

UMONS

# À la recherche des civilisations extra-terrestres

Claude Semay

Université de Mons



*Radiotélescope VLA (Nouveau Mexique, U.S.A.)*  
[Wikipédia]

Une publication du Cercle d'Astronomie  
Olympus Mons

2001

# À la recherche des civilisations extra-terrestres

Claude Semay

Université de Mons

Au cours d'une conversation maintenant célèbre, le physicien Enrico Fermi, père de la première pile atomique, demanda plaisamment lors d'un dîner qui se déroulait à Los Alamos en 1950 : « Où sont-ils ? ». Si des êtres intelligents, technologiquement plus avancés que nous, existent quelque part dans l'Univers, pourquoi n'avons-nous reçu aucun signal de leur part, pourquoi ne sont-ils pas déjà venus nous voir ? [1]

Je n'ai pas l'ambition de répondre ici à cette question, mais simplement de vous apporter quelques éléments de réflexion. Cet essai a initialement paru sous la forme de 11 articles dans la revue **Galactée** du Cercle d'Astronomie Olympus Mons, entre le n° 7 (février 1998) et le n° 22 (octobre 2000). Très peu de modifications ont été apportées par rapport au contenu de la revue : seuls quelques documents iconographiques et quelques informations complémentaires ont été ajoutés.

Signalons d'emblée que je ne prétends pas discuter du problème de la vie dans l'Univers ; je me concentre sur un phénomène plus restreint, celui de l'existence éventuelle d'une ou plusieurs civilisations technologiquement avancées dans la Galaxie. Je développe dans chaque chapitre un aspect particulier du problème et je termine par une conclusion personnelle.

## Table des matières

1. La classification des civilisations technologiques	4
2. L'équation de Drake	9
3. Les sphères de Dyson	15
4. Le projet SETI	22
5. Les transports interstellaires	28
6. La colonisation de la Galaxie	35
7. Les nomades cométaires	40
8. Les machines de von Neumann	46
9. Des sondes extra-terrestres dans notre système solaire ?	52
10. Un point de vue rationnel sur le phénomène ovni	58
11. Et si l'homme était seul dans la Galaxie ?	63
Références	70

# 1. La classification des civilisations technologiques

Le premier aspect que je vais aborder est celui de la classification d'éventuelles civilisations technologiques. Si elles existent en grand nombre – c'est ce dont je vous entretiendrai dans le prochain chapitre –, il peut en effet être utile de posséder un instrument de classification.

En 1964, l'astrophysicien N. S. Kardashev – actuellement directeur de l'observatoire qui abrite le plus grand radiotélescope du monde, en construction à Samarkand – a proposé une classification basée sur la consommation énergétique d'une civilisation [2]. Selon Kardashev, une civilisation de type I est une civilisation planétaire durable, capable d'utiliser efficacement (sans mettre en danger son écosystème) toutes les ressources énergétiques de sa planète. D'après les critères de Kardashev nous ne sommes pas encore arrivés à ce stade, bien que l'actuelle production d'énergie sur Terre corresponde à une puissance moyenne d'environ  $10^{13}$  watts<sup>1</sup>. Cela équivaut à la puissance dissipée par 100 milliards d'ampoules de 100 watts ou encore à la production énergétique de dix mille centrales nucléaires de 1 gigawatt (milliard de watts).

Une civilisation de type II est capable d'utiliser toute la puissance émise par son soleil. À titre d'exemple, la Terre intercepte un peu moins de deux milliardièmes du rayonnement solaire, tout le reste étant perdu dans l'espace. Le problème est d'imaginer un moyen d'utiliser la puissance totale d'une étoile. Le physicien mathématicien Freeman Dyson s'est penché sur la question [3]. Il a présenté un schéma selon lequel la planète Jupiter serait minutieusement « démontée », transportée par morceaux sur une orbite de rayon légèrement supérieur au rayon de l'orbite de la Terre, et réassemblée sous la forme d'une coquille sphérique, essaim de fragments individuels tournant autour du Soleil. Une telle structure est maintenant connue sous le nom de « sphère de Dyson » ; j'aurai l'occasion de vous en reparler dans le chapitre 3. Devant le gigantisme de la tâche proposée, on peut se demander s'il s'agit de spéculations ou de divagations. Il est évident qu'il ne nous est pas possible d'imaginer, même dans un futur assez lointain, entreprendre un tel travail de titans. Cependant les calculs de Dyson montrent qu'aucune loi physique n'interdit la réalisation d'une sphère de Dyson et que sa construction pourrait être achevée en moins d'un millénaire. Des sociétés extraterrestres plus vieilles et plus avancées que la nôtre pourraient donc s'être lancées dans l'aventure. Chacun des fragments de la coquille sphérique entourant leur étoile pourrait être garni de panneaux solaires assurant une fourniture en énergie extraordinairement importante.

Enfin, Kardashev définit une civilisation de type III comme étant capable d'utiliser l'énergie totale de la galaxie qui l'abrite. Il faut donc imaginer une société qui a réussi à

---

<sup>1</sup> La notation exponentielle est courante en sciences. Le nombre  $10^n$  représente le nombre 1 suivi de  $n$  zéros. Ainsi  $10^0 = 1$ ,  $10^1 = 10$ ,  $10^2 = 100$ ,  $10^3 = 1\ 000$ ,  $10^9 = 1$  milliard. De même  $2 \cdot 10^3$  représente  $2 \times 1\ 000$ , c'est-à-dire 2 000. Cette notation est très compacte et accélère fortement les calculs pour les personnes qui en ont l'habitude.

franchir les distances entre les étoiles et qui a construit autour de chaque étoile colonisée une sphère de Dyson. Nous verrons dans le chapitre 6 qu'il faudrait dans ce cas plutôt parler d'une collection de civilisations de type II, chaque société vivant à proximité de sa sphère de Dyson étant incapable de maintenir un lien social ou culturel avec ses voisines. Étant donné les distances interstellaires et la vitesse des communications radio (vitesse de la lumière), il faut en effet plusieurs années entre chaque question et réponse d'une conversation se déroulant entre deux étoiles.

