

INTRODUCTION

L'équation de Drake écrite en 1961 avait un but très précis au moment du lancement du projet OZMA, précurseur du projet SETI.

Après avoir rappelé plus en détail ce point historique, nous nous intéresserons aux termes de la fameuse équation, et nous essaierons de chiffrer chacun d'entre eux, le plus possible avec des fourchettes de valeurs issues de notre science, et quand cela n'est pas possible, avec des informations venues d'ailleurs (**en bleu dans le texte**).

Au fur et à mesure de nos évaluations, nous nous rendrons compte que les paramètres qui relèvent de l'astrophysique, des environnements planétaires, sont de plus en plus accessibles à notre science.

Mais pour ce qui relève de l'origine de la vie, puis des étapes de son développement jusqu'à l'intelligence humaine, nous ne pouvons progresser dans nos évaluations que grâce aux informations **d'une autre science**.

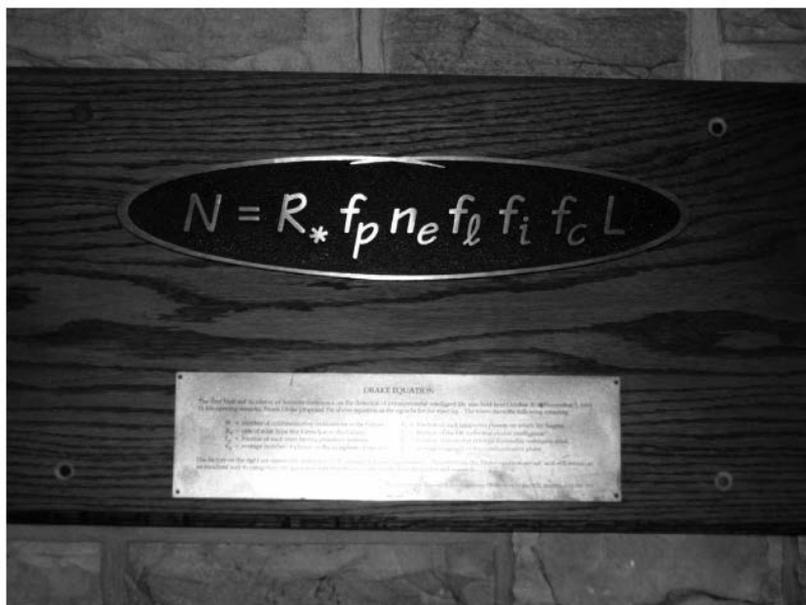
L'idée générale de ce texte n'est pas d'obtenir un résultat à tout prix : cela sera toujours possible en tirant des valeurs au hasard.

L'idée est d'éviter le tirage aléatoire en remplaçant les inconnues par des données « **venues d'ailleurs** ». Un résultat N sera obtenu, et on pourra toujours disserter sur sa valeur.

Mais celui-ci sera-t-il cohérent avec le corpus de données issues de la même **source** ?

Rappel historique sur l'équation de Drake et de son contexte

(Ref 1) *The Drake Equation Estimating the prevalence of Extraterrestrial Life through the Ages*
Cambridge University Press 2015



L'équation de Drake a été écrite pour la première fois en 1961 lors d'une conférence informelle à l'origine du projet OZMA, qui deviendra ensuite le projet SETI.

L'objectif était d'obtenir la probabilité de succès du projet, à savoir détecter par ondes radio des civilisations synchrones de la nôtre.

L'ordre des termes de l'équation n'est pas anodin, car de gauche à droite, on va de plus en plus dans l'inconnu.

D'ailleurs, à cette époque, la seule variable à peu près connue était R^* , et Drake insistait clairement sur le fait qu'il fallait considérer R^* à l'époque de la naissance du Soleil, soit il y a 4.5 Gyears : il faisait en cela l'hypothèse cachée que le développement des civilisations recherchées était identique et parallèle au nôtre. C'était en fait une règle non écrite du projet SETI : « Only assume phenomena you know exist », le seul exemple connu étant le nôtre...

Ayant introduit un terme variant en $1/\text{années}$, l'équation est bouclée en introduisant le terme L en années. Mais il s'agit là aussi d'une variable cachée car il ne s'agit pas de la durée de vie d'une civilisation technologique au sens large ; car, ce qui intéressait Drake, c'était le nombre de civilisations détectables et donc émettant des radio ondes. Et comme il le dit, une civilisation ne va peut-être utiliser ce moyen de communication que pendant un nombre très limité d'années avant de changer de technologie ; et d'estimer alors ce paramètre entre quelques centaines d'années et jusqu'à 10000 ans.

Il faut donc considérer le terme ($R^* L$) comme un facteur tamisant (« winnowing ») les possibilités d'obtenir des civilisations existant actuellement, communiquant par ondes radio, et non comme une indication générale de civilisations synchrones de la nôtre.

Ce produit ($R^* L$) n'est pas si intuitif. Car que peuvent bien avoir en commun le taux de formation d'étoiles et la période pendant laquelle une civilisation communique par radio ondes ?

Si on remplace simplement R^* par L^* (taux de naissance d'une civilisation), sans nous occuper des autres facteurs de l'équation de Drake, et en faisant l'hypothèse qu'il naît une civilisation communicante par ondes radio par an, puis que $L=100$ ans, alors L^* fois $L=100$. Sur une période glissante de 100 ans, nous verrons donc bien finalement 100 civilisations communicantes puisqu'il en naît une par an, la première de celle-ci étant visible pendant 100 ans dans le domaine des ondes radio et ainsi de suite en régime établi. Autrement dit, en étendant notre projet SETI sur une centaine d'années, on devrait assurer le succès de l'opération, pour autant que nos antennes radio soient suffisamment sensibles ! A condition bien sûr que $L=100$ ans.

Comme le disaient semble-t-il les pionniers du projet SETI, l'équation était construite de manière à ce que N soit une approximation de L (durée d'utilisation des ondes radio), et rien d'autre.

100 ans à comparer à la durée de vie du Soleil et de la Terre, cela paraît infinitésimal. Rappelons donc l'hypothèse que les civilisations cherchées seraient nées en même temps que nous, que la gestation de la vie a duré partout 4.5 Gyears, que le développement technologique est identique au nôtre, en passant par le domaine des ondes radio....

L'équation de Drake n'est donc pas faite pour estimer le nombre de civilisations ou d'espèces intelligentes qui pourraient exister en même temps que nous. Car beaucoup plus de civilisations pourraient exister, qui ne communiquent pas ou plus dans le domaine radio, se sont formées en des temps différents (plus tôt, plus tard autour d'étoiles plus vieilles ou plus jeunes), et peut-être avec des durées de vie de leurs civilisations inimaginables.

Les termes de l'équation de Drake

L'équation de Drake

$$N = R^* \times f_p \times n_e \times f_l \times f_i \times f_c \times L$$

où :

- N est le nombre de civilisations extraterrestres dans notre galaxie avec lesquelles nous pourrions entrer en contact,
- R^* est le nombre d'étoiles en formation par an dans notre galaxie,
- f_p est la fraction de ces étoiles possédant des planètes,
- n_e est le nombre moyen de planètes par étoile potentiellement propices à la vie,
- f_l est la fraction de ces planètes sur lesquelles la vie apparaît effectivement,
- f_i est la fraction de ces planètes sur lesquelles apparaît une vie intelligente,
- f_c est la fraction de ces planètes capables et désireuses de communiquer,
- L est la durée de vie moyenne d'une civilisation, en années.

Le livre cité en référence 1 indique que malgré les nombreuses critiques qui ont pu être faites sur l'équation de Drake, cette dernière reste quand même très stimulante dans le cadre de la recherche d'une vie extraterrestre et le restera encore pour un long moment. Voyons ce que nous pouvons en faire.

Les termes f_l et f_i

Avant de revenir sur les termes R^* et L, que nous étudierons ensemble à la fin, nous allons faire maintenant une hypothèse fondamentale sur les termes f_l et f_i .

Cette hypothèse est la suivante :

« Les lois de la biogénétique sont les mêmes partout dans l'univers »

Si l'évolution de la vie telle qu'observée sur Terre ne fait que traduire les lois générales de l'évolution, alors celles-ci s'appliquent aussi dans notre environnement stellaire proche. Ces lois de la biogénétique seraient le pendant des lois de la physique, que l'on considère ici sur Terre de manière tout à fait naturelle comme applicables partout dans l'univers.

Elles signifient que si une planète réunit toutes les conditions pour abriter la vie, alors la vie va se développer, tous les embranchements possibles vont être explorés, jusqu'à aboutir à l'existence d'êtres intelligents doués de conscience.

D'où : **$f_l=1$ et $f_i=1$**

Evidemment, nous sommes dans une grande perplexité sur Terre concernant les lois de la biogénétique. Car en vérité nous manquons de compréhension sur comment la vie apparaît réellement, via quel processus ? Même si on sait dater l'apparition de la vie sur Terre, on ne connaît pas les mécanismes qui s'enchaînent les uns les autres pour aboutir in fine à l'intelligence humaine.

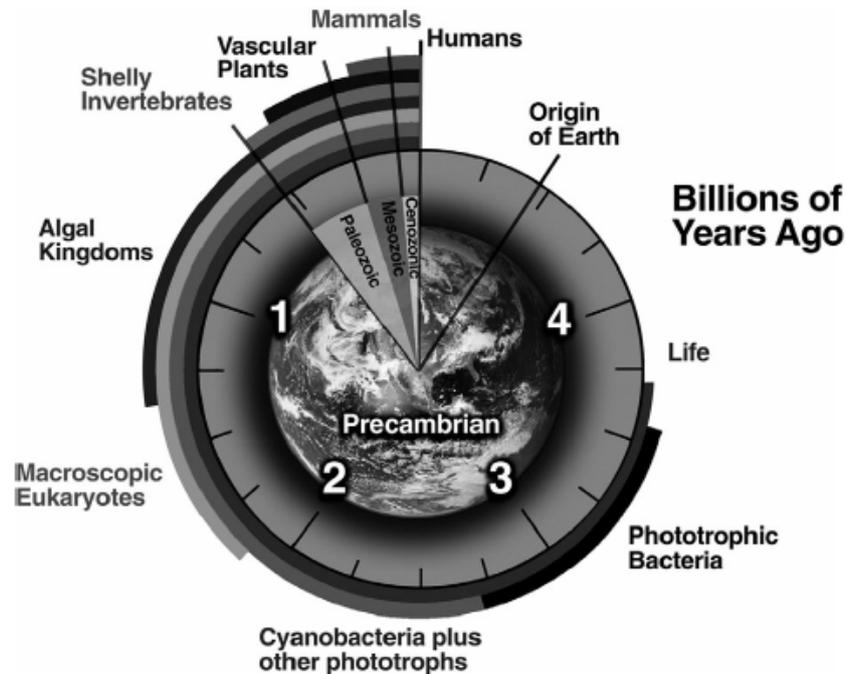


Figure 8.3 Evidence for key categories of life (adapted from Des Marais 2000). The white numbers provide a clock-like timescale (in billions of years) that indicates the antiquity of this evidence.

