Compte rendu du Bar des Sciences du mardi 5 mai 2020
«A la recherche d'intelligences extra-terrestres :
Une nouvelle analyse du Paradoxe de Fermi »

Soirée organisée par : le **« Pavillon des Sciences »** et animée avec dynamisme par **Pascal REMOND**.
Co production : Pavillon des sciences- Pays de Montbéliard Agglomération.
en partenariat avec l'Institut d'Astrophysique de Paris.
Crise sanitaire et confinement obligent, nous avons réalisé ***un Bar des sciences numérique.***

Lieu - Horaire : nous pouvions suivre en direct cette conférence sur Internet via YouTube, en cliquant sur le lien que voici : https://youtu.be/psD6VgEJOQw
Nous pouvions interagir, poser des questions etc….
- mardi 5 mai 2020 - De 18h30 à 19h30

Participation : excellente : **616 internautes** étaient connectés en « live ». Nous avons presque doublé la participation précédente

Thème et Intervenants :
Cette conférence a été animée par **Guillaume Hébrard (IAP)** et transmise via YouTube par **Jean Mouette.**
Ce fut une deuxième! Si ça fonctionne bien nous reprendrons la formule.

- **A la recherche d'intelligences extra-terrestres: une nouvelle analyse du Paradoxe de Fermi**

Par **Nikos PRANTZOS, Astrophysicien, Directeur de Recherche CNRS IAP (Institut d'Astrophysique de Paris)**

Prix de la Société Internationale d'Astronautique pour le livre "Sommes-nous seuls dans l'Univers ?".Ces dernières années, la découverte des plusieurs planètes extrasolaires dans la zone habitable de leurs étoiles a permis d'avoir une idée plus précise sur la fréquence de ces objets et donc du nombre de niches potentielles de vie dans la Voie lactée. A la lumière de ces découvertes, Nikos PRANTZOS présentera une analyse récente du fameux "Paradoxe de Fermi ».
Le paradoxe de Fermi – vieux de 1950- est un argument que l'on invoque lorsque l'on s'interroge sur la possibilité de l'existence d'une civilisation extraterrestre technologiquement avancée dans la Voie lactée. Il fait bien sûr l'objet de beaucoup de débats. "Si ces civilisations existaient, où sont-elles ?" Ce soir nous avons navigué entre science et science-fiction !

Déroulement de la soirée : Ce compte-rendu est réalisé à partir des notes prises par J.P.BULLIARD et n'engage pas la responsabilité du conférencier
Nikos PRANTZOS : commence par une analyse historique de la situation.

Depuis l'Antiquité : le débat sur la pluralité des mondes :
Métrodore de Chios (IVème siècle avant JC) : est un disciple atomiste qui dit qu' « il est aussi absurde de concevoir un champ de blé avec une seule tige qu'un monde unique sans ce vaste univers ».

Platon et Aristote : considèrent qu'il existe un seul monde habité, c'est une conséquence du **Système Géocentrique** et de la physique d'Aristote car ils voyaient la terre au centre du monde, les planètes et le soleil lui tournant autour et l'espace entre l'orbite de la lune et la dernière sphère était occupé par une substance : **l'éther**.
Ce système a persisté en Occident pendant 15 siècles. Il a été enrichi par des arguments théologiques.

Au Moyen-Age : Saint Augustin (354 – 430) : dit que la Mort et la Résurrection du Christ sont des faits uniques dans l'histoire. Cette unicité est incompatible avec l'existence d'autres mondes habités. Cette unicité vient du fait que le Christ est venu sur terre une seule fois, il ne pouvait pas avoir fait la même chose ailleurs.

Albert Le Grand (1193 – 1280) : néanmoins se demande « si Dieu est tout puissant, pourquoi n'aurait-il pas créé d'autres mondes habités ? »

Saint Thomas d'Aquin (1225 – 1274), son discipline, lui donne une réponse par un raisonnement par l'absurde :
Si Dieu avait créé d'autres mondes, il les aurait faits :

- **1) Tous pareils :** ce qui est incompatible avec l'économie de la sagesse divine,
- **2) Tous différents :** cela voudrait dire que certains mondes seraient plus parfaits que d'autres, ce qui est incompatible avec la perfection de l'acte divin.

Donc : Il a créé un seul monde : le nôtre.

Ces arguments peuvent faire sourire aujourd'hui mais, à l'époque, on ne rigolait pas avec le Dogme, c'est ce qui est arrivé à :
Giordano Bruno (1548 – 1600) : ayant dit qu'il existait une infinité de mondes habités, il fut brûlé vif par l'Inquisition.

A la Renaissance
Copernic (1473 – 1543) remplace le Système Géocentrique par le **Système Héliocentrique**. Désormais la terre n'est plus au centre du monde, c'est le soleil qui occupe ce centre et toutes les planètes lui tournent autour. Il a sorti la terre de la position centrale, désormais **notre position dans l'univers n'a rien d'exceptionnel**.

Galilée (1564 – 1642) et Newton (1642 – 1727) : démontrent que les lois physiques sont les mêmes partout, ici-bas et là-haut. La pomme qui tombe au sol suit les mêmes lois que les planètes qui tournent autour du soleil. Donc, exit la physique aristotélicienne. Cela a été confirmé de nos jours, on applique les mêmes lois de la physique pour des corps à des milliards d'années-lumière que pour nos expériences dans nos laboratoires. **On peut extrapoler en pensant qu'il y ait une infinité de mondes ailleurs, pourquoi pas ?**

Et de nos jours, où en est-on ?
Mais qu'en est-il des **lois biologiques, sociologiques** etc. qui régissent **le développement de la Vie et de l'Intelligence ?** On n'est pas sûr que ce genre de lois s'applique ailleurs. En tout cas, **jusqu'à aujourd'hui, on n'a pas rencontré un seul exemple de vie en dehors de la terre**. Ce n'est pas faute d'avoir essayé.

Recherche de vie dans le Système Solaire :
Déjà **on a envoyé nos sondes aux quatre coins de notre système solaire** dans la seconde moitié du XXème siècle. Et aucune trace de vie, même au niveau microscopique, n'a été trouvée dans notre Système Solaire. On sait maintenant que **les 4 planètes géantes gazeuses (Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune) sont certainement hostiles à la vie** (telle que nous la connaissons).
Il y a aussi **les planètes telluriques (constituées de solides : roches et métaux) :** on sait que cette hostilité à la vie vaut aussi pour l'atmosphère dense et torride de **Vénus**, la surface brûlante de **Mercure** et la surface glacée de **Pluton**.