Le gouffre, calculé en termes énergétiques, qui sépare une civilisation de type I d'une civilisation de type II, ou une civilisation de type II du type III, est énorme – chaque fois de l'ordre d'un facteur de dix milliards. Il est donc intéressant d'utiliser une mesure un peu plus fine si on veut examiner sérieusement le sujet. Une possibilité est d'introduire ce que j'appelle l'indice  $K$  d'une civilisation ( $K$  comme Kardashev). Il est défini par la relation suivante :

$$K = \frac{1}{10} \log W,$$

où  $W$  est la puissance utilisée par la civilisation exprimée en mégawatts (millions de watts) et où la fonction « log » désigne le logarithme<sup>2</sup> en base 10. Cette relation permet de retrouver approximativement la classification de Kardashev. Signalons que multiplier  $W$  par 10, implique une augmentation de  $K$  de 0,1.

Avec une puissance utilisée égale à  $10^{13}$  watts (chiffre officiel de 1990), l'indice  $K$  de la Terre est actuellement d'environ 0,7. Cependant, une grande partie de l'humanité doit se contenter de très maigres ressources énergétiques. Si la totalité de la population mondiale jouissait du niveau de vie d'un Américain moyen, l'indice  $K$  s'élèverait à 0,78. Enfin, si la Terre entière était tapissée de panneaux solaires ayant un rendement de 100 %, la puissance disponible serait de  $1,7 \times 10^{17}$  watts, c'est-à-dire que notre indice  $K$  atteindrait la valeur de 1,1. Transformer notre planète de la sorte n'est évidemment pas une perspective réjouissante, mais on peut envisager la fabrication de gigantesques centrales solaires en orbite [4,5]. Une surface de panneaux solaires équivalente à la section de la Terre, d'un rendement de 10 %, mettrait notre civilisation à un niveau  $K = 1,0$  – ce qui correspondrait au stade I dans la classification de Kardashev. Il est difficilement envisageable que plus de puissance puisse être dissipée sur Terre. En effet, les lois de la thermodynamique impliquent que toute machine a un rendement inférieur à 100 %. À titre d'exemple, une centrale nucléaire transforme environ 35 % de l'énergie de fission en énergie électrique, un moteur de voiture ne transforme que 20 % de l'énergie chimique libérée en travail mécanique et seulement 3 % de l'énergie

---

<sup>2</sup> La fonction logarithme est très utilisée dans les sciences. Si un nombre  $y$  peut s'écrire comme  $y = 10^x$  alors on a  $\log y = x$ , si la fonction « log » représente le logarithme en base 10. Cette fonction permet de ramener des grands nombres à des valeurs plus accessibles à notre sens commun. Par exemple,  $\log 1\ 000 = 3$  et le logarithme de 1 milliard vaut 9. Signalons que cette propriété n'est pas le seul intérêt de la fonction logarithme et qu'on peut définir des logarithmes dans d'autres bases que 10.

dissipée par une ampoule électrique classique est émise sous forme de lumière. Atteindre une valeur de  $K$  proche de 1 signifierait donc produire une quantité de chaleur du même ordre de grandeur que celle que le Soleil nous envoie. Cela ne semble pas possible sans modifier profondément le climat mondial. Pour dépasser ce stade, il faudra donc obligatoirement que l'humanité colonise le Système solaire. En imaginant que cette entreprise s'achève par la fabrication d'une sphère de Dyson dont la fonction serait d'être une gigantesque centrale solaire d'un rendement de 10 %,  $K$  atteindrait alors la valeur 2,0 – ce qui correspondrait au stade II dans la classification de Kardashev. Enfin si chaque étoile de notre Galaxie était entourée de telles sphères de Dyson, l'indice  $K$  de l'humanité atteindrait la valeur 3,1 – le stade III de Kardashev.

Une manière de caractériser une civilisation, autre qu'en termes de puissance utilisée, a été proposée par l'astronome américain Carl Sagan [2,6]. Un excellent critère du degré d'avancement d'une civilisation technologique met en jeu la somme totale d'informations stockées. Le problème est de quantifier une connaissance, qu'elle soit de type scientifique, culturelle ou autre. Une manière pratique d'aborder le problème est de calculer le nombre de « bits » qui sont nécessaires pour enregistrer une information [7]. Un bit est une quantité élémentaire d'information qui peut prendre deux valeurs, habituellement notées 0 ou 1. C'est la base du langage binaire utilisé par les ordinateurs. Un bit permet de stocker 2 informations. Un mot de 2 bits permet de représenter  $2 \times 2 = 2^2 = 4$  informations. De même, un code de 3 bits permet de représenter  $2 \times 2 \times 2 = 2^3 = 8$  symboles différents. Un exemple de code est donné dans le tableau suivant où les huit chiffres de 0 à 7 sont représentés par 3 bits.

Code	Chiffre	Code	Chiffre
000	0	100	4
001	1	101	5
010	2	110	6
011	3	111	7

Supposons que les caractères qui composent le langage écrit soient codés sur 7 bits ; cela nous fait  $2^7 = 128$  symboles différents. C'est bien suffisant pour représenter, par exemple, 26 lettres minuscules, 26 lettres majuscules, 10 chiffres et 66 autres symboles (lettres accentuées, caractères de ponctuation, etc.). Nous dirons donc qu'un caractère contient 7 bits d'informations. Un mot étant en moyenne formé de 6 lettres, il contient  $6 \times 7 = 42$  bits d'informations. Un livre de 500 pages contenant environ 500 mots par page représente donc  $500 \text{ pages} \times 500 \text{ mots/page} \times 42 \text{ bits/mot} = 10^7$  bits. Une grande bibliothèque publique ou universitaire contient de l'ordre d'un million de livres. On peut donc raisonnablement penser que dix millions d'ouvrages peuvent représenter tout ce que nous voudrions transmettre de notre culture à nos descendants (en évitant la redondance due notamment à la multitude de langues différentes), ce qui représente environ  $10^{14}$  bits.