L'estimation de f_l sur Terre relève pour l'instant plus de la croyance que de faits scientifiques, et il reste beaucoup de travail à faire (Ref 1 page 159) ne serait-ce que pour donner une valeur infinitésimale à f_l ! Alors le raisonnement devient binaire : soit comme Jacques Monod on prend $f_l=0$ (Le hasard et la nécessité), et $N=0$; soit f_l est une sorte d'impératif cosmique et $f_l=1$. (ref 1 page 301).

Ce choix binaire ne repose finalement que sur des croyances philosophiques et non sur des évidences scientifiques, car comme déjà mentionné, notre science reste très silencieuse sur le procédé qui a permis de passer d'une planète rocheuse à une planète « parfaite ».

Quant à f_i , l'équipe de Drake n'avait pas fait les choses à moitié et avait estimé à l'époque que $f_i=1$, (ref 1 page 184) ; d'ailleurs, la plupart des scientifiques continuent de croire que $f_i=1$. Autant dire que pour passer d'une croyance à une valeur scientifique, il reste là aussi énormément de travail à faire, notamment sur la question du fonctionnement du cerveau humain, de la compréhension de son évolution, du contexte de son évolution en parallèle des autres espèces, du partage de la cognition avec les autres espèces sur Terre, de toutes les variations imaginables de cet aboutissement en liaison avec les autres espèces.

Le terme ne

Ce terme fait l'objet de toutes les attentions des astronomes actuels, ceci en raison des très nombreuses découvertes d'exoplanètes effectuées depuis octobre 1995. C'est sans doute le facteur qui a le plus évolué depuis 1961. Le terme de zone habitable a été utilisé pour la première fois en 1959 (réf 1 page 115), et était déjà lié aux conditions de vie d'une exoplanète. Cette zone habitable s'appelait aussi « écosphère » à l'époque.

Le chapitre 6 du livre en réf 1 détaille longuement les paramètres influant sur l'existence ou non d'une zone habitable: mais au final, aucun risque de quantification n'est pris concernant **ne**, car le sujet des exoplanètes évolue tellement vite que n'importe quelle évaluation valable aujourd'hui sera obsolète dès demain.

Tout au plus indique-t-on en conclusion que le nombre d'exoplanètes dans notre galaxie est certainement supérieur au nombre d'étoiles, soit 200 à 300 billions d'exoplanètes !

Si on veut synthétiser les paramètres autorisant l'existence d'une zone habitable, la source la plus concise paraît être **(D731) !**

L'extrait suivant **(D731)** décrit des paramètres importants pour trouver un milieu planétaire propice à l'apparition de la vie intelligente :

Pour la planète :

- Une masse suffisante (champ de gravité suffisant pour retenir une atmosphère)
- Un champ magnétique de protection (contre les radiations)
- Une température comprise entre 250 °K et la température d'ébullition de l'eau (qui dépend de la pression atmosphérique).
- Une « bonne » composition de l'atmosphère
- De l'eau en suffisance (avec la fourchette de températures indiquée plus haut)
- Des éléments chimiques en suffisance (milieu géologique), sous-entendu en cohérence avec la métallicité de l'étoile. Il faut des métaux pour faire des planètes rocheuses.
- Niveau de radiations géologiques
- Niveau d'ionisation atmosphérique

Pour l'étoile :

- Un niveau de radiations suffisant (luminosité)

Pour l'environnement stellaire :

- Une fréquence d'impacts limitée des aérolithes.

Il pourrait aussi exister des planètes sans étoile (!) :

- Magma intérieur réchauffant la planète
- Rayonnement géologique apportant de l'énergie supplémentaire

J'ai noté que dans la référence 1 chapitre 6, on décrivait des paramètres supplémentaires comme :

- La zone habitable continue : il faut s'assurer que la planète entre et reste dans la zone habitable suffisamment longtemps pour le développement de la vie.

- La possibilité que la planète orbite autour d'une étoile double (plus de 70 % des étoiles au voisinage du Soleil sont dans cette catégorie et nous avons déjà découvert de nombreuses exoplanètes autour d'une étoile double).
- Quelle est l'Influence des paramètres orbitaux sur la zone d'habitabilité continue ? (Excentricité, obliquité, etc...)

Ces trois derniers points ne sont pas évoqués dans la synthèse (D731). Notamment, la notion de zone habitable continue semble un point important ne serait-ce que pour laisser le temps à la vie de se développer sur une planète compatible. L'annexe 1 montre en effet que la zone habitable autour d'une étoile n'est pas immuable dans le temps : c'est une notion dynamique.

Ceci étant posé, il nous faut tenter une estimation de n_e (qui sera fautive très rapidement mais il faut bien partir de quelque part).

Certains des paramètres présentés ci-dessus sont actuellement accessibles à notre science, ceci depuis octobre 1995 et la découverte de la première exoplanète ; depuis lors, nous en avons découvert des milliers, et la quête est loin d'être terminée.

Nos scientifiques estiment qu'environ 45 exoplanètes parmi celle découvertes à ce jour (4395 au 1^{er} janvier 2021) sont propices à l'apparition de la vie.

Cela signifierait que 1% des exoplanètes (parmi toutes celles qui ont été découvertes) seraient potentiellement habitables. Evidemment, cette estimation ne prend en compte pour l'instant que les paramètres de luminosité de l'étoile, et le calcul d'une zone habitable dans laquelle la température moyenne de la planète est dans la fourchette ci-dessus. Nous ne sommes pas encore capables par exemple de détecter finement les compositions des atmosphères de ces exoplanètes, même si nous savons que certaines d'entre elles portent de l'eau en abondance.

Nous sommes donc tentés de prendre $n_e=1\%$.

Cette valeur est certainement un large majorant au vu de la liste des conditions nécessaires.

En ce qui concerne la planète :

- *En nous limitant lors des applications numériques à une zone galactique proche autour de notre étoile, on peut penser que la composition chimique locale des nuages interstellaires dans lesquels se sont formés le soleil et les étoiles proches étaient d'une composition chimique voisine. En effet, une planète rocheuse ne peut exister que s'il existe des métaux notamment. Cela signifie qu'il faudrait prendre en compte la métallicité des étoiles dans un calcul global détaillé, ainsi que l'évolution de la métallicité en fonction du temps. (Référence 3). En nous limitant à une zone galactique proche du soleil, on peut s'attendre à avoir une dispersion relativement faible sur la métallicité d'une part, à condition d'autre part de ne pas remonter trop loin dans le passé, car n'oublions pas qu'au final, les métaux proviennent des étoiles en fin de vie : on se rend compte ici que l'intégrale de $R^*[t]$ joue un deuxième rôle en terme de source de métallicité.*
- Même si certaines planètes ne sont pas porteuses d'un champ magnétique fort, l'ionisation de leur atmosphère peut suffire à créer une magnétosphère induite (exemple de Vénus).
- En cas de planète située par exemple à la limite froide de la zone d'habitabilité comme nous la calculons aujourd'hui, il peut y avoir des compensations énergétiques, liées par exemple à

un taux plus fort de CO₂ (effet de serre), à un volcanisme plus important (D541 indique par exemple l'apparition de la vie sur d'anciennes terres volcaniques), etc.

En ce qui concerne l'étoile hôte, il faut se pencher sur ses caractéristiques et apporter une correction liée à sa masse comme nous allons le voir.

JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 105, NO. E1, PAGES 1651-1658, JANUARY 25, 2000

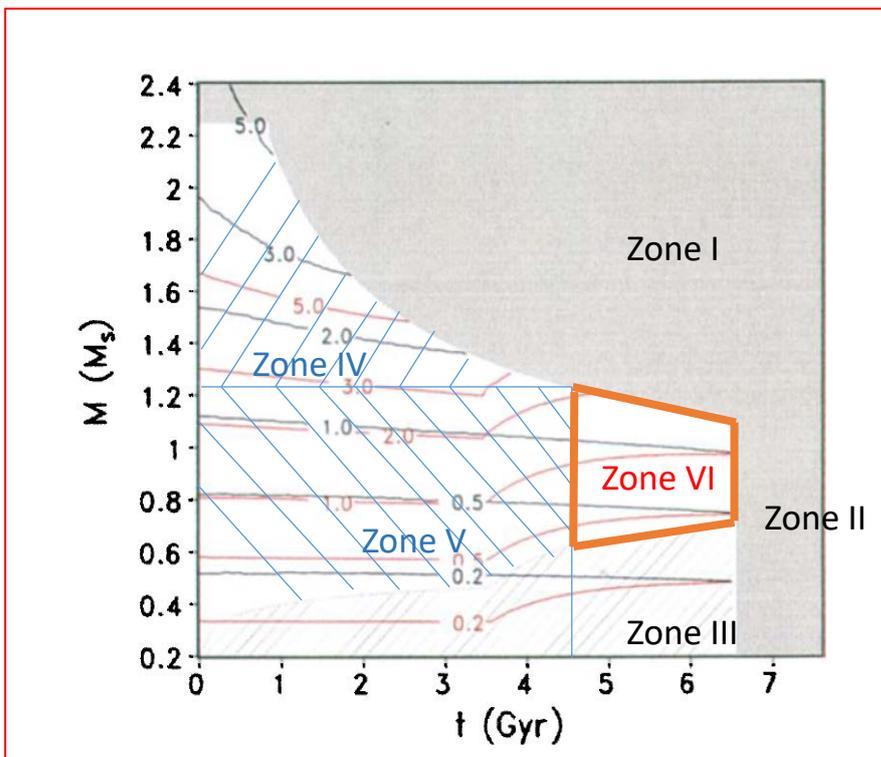
Determination of habitable zones in extrasolar planetary systems: Where are Gaia's sisters?