Il reste **Mars** et quelques satellites de planètes géantes. On a envoyé des sondes sur Mars depuis longtemps (1962). On va encore prochainement y envoyer la sonde « **Perseverance Rover** » (lancement prévu en août 2020 pour un atterrissage en février 2021?). **On va sonder s'il y a des traces de glace dans le sous-sol de Mars**.
Des **traces de vie ancienne microscopique pourraient donc exister au sous-sol de Mars** où l'eau liquide a probablement coulé il y a des milliards d'années.
On va chercher aussi à **savoir s'il se trouve des formes de vie dans les satellites Europe** (satellite de **Jupiter**) et **Encelade** (satellite de **Saturn**e) sous leurs épaisses couches de glace ?
La NASA a une mission programmée pour 2030 : « Europa Lander ». Elle veut envoyer un robot à la surface d'Europe pour y étudier les réactions chimiques et biologiques.

Question d'un participant : Vous avez parlé de la notion de pluralité des mondes chez Epicure, cette notion est assez abstraite. Ne pensez-vous pas que Giordano Bruno (dont vous avez parlé précédemment) ait une notion plus concrète de la pluralité des mondes ?

Réponse de Nikos PRANTZOS : chez les anciens, comme Epicure, l'expression "mondes" signifiait "ce qu'on voit autour de nous" : une Terre au centre (selon eux), et Soleil, planètes, étoiles autour d'elle : c'est ça UN MONDE pour les anciens, et pour les atomistes il y en a plein (peut-être un nombre infini) de ces mondes. Aujourd'hui, quand on cherche des "mondes habités" on a en tête juste des planètes. Donc, les anciens donnent au mot une signification presque équivalente à ce qu'on appelle "l'univers" (pas tout à fait, ils ne pourraient jamais imaginer que l'univers est aussi grand).

Au-delà du Système Solaire :
Il y a les étoiles et, pendant très longtemps, il fut impossible de déterminer si autour de certaines étoiles gravitaient des planètes ? Car les instruments d'astronomie étaient basés sur le captage de la lumière. Et une planète passant près d'une étoile réfléchit très peu de lumière, inobservable avec nos moyens d'époque. C'était comme si on avait une bougie à côté d'un phare : à distance, il est impossible de voir la luminosité de la bougie. **Sauf si l'on cherche non pas une longueur d'onde lumineuse mais une longueur d'onde de signaux radio extraterrestres**. C'est ce qu'on fait les chercheurs américains **Giuseppe Cocconi et Philip Morrison en 1959**. Il y eut une explosion dans **l'émission des ondes radio** à cause de l'expansion du radar lors de la seconde guerre mondiale.
Ces chercheurs pensaient que les ondes radio sont le meilleur moyen d'émettre des signaux interstellaires parce que :

1) Ces signaux ne sont pas absorbés par le gaz et les poussières du disque de la Galaxie ; on peut émettre plus loin en radio qu'avec des ondes lumineuses.
2) Ces signaux nécessitent moins d'énergie que les autres longueurs d'onde électromagnétiques pour le transport d'une quantité d'information donnée.

Leur article se terminait par cette phrase : « il est difficile d'évaluer nos chances de succès ; mais si on ne cherche pas, elles seront nulles ».
En 1960 : Frank Drake, tout jeune radioastronome, démarre le projet OZMA : 150 heures d'écoute des étoiles tau Ceti et epsilon Eridani avec le radiotélescope de 26m de Green Bank (Virginie occidentale – USA). Cela n'a rien donné mais **en 1961, il organise la première conférence à Green Bank sur la Communication avec l'Intelligence Extraterrestre (CETI).** Pour préparer cette conférence, il a cherché quelles sont les chances de détecter par les ondes radio des signaux extraterrestres. **Notre Galaxie compte environ 100 Milliards d'étoiles**. **Il veut estimer combien d'entre elles sont de « bons candidats » pour abriter des civilisations technologiques ? Il a donc créé en 1961 sa formule portant le nom d'équation de Drake.**

L'équation de Drake : **donne le nombre N de civilisations technologiques (communicantes par radio) dans la Voie Lactée.**

$$N = R^* \times f_{PLA} \times n_E \times f_{VIE} \times f_{INT} \times f_{TEC} \times L$$

Dans laquelle :

R^* est le taux de formation stellaire dans la Voie Lactée.

f_{PLA} donne la fraction des étoiles ayant des planètes

n_E est le nombre de planètes telluriques dans les zones continûment habitables de ces étoiles

f_{VIE} représente la fraction de planètes habitables sur lesquelles la vie est effectivement apparue

f_{INT} fournit la fraction de ces planètes où l'évolution a produit des êtres doués d'intelligence

f_{TEC} est la fraction de planètes dont les êtres sont capables de communiquer par des signaux radio

L représente la durée de vie moyenne de ces civilisations technologiques

A l'époque de Drake, en 1960, seul le 1er terme R^* était connu. On ne savait pas, à l'époque, s'il y avait d'autres planètes en dehors de notre système solaire. Maintenant on sait qu'il y en a. On a donc estimé f_{PLA} et n_E dans les **années 2012**. Les **4 derniers termes étant toujours inconnus**.

Actuellement on a donc évalué N entre 1 million et plusieurs millions.

Cette **équation de Drake n'a pas de pouvoir prédictif.** Elle est cependant importante et a joué un rôle prépondérant pendant les soixante ans après sa formulation. Elle nous a aidés à structurer notre pensée sur ce phénomène extrêmement complexe de la vie dans notre galaxie.

Depuis les années 1990, on a été plus modeste et moins optimiste sur la possibilité de communication extraterrestre dans l'univers. Le projet est devenu **le SETI (Seach for Extra-Terrestrial Intelligence = recherche d'une intelligence extraterrestre)** pour l'écoute et l'émission des signaux radio.

Le SETI fut promu par l'**astronome américain Carl Sagan.**

La **tâche est complexe** car :

- On ne sait pas dans quelle direction chercher ?
- A quelle fréquence radio doit-on travailler ?
- Combien d'étoiles faut-il écouter ?
- Pendant combien de temps ?

Ces questions ont déçu le Congrès Américain qui arrêta de financer ce programme. **Depuis SETI fonctionne sur des fonds privés**, tels ceux fournis par **Paul Allen**, le co-fondateur de Microsoft. Sa famille et lui-même ont fait de donations (pratique courante aux USA) à l'Université de Californie, qui a construit **le réseau de téléscopes « Allen Telescope Array »** (utilisant aussi d'autres sources de financement) et l'a nommé en l'honneur de Paul Allen et de sa famille.