Mais il n'y a pas que les informations textuelles dont nous devons tenir compte dans notre inventaire. Les images et les sons peuvent également être stockés. Par exemple, une image de télévision est formée d'environ 500 lignes contenant chacune 500 points ; ce qui fait

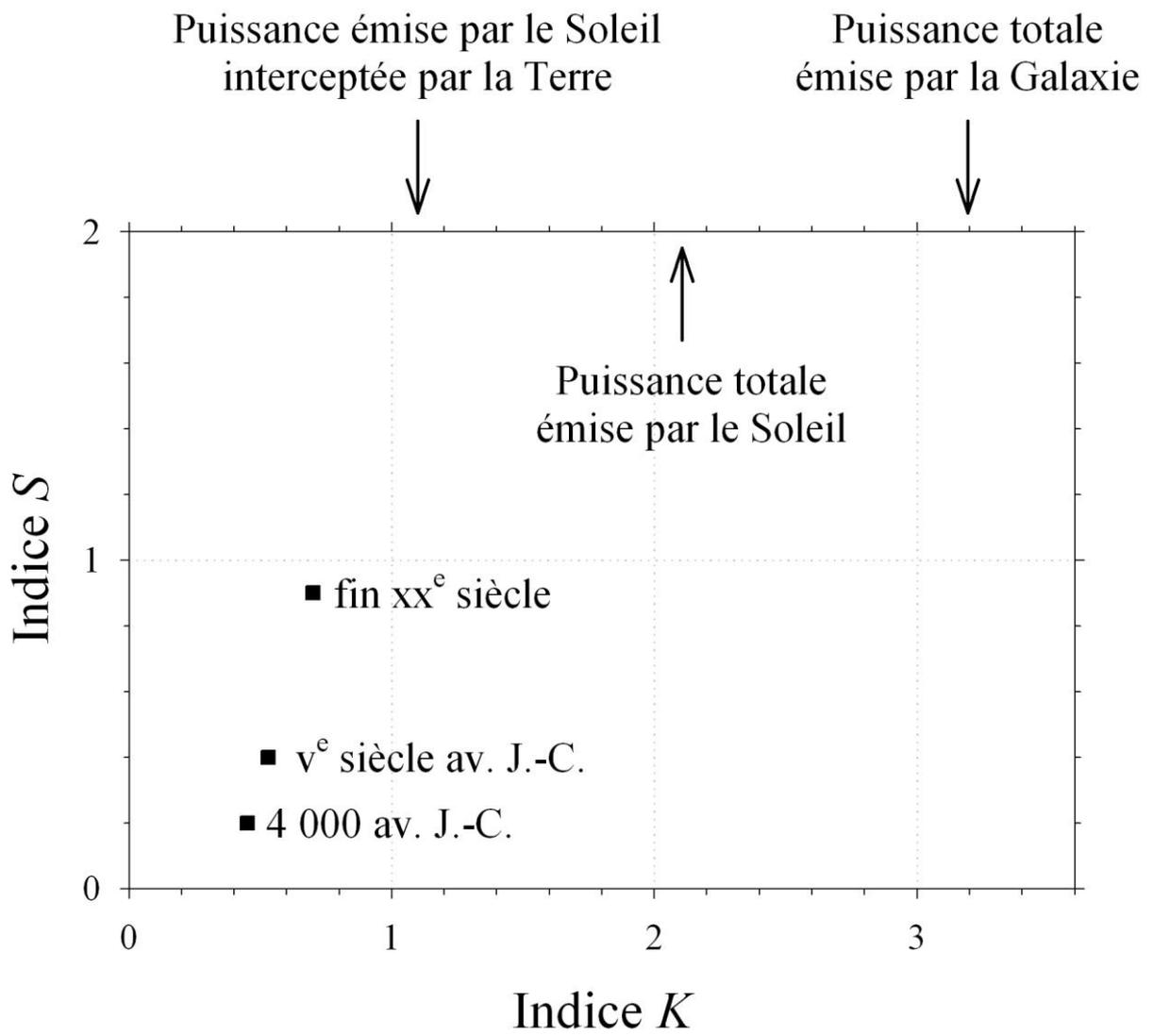
$25 \times 10^4$  pixels (points d'une image en langage informatique). Admettons qu'un pixel soit défini par trois couleurs et dix intensités lumineuses pour chaque couleur, c'est-à-dire 30 nombres. Comme le nombre 30 est proche de  $2^5$  ( $= 32$ ), on peut dire qu'un pixel représente 5 bits d'informations. Dans ce cas, une image de qualité très moyenne peut être définie par un million de bits. Une image de bande dessinée, aussi complexe soit-elle, atteindra peut être le millier de bits, tandis qu'une reproduction en couleurs de bonne qualité peut dépasser le milliard de bits. Si nous supposons qu'un ouvrage contient en moyenne une dizaine d'images, notre stock de dix millions de livres contiendra environ  $10^{14}$  bits d'informations en images, c'est-à-dire autant que d'informations présentes sous forme de texte. On peut donc estimer que notre culture possède entre  $10^{14}$  et  $10^{15}$  bits d'informations (n'oublions pas qu'il existe maintenant des techniques sophistiquées et très efficaces de compression de l'information). Les experts du domaine estiment que la Grèce antique (v<sup>e</sup> siècle av. J.-C.) nous aurait transmis entre  $10^9$  et  $10^{10}$  bits d'informations, tandis qu'un ensemble de  $10^6$  bits correspondrait à une société extrêmement primitive. En fait un très petit nombre de bits peut receler une quantité importante d'informations capable de modifier profondément une société. C'est ainsi que la totalité de la culture grecque (qui influença fortement la nôtre) peut être contenue dans un ou deux disques compacts. Nous reviendrons sur cette remarque dans le chapitre 4.

Pour éviter de manipuler de grands nombres, on peut définir ce que j'appelle l'indice  $S$  ( $S$  comme Sagan) d'une civilisation :

$$S = \frac{1}{10} \log B,$$

où  $B$  est le nombre de bits d'informations exprimé en mégabits (millions de bits). Ainsi pour la fin du XX<sup>e</sup> siècle nous avons  $S = 0,9$  environ, et pour la Grèce antique on peut évaluer  $S$  à environ 0,4. Pour atteindre une valeur de  $S$  égale à 2, il faudrait une fédération de 100 millions de mondes contenant chacun mille fois plus d'informations que le nôtre. Il s'agirait là d'une société galactique, sans doute de type III dans la classification de Kardashev.

Il est évident que quantité ne veut pas dire qualité. Une société caractérisée par de grandes valeurs des indices  $K$  et  $S$  peut dépenser beaucoup d'énergie pour des choses futiles, voire néfastes, et stocker beaucoup d'informations sans intérêt ; c'est probablement un peu le cas sur Terre. Aussi grossiers et imprécis soient-ils, ces instruments de mesure permettent une première classification d'une civilisation technologique. La figure ci-dessous nous montre, dans un diagramme  $K$ - $S$ , trois stades de la civilisation humaine à différentes époques. Si un jour nous entrons en contact avec d'autres cultures, où se placeront-elles dans ce diagramme ? Sans doute plus haut et plus à droite. Sagan estime pour sa part qu'une communication devrait être possible avec des sociétés extra-terrestres allant de type ( $K = 1,5 - S = 1,0$ ) à ( $K = 1,8 - S = 1,1$ ) [2]. Savoir si un contact avec une intelligence extra-terrestre est vraiment souhaitable ne sera pas traité ici. Signalons seulement que des avis divergents existent sur la question [2,8,49].