La figure 3 de l'article ci-dessus (Référence 2) explique qu'une planète habitable ne peut pas être trop près de son étoile par effet de marée qui bloque la planète en position synchrone, ce qui limiterait la masse de l'étoile vers le bas à 0.7 Masses solaires, et ceci afin de permettre à la planète de rester dans la zone d'habitabilité (Annexe 1) suffisamment longtemps (au moins 4.5 Gyears).

La valeur de 4.5 Gyears pour le développement de la vie intelligente est la seule valeur que l'on connaisse et c'est pourquoi Drake utilisait cette valeur. : « Only assume phenomena you know exist » !

D'autre part, afin de permettre le développement de la vie sur une telle période (4.5 Gyears) l'étoile doit vivre au moins tout ce temps, ce qui limite sa masse aux environs de 1.1 Masses solaires.

J'ai repris la figure de l'article en l'agrémentant d'un zonage comme suit :



En ordonnée, on trouve la masse de l'étoile exprimée en masse solaire.

En abscisse, on trouve le temps écoulé depuis l'arrivée de l'étoile sur la séquence principale (ZAMS = Zero Age Main Sequence). Attention, c'est le même T0 pour toutes les étoiles sur cette figure.

On y voit aussi des tracés d'iso distances pour différentes bandes d'habitabilité, pour des planètes situées respectivement dans la fourchette 0.2 à 5 UA de leur étoile : Outer zone en rose et Inner zone en noir. Il vaut mieux être proche d'une Inner Zone, car elle varie moins vite que l'outer zone (voir le cas de Mars et de la Terre dans la référence et rappelé en Annexe 1).

On note différentes limites ou zones sur le graphique original, les trois premières étant données par les auteurs de l'article :

I durée de vie de l'étoile : celle-ci dépend de la masse de l'étoile. Une durée de vie limitée va engendrer une zone habitable limitée dans le temps et non opérationnelle pour développer la vie.

II une limite à 6.5 Gyears, que les auteurs attribuent aux conditions "géodynamiques" de la planète, en considérant que celle-ci ressemble à la Terre. Autrement dit, il resterait 2 Gyears à une civilisation intelligente pour se développer ensuite.

III une limite inférieure due à l'effet de marée qui bloque la planète en position synchrone. Cela limite la masse de l'étoile vers le bas.

J'ai rajouté quelques zones :

IV une limite en masse de l'étoile correspondant à 4.5 Gyears, qui est le temps nécessaire supposé comme sur Terre pour voir l'apparition d'êtres plus évolués. Cela limite la masse de l'étoile vers le haut, car aucune intelligence n'aurait le temps de se développer pendant la durée de vie de l'étoile, ou alors de manière trop courte.

V en supposant toujours qu'il faille 4.5 Gyears pour développer l'intelligence, nous n'aurons pas à considérer les temps inférieurs à 4.5 Gyears, trop "just in time" !

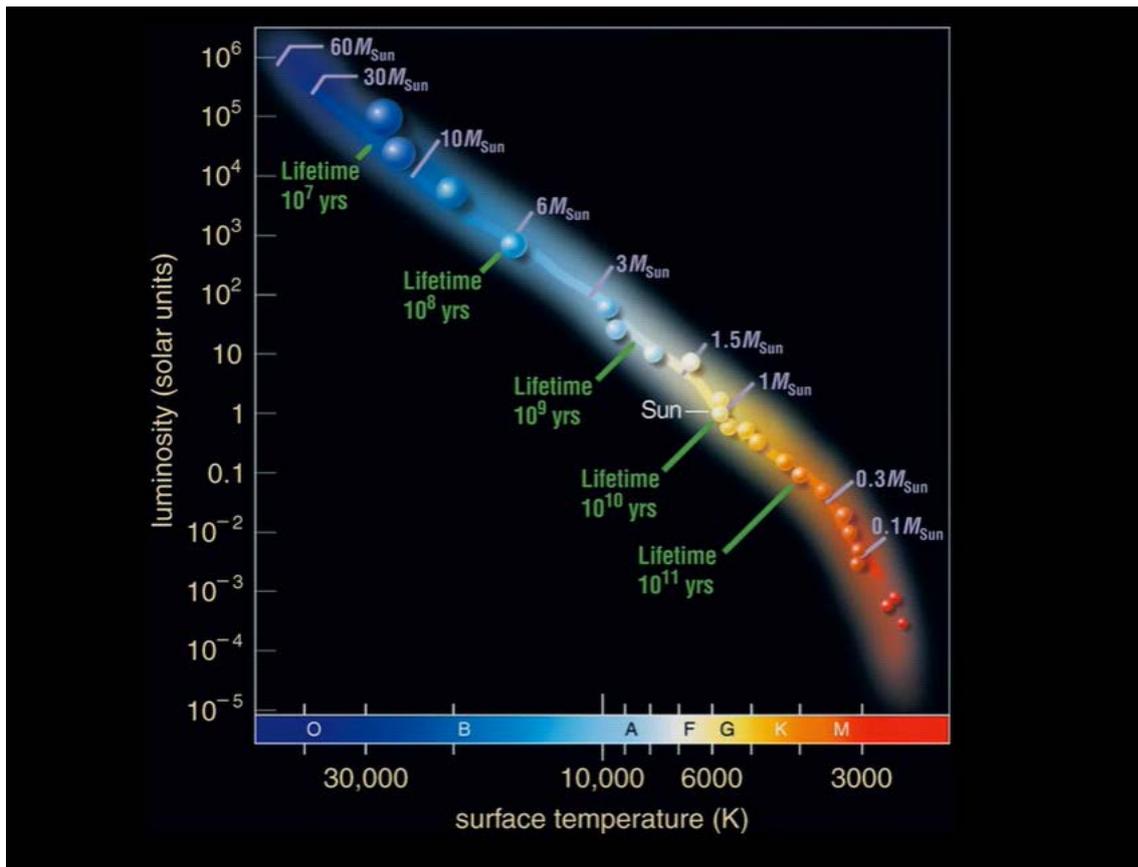
De tout cela résulte la zone suivante :

VI Zone restante.

Il reste une fenêtre temporelle qui ne pourrait pas dépasser 2 Gyears d'après le graphe ci-dessus. Elle concerne essentiellement des étoiles dans la gamme **0.7 Ms à 1.1Ms.**

Ainsi, on ne doit considérer que les exoplanètes dont l'étoile est située sur la séquence principale (90 % des étoiles), avec des masses comprises grosso modo entre 0.7 Ms et 1.1 Ms.

Si on examine le diagramme de Hertzsprung-Russel, cela correspond aux étoiles de la séquence principale de type F, G et K. Ceci est très cohérent avec l'information ([D 99](#)) limitant les étoiles habitables à celles dont la température effective est située entre 4552 °K et 6170 °K.



Ces étoiles ne représentent au final que 21 % de toutes les étoiles existantes.

Ainsi, pour conclure ce chapitre sur **ne**, il semble plus prudent de considérer que :

ne = 1 % * 0.21 = 0.21 % . Ce coefficient doit être estimé en fonction des caractéristiques du couple planète-étoile d'une part, et ne doit s'appliquer qu'à une zone galactique restreinte autour de notre étoile d'autre part. Ceci permet d'éviter des considérations liées par exemple à la métallicité des étoiles qui peut jouer un rôle très important dans ce type d'estimation à l'échelle de l'univers (référence 3 suivante).

**An Estimate of the Age Distribution of Terrestrial Planets
in the Universe: Quantifying Metallicity as a Selection Effect**

Charles H. Lineweaver

Le paragraphe sur **fp** va nous donner une indication supplémentaire sur la zone galactique restreinte à considérer.

Le terme fp

En 1961, au moment de la conférence citée au début, on situait fp dans la fourchette {0.2,0.5} avec une moyenne de 0.4. (Référence 1 page 68). Depuis 1961, différentes méthodes datant des années 2010-2015 convergent vers la conclusion que $fp \sim 1$. (ref 1 page 84) . Cependant, il faut prendre des précautions : cette valeur n'est pour l'instant confirmée que pour **une zone limitée à 100 parsecs** autour de notre Terre (page 85) et il est très hasardeux de faire une extrapolation à l'échelle galactique.

Il est probable que dans les années à venir, avec l'amélioration des instruments, nous nous rendons compte qu'il existe autant de systèmes solaires que d'étoiles dans toute la galaxie et que l'on puisse étendre $fp=1$ à toute la galaxie. Si les lois de la physique sont les mêmes partout dans l'univers, la formation d'une étoile et de son système planétaire à partir d'un nuage de gaz devrait être universelle.

Dans l'immédiat, on prendra :

fp=1 mais en restant prudent , et en considérant cette valeur comme valable dans une zone limitée de 100 parsecs autour de notre Soleil.

Cela conforte notre choix de ne pas introduire la métallicité dans l'étude de **ne** : la distribution de celle-ci dans notre voisinage proche ne doit pas avoir d'effet de sélection comme indiqué dans la référence 3.

Le terme fc

En synthèse, le chapitre 12 de la référence 1 indique que $fc=1$, même si actuellement nous ne sommes pas encore capables de dépasser une portée de 100 années-lumière en ce qui concerne nos moyens radio. Mais cette valeur devrait être de 1 d'ici quelques siècles.

De toute manière, nous prenons le parti pris délibéré de ne pas nous intéresser à la radio communication ! Autrement dit, peu importe que la civilisation technologique communique ou pas par ondes électromagnétiques ou maîtrise ou pas le voyage interstellaire. Ce qui nous intéresse, c'est l'existence d'une intelligence synchrone à la nôtre, quel que soit son développement.

C'est pourquoi nous prendrons également :

fc=1

Ce terme pourrait être toutefois utilisé avec d'autres valeurs à condition de bien définir sa signification. Par exemple :

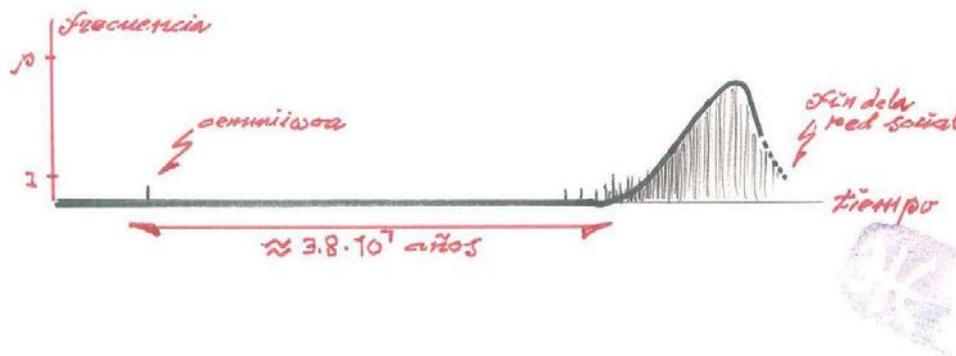
- la probabilité qu'une civilisation technologique maîtrise ou pas le voyage interstellaire en ce moment
- la probabilité qu'une civilisation technologique ait envie ou besoin de communiquer de quelque manière que ce soit (ondes gravitationnelles, etc.) en ce moment
- la probabilité qu'une civilisation technologique soit agressive en ce moment
- etc.

Conséquence sur le choix de L

L'inconvénient de cette démarche plus générale que celle de Drake est que L ne se limite plus à une phase de communication par ondes radio ; autant il était possible, comme Drake, d'extrapoler L de quelques siècles à 10000 ans (réf 1 page 270), autant nous sommes maintenant dans le flou le plus total sur la durée de vie effective moyenne d'une civilisation.

Le seul exemple étant le nôtre, on pourrait être tentés de nous limiter à quelques siècles. Mais on peut espérer que la civilisation humaine n'en est qu'à ses débuts et pourra un jour accéder au voyage interstellaire (ce qui ne paraît pas pour demain...). Et puis d'après la figure ci-dessus (Zone VI), il nous resterait 2 Gyears d'espérance de vie dans la zone habitable, ceci en étant très optimistes sur nos comportements... Alors que choisir entre quelques millénaires et 2 Gyears ?

Il existe une information extraterrestre sur ces questions ([D 792-1](#)).



Ce graphique explique que le stade d'évolution suivant de « l'humanité » est la transformation de celle-ci en quelque chose de transcendant. Cette transcendance peut avoir lieu dès quelques millions d'années (1.4 millions d'années précisément !) ; et elle peut apparaître au plus tard à plus de 38 millions d'années, si bien sûr aucune catastrophe cosmique ou technologique (autodestruction) ne vient empêcher cette ultime évolution. Ce quatrième stade de l'évolution se traduit alors par la disparition de l'espèce.

Cela donnerait une fourchette assez large pour L qui irait de 1.4 à 38 Millions d'années.

Mais on peut préciser un peu la situation, car il existe aussi une loi de distribution fournie selon le graphique ci-dessous ([OT 35](#)), sur la base des 74 civilisations connues par cette ethnie extraterrestre. De ce graphique, on peut calculer une moyenne statistique pondérée : L=5.4 Millions d'années si on prend les 74 données, 4 Millions d'années si on ne prend que les 70 premières.

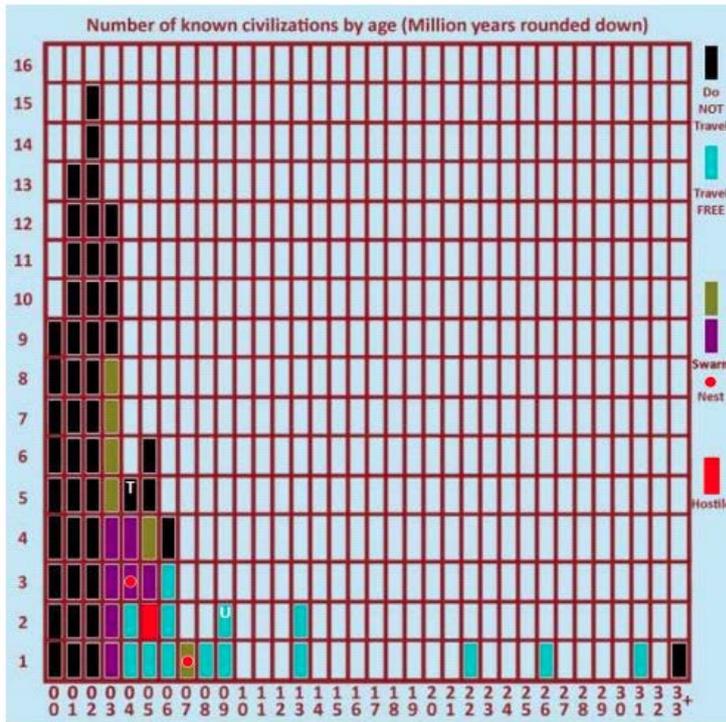
On pourrait donc prendre :

L= 4 Myears en moyenne, avec une large fourchette de {1.4,38} Myears.

Dans ce graphique, notre civilisation aurait environ 4 Millions d'années (date d'apparition de l'intelligence sur Terre, ce qui est cohérent de l'apparition de l'australopithèque).

Cela nous situe dans la fourchette et près de la moyenne.

La civilisation ayant fourni cette information aurait 9 Millions d'années.



Ainsi, l'unité de temps pour L ne serait pas du tout le siècle, ni le millénaire, **mais le million d'années**, car il faut raisonner en terme d'apparition du troisième stade de l'évolution et non pas de celle d'une civilisation technologique. C'est pourquoi on remplacera dans la suite le terme de civilisations technologiques par celui « d'humanités intelligentes ».

Attention, on devra considérer ces informations avec prudence dans la suite et il faudra s'assurer de leur cohérence avec d'autres informations de la même source.

Faut-il utiliser $R^*[t]$, ou plutôt $L^*[t-4.5]$?

Rappelons que nous ne cherchons pas le nombre de civilisations *actuellement* communicantes via des ondes radio, mais le nombre « d'humanités intelligentes » *actuelles* existantes, ce qui revient à prendre $f_c=1$ comme expliqué ci-dessus. Libre au lecteur de prendre le terme f_c qui lui convient en fonction de ce qu'il recherche !

Voyons ou nous en sommes dans notre estimation de l'équation de Drake :

$N = (R^* L) f_p n_e f_l f_i f_c = (R^* L) * 1 * 0.21\% * 1 * 1 = 0.0021 (R^* L)$, mettant bien évidence le terme ($R^*[t] L$).

Comme indiqué dans le rappel historique, un taux de formation d'étoiles n'a pas grand-chose à voir avec la durée de vie d'une « humanité intelligente ».

Pour une meilleure compréhension, nous allons donc considérer dans la suite le paramètre $L^*[t]$ en le définissant comme suit :

$L^*[t] = R^*[t] f_p n_e f_l f_i f_c = 0.0021 R^*[t]$.

Pour être encore plus précis, connaissant $R^*[t]$, t étant exprimé en milliards d'années, nous allons considérer comme le faisait Drake $R^*[t-4.5]$, car il faut laisser le temps à partir de la naissance de l'étoile au développement de la vie.

Nous ne changeons pas du tout l'équation de Drake : nous l'explicitons plus clairement et regroupons simplement les termes pour une meilleure compréhension, mais sans rien altérer au final :

$$N(t) = R^*[t-4.5] f_p n_e f_l f_i f_c L = L^*[t-4.5] L$$

$L^*[t-4.5]$ recouvre alors le nombre « d'humanités intelligentes » qui naît par an, autour d'une étoile de type {F, G, K} de la séquence principale, et ayant une planète dont les critères d'habitabilité sont conformes à ceux attendus, ce qui fait que la vie intelligente s'y développe automatiquement. Le décalage dans le temps ($t-4.5$) est juste là pour rappeler que quand on s'intéresse à un résultat aujourd'hui ($t=0$), il faut prendre la quantité qui prévalait il y a 4.5 Gyears.

Tout est contenu ou presque dans le paramètre **ne** dont l'estimation doit tenir compte des caractéristiques du couple étoile-planète ; on doit aussi se limiter à une zone proche de la galaxie autour de notre soleil pour garder $f_p=1$ d'une part et ne pas entrer d'autre part dans des corrections compliquées liées à la métallicité des étoiles à travers les âges. (Référence 3).

Cette zone de la galaxie sera limitée dans la suite à un rayon de 100 parsecs autour de notre étoile.

Utilisation de données scientifiques pour terminer le calcul numérique de l'équation de Drake

Connaissant $R^*[t-4.5]$ dans cette zone, $L^*[t-4.5]$ traduit donc simplement le nombre « d'humanités intelligentes » qui naît chaque année dans ladite zone.

Nous avons maintenant besoin d'une information précise, à savoir le taux de formation d'étoiles R^* dans un rayon de 100 parsecs autour de notre étoile, duquel dépend L^* .

Il se trouve que la référence 4 suivante de 2019 nous fournit cette information.

A&A 624, L1 (2019)
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935105>
© ESO 2019

**Astronomy
&
Astrophysics**

LETTER TO THE EDITOR

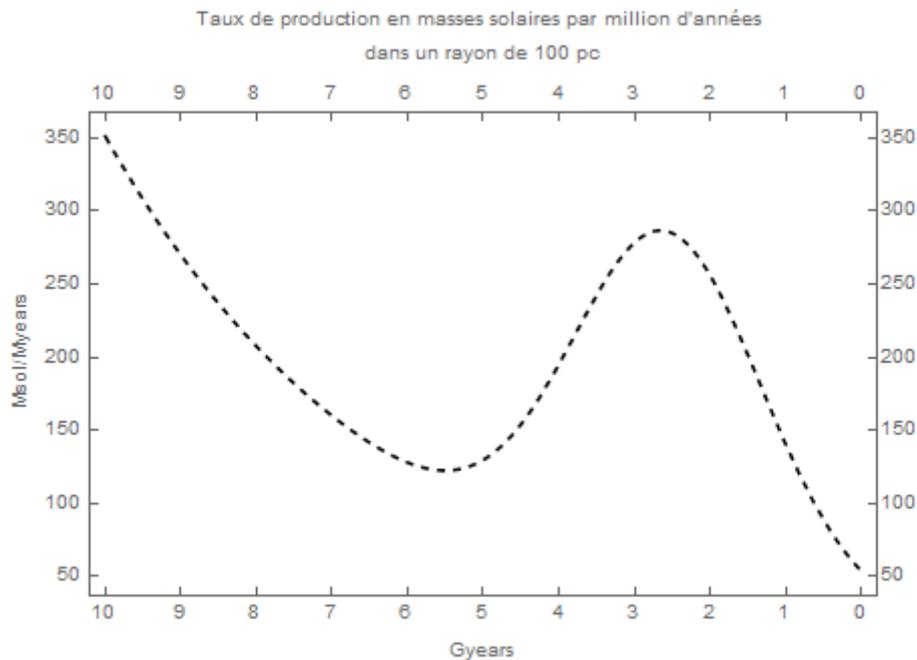
Gaia DR2 reveals a star formation burst in the disc 2–3 Gyr ago

R. Mor¹, A. C. Robin², F. Figueras¹, S. Roca-Fàbrega³, and X. Luri¹

Le graphique suivant est basé sur la figure 2 de la publication, et on explique en Annexe2 comment passer de la figure de la publication au graphique suivant, le but étant de se focaliser sur le taux de formation de nouvelles masses solaires sur une zone du disque galactique correspondant à une distance de 100 pc de notre soleil.

Le résultat est présenté en *masses solaires* qui naissent chaque million d'années dans notre environnement, le tout en remontant le temps de droite à gauche. Les auteurs indiquent qu'une flambée de production d'étoiles s'est produite il y a 2 à 3 Gyears.

Ils indiquent aussi qu'environ la moitié des naissances s'est faite pendant les 5 derniers Gyears.



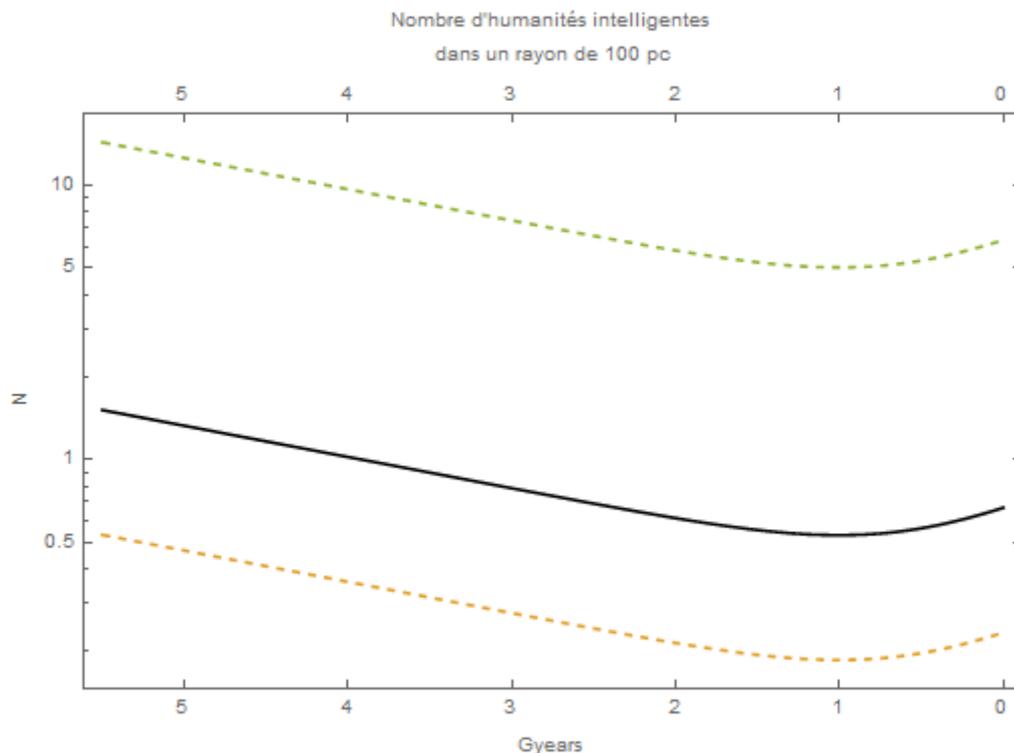
Pour passer des masses solaires au nombre d'étoiles (de masses différentes), il faut une fonction de répartition des étoiles en fonction de leur masse : cette fonction (Initial Mass Formation ou IMF) est également fournie dans la publication et explicitée en Annexe 2. On calcule qu'en moyenne, il faut 1.94 masses solaires pour former une étoile, ce qui revient à diviser les résultats précédents par cette valeur moyenne.

Remarque :

Comme nous connaissons la fonction IMF, on peut calculer la proportion d'étoiles comprises entre deux valeurs de masse ; le coefficient de 0.21 utilisé pour se restreindre aux étoiles de type {F, G, K} correspond alors aux bornes {0.73, 1.1} Masses solaires. En estimant plus finement la correspondance {4552 °K, 6200°K} => {0.7 Ms, 1.15 Ms}, le coefficient calculé vaut 0.26. Ces résultats figurent en Annexe 2.

Afin de ne pas revenir sur les choix faits pour **ne**, nous garderons la valeur de 0.21 du texte : l'écart de l'ordre de 20 % correspond à un resserrement du tri effectué sur la masse des étoiles de type {F, G, K}, la fourchette passant de {0.7, 1.15} Masses solaires à {0.73, 1.1} Masses solaires : cet écart de 5 % obtenu en termes de masses est acceptable.

Pour passer à $L^*[t-4.5]$, il suffit de multiplier par 0.0021. Et en multipliant par L, nous obtenons enfin le résultat recherché (le graphique est décalé « vers la droite » en raison du terme $t-4.5$).



Ce graphique représente le résultat N de l'équation de Drake pour 3 valeurs de L : $L = 4$ Myears, valeur moyenne estimée, en noir, et les deux bornes basses et hautes fournies, à savoir $\{1.4, 38\}$ Myears en pointillés.

Ce résultat montre qu'il pourrait exister jusqu'à 6 ou 7 humanités intelligentes vivant actuellement autour de nous dans un rayon de 100 parsecs.

Quelle est la barre d'incertitude sur ce résultat ; quelle est sa validité ?

On pourrait regrouper les paramètres en deux familles en laissant tomber f_c :

- Celle de l'astrophysique et de l'astrobiologie $\{R^*, f_p, n_e\}$
- Celle de la biogénétique $\{f_l, f_i, L\}$

Les paramètres de l'astrophysique sont aujourd'hui quantifiables par nos instruments, même si les barres d'incertitude restent importantes. Tout comme Drake à son époque, le paramètre que l'on maîtrise le mieux reste $R^*[t]$, sachant que la barre d'incertitude sur $R^*[t-4.5]$ est quand même de l'ordre de 50%. Le terme n_e va se préciser dans les années à venir au fur et à mesure de la découverte d'exoplanètes et des caractérisations physiques du couple étoile-exoplanète répondant à toute une liste de critères mesurables. La valeur prise pour n_e dans ce texte est très probablement fautive avec plusieurs centaines de % d'incertitudes, mais les mesures et simulations à venir concernant les exoplanètes permettront de resserrer ces barres d'incertitudes. C'est un point positif de notre science qui va progresser encore fortement dans les décennies à venir.

Concernant les paramètres de la biogénétique, deux d'entre eux relèvent de lois inconnues par nous et tout au plus pourrait-on les assimiler à un « impératif cosmique » et fixer ces valeurs de manière binaire à 1 car nous sommes très loin de faire de la science reproductible dans ce domaine.

Le troisième paramètre (L) nous est totalement inconnu, étant basé sur un phénomène dont nous n'avons pas conscience, pour autant qu'il existe, à savoir le phasage qui conduit une nouvelle humanité à une sorte de transcendance et à sa disparition. Comment parler alors d'incertitudes sur des notions et sur des lois qui nous sont totalement étrangères ? Cela relève plus de la foi et de la subjectivité, notions qui n'ont rien à faire avec la démarche scientifique.

Ainsi, le résultat calculé ci-dessus relève pour moitié de la démarche scientifique, et pour une autre moitié de la foi en des affirmations invérifiables actuellement par notre science.

Tout au plus pourrait-on confronter ce résultat avec d'autres informations issues de la même source extraterrestre, ne serait-ce qu'afin d'en vérifier la cohérence, cohérence ne voulant pas dire vérité.

Nombre d'humanités ayant existé dans le passé.

Nous avons de nombreux éléments qui vont nous permettre d'évaluer le nombre d'humanités ayant existé dans le passé, et cela sans même avoir besoin du terme L.

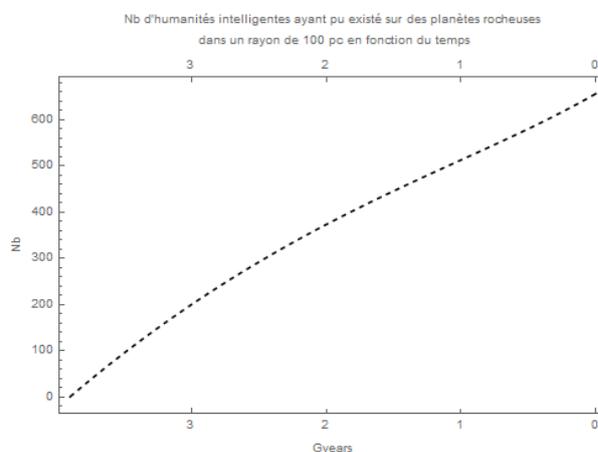
Comme pour le calcul précédent, cette évaluation doit être faite à (t-4.5), car toute nouvelle étoile naissant après -4.5 Gyears ne porte pas encore de vie intelligente (hypothèse de Drake).

Il ne faut pas toutefois considérer toutes les étoiles depuis 10 Gyears. Car il faut une métallicité suffisante pour obtenir des planètes rocheuses, et la première génération d'étoiles ne remplissait pas cette condition.

La référence 3 nous donne une indication intéressante sur le temps à partir duquel on peut commencer l'intégration (voir la figure 2 de la référence 3) : on relève -8.4 Gyears à partir du temps présent, ceci pour obtenir une métallicité minimale compatible de celle de notre disque galactique.

Notons que la plupart de ces étoiles existe toujours, sauf peut-être les étoiles de type F dont la durée de vie est plus courte que notre soleil, qui vit environ 10 Gyears. Mais ces étoiles de type F ne représentent que 10 % de notre sélection d'étoiles de type {F, G, K}.

En multipliant ensuite par $n_e=0.0021$, nous obtenons la somme de toutes les humanités ayant existé depuis l'origine des planètes rocheuses jusqu'à nos jours, le tout dans un rayon de 100 parsecs.



Notre coin galactique aurait donc déjà vu passer 656 humanités intelligentes sur une période de 3.9 Gyears, soit environ **1 humanité intelligente tous les 6 millions d'années**.

Ce résultat ne dépend pas de L, mais il est complètement cohérent du résultat précédent qui repose lui sur des hypothèses pour les valeurs de L, et qui donnait entre 1 et 6 humanités synchrones selon les valeurs de L.

A défaut, il y a donc une excellente cohérence entre les résultats instantanés et les résultats intégrés, ce qui ne signifie pas qu'ils sont vrais rappelons-le.

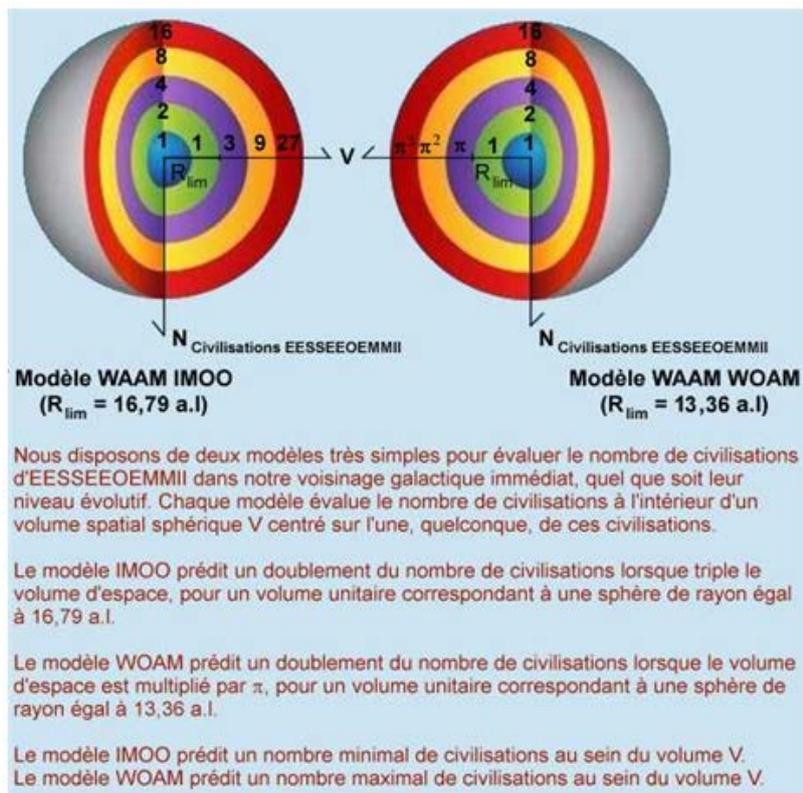
Jusqu'ou peut aller la cohérence ?

La source extraterrestre nous fournit des informations quant au nombre de civilisations dans notre voisinage galactique immédiat, **et ceci quelque soit leur niveau évolutif**.

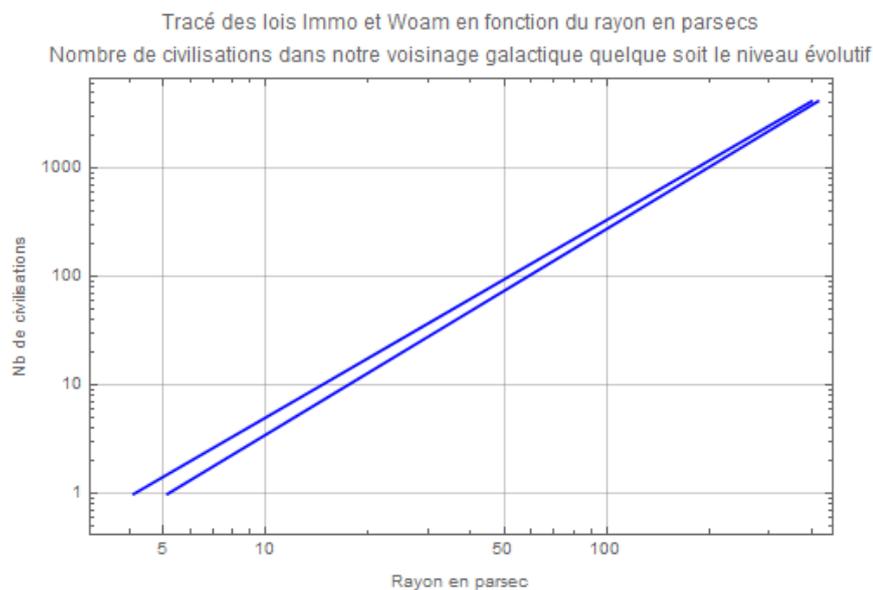
Je traduis cela de la manière suivante :

- L'humanité intelligente est apparue (cela peut être l'équivalent des australopithèques).
- Puis cette humanité intelligente a finalement évolué après de nombreux millions d'années vers son état de transcendance et a disparu.

Cela correspondrait donc d'après mon interprétation à l'intégrale des humanités ayant existé dans le passé. Les lois fournies sont les suivantes (**W1-133**).



On peut les transcrire facilement pour obtenir le graphique suivant :



Pour 100 parsecs, nous obtenons une moyenne de 300 humanités ayant existé dans le secteur.

Je considère ce premier résultat comme très cohérent de la valeur obtenue par nos soins, à savoir 656 humanités ayant existé. A ce stade, un facteur deux seulement pourrait même paraître suspect compte tenu des inconnues principalement sur **ne**, sachant que L n'intervient pas à ce stade, et que les facteurs fl et fi ne relèvent pas vraiment de résultats scientifiques !

Peut-on maintenant obtenir une comparaison avec le nombre d'humanités **actuelles** ?

L'information suivante est donnée au niveau galactique : il existerait actuellement 1.2 millions de civilisations, sachant que 18 millions ont existé jusqu'à ce jour (**OT 57**).

Si on fait la règle de trois au niveau local, on obtient un facteur 1/15 à appliquer au résultat ci-dessus, **soit 20 humanités existant actuellement dans le secteur.**

Ceci est à comparer à la fourchette de 1 à 7 humanités existantes actuellement dans notre secteur et estimée par nos soins : là encore, les deux estimations ne sont pas complètement différentes de plusieurs ordres de grandeur, et il est quand même assez frappant de noter que l'ordre de grandeur y est car nous ne sommes qu'à un facteur 3 près !

On peut donc considérer que les différentes informations fournies n'engendrent pas de contradictions flagrantes avec d'autres informations qui nous ont permis de faire ces évaluations.

Cette cohérence peut être soulignée, en insistant bien sur le fait qu'elle ne démontre en rien la pertinence des informations.

Une remarque avant de conclure

Si les lois imoo et woam donnent bien le nombre de civilisations ayant existé dans un volume donné d'une part, et que 74 civilisations existantes ont été approchées d'autre part, alors cela signifierait que les explorateurs extraterrestres ont dû arpenter un volume correspondant à la localisation de $74 \times 15 = 1110$ civilisations ayant existé au total.

Cette valeur correspond sur le graphe ci-dessus à un domaine d'exploration de l'ordre de 200 parsecs de rayon autour de leur planète. Autrement dit, ces gens auraient parcourus des distances

d'au moins 650 années-lumière, alors que nous peinons à nous rendre plus loin que la Lune en chair et en os.

Cela suggère l'accès à une technologie permettant de voyager à des vitesses "apparentes" largement supraluminiques, basée sur des lois de la physique qui nous sont inconnues.

Finalement, notre optimisme quant à l'avancement de nos propres lois de la physique n'est peut-être pas si justifié...

CONCLUSION

L'équation de Drake étudiée en détail dans ce texte fournit le nombre **N** « d'humanités intelligentes » qui naît par an, autour d'une étoile de type {F, G, K} de la séquence principale, et ayant une planète dont les critères d'habitabilité sont conformes à ceux attendus. Ce calcul est fait pour un temps $t = -4.5$ Gyears, comme le faisait Drake. Nous avons laissé tomber le terme f_c de l'équation pour la simple raison que nous nous intéressons à toutes les humanités, de l'australopithèque à la plus sage et la plus ancienne civilisation quel que soit son niveau technologique. Nous nous sommes aussi restreints humblement à une zone de notre disque galactique de 100 parsecs de rayon autour de notre Soleil pour laquelle notre science est capable de nous fournir des données chiffrées.

On peut regrouper les paramètres restant de l'équation en deux familles scientifiques :

- F1 = Celle de l'astrophysique au sens large { R^* , f_p , n_e }
- F2 = Celle de la biogénétique { f_l , f_i , L }

Le terme biogénétique recouvre plusieurs questions : quelle est l'origine de la vie ? Comment passe-t-on d'une planète rocheuse à une planète portant la vie ? Comment celle-ci se développe-t-elle en explorant tous les embranchements possibles jusqu'à produire une humanité intelligente ? Qu'advient-il à cette humanité dans la durée si aucun cataclysme cosmique ou autre lui permet de survivre ?

Au moment du bilan, on va utiliser de trois manières différentes l'équation de Drake et ainsi obtenir 3 estimations de **N**, et nous profitons comme nous l'avons fait dans le texte des données disponibles pour estimer la somme des humanités **NH** ayant pu exister dans le passé (à noter que l'évaluation de **NH** n'a pas besoin du terme L de la famille F2, mais d'une estimation de la date d'apparition des premières planètes rocheuses). Ces trois approches sont les suivantes :

- A1 = Estimation de **N** et **NH** sur la base uniquement de données de notre science.
- A2 = Estimation de **N** et **NH** sur la base de données purement extraterrestres ; précisons que **N** et **NH** sont calculés ici d'une manière différente de celle de Drake, via des lois et des estimations qui nous sont inconnues.
- A3 = Estimation de **N** et **NH** sur la base d'un mixte de A1 et A2 en limitant au maximum l'emploi de données issues de A2.

Le tableau suivant synthétise cette approche.

	Lois physiques F1			Lois biogénétiques F2		L	N	NH
	R*	fp	ne	fl	fi			
						Myyears	Drake	total
A1 Science terrestre	Connu	1	0,0021	?	?	??	????	656 ??
							Lois autre science	
A2 Autre science	sans objet	sans objet	sans objet	1	1	1,4 à 38	20	300
							Drake	Total
A3 Mixage A1 A2	Connu	1	0,0021	1	1	1,4 à 38	1 à 7	656

Ce tableau est très instructif et il montre plusieurs choses :

- Les résultats des lignes A2 et A3 présentent une certaine cohérence, les valeurs obtenues étant à mieux qu'un facteur 3 près. Cela ne veut pas dire qu'ils reflètent la réalité de notre environnement galactique ni qu'ils sont vrais, mais au moins ils sont obtenus dans un cadre que l'on peut qualifier d'auto cohérent.
- Bien qu'encore imparfaites au vu des très importantes barres d'incertitude, nos connaissances dans le domaine de l'astrophysique et de la planétologie sont correctes et elles vont s'améliorer dans les décennies à venir.
- En revanche, sans l'aide d'une autre science, nous n'aurions pas pu proposer de résultat en bout de ligne A3, car nous sommes dans le flou complet concernant l'origine de la vie et son développement (**fl**) jusqu'à l'apparition de l'intelligence (**fi**). Quelle probabilité attribuer à un processus qui nous est inconnu ? Il est clair que la découverte d'un second échantillon de vie sur une autre planète (Mars ?) remettra en cause complètement la valeur attribuée à fl, et cela changera beaucoup de choses sur la question du passage d'une planète rocheuse à une planète parfaite.

Cette autre science existe-t-elle ? La science n'est pas une croyance mais une méthode qui repose sur des preuves expérimentales. Ainsi, les résultats obtenus ci-dessus relèvent pour moitié de notre démarche scientifique, et pour une autre moitié de la foi en des lois invérifiables actuellement par notre science. Tout au plus peut-on rejeter le délit d'incohérence.

Je laisse alors le lecteur méditer sur cette conclusion du prix Nobel Manfred Eigen, à la fin de son livre « Steps towards life : a perspective on evolution », de 1992.

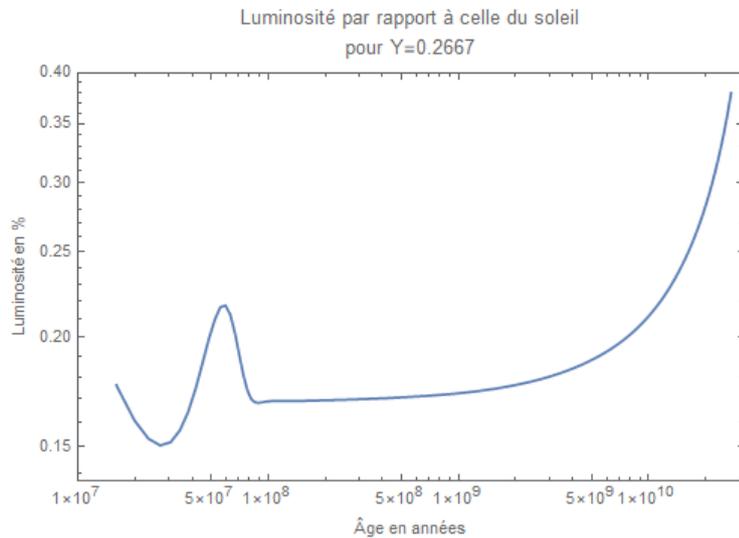
The object of scientific research is that which is observable and inter-subjectively reproducible. Repeatable observations are set in relation to one another and fitted into a scheme that is free from contradictions. Striving towards scientific discovery is a collective activity of the mankind: nothing counts as proved unless it is accepted by the worldwide forum of science. This in no way excludes the possibility of error or misinterpretation. Yet no projection of reality is more reliable than the world-view supported by the edifice of scientific discovery.

Religious experience is based upon faith and thus possesses the independence that characterizes subjectivity. In this respect, it differs fundamentally from scientific knowledge. Owing to the limitations of human understanding, conflicts between religious and scientific world-views are hard to avoid. The frequently raised question 'Creation *or* evolution?' thus stems from a non-existent contradiction, since the word 'or' implies a confrontation between two incommensurable projections. I am well aware that these questions have occupied a central position in the subjective consciousness of many people. Nevertheless, although I am frequently asked about such matters, I have in this book left them untouched. Banal replies such as 'Evolution is the realization of creation by means of natural law' do little to satisfy, or to help, those who are seeking answers on this matter. They are in fact asking about something quite different, problems for which science offers no solution.

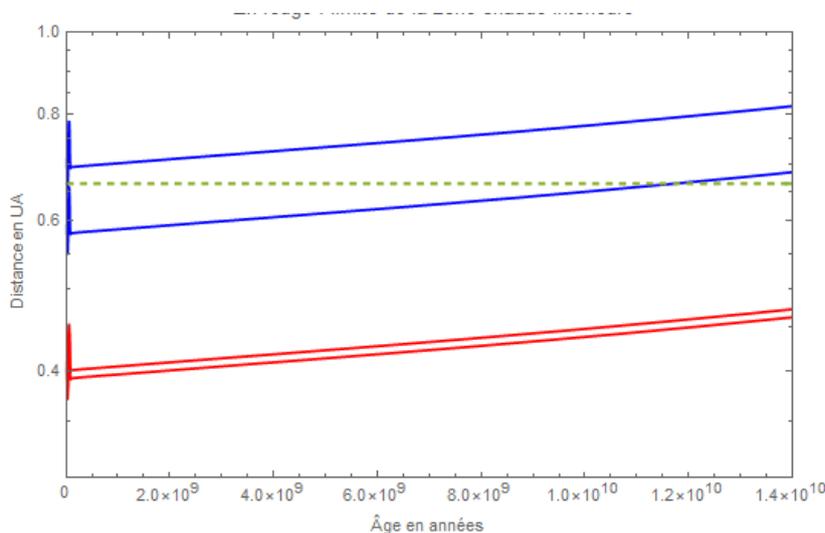
Annexe 1 La zone habitable autour d'une étoile : Quelques précisions sur cette notion.

Une étoile naît, vit et meurt. Nos modèles actuels permettent par exemple de prédire la luminosité d'une étoile en fonction du temps sur des durées de plusieurs milliards d'années.

Voici par exemple la luminosité d'une étoile de type K exprimée en % de la luminosité de celle du soleil, en fonction du temps. Comme on le voit, cette luminosité augmente avec l'âge de l'étoile.



Ce n'est pas sans conséquence sur la zone d'habitabilité. Partant du graphique précédent, on peut estimer très grossièrement la bande d'habitabilité de l'étoile. Mais selon les modèles choisis, les limites peuvent varier comme le montre le graphe suivant pour deux modèles différents.



La zone dite chaude (en rouge) a peu varié, mais la zone froide la plus extérieure est plus incertaine. Ce qui fait qu'une planète située par exemple à 0.67 UA de son étoile soit se situe à l'intérieur de la zone d'habitabilité et y reste indéfiniment ou presque, ou n'y rentre jamais ou alors au bout de 12 Gyears comme montré sur le graphique, ce qui revient au même. Toutes les variations sont imaginables : une planète plus proche (0.41 UA) pourrait se situer dans la ZH mais en sortir au bout de quelques Gyears. Une planète située vers 0.6 UA pourrait au contraire ne rentrer dans la ZH qu'au bout de quelques Gyears, etc.

L'exemple le plus frappant pour illustrer ceci provient de notre système solaire.

Voici deux études scientifiques très sérieuses de 2000 (Référence 2 du texte) et 2001 (Ref A1 ci-après), qui étalonnent en quelque sorte leurs recherches en s'appuyant sur ce qui se passe dans le système solaire.

Naturwissenschaften (2001) 88:416–426
DOI 10.1007/s001140100257

REVIEW ARTICLE

S. Franck · A. Block · W. von Bloh · C. Bounama
I. Garrido · H.-J. Schellnhuber

Planetary habitability: is Earth commonplace in the Milky Way?

Published online: 23 August 2001
© Springer-Verlag 2001

La figure ci-dessous présente le cas de Vénus, la Terre et Mars, en termes de zone d'habitabilité à travers les âges.

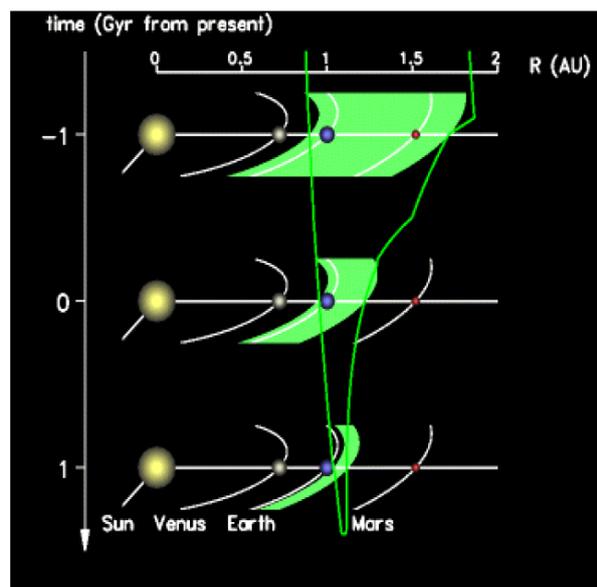


Fig. 4: Habitable zone (green shading) for the solar system at three different time steps. The orbits of the three terrestrial planets, Venus, Earth and Mars are shown. The solid green line describes the evolution of the inner and outer boundary of the HZ.

Cette figure montre qu'il y a 1 Gyears, Mars était dans la ZH, mais n'y est plus à ce jour. C'est bien l'objet de la dernière mission de la NASA (Persévérance) que de ramener in fine des échantillons de sols martiens sur Terre pour montrer l'existence passée d'océans, de lacs, et peut être de premières formes de vie sur Mars.

Appliquée à la Terre, cette figure montre que dans **500 millions d'années** (voir le texte de la publication de 2000), la zone habitable de la Terre aura disparu, car la Terre est située de manière très proche de la limite intérieure chaude.

Ainsi, la zone habitable intérieure se sera éloignée du Soleil, ce que nous attendions, alors que la zone habitable extérieure se sera rapprochée du Soleil, ce qui semble contre intuitif. Les auteurs expliquent que ce dernier point proviendrait de conditions « géodynamiques ».

En guise de conclusion de cette annexe

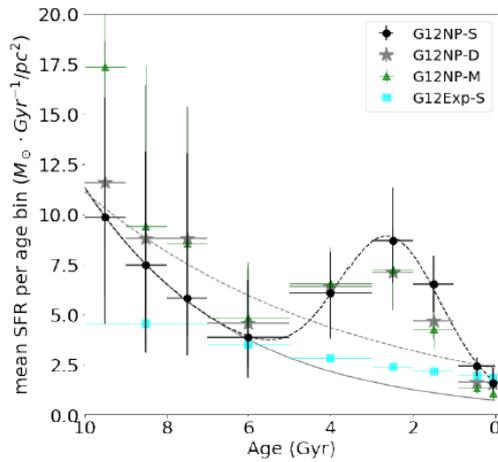
Ces différentes approches montrent en tout cas clairement que la notion de zone habitable n'est pas du tout figée dans le temps, ceci en raison de l'évolution de l'étoile tout au long de sa vie, et aussi d'autres considérations liées à la planète elle-même : la zone habitable peut apparaître, puis se réduire, puis disparaître : c'est une notion **dynamique dont la durée temporelle peut être incompatible avec l'apparition de la vie.**

Ainsi, une planète qui gravite autour d'une étoile beaucoup plus ancienne que le Soleil, peut très bien n'être entrée que tardivement dans sa zone d'habitabilité, peut être en même temps que la Terre dans la sienne.

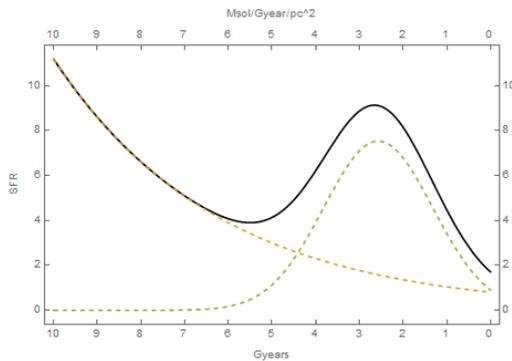
Afin de ne pas compliquer la situation, nous supposons que chaque planète habitable apparaît de manière quasi synchrone avec son étoile.

ANNEXE 2

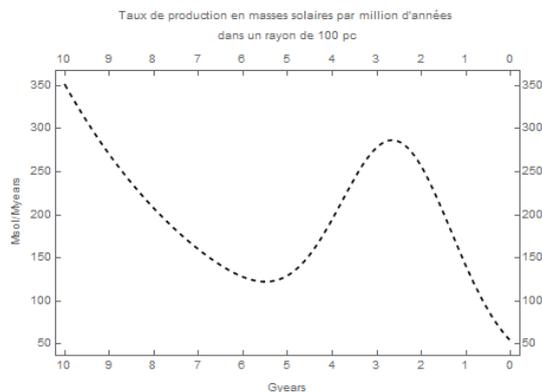
Voici la figure 2 de la publication référence 4. Les barres d'incertitude sont assez élevées, de l'ordre de 50 %



Le texte explique comment ajuster le résultat, ce que nous avons fait en suivant scrupuleusement les prescriptions des auteurs.



Puis nous rapportons cela à un rayon de 100 parsecs.

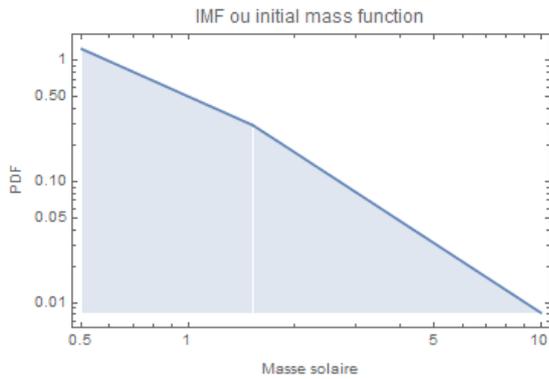


Il faut apporter une correction pour passer de masses solaires à un nombre d'étoiles comme expliqué dans le texte.

En utilisant les paramètres suivants fournis par la publication, nous obtenons l'IMF cherchée.

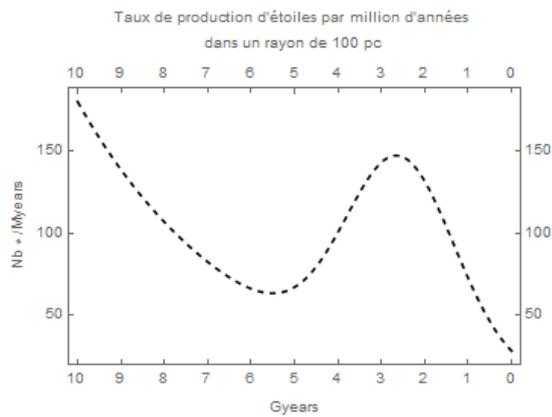
$$\alpha_2 = 1.3; m_2 = 0.5; m_3 = 1.53; \alpha_3 = 1.9; m_1 = 0.09; \alpha_1 = -0.5; m_4 = 10;$$

La fonction obtenue est une densité de probabilité (PDF) en fonction de la masse de l'étoile.

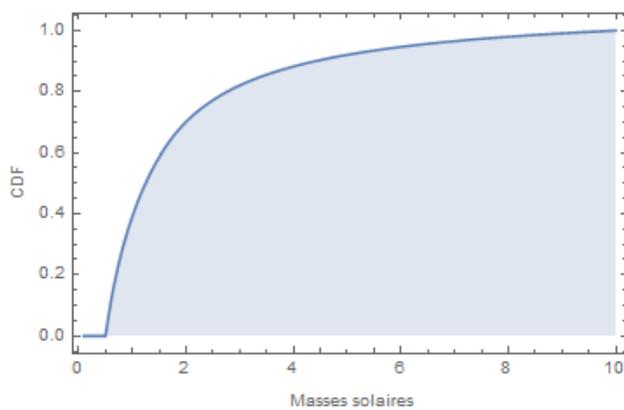


La moyenne en masse est calculée : **Mmoy=1.94**. Cela signifie qu'il faut diviser les masses solaires obtenues par ce coefficient pour traduire le taux de production de masses solaires en taux de production d'étoiles.

Nous obtenons alors la figure suivante utilise ensuite pour établir la figure du nombre d'humanités existantes présentée dans le texte.



Il est aisé de calculer l'intégrale de la fonction IMF : elle est normée à 1 comme il se doit, puisqu'il s'agit d'une densité de probabilité dont on calcule progressivement le cumul.



On peut calculer la probabilité d'avoir des étoiles entre deux bornes :

Par exemple :

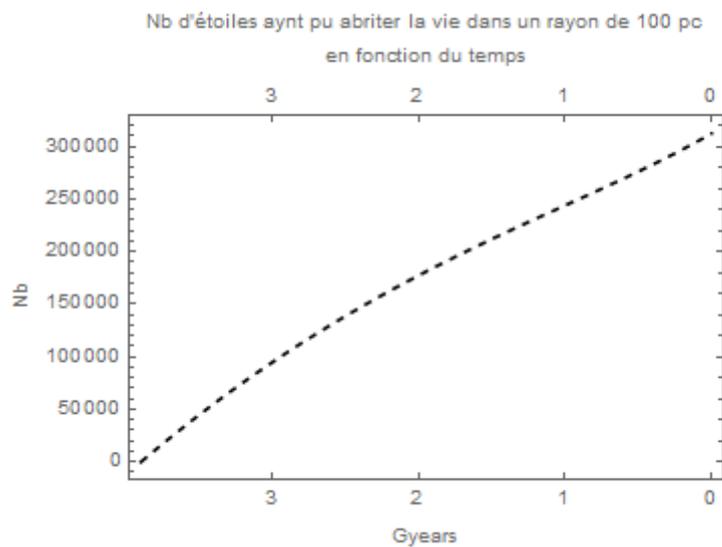
$$\text{CDF}[\mathcal{D}2,1.15] - \text{CDF}[\mathcal{D}2,0.7] = 0.260$$

$$\text{CDF}[\mathcal{D}2,1.1] - \text{CDF}[\mathcal{D}2,0.73] = 0.215$$

Le texte fait le choix d'utiliser l'intervalle {0.73,1.1} afin de ne pas avoir à reprendre **ne**.

Il reste à multiplier le taux de production d'étoiles par 0.0021, puis par différentes valeurs de L pour obtenir la figure du texte, en se calant sur t-4.5 Gyears.

Concernant la somme des humanités ayant pu exister, comme expliqué dans le texte, il faut intégrer la production d'étoiles à partir d'un temps compatible de la production de planètes rocheuses, en l'occurrence à partir de -8.4 GYears.



Puis nous obtenons la figure du texte en multipliant par 0.0021.