Plus récemment en 2015 : le **russe Yuri Milner** a décidé de **fournir 100 Millions de $ sur 10 ans au projet « Breakthrough Listen Initiative = Percée de l'Initiative d'Ecoute ».** Programme plus ambitieux que les précédents : son objectif étant **d'écouter 1 million d'étoiles proches** dans une large gamme de fréquences en utilisant des **télescopes extrêmement sensibles** tels que « **Green Bank aux USA** », « **Parkes en Australie** » et **« Meerkat en Afrique du Sud** ».

En 1995 : première détection de planète extrasolaire par Didier Queloz et Michel Mayor (la première exoplanète découverte : 51 Pegasi b, planète en rotation autour de son étoile 51 Pegasi). Pour cette importante découverte, ils reçurent le **Prix Nobel de Physique en 2019**. C'est une révolution presqu'aussi importante que celle de Copernic. On a su pour la première fois qu'il y avait des planètes tournant autour d'autres étoiles que le soleil.

Depuis on a détecté plus de 4000 exo-planètes gravitant autour d'étoiles situées jusqu'à 1500 années-lumière de la Terre. Mais toutes ces planètes ne sont pas considérées comme intéressantes pour nous du point de vue de la vie et de l'intelligence. Les **planète**s que l'on considère comme **intéressantes** sont les **Planètes Telluriques dans la zone habitable de leur étoile**, c'est-à-dire celles où la température permet l'existence d'eau liquide. (L'eau liquide étant nécessaire pour la vie telle que nous la connaissons.) Ainsi pour le système solaire, si l'on note les planètes les plus proches du soleil, on trouve Mercure, puis Vénus, là où la température est trop élevée et, en s'éloignant : la terre (où la température et l'eau permettent la vie), puis plus on s'éloigne du soleil, plus la température est froide, trop froide pour la vie, comme sur Mars)

D'autres systèmes solaires ont été découverts comme celui de l'étoile TRAPPIST-1 qui possède 7 planètes notées b, c, d, e, f, g, h, de la plus proche de l'étoile à la plus lointaine. **Les planètes e, f et g seraient dans une zone « habitable ».** L'étoile TRAPPIST-1 est beaucoup plus petite que le soleil. **On estime aujourd'hui que la fraction d'étoiles de type solaire avec des planètes telluriques dans leur zone habitable égale à 5 à 10%.**

Le **nombre total de ces étoiles, de type solaire**, avec quelques planètes habitables est estimé à **quelques milliards**.

Simplification de l'équation de Drake : on est allé plus loin dans la recherche et l'on a regroupé les termes de l'équation de Drake de la façon suivante :

$$N = R^* \times f_{PLA} \times n_E \times f_{VIE} \times f_{INT} \times f_{TEC} \times L$$

Devient :

$$N = R_{ASTRO} \times f_{BIOTECH} \times L$$

Avec :

$R_{ASTRO} = R^* \times f_{PLA} \times n_E$ = **Facteur Astronomique**

$f_{BIOTECH} = f_{VIE} \times f_{INT} \times f_{TEC}$ = **Facteur Biotechnologique**

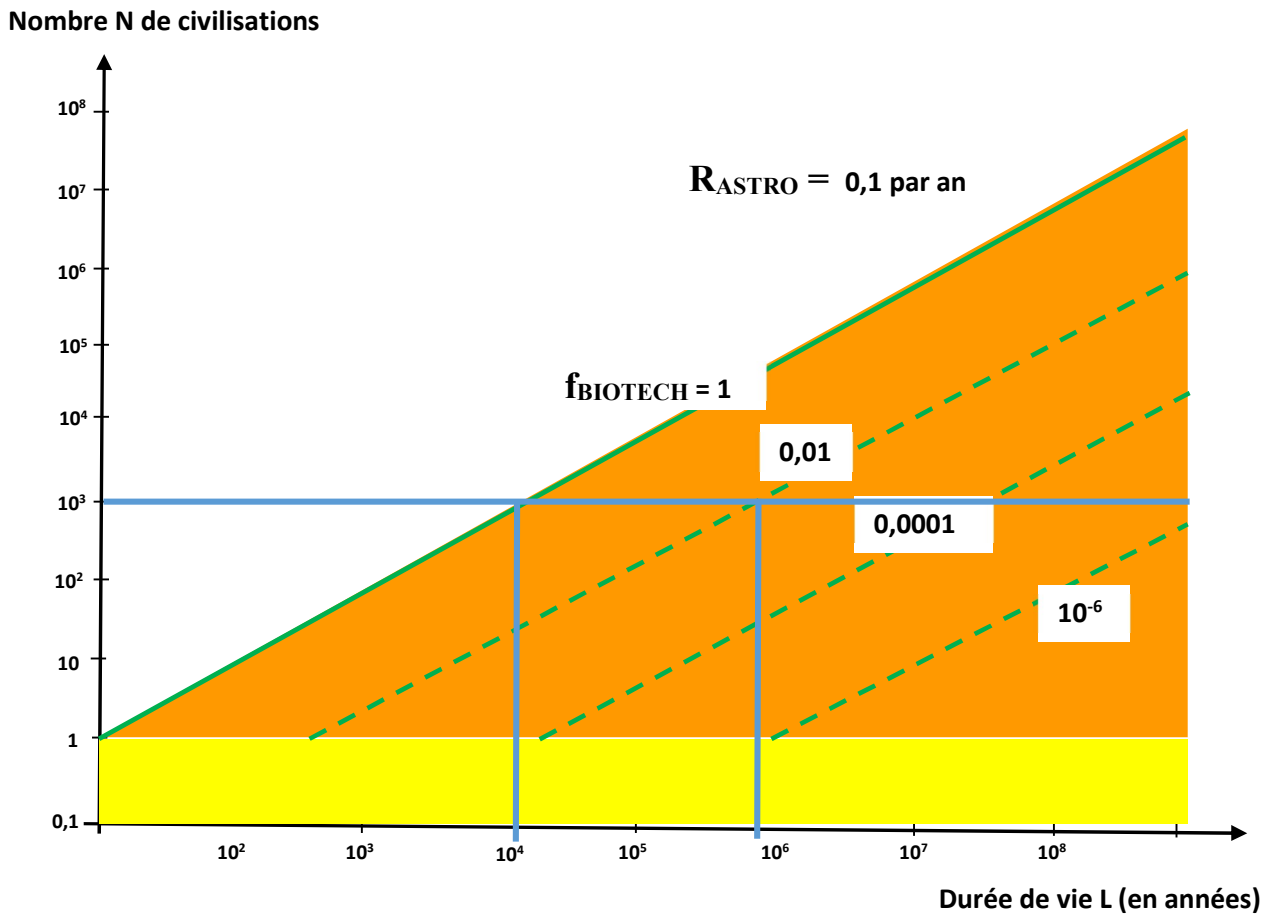
R_{ASTRO} donne le taux de formation des planètes habitables (il est mesuré de 0,1 par an, c'est-à-dire que tous les 10 ans une planète habitable apparait dans notre galaxie)

$f_{BIOTECH}$ est la fraction des planètes ayant une technologie, ce terme est forcément <1 et même beaucoup plus petit que 1.