## 2. L'équation de Drake

Dans le chapitre précédent, je vous ai proposé une classification possible des éventuelles civilisations technologiques extra-terrestres. Il est temps maintenant d'essayer d'évaluer le nombre de ces civilisations que pourrait abriter notre Galaxie. C'est en 1961 que l'astronome Frank Drake propose une formule pour calculer ce nombre [9]. Depuis, cette relation est connue sous le nom d'« équation de Drake » (terme que nous adopterons ici), « équation de Drake-Sagan » ou encore « équation fondamentale ». Elle s'appuie sur notre connaissance des processus intervenant en astrophysique, en biologie et en sociologie. Parmi les différentes versions de cette équation, je vous propose de discuter une forme couramment utilisée et abondamment commentée dans l'ouvrage de Rood et Trefil [6] :

$$N = R \times f_p \times n_e \times f_l \times f_i \times f_t \times T$$

$N$  : nombre de civilisations technologiques susceptibles d'être présentes dans notre Galaxie ;

$R$  : nombre d'étoiles qui naissent chaque année dans notre Galaxie ;

$f_p$  : fraction des étoiles qui, une fois formées, possèdent un cortège de planètes ;

$n_e$  : nombre de planètes dans un tel cortège qui possèdent un environnement permettant la vie ;

$f_l$  : fraction de ces planètes où la vie est apparue ;

$f_i$  : fraction de ces planètes où la vie évolue vers une vie intelligente ;

$f_t$  : fraction de ces civilisations intelligentes ayant pu développer une technologie avancée ;

$T$  : durée de vie moyenne de telles civilisations technologiquement avancées.

Les paramètres  $R$ ,  $f_p$  et  $n_e$  sont du domaine de l'astrophysique et font l'objet d'études approfondies. L'estimation des paramètres à dominante biologique  $f_l$ ,  $f_i$  et  $f_t$  est très difficile car nous n'avons à notre disposition qu'un seul exemple de planète où la vie est apparue et où une civilisation technologique a vu le jour : la Terre. La sociologie ne nous fournit que peu d'informations sur la valeur de  $T$ . L'exercice qui consiste à calculer  $N$  est donc périlleux, mais nous allons le tenter en proposant pour chaque paramètre de l'équation de Drake trois estimations. L'une sera dite optimiste dans le sens qu'elle tend à maximiser  $N$ . Une deuxième estimation sera qualifiée de pessimiste car elle tendra à minimiser  $N$ . Enfin une tentative de détermination « raisonnable » sera faite, entre les visions optimiste et pessimiste.

La vie et donc l'intelligence ne peuvent pas apparaître n'importe où dans n'importe quelles conditions. Il faut un environnement stellaire stable pendant des périodes couvrant plusieurs milliards d'années, durées communément estimées nécessaires pour la naissance de la vie et son évolution vers des formes complexes. Nous supposerons dans la suite que si une forme de vie existe, elle est basée sur la chimie du carbone et nécessite la présence d'eau sous forme liquide (d'autres formes de vie sont peut-être possibles, mais nous n'en avons absolument aucune preuve actuellement). De plus, il faut qu'une température convenable soit

assurée, sans grandes ni brutales variations, pendant les milliards d'années que nécessitent l'apparition et l'évolution des formes de vie complexes. La température moyenne d'une planète dépend non seulement de la quantité de rayonnement qu'elle reçoit, mais également de manière cruciale de la composition de son atmosphère (l'effet de serre). Les simulations sur ordinateurs nous permettent de donner la liste des conditions qui doivent être remplies pour qu'une planète « bio-compatible » existe [6,10] :

Le système solaire de la planète doit s'être formé d'un nuage de poussières et de gaz riche en éléments essentiels pour la vie, tels le carbone, l'azote et l'oxygène.

L'étoile doit être de type solaire. Trop petite, elle ne peut fournir assez d'énergie à un taux suffisamment élevé pour maintenir la vie<sup>3</sup>. Trop massive, elle ne vit pas assez longtemps pour permettre le développement de la vie<sup>4</sup>.

L'étoile ne peut pas appartenir à un système multiple, comme cela semble être le cas pour la moitié des étoiles de la Galaxie. En effet, des systèmes planétaires ne peuvent probablement pas se former dans cette situation. Même si cela était possible, il y a peu de chance pour que des orbites planétaires stables existent dans un tel environnement.

La planète doit être comparable en taille à la Terre pour permettre une stabilisation du climat par un effet de serre adéquat (les mécanismes mis en jeu sont assez complexes et impossibles à expliquer dans un article qui ne se veut pas trop long).

La planète doit graviter à une distance adéquate de l'étoile pour recevoir suffisamment de rayonnement mais pas trop (dans ce qu'on appelle la zone continûment habitable).

L'orbite de la planète doit être proche d'un cercle et l'inclinaison de l'axe de rotation de la planète ne doit pas être trop grand pour éviter de trop larges variations saisonnières de température. De plus la durée du jour doit être assez courte pour éviter les trop grandes fluctuations journalières de température.

Le premier terme de l'équation de Drake est le taux annuel de formation d'étoiles  $R$  dans notre Galaxie. Nous savons maintenant que seuls certains types d'étoiles peuvent éclairer des planètes bio-compatibles. Donc, pour  $R$  nous devons prendre en compte uniquement la formation d'étoiles de ce genre. Les modèles d'évolution galactique indiquent  $R = 0,05$  étoile par an. Il existe un facteur d'incertitude égal à 3 dont nous tenons compte pour les estimations optimiste et pessimiste. Des simulations sur ordinateurs montrent qu'environ 10 % des étoiles peuvent être accompagnées d'un cortège planétaire. Des estimations plus optimistes donnent des chiffres avoisinant les 30 %. D'autres estimations plus pessimistes fournissent une probabilité  $f_p$  infime. Les modèles de formation planétaire indiquent que la probabilité pour

---

<sup>3</sup> Les raisons précises qui font que les petites étoiles sont impropres à entretenir la vie sont complexes. Elles résultent de l'interférence entre la variation de la luminosité de l'étoile peu après sa naissance et l'évolution de la composition chimique des atmosphères planétaires à la même période.

<sup>4</sup> Les étoiles massives possèdent plus de « carburant » nucléaire que les étoiles légères, mais elles le brûlent à un taux beaucoup plus élevé. Il en résulte que plus une étoile est massive, moins longtemps elle vit.

qu'une ou deux planètes de type terrestre gravitent dans la zone continûment habitable d'une étoile serait de 5 %, ce qui donne  $n_e = 0,05$ . Certaines estimations donnent une valeur jusqu'à 4 fois supérieure, tandis que d'autres arrivent à la conclusion que  $n_e$  est quasi nul. D'autres calculs pourraient un jour revoir complètement ces chiffres (à la hausse ou à la baisse). Ce qui est important c'est qu'aussi bien  $R$  que  $f_p$  et  $n_e$  sont susceptibles de faire l'objet d'une analyse détaillée et rigoureuse.

Notre connaissance de la manière dont la vie a pu émerger du monde minéral sur Terre il y a plus de 4 milliards d'années n'est encore que fragmentaire. Il est donc très difficile d'assigner une valeur à la probabilité  $f_l$  que le même phénomène ait pu se produire ailleurs dans notre Galaxie sur une planète accueillante. Les optimistes pensent que lorsque les conditions sont réunies, la vie doit forcément apparaître. Ils estiment que  $f_l$  pourrait atteindre 0,5. Le camp des optimistes compte surtout des astronomes comme Sagan et Drake, pour ne citer que les plus connus du grand public. Les biologistes sont en général plus pessimistes. Certains estiment que la probabilité pour que des combinaisons moléculaires complexes finissent par créer une cellule vivante est si faible que notre présence sur le globe tient presque du miracle. Entre ces deux extrêmes, Rood et Trefil tentent dans leur ouvrage [6] une estimation raisonnable  $f_l = 0,01$ . Signalons que dans certains scénarios la présence d'un grand satellite (dans notre cas la Lune) joue un rôle primordial dans l'apparition de la vie. Pour parler simplement, l'idée est que grâce aux marées importantes provoquées par la Lune, la mer a pu venir régulièrement inonder des lagunes argileuses chauffées par le Soleil. De cette manière, des molécules organiques simples présentes dans l'eau ont été apportées sur un substrat permettant des réactions de formation de molécules organiques complexes, ces dernières pouvant être réinjectées dans la mer aux marées suivantes. Le Soleil seul provoquerait aussi des marées, mais d'amplitude trois fois moins importante que celles dues à la Lune. Actuellement, on pense que la Lune s'est formée au cours d'une collision entre la Terre et un astre de la taille de Mars. Si cette théorie est correcte, alors la présence d'un gros satellite pour une planète tellurique doit être une situation assez rare. Le cas de la Terre est en tous cas unique dans le système solaire.

La probabilité pour que la vie conduise à la vie intelligente est tout aussi difficile à évaluer. Il a fallu près de 4 milliards d'années d'évolution pour passer des premières cellules vivantes à l'homme. Un tel événement a-t-il pu se produire ailleurs sur une planète abritant la vie ? Si oui, combien de temps cela a-t-il pris ? Les optimistes pensent que l'intelligence doit forcément apparaître lorsque la vie est présente. Dans ce cas  $f_i = 1$ . D'autres pensent que la voie évolutive qui conduit à l'intelligence est si étroite que sa probabilité d'apparition est quasi nulle. Comme dans le cas précédent, la querelle entre experts fait rage. Nous prendrons comme estimation raisonnable celle de Rood et Trefil, c'est-à-dire 0,5 [6].

Un grand nombre de civilisations se sont développées sur Terre sans vraiment qu'on puisse les qualifier de technologiques. Ce n'est que récemment que la science et la technologie ont connu un formidable développement, unique dans l'histoire de l'humanité. Sur une échelle de temps géologique, la technologie avancée est apparue très peu de temps

après l'apparition de l'homme moderne. Quelques dizaines, voire quelques centaines de milliers d'années ne sont pas grand-chose si on les compare à l'âge de la Terre. Faut-il en conclure que  $f_i = 1$  ? Pas forcément ; certains pensent que l'émergence de la technologie est due à un concours de circonstances, trop nombreuses pour pouvoir espérer qu'elles se répètent toutes ailleurs. De plus nous pouvons très bien imaginer des situations dans lesquelles une intelligence extra-terrestre n'aurait pas la possibilité de développer la technologie (pensons à une société de « dauphins » intelligents), ou n'aurait aucun incitant à la développer (la créature intelligente est le prédateur le plus gros et le plus efficace de sa planète). Nous nous contenterons encore une fois de l'hypothèse raisonnable de Rood et Trefil qui estiment  $f_i = 0,5$  [6].

Le dernier paramètre de l'équation de Drake est la durée de vie  $T$  d'une civilisation technologique. Les plus optimistes pensent qu'une fois la technologie bien maîtrisée, une civilisation peut perdurer pratiquement aussi longtemps qu'elle veut. Nous prendrons dans le scénario optimiste  $T = 1$  million d'années, ce qui est beaucoup plus que n'a jamais vécu aucune société sur Terre. Les pessimistes pensent que dès que la technologie avancée apparaît, cela mène inéluctablement à la fin de l'espèce qui la développe. Un conflit nucléaire généralisé ou une mort plus lente due à la pollution doit inévitablement survenir. Dans ce cas,  $T$  ne peut guère excéder une centaine d'années. L'estimation raisonnable de Rood et Trefil est  $T = 10\,000$  ans [6].

Les divers paramètres de l'équation de Drake pour nos trois estimations sont rassemblés dans le tableau 1. Le calcul optimiste donne quelques milliers de civilisations technologiques dans notre Galaxie. Aux yeux de certains, il apparaît improbable que toutes les estimations « généreuses » des paramètres soient exactes. Il convient cependant de signaler que d'autres estimations sont encore plus optimistes, suggérant que des millions de civilisations avancées se développent (ou se sont développées) dans la Galaxie [11].

Le tableau 2 nous montre la distance moyenne qui sépare deux sociétés extra-terrestres avancées en fonction de  $N$ . On voit que même avec des estimations relativement optimistes, la Galaxie est si vaste que les civilisations seraient séparées par d'énormes distances. Cette remarque prendra toute son importance quand nous parlerons du projet SETI (Search for Extra-Terrestrial Intelligence) dans le chapitre 4.

Facteur de l'équation	Estimations		
	Optimiste	Raisonnable	Pessimiste
$R$ (par an)	0,15	0,05	0,005
$f_p$	0,3	0,1	infime <sup>5</sup>
$n_e$	0,2	0,05	infime
$f_l$	0,5	0,01	infime
$f_i$	1	0,5	infime
$f_t$	1	0,5	infime
$T$ (années)	1 million	10 000	100
$N$	5 000	0,01	infime

**Tableau 1 :** Récapitulation des paramètres de l'équation de Drake.

$N$	$D$ (années-lumière <sup>6</sup> )
100 millions	10
10 millions	100
100 000	1 000
1 000	10 000
1	$\infty$

**Tableau 2 :** Distance moyenne  $D$  entre civilisations technologiques, en fonction de leur nombre  $N$  dans la Galaxie [6].

L'estimation raisonnable donne  $N = 1/100$ . Cela signifie que la période durant laquelle des civilisations avancées ont existé ne correspond qu'à 1/100 de la durée de vie totale de la Galaxie, et que nous sommes **actuellement** seuls (de nombreuses civilisations ont pu exister mais elles ont disparus). Enfin, l'estimation pessimiste est compatible avec le fait que la Terre abrite la seule civilisation technologique (qui existe et qui ait jamais existé) dans la Galaxie.

Un certain nombre de facteurs, plus spéculatifs, dont nous n'avons pas tenu compte dans l'analyse ci-dessus, pourraient encore réduire la valeur de  $N$ . Les simulations de formation de systèmes planétaires semblent montrer que la formation de planètes telluriques,

<sup>5</sup> L'indication « infime » signifie en fait que le nombre est si faible qu'on en conclut que seule la Terre abrite une civilisation avancée.

<sup>6</sup> Unité de distance utilisée en astronomie représentant l'espace parcouru par la lumière en une année, c'est-à-dire environ 9 461 milliards de kilomètres.

comme la Terre ou Mars, est un processus assez universel. Par contre la formation de géantes gazeuses, comme Jupiter ou Saturne, semble être beaucoup plus difficile à expliquer. Leur présence dans un système solaire ne serait donc pas systématique. Il est vrai que de telles planètes ne peuvent sans doute pas abriter la vie, mais elles sont nécessaires pour « nettoyer » par interaction gravitationnelle le système solaire de débris de formation en tout genre, astéroïdes et comètes, qui pourraient, sinon, continuellement bombarder les planètes telluriques et étouffer dans l'œuf ou détruire les formes de vie qui auraient pu s'y développer [10,12]. Rappelons-nous que c'est très probablement la chute d'un bolide d'une dizaine de kilomètres de diamètre qui mit fin, entre autres, au règne des dinosaures voici 65 millions d'années. Signalons que, jusqu'à présent, les seules planètes qui ont été détectées autour d'autres étoiles sont des géantes gazeuses [63]. La détection de planètes telluriques est cependant possible ; des programmes de recherche sont en cours de développement [64].

La notion de ceinture d'habitabilité galactique a fait récemment son apparition [9] et est venue renforcer les arguments des pessimistes. Les étoiles et les nuages de gaz et de poussières qui composent notre Galaxie ne tournent pas d'un seul bloc. Notre Soleil a quitté un des bras spiraux de la Galaxie il y a environ 4,6 milliards d'années et rentrera dans un autre bras dans environ 3,3 milliards d'années. À partir de ce moment, notre système sera amené à côtoyer de nombreuses supernovae, plus présentes dans les bras de galaxie qu'entre eux. Si nous nous trouvons à moins de 30 années-lumière d'une supernova, le taux de radiation à la surface du globe sera multiplié par un facteur 100, ce qui sera très difficile à supporter pour les formes de vie évoluées. Ceci indique que pour qu'un système solaire soit apte à accueillir une vie intelligente, il faut qu'il soit situé dans une région de la Galaxie telle que son mouvement le maintienne éloigné des bras spiraux pendant plusieurs milliards d'années. La zone d'habitabilité ainsi définie serait un tore d'environ 30 000 années-lumière de plus grand rayon et d'environ 1 500 années-lumière de plus petit rayon (voir figure ci-dessous). Cette zone ne contiendrait qu'un centième des étoiles de la Galaxie. L'équation de Drake devrait donc contenir un facteur supplémentaire égal à 1/100.



*Tore vu en coupe. La petite (grande) flèche indique le petit (grand) rayon.*

Signalons pour terminer que notre ignorance sur la valeur de certains des paramètres de l'équation de Drake est telle que l'on a osé dire que cette formule n'était que la concentration d'une très grande quantité d'ignorance dans un tout petit espace. Cette équation a cependant le mérite de rationaliser la question en dressant une liste des paramètres critiques intervenant dans la réponse à une question que l'humanité se pose depuis fort longtemps : l'homme est-il seul dans l'Univers ?

## 3. Les sphères de Dyson

### 1. Le concept

Dans le chapitre 1, je discutais la classification des civilisations technologiques proposée par l'astronome russe N. S. Kardashev. Selon lui, une civilisation de type I est capable d'utiliser autant de puissance que celle que sa planète reçoit de son étoile. Une société technologique en mesure de capter la totalité de la puissance émise par son étoile est qualifiée de type II. Il a été suggéré que ce genre de société pourrait exister quelque part dans la Galaxie [13,14]. Le problème est d'imaginer un moyen d'utiliser la puissance totale d'une étoile. Le physicien mathématicien Freeman Dyson s'est penché sur le problème et a été le premier à proposer une méthode pour construire un dispositif capable de recueillir toute la lumière émise par une étoile [3]. Une telle structure est maintenant connue sous le nom de « sphère de Dyson ».

Dyson avoue volontiers ne pas être l'inventeur du concept. Cette idée a initialement germé dans l'esprit de l'auteur anglais de science-fiction Olaf Stapledon (par ailleurs très peu connu du public francophone). Dans son œuvre monumentale « Star Maker » (Créateur d'étoiles), parue en 1937, l'auteur raconte le voyage initiatique d'un homme ordinaire à travers la Galaxie et l'Univers en quête de l'être suprême, le créateur d'étoiles. Un court passage du livre mentionne l'existence de titanesques centrales solaires : « La communauté galactique... résolue à poursuivre l'aventure de la vie et de l'esprit, commença à utiliser l'énergie de toutes ces étoiles jusqu'à une échelle alors insoupçonnée... Chaque système solaire était entouré d'une gangue de pièges de lumière, qui concentraient l'énergie solaire dans un but intelligent... ». Le mérite de Dyson est d'avoir procédé à une analyse scientifique du concept d'une sphère gigantesque entourant une étoile, et d'avoir montré qu'aucune loi de la nature n'interdit *a priori* sa réalisation.

### 2. Les différents types

Depuis le premier article de Dyson, plusieurs « modèles » de sphères ont été inventés. Je vous propose de découvrir les trois grands types possibles.

#### a. La sphère rigide

On pourrait imaginer une sphère de Dyson comme une énorme coquille rigide entourant complètement une étoile. La stabilité de la structure serait assurée par sa rotation autour de l'étoile. Un calcul rapide montre qu'il existe suffisamment de matière dans le Système solaire (à condition de désassembler une ou plusieurs planètes) pour construire, autour du Soleil, une sphère d'un diamètre double de celui de l'orbite terrestre et de plusieurs

mètres d'épaisseur [3]. Le problème est qu'il n'existe aucun matériau capable de résister aux tensions qui se développeraient dans une telle structure, et aucun espoir d'en fabriquer un jour. De plus, la construction d'une telle sphère serait extraordinairement compliquée, car un morceau de sphère est une structure instable. On pourrait imaginer construire la sphère par morceaux, chacun gravitant librement autour du Soleil, puis les assembler d'un seul coup par un mouvement d'ensemble. Cela requerrait une précision diabolique, pratiquement impensable. Comme on l'a fait remarquer : « Si vous êtes capables de construire une sphère de Dyson rigide, alors vous n'en avez pas besoin. »

Il faut donc abandonner l'idée de sphère de Dyson rigide aux auteurs de science-fiction, qui ne se sont d'ailleurs pas privés d'en faire usage. Pour les amateurs du genre, on peut citer, entre autres, outre *Créateur d'étoiles* d'Olaf Stapledon, *L'anneau-monde* de Larry Niven, *Les vaisseaux du temps* de Stephen Baxter, *L'Orbe et la Roue* de Michel Jeury, etc.

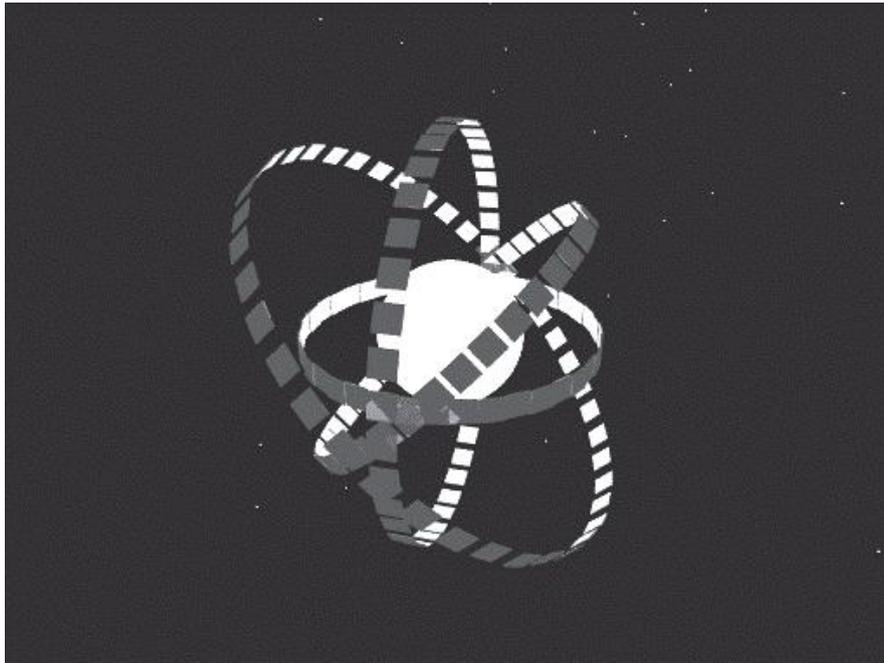
### *b. La sphère d' « orbiteurs »*

Dans ses articles [3,15], Dyson propose un modèle de sphère plus « réaliste ». Premièrement, il fait remarquer qu'il est possible de construire de très grandes structures rigides dans l'espace. Sur Terre, la taille maximale que l'on peut donner à un « objet », construit avec des matériaux de type acier ou fibre de verre, est de l'ordre d'une dizaine de kilomètres, ce qui est compatible avec la taille des plus hautes montagnes terrestres. Dans l'espace, la taille maximale est limitée par les forces de marées qui s'exercent sur la structure, c'est-à-dire le gradient de force qui existe entre les parties de l'objet les plus proches et les plus éloignées de la source de gravitation autour de laquelle gravite la structure. La taille maximale possible d'un objet construit avec les matériaux connus les plus résistants, en orbite autour du Soleil à la distance de la Terre (1 unité astronomique), est de l'ordre d'un million de kilomètres. On peut donc imaginer une coquille d'objets de cette taille, les « orbiteurs », gravitant tous autour du Soleil sur des orbites de rayons légèrement différents de manière à éviter les collisions. Il faudrait environ 200 000 de ces objets pour former une coquille sphérique, d'une unité astronomique de rayon, englobant complètement le Soleil.

Deuxièmement, Dyson montre qu'il est technologiquement possible de fabriquer des structures rigides d'un million de kilomètres de diamètre. Il propose de les construire comme un gigantesque meccano en agençant des pièces élémentaires en des structures de plus en plus complexes et de plus en plus grandes, mais de moins en moins denses. Par exemple, en empilant des cubes vous pouvez fabriquer des tiges. Vous pouvez ensuite assembler ces tiges pour faire des cubes réduits à leurs arêtes. Ces cubes peuvent ensuite servir à fabriquer de nouvelles tiges, et ainsi de suite (c'est ce que l'on appelle également une structure fractale). Dyson estime que la masse minimale d'une sphère d'orbiteurs est de l'ordre  $6 \cdot 10^{19}$  kilogrammes, c'est-à-dire environ 1/100 000 de la masse de la Terre, ou encore 1/5 000 de la masse de la planète Mercure. Chacun de ces orbiteurs peut être alors garni de panneaux

solaires ou aménagé en habitats. La masse totale de la sphère pourrait alors devenir comparable à celle d'une planète tellurique.

Enfin Dyson propose une méthode pour démonter une planète. Je ne m'étendrai pas ici sur les détails techniques. Il faut cependant signaler qu'une méthode plus économique pour se procurer des matériaux est sans doute de déplacer des gros astéroïdes, ce qui permet d'éviter le coûteux travail de mise en orbite depuis une planète. Une représentation du premier stade de construction d'une structure constituée d'orbiteurs est donnée dans la figure 1.

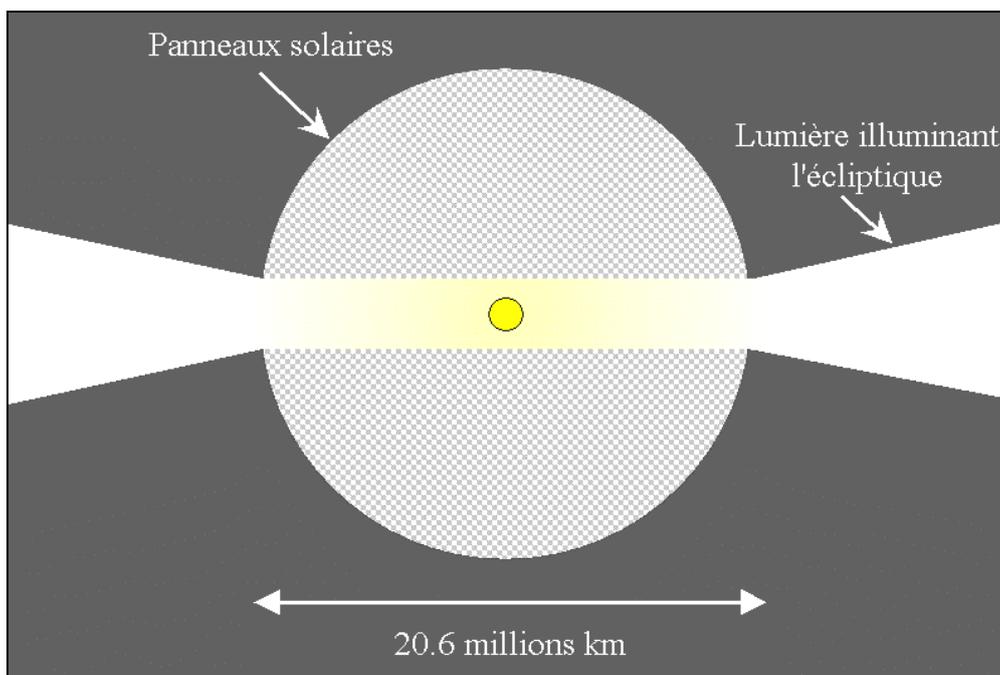


**Figure 1 :** Premier stade d'une sphère de Dyson constituée d'« orbiteurs ». L'étoile est entourée par plusieurs « anneaux » de panneaux solaires (Image disponible sur le site Internet : [http://www.aleph.se/Trans/Tech/Megascale/dyson\\_page.html](http://www.aleph.se/Trans/Tech/Megascale/dyson_page.html)) . Les divers éléments du dessin ne sont pas représentés à l'échelle.

### *c. La sphère de « statiques »*

Tout objet illuminé subit de la part de la lumière qui l'éclaire une pression que l'on appelle pression de radiation. Par exemple au niveau de l'orbite terrestre la lumière du Soleil exerce sur les corps une pression d'environ 1/100 000 de Newton par mètre carré, c'est-à-dire approximativement le poids d'une pièce de monnaie réparti sur une surface équivalente à un terrain de football. C'est évidemment très faible, mais suffisant pour que l'on songe à utiliser la pression de radiation pour propulser des vaisseaux spatiaux interplanétaires. La lumière du Soleil pousserait ainsi de grandes feuilles réfléchissantes très légères, baptisées voiles solaires, auxquelles serait accrochés des vaisseaux spatiaux éventuellement habités. Avec une voile solaire circulaire de 900 mètres de diamètre, en kapton aluminisé de 2,5 micromètres d'épaisseur, il devrait être possible de transporter 5 tonnes de charge utile de la Terre à Mars en environ 500 jours [16].

La pression de radiation décroît comme le carré de la distance au Soleil, exactement comme la force d'attraction solaire. On peut ainsi montrer qu'une voile solaire parfaitement réfléchissante peut être maintenue en lévitation au-dessus du Soleil, à n'importe quelle distance de l'astre, pourvu que sa masse par unité de surface soit égale à environ 1,5 gramme par mètre carré, ce qui correspond à une épaisseur de 0,6 micromètre d'aluminium. Si la voile est parfaitement absorbante, la masse surfacique de la voile doit être réduite de moitié pour qu'elle puisse constamment se maintenir à la même distance du Soleil.



**Figure 2 :** Sphère de Dyson constituée de « statiques ». Les panneaux solaires, flottant sous l'effet de la pression de radiation, entourent presque complètement une étoile comparable au Soleil. Une « ouverture » ménagée au niveau de l'écliptique permet à l'étoile d'éclairer les planètes. La sphère de Dyson est invisible depuis les surfaces planétaires. À titre de comparaison, la planète Mercure est située à environ 58 millions de km du Soleil, c'est-à-dire en dehors de la figure ci-dessus, qui est réalisée à l'échelle.

S'il est possible de fabriquer des panneaux solaires dont la masse surfacique est en moyenne d'environ 1 gramme par mètre carré, alors on peut envisager de fabriquer une sphère de Dyson uniquement constituée de voiles solaires. On peut imaginer qu'une grande partie de la sphère soit constituée de voiles solaires très légères, les « statiques », supportant des structures plus massives de panneaux solaires ou autres appareillages. Cette idée développée dans la référence [17] est probablement due au physicien Robert Forward. Si on suppose qu'un pour-cent « seulement » de la surface solaire est masquée par les voiles solaires et que, sur ces structures, les panneaux solaires, d'une efficacité de 10 %, ne représentent qu'un centième de la surface, la puissance captée serait de l'ordre de  $4 \cdot 10^{21}$  watts. Cela représente près de 400 millions de fois la puissance totale consommée sur Terre actuellement. L'énergie captée par les statiques n'aurait pas à être utilisée sur place, mais pourrait être envoyée ailleurs dans le système solaire, sous forme de faisceaux de micro-ondes par exemple.

Le diamètre d'une sphère de statiques serait de l'ordre de 20 millions de kilomètres pour maintenir les voiles solaires loin des violentes éruptions du Soleil. Une bande vide de

toute structure serait prévue pour que les planètes continuent de recevoir la lumière de l'astre du jour (voir la figure 2). La masse totale de cette sphère serait d'environ  $2 \cdot 10^{18}$  kilogrammes, beaucoup moins qu'une sphère constituée d'orbiteurs garnis d'équipement divers. La planète Mercure, qui représente environ 160 000 fois cette masse, constituerait donc un endroit idéