveau actuel de compréhension.

Habitabilité des exoplanètes

- Plus de 4 000 exoplanètes ont été découvertes et validées.
- Des critères d'habitabilité sont décrites avec deux niveaux :
 - - habitabilité d'une planète par ailleurs stérile
 - - planète hébergeant la vie sous une forme quelconque.

Les critères

- Stabilité au cours du temps des conditions physiques :
 - Orbite stable
 - Etoile relativement stable en luminosité

- Le critère le plus utilisé : présence d'eau liquide.
- Mais aussi : présence d'une atmosphère
- Présence d'atomes indispensables à la vie.

Les différents niveaux

Indice de similarité avec la Terre (IST) — Similitude avec la Terre sur une échelle de 0 à 1, avec 1 étant le plus semblable à la Terre. L'IST dépend du rayon, de la densité, de la vitesse de libération et de la température de surface de la planète.

Standard Primary Habitability (SPH) — Habitabilité pour les producteurs primaires (végétation, autotrophes...) sur une échelle de 0 à 1, 1 étant le mieux adapté pour la productivité primaire (croissance). Le SPH dépend de la température de surface (et de l'humidité relative si elle est connue).

Exemple de calcul

Critères pour le calcul

Insolation entre 0.8 et 1.2 fois celle de la Terre. L'insolation est la quantité de lumière venue de l'étoiles comparée à celle reçue sur Terre. Cela permet de s'affranchir de la luminosité et de la distance de la planète.

Sinon : **Luminosité** stellaire et **distance** de la planète.

Masse est comprise entre 0.1 et 5 masses terrestres : 112 sur 1 258 exoplanètes

Rayon compris entre 0.5 et 1.5 fois le rayon terrestre : 830 sur 3 575 exoplanètes.

Autres critères

Rayon,

Densité (masse / volume),

Vitesse de libération (pour l'existence d'une atmosphère),

Température effective sur la planète.

Application

- Fichier des exoplanètes validées.
- On possède toutes les données pour 770 planètes.

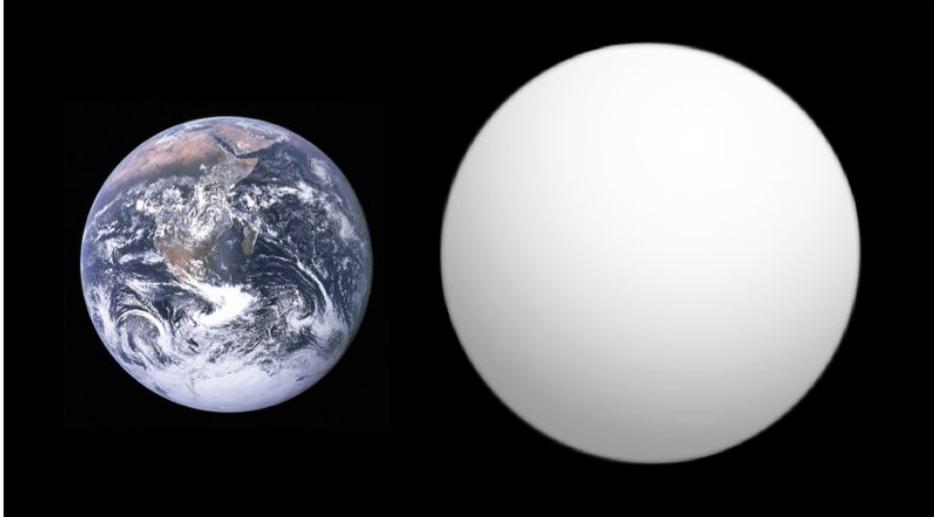
Résultats

- 18 ont une similarité comprise entre 60 et 80 avec la Terre
- 8 ont une similarité supérieure ou égale à 80 %.

Les 8 planètes « habitables »

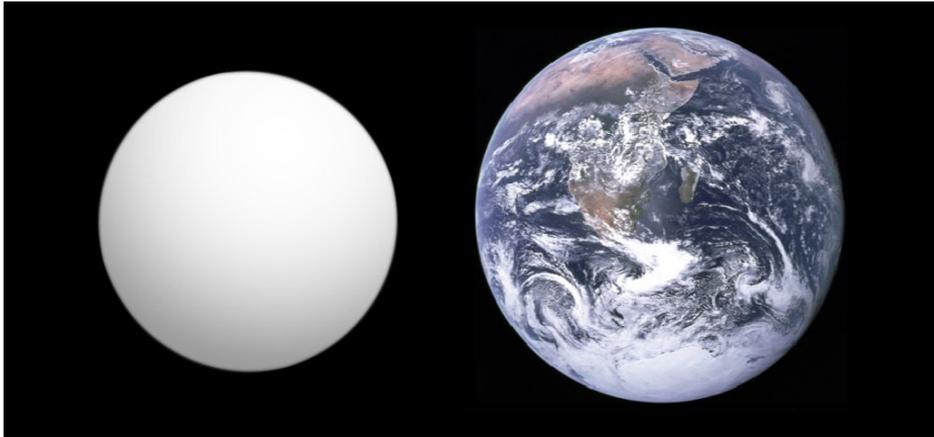
3815	K2-3 d	0.830973
4287	K2-72 e	0.888399
12611	Kepler-1649 c	0.850221
29050	TRAPPIST-1 c	0.887121
29055	TRAPPIST-1 d	0.910829
29058	TRAPPIST-1 e	0.876161
28365	LHS 1140 b	0.807263
28836	Proxima Cen b	0.799026

K2-3d (EPIC)



- $5.8 M_{\text{Terre}}$
- $1.4 R_{\text{Terre}}$
- $D : 0.2 \text{ ua}$
- Etoile : M0 V
- Score : 0.83

K2-72e

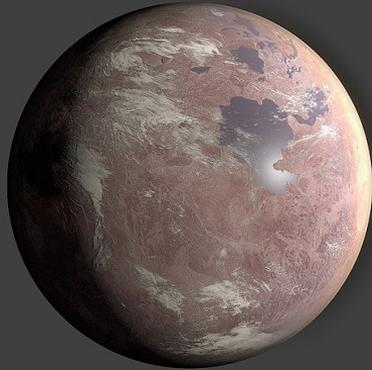


- $2.2 M_{\text{Terre}}$
- $1.3 R_{\text{Terre}}$
- $D : 0.1 \text{ UA}$
- Etoile : M5 V
- Score : 0.89

Kepler 1649c



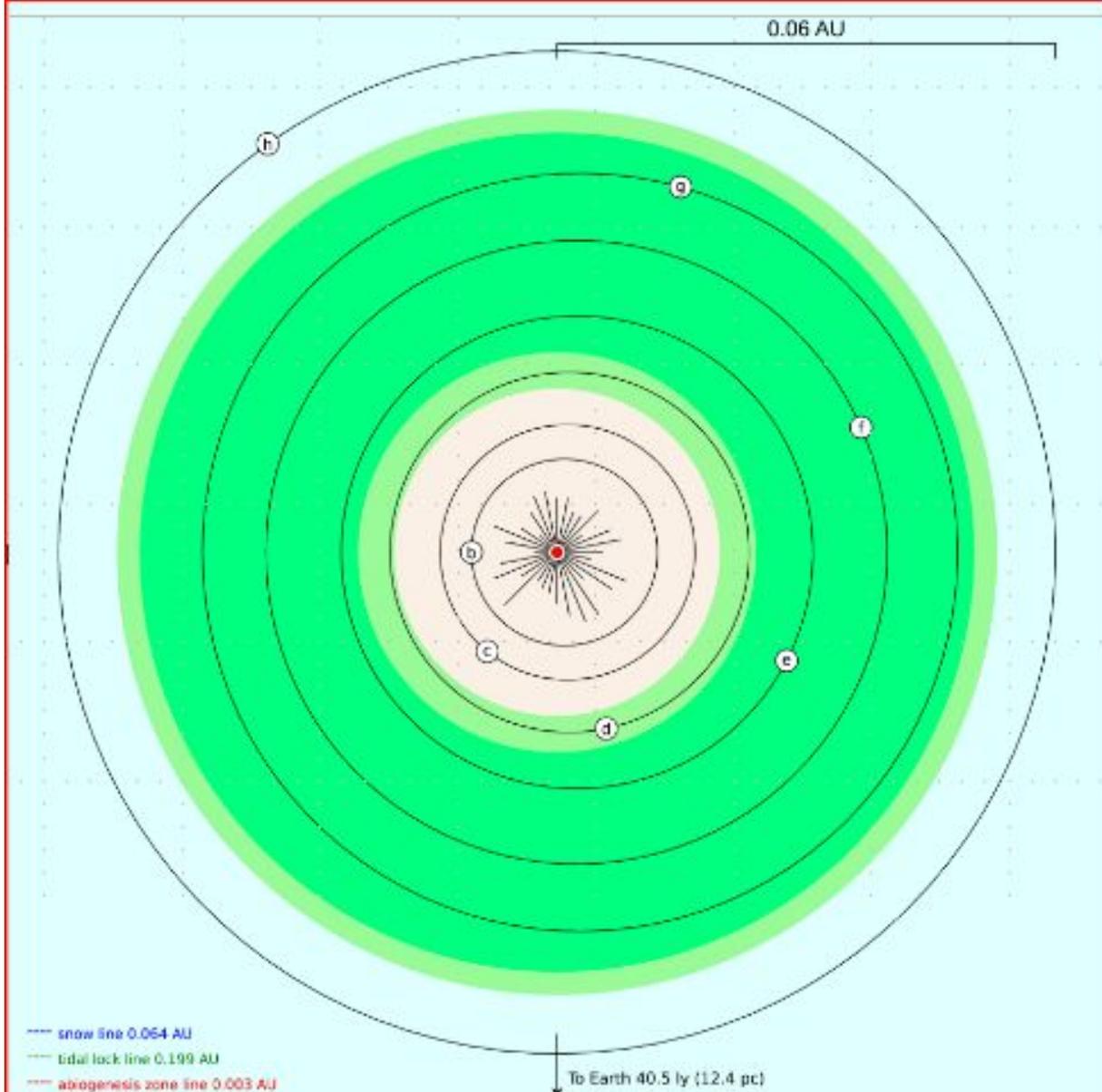
Earth



Kepler-1649c

- $1.2 M_{\text{Terre}}$
- $1.1 R_{\text{Terre}}$
- $D : 0.065 \text{ UA}$
- Score : 0.85
- Etoile : Naine rouge

Le système Trappist



LHS 1140b

- $6.7 M_{\text{Terre}}$
- $1.5 R_{\text{Terre}}$
- $D : 0.096 \text{ UA}$
- Etoile M4.5
- Score : 0.81



Proxima Centauri b



- $1.6 M_{\text{Terre}}$
- $1.3 R_{\text{Terre}}$
- $D : 0.049 \text{ UA}$
- Etoile : $M 5.5 V$
- Score : 0.8

Autres exoplanètes

423	GJ 1061 d ... 0.787605	• 21350	Kepler-48 d ... 0.620477
515	GJ 357 b ... 0.612814	• 22160	Kepler-538 b ... 0.697158
3165	K2-18 b ... 0.760559	• 28401	L 98-59 d ... 0.678102
3802	K2-3 c ... 0.722311	• 28428	LTT 1445 A b ... 0.684716
9538	Kepler-138 c ... 0.715758	• 28433	LTT 3780 c ... 0.698783
9555	Kepler-138 d ... 0.673460	• 29038	TOI-270 d ... 0.676525
14107	Kepler-20 d ... 0.615284	• 29095	TOI-776 c ... 0.653943
14706	Kepler-22 b ... 0.631777	• 29117	TRAPPIST-1 b ... 0.765464
17746	Kepler-310 d ... 0.667201	• 29133	TRAPPIST-1 f ... 0.777900
		• 29136	TRAPPIST-1 g ... 0.730155

Remarques

- Ce n'est pas parce qu'une exoplanète est dans la zone d'habitabilité basée sur ces critères que la vie y est possible.
- Par exemple proxima Centauri b est dans la zone mais son étoile produit des éruptions avec un rayonnement UV intense et fortement toxique pour la pérennité des molécules même simples comme H₂ .
- La liste des 8 exoplanètes semblables à la Terre se raccourcira probablement si on ajoute des critères basés sur le fonctionnement de leur étoile.

Autres critères

Distance d'habitabilité : Distance par rapport au centre de la zone habitable de l'étoile, à l'échelle de sorte que -1 représente le bord intérieur de la zone, et +1 représente le bord extérieur. Le HZD dépend de la luminosité de l'étoile et de sa température et de la taille de l'orbite de la planète.

Composition chimique nécessaire (HZC) : Mesure de la composition en vrac, où des valeurs proches de zéro sont des mélanges fer-roche-eau. Les valeurs inférieures à -1 représentent des corps composés principalement de fer, et les valeurs supérieures à +1 représentent les corps composés principalement de gaz. Le HZC dépend de la masse de la planète et de son rayon.

Habitable Zone Atmosphere (HZA) — Potentiel de la planète à maintenir une atmosphère habitable. Le HZA dépend de la masse, du rayon et de la taille de l'orbite de la planète et de la luminosité de l'étoile.

Conclusion

- Un nombre limité d'exoplanètes se présentent avec des conditions proches de celles de la Terre.
- Cela permet de sélectionner en priorité celles dont il faudra étudier l'atmosphère, à la recherche en particulier de l'ozone.