L est toujours la durée de vie des civilisations (au niveau technologique approprié) 10

Diagramme du nombre de civilisations N en fonction de la durée de vie L :

$$N = R_{ASTRO} \times f_{BIOTECH} \times L$$



Question d'un participant : sur ce diagramme, on voit que les droites en diagonales liées au facteur biotechnologique sont vraiment importantes. A-t-on espoir de pouvoir un jour déterminer ce facteur ?
Réponse de Nikos PRANTZOS : ce facteur biotechnologique, composé de trois termes indique la fraction de planètes où la vie est apparue. Je ne vois pas comment on va pouvoir dans l'avenir déterminer ce facteur lié à l'intelligence et à la technologie. Les signaux radio sont des techno-signatures mais je ne vois pas comment on va pouvoir déterminer ce facteur $f_{BIOTECH}$. La seule possibilité à l'avenir serait de trouver des gaz qui sont des bio-signatures comme le méthane.
En regardant le diagramme ci-dessus, on voit qu'on peut atteindre un nombre de civilisations égal à 1000 (ligne bleue horizontale) de deux façons différentes :

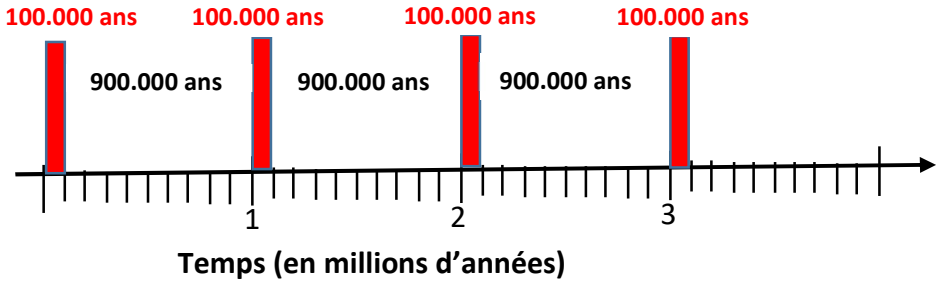
- Soit avec un facteur $f_{BIOTECH}$ =1 pour une durée de vie de civilisation égale à 10.000 ans
- Soit avec un facteur $f_{BIOTECH}$ = 0,01 pour une durée de vie de civilisation égale à 1.000.000 ans

Les deux combinaisons donnent le même résultat (1000 civilisations) mais les implications ne sont pas les mêmes
Le nombre de civilisations est proportionnel à la durée de vie : plus la durée de vie est grande, plus le nombre de civilisations communicantes est grand. La ligne oblique verte correspondant à $f_{BIOTECH}$ =1 signifie que toutes les planètes développent une forme de vie technologiquement avancée. Cette situation est très optimiste :

probablement 1 sur 100, 1 sur 1000 ou 1 civilisation sur 10.000 développeront une vie technologiquement avancée (ce qui correspond aux autres lignes obliques vertes qui sont en pointillés).

Remarques de quelques internautes participants : on voit actuellement les réactions des internautes, certains disent que la réponse au paradoxe de Fermi semble très simple, c'est parce que la durée de vie des civilisations est vraiment très courte.

Nikos PRANTZOS continue son exposé : **on a l'impression** qu'il y a une **limite inférieure au nombre N**. Celui-ci ne peut être inférieur à 1 (parce qu'on est là il y a au moins une civilisation technologique et communicante dans la voie lactée). Mais on voit qu'en combinant ces chiffres, sur cette partie du diagramme, **on peut avoir N = 0,2.** On peut donner **à ce chiffre une signification statistique**. Imaginons un village en France abandonné par ses habitants. Un seul a conservé sa maison et vit en ville la plupart du temps. Mais chaque été il revient durant un mois dans la maison de ce village puis revient à la ville. Si on voulait faire un recensement de population et attribuer une population à ce village, on ne pourrait mettre ni un ni zéro. Ce n'est pas tout à fait zéro car si on venait dans ce village le mois où le citadin passe ses vacances, on dirait qu'il y a une personne dans ce village. On ne peut mettre un comme valeur également car la plupart du temps, il n'y a personne. En réalité, si on va visiter ce village à n'importe quel moment, **il y a une chance sur 12 qu'on tombe sur une personne on pourrait donc dire que la population est de 1/12.**
De la même façon on pourrait définir N<1 : car **« seuls dans l'espace » ne signifie pas forcément être « seuls dans le temps », ni « être les premiers », ni être « uniques ».**
Prenons par exemple une civilisation qui vit 100.000 ans puis disparaît pendant 900.000 ans, ceci se répétant toutes les millions d'années. On obtiendrait alors le diagramme suivant :



Il se peut donc que des milliers de civilisations technologiques aient bien pu éclore dans la Galaxie, vivre longtemps (des dizaines ou des centaines de milliers d'années) et même coloniser leur voisinage, étant « seules » dans la Galaxie pendant tout ce temps, puis disparaître, sans pouvoir communiquer avec d'autres, ignorant que d'autres les ont précédées et inconnues à leurs successeurs. Il se peut aussi que notre propre civilisation appartienne à cette classe.

Le paradoxe de Fermi ou, de façon plus correcte, la question de Fermi :
Enrico Fermi (1901 - 1954) est l'un des plus grands physiciens du XXème siècle, le dernier grand physicien, aussi bien à l'aise avec la théorie qu'avec l'expérience. Il a eu le **prix Nobel de physique en 1938** pour sa théorie sur la radioactivité. **C'est lui qui a réussi à produire pour la première fois une réaction de fission en chaîne**. Il a participé au **« projet Manhattan » de la construction de la 1ère bombe atomique** fuyant dans les années 1930 l'Italie de Mussolini pour émigrer aux USA. En discutant au **Laboratoire militaire de Los Alamos aux USA** avec ses collègues en 1950, dont **Edward Teller, père de la Bombe à Hydrogène**, **sur les OVNIs (UFOs),** les premiers rapports sur les OVNIs ayant circulé aux USA en 1947, **tous conviennent que ces OVNIs ne pouvaient pas être des extraterrestres** (vaisseaux, robots, artefacts) sur terre mais à un moment **Fermi pose la question : « Où sont-ils ? ».** Comment se fait-il que s'il existe des civilisations extraterrestres, on ne les voit pas ? Il n'y a aucun signe de la présence de ces extraterrestres sur terre. Fermi n'a jamais publié ses réflexions à ce sujet et cette conversation est restée ignorée pendant longtemps. Probablement il a dû calculer quelque chose comme le calcul fait dix ans plus tard par Drake.
L'argument de Fermi a été redécouvert complètement par hasard et de façon indépendante **en 1975** par **l'astronome Michael Hart et les conclusions de Hart étaient radicales** :

1) **Il y a peu d'autres civilisations (probablement aucune) dans la Galaxie**
2) **La recherche de signaux extraterrestres est une perte de temps et d'argent.**

Cet article, annulant de nombreux travaux de ses collègues, a suscité pas mal de réactions et c'est suite à ces débats que **cette problématique fut qualifiée de « Paradoxe de Fermi » 25 ans après sa formulation par Fermi lui-même**.

Il s'avère que déjà **au XVIIème siècle**, **Bernard le Bovier de Fontenelle (1657 – 1757)** avait publié un livre s'intitulant **« Entretiens sur la pluralité des mondes ».** Le livre est écrit sous forme de dialogue entre un philosophe et une charmante jeune Marquise qui joue le rôle de candide. A un moment **le philosophe dit** : « Il existe d'autres mondes habités dans l'Univers, même sur la lune ». **La Marquise répond** : « si c'était le cas, les habitants de la Lune auraient dû nous rendre visite maintenant ». On retrouve dans cette phrase l'idée de Fermi : « mais où sont-ils ? ».
Le philosophe répond : « Le temps nécessaire pour maîtriser le voyage spatial est très long. S'il est supérieur à 6000 ans on comprend pourquoi ils n'ont pas pu encore arriver ici.
Pourquoi 6000 ans ? Parce qu'à l'époque on n'avait aucune notion de l'âge de la terre et l'on se basait sur les récits bibliques. En comptant toutes les générations depuis Adam, on arrive à ce chiffre d'environ 6000 ans. La réponse du philosophe est symétrique entre ce qui concerne les terriens et les habitants de la lune. On avait le même temps pour accomplir la distance terre-lune. Si nous n'avons pas pu aller sur la lune, c'est normal que les habitants de la lune n'aient pas pu aller sur la terre. A notre époque, l'argument de Fermi n'est pas symétrique : nous ne pouvons pas aller sur les étoiles aujourd'hui mais nous sommes apparus relativement tard, notre soleil est là depuis environ 4 milliards d'années mais il y a environ la moitié des étoiles de la Galaxie qui sont plus anciennes que le soleil. Donc les habitants des autres planètes auraient eu tout le temps de venir jusqu'ici mais ils ne l'ont pas fait donc ils n'existent pas (argument de Fermi).
Le Russe Konstantin Tsiolkovski (1857 – 1935), mathématicien, a créé les équations des fusées. Il était aussi un philosophe visionnaire. Il avait envisagé l'expansion de l'espèce humaine dans l'espace pour aller vers les étoiles, utiliser l'énergie solaire. Il disait que la terre est le berceau de l'humanité mais personne ne passe toute sa vie dans le berceau. Dans **son livre « Rêves de la Terre et du Ciel » (1912)** il pensait que les extraterrestres existent mais qu'ils nous ont laissé évoluer par nous-mêmes pour atteindre la perfection et avoir notre contribution singulière à l'évolution du Cosmos. C'est une autre classe de réponse au paradoxe de Fermi.
Il est amusant de voir que cette réponse de Tsiolkovski correspond assez bien à celle de **la série de films Star Trek (1967).** Dans cette série il y a la **Directive Première (XXIVème siècle)** selon laquelle, la Fédération des planètes unies n'est pas supposée interférer dans le développement des autres espèces de l'univers. Le charme de cette série était que les protagonistes devaient trouver des moyens pour contourner cette Directive Première.

Comment formuler le Paradoxe de Fermi – Hart de manière plus analytique ?
Comme tout paradoxe, on fait **quelques hypothèses** et, à la fin, on conclut quelque chose qui semble paradoxal. Dans ce cas, la solution du Paradoxe consiste à montrer qu'une ou plusieurs hypothèses sont fausses.
4 hypothèses ont été formulées :

1) Notre civilisation n'est pas la seule civilisation technologique dans la Galaxie
2) Notre civilisation est « typique », elle n'est pas la plus avancée ni la seule désirant explorer et communiquer
3) Le voyage interstellaire n'est pas trop difficile pour une civilisation légèrement plus avancée que la nôtre. Certaines ont dû entreprendre ces voyages
4) La colonisation de la Galaxie est relativement rapide (Echelle de temps $<10^8$ ans, ce qui est plus petit que 1% de l'âge de la Voie Lactée) Les étoiles les plus anciennes sont là depuis 12 milliards d'années.

Si l'on met ensemble ces 4 hypothèses (1 + 2 + 3 + 4), la conclusion qui s'impose serait : **« Ils » devraient être ici !**
Alors Fermi pose la question : « Où sont-ils ? »

Remarques de quelques internautes participants : à partir de l'explication du nombre de civilisations <1 et du dernier graphique donné plus haut, on pourrait imaginer que les civilisations sont apparues plusieurs fois sur la terre.

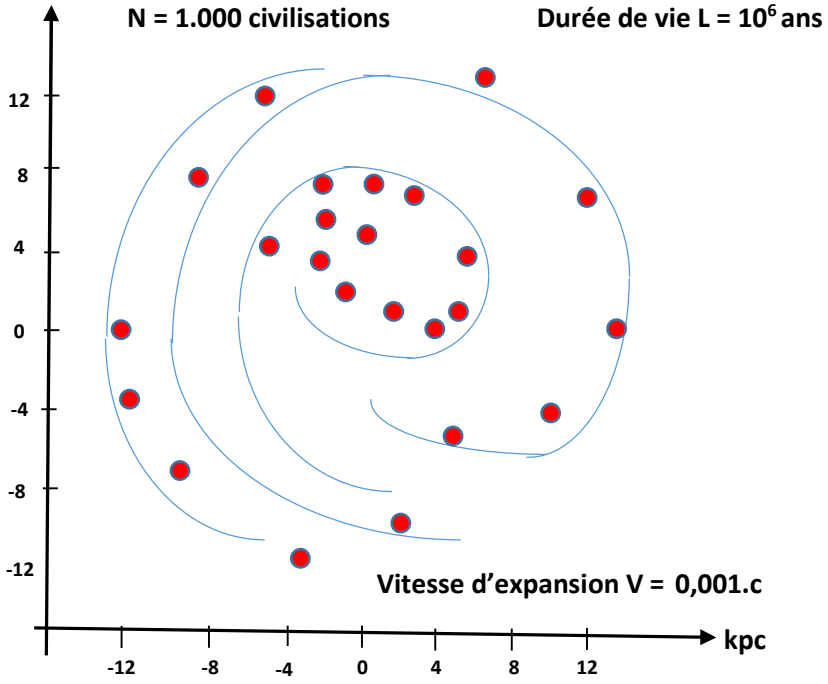
Question d'un participant : à partir de l'hypothèse 4 et de la colonisation relativement rapide de la Galaxie, pouvez-vous nous donner les éléments qui permettent de quantifier ce point et quelle est l'échelle de temps utilisée pour ce calcul ?
Réponse de Nikos PRANTZOS : les gens qui ont calculé cette échelle de temps ont dû faire aussi quelques hypothèses que l'on peut, ou non, réfuter. **On a une limite inférieure car on connait la taille de la Galaxie (elle a 100.000 années-lumière de diamètre) Il est donc claire que, même à la vitesse de la lumière, on ne peut pas coloniser la Galaxie en moins de 100.000 ans.** La question est : « quelle est une échelle de temps raisonnable ?», cela dépend de combien ils sont car il n'est pas nécessaire qu'une civilisation colonise toute la Galaxie. S'il y en a 10.000, chacun peut coloniser une partie de la Voie Lactée. Si donc une partie de la Voie Lactée est occupée par 10.000 civilisations, nous devrions voir au moins une de ces civilisations. Il existe beaucoup d'hypothèses mais on peut les quantifier et il faut faire aussi des hypothèses sur la vitesse d'expansion de chaque civilisation, elle doit être inférieure à la vitesse de la lumière et c'est de là que découle **la limite inférieure de 100.000 ans**.

Nikos PRANTZOS continue son exposé : je sais qu'il y a beaucoup de gens qui ont leur propre réponse au Paradoxe de Fermi. Je vous conseille alors **ce livre (en anglais) de Stephen Webb : « si l'univers est grouillant d'extraterrestres… Où se trouvent-ils ? »** - édité en 2010 avec ce sous-titre : **« 50 solutions au Paradoxe de Fermi »**. En 2015 il fait une seconde édition de son livre avec ce sous-titre : **« 75 solutions au Paradoxe de Fermi et le problème de la Vie Extraterrestre »**. Avec une préface de Martin Rees.
Je suis sûr que, s'il y a une 3ème édition, il y aura 100 solutions au Paradoxe de Fermi. La plupart de ces solutions appartiennent à une **classe de solutions que je qualifierais de « sociologiques », malheureusement non-quantifiables.**

Quelques contraintes quantifiables de ce Paradoxe de Fermi :

- La Galaxie compte 100 milliards d'étoiles
- Elle se situe dans un disque de 100.000 années-lumière de diamètre (soit 25 kpc = 25 kiloparsec)
- Ce disque a 2.000 années-lumière d'épaisseur
- Le Soleil se trouve à 26.000 années-lumière du Centre Galactique (il est donc très décentré dans la Galaxie)

Faisons une simulation de la Distribution aléatoire pour N = 1.000 civilisations de durée de vie L = 1 million d'années et divers âges A.
On obtient ce diagramme : (avec en fait **un millier de points rouges pour représenter les civilisations** dans la Galax **kpc**



La taille des cercles rouges devrait, en fait, être variable car elle représente la **taille de la sphère d'influence de chaque civilisation.**
Ces civilisations se répandent dans la Galaxie avec une vitesse V (ici V = 0,001.c où c représente la vitesse de la lumière= et aujourd'hui ces populations occupent des sphères de rayon R = V.A égale au produit de la vitesse d'expansion par l'âge de la civilisation considérée).
On peut alors définir une **probabilité de contact de ces civilisations : P = Volume exploré / Volume Galactique**
Cette probabilité dépend du nombre N de ces civilisations, de leur durée de vie L et de leur vitesse d'expansion V.
Sur cette base on a fait de **nombreuses simulations en faisant varier N de 2 à 1.000, en faisant varier L de 10^4 ans à 5 x 10^7 ans et pour des vitesses allant de V = 0,0001.c à 0,05.c**

Dans les simulations présentées, trois sont dignes d'intérêt :

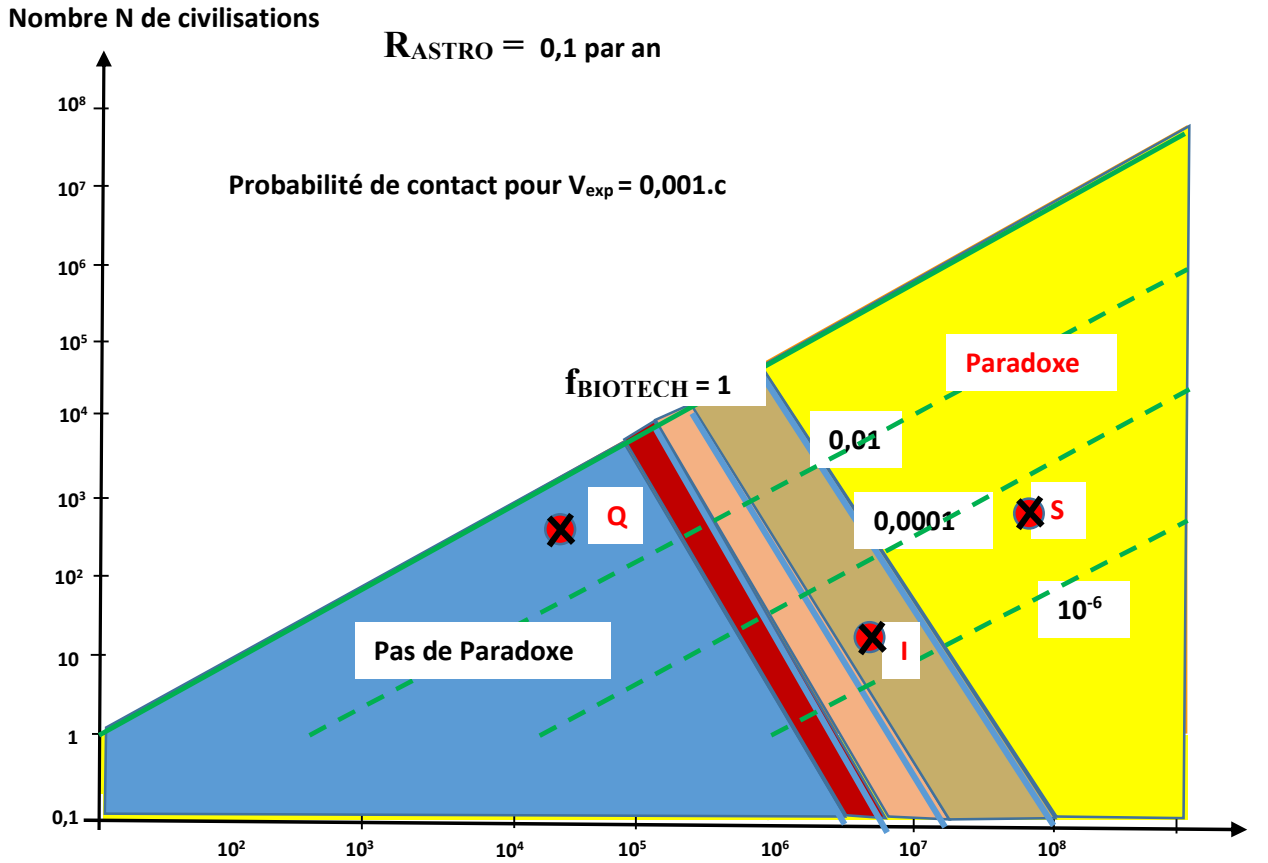
- La **simulation Q** pour laquelle : **N=1.000 ; L=10^5 ans ; V=0,001.c** montre qu'il n'y a qu'une **fraction infime de civilisations colonisées** (Probabilité de contacts P proche de zéro)
- La **simulation S** pour laquelle : **N=1.000 ; L=10^7 ans ; V=0,001.c** montre que **la Galaxie toute entière a été colonisée** (Probabilité de contacts P égale à 1)

- La **simulation I** pour laquelle : **N=10 ; L=10^7 ans ; V=0,001.c** montre un **résultat intermédiaire** entre les simulations Q et S (**Probabilité de contacts P proche de 0,5**)

Pourtant, **dans les trois cas, on a la même vitesse d'expansion**, proche de **un millième de la vitesse de la lumière**.

Reprise du Diagramme du nombre de civilisations N en y ajoutant les probabilités de contacts :

$$N = R_{ASTRO} \times f_{BIOTECH} \times L$$



Graduation des probabilités de contacts sur le diagramme :

Forte : P proche de 1
Elevée : P = 0,1
Moyenne : P = 0,01
Légère : P = 0,001
Faible = P proche de 0

La probabilité de contacts varie avec $f_{BIOTECH}$ et L.

On a colorié **sur le diagramme des zones en fonction de la probabilité de contacts des civilisations**. Lorsque cette **probabilité est faible (zone bleue)** il n'y a pas de Paradoxe. Par contre ce Paradoxe existe lorsque **cette probabilité est forte (zone jaune)**. Entre ces deux extrêmes, il y a 3 zones intermédiaires (couleurs rouge, orange et brune). **On a aussi situé sur le diagramme les 3 simulations importantes Q, S, I** en tenant compte de leur niveau de probabilité de contacts.

Avec ce diagramme, on peut voir de manière quantitative quelles sont les contraintes pour qu'il y ait ou non un Paradoxe. Si par exemple il s'avère que les civilisations vivent moins de 100.000 ans ou de un million d'années, alors il n'y a pas de Paradoxe, elles n'ont pas le temps d'arriver jusqu'ici. Cela, c'est pour une vitesse d'expansion égale à un millième de la vitesse de la lumière. Si vous allez à une vitesse plus élevée, les courbes se déplacent vers la gauche du diagramme. Je vous rappelle aussi que **la durée de vie des espèces sur la terre est L = 1 million d'années. Le**

Paradoxe de Fermi existe pour des valeurs élevées de la durée de vie L (quelques millions d'années). Il faut dire aussi que le facteur $f_{BIOTECH}$ de 1 est aussi sur-optimiste. D'autres facteurs beaucoup plus faibles sont plus réalistes. Par exemple, s'il y a une civilisation sur 100 qui émerge sur une planète habitable ou sur 100 planètes habitables une civilisation, alors il faudra oublier la partie supérieure du diagramme. Et si c'est une planète sur 10.000 il faut oublier cette partie supérieure du diagramme. Et si les civilisations technologiques émergent une fois sur un million de planètes habitables, il faut oublier aussi cette partie-là. **Donc pour que le Paradoxe de Fermi existe, il faut aussi que le facteur fBIOTECH ne soit pas trop faible (supérieur à 10-6).**

De nombreux biologistes (E. Mayr, G.G.Simpson, S.J.Gould,…) sont très sceptiques quant à l'existence d'une autre forme de Vie Intelligente dans la Voie Lactée, compte-tenu de l'improbabilité du chemin évolutif qui a conduit à l'émergence de l'Intelligence sur la terre. Le chemin qui mène de la vie unicellulaire à la vie pluricellulaire n'est pas simple et à sens unique : **l'évolution de la terre a connu cinq grandes catastrophes dans les dernières 530 millions d'années de vie pluricellulaire sur notre planète**. Sur le diagramme montré en diapositives, on voit deux de ces grandes catastrophes :

- **L'atterrissage du météorite il y a 66,4 millions d'années** (à la fin du Mésozoïque et au début du Cénozoïque) qui a conduit à **l'extinction des dinosaures**. Mais si cette météorite était arrivée à son rendez-vous avec une heure de retard, alors les dinosaures seraient toujours là et les mammifères qui étaient présents à l'époque n'auraient jamais pu s'émanciper et donner l'évolution jusqu'à l'homme.
- **L'extinction de masse il y a 280 millions d'années** (dans le Paléozoïque) qui a abouti à **l'extinction de 95% des espèces.**

Dans ces conditions, les résultats qui ont amené à la vie technologique sont dus beaucoup au hasard. Ce n'est pas l'avis de tous les biologistes, mais cependant d'un grand nombre de biologistes.

Alors, où sont-ils ?

Voici ma classification personnelle des réponses :

1) **Ils sont ici :** ils – ou leurs sondes – sont venus par le passé et ont observé – ou même « créé » - nos ancêtres ; ils ont laissé leurs sondes sur Terre ou quelque part dans le Système Solaire ; nous devrions chercher mieux pour découvrir leurs traces (ainsi pensent **A.Clarke** et **Papagiannis**). Mais pour l'instant, on n'a rien trouvé.
2) **Ils sont Là-bas mais** : (il y a **3 classes de réponses** qui ne sont pas toutes au même niveau)

REPONSES SOCIOLOGIQUES - Ils ne veulent pas venir car ils ont d'autres intérêts, - Ils ne se manifestent pas (comme le pensent **Tsiolkovsky** et **Ball**) parce qu'ils ont peur de nous ou veulent nous laisser nous émanciper nous-mêmes,
REPONSES PHYSIQUES - Ils sont rares car ils ont un facteur $f_{BIOTECH}$ faible et/ou ils ne peuvent pas, - Ils ont une courte durée de vie (facteur **L** faible comme le pense Fontenelle),
REPONSES SOCIOLOGIQUES - L'expansion interstellaire n'est pas assez rapide (vitesse d'expansion V faible) voire impossible (comme le croient **Hoyle** et **Drake**). Mais aucune loi physique n'empêche le voyage interstellaire.

3) **Ils sont nulle part** : nous sommes seuls comme le croient des biologistes et des astronomes (Hart, Tipler, Bracewell + Simpson, Mayr, Gould).

Sont-ils ? on peut se demander : « est-ce qu'ils existent ? »

- **Certains pensent, s'ils existent, qu'ils pourraient beaucoup apporter à l'espèce humaine c**ar, avec leur expérience, ils ont traversé beaucoup de difficultés et il serait bon pour nous de savoir comment ils les ont résolues ? Ils sont passés à travers beaucoup de filtres et pourraient nous indiquer, par exemple, comment faire pour ne pas nous détruire ? (par une catastrophe nucléaire ou par un virus comme on a actuellement).
- **D'autres pensent, au contraire, que ce serait très dangereux de les rencontrer**.

Tout cela est fort bien décrit par **Arthur C. Clarke (1968) par son livre « 2001, Odyssée de l'Espace »** : **« un jour, entre les étoiles, nous rencontrerons nos égaux ou nos maîtres »**. C'est l'espoir ou la crainte. Il est tout à fait aussi possible que nous rencontrions personne, auquel cas il faut aussi garder dans notre tête une possibilité de solidité cosmique.

Question d'un participant : certains biologistes sont plus optimistes et pensent que la vie pourrait se développer facilement même dans des conditions extrêmes (dans l'eau, le méthane). Qu'en pensez-vous ?
Réponse de Nikos PRANTZOS : je ne suis pas biologiste. **On a ici beaucoup parlé des civilisations technologiquement avancées**. Mais **la vie en tant que telle est quelque chose de complètement différent :** on peut imaginer des milieux encore plus extrêmes que ceux que vous signalez, par exemple une vie ayant comme solvant, non pas l'eau liquide mais l'ammoniaque liquide, on peut aussi penser à **des formes de vies non pas basées sur le carbone mais sur le silicium** qui peut former des liaisons moléculaires assez développées, on peut imaginer tout ce qu'on veut. Il y a même des gens qui **ont imaginé des formes de vie à la surface des étoiles à neutrons**, basées sur la force nucléaire et pas sur la force électromagnétique. **Tout cela reste dans le domaine du possible**.
Comme nous le savons tous, **quand on perd nos clés la nuit, on les cherche surtout sous le lampadaire ! Il est difficile de chercher ailleurs,** non pas parce qu'on manque d'imagination mais parce que l'on ne peut pas brasser toutes les possibilités si on n'a pas quelque chose de tangible. Oui ces formes de vie peuvent exister, **cela peut être des formes microscopiques**, mais **est-ce que cela peut aller aussi loin que l'intelligence et la technologie**, on peut même imaginer des poulpes intelligentes ! Mais pourraient-elles réaliser des voyages interstellaires ? On pourrait discuter à l'infini mais **je ne vois pas où cela pourrait nous amener de manière concrète** tant qu'on n'a rien à se mettre sous la dent. **Pour les formes de vies simples, je dirais « oui »** : dans les prochaines décennies, je suis sûr qu'on va trouver des formes de vies dans des endroits qu'on ne peut pas imaginer mais des formes de vies simples, il m'étonnerait qu'il y ait des formes de vies complexes. Il y a u**n livre « le nuage noir» d'un astronome célèbre Fred Hoyle** qui parle d'un énorme **nuage qui envahirait notre Système Solaire composé de particules électrons – positons** avec des interactions électromagnétiques qui aient une forme de vie intelligente. Est-ce que ce genre de choses peut exister ? Peut-être mais comment un seul nuage énorme pourrait-il devenir intelligent ? Je n'en sais rien. Mais un auteur de science-fiction peut très bien l'imaginer et, peut-être, il va s'avérer, dans un futur plus ou moins lointain, que quelqu'un parmi eux a vu juste, peut-être existe-t-il des fourmis intelligentes quelque part. **On ne peut pas l'exclure mais je trouve cela très peu probable.**

Question d'un participant : certains internautes ont parlé du **Système Solaire comme une cage et l'on y serait observé comme des singes dans un zoo**. Qu'en pensez-vous ?
Réponse de Nikos PRANTZOS : cela apparaît dans la **classe sociologique des réponses de Fermi** indiquées plus haut. **C'est l'astronome américain John Ball qui a publié un article en 1974 et qui a parlé de « zoo-cosmique ».** On nous observerait comme dans un zoo. D'autres ont parlé de **société galactique qui nous observerait simplement**. Comme **dans « la planète des singes »,** les singes vont-ils se répandre dans la Galaxie et prendre le dessus ? **Va-t-on, comme eux, sortir du zoo et composer avec eux ? Je n'en sais rien, c'est une hypothèse comme une autre.**

Rédacteur : Jean-Pierre BULLIARD
IESF Franche-Comté
Vice - Président des Ingénieurs INSA de Franche-Comté
Pour le compte du Pavillon des Sciences

Prochain Bars des Sciences :

- **Mardi 19 mai 2020 à 18h30 en live sur Internet avec l'Institut d'Astrophysique de Paris.**
  « Les galaxies confinées dans les amas ont-elles des comportements particuliers ?»

Voir détails sur :
Le Site Internet du Pavillon des Sciences : *www.pavillon-sciences.com*.
Parc Scientifique du Près-la-Rose – 25200 MONTBELIARD
Renseignements Bar des Sciences : Pascal REMOND – Tél 03 81 97 18 21 –
E-Mail : pascal@pavillon-sciences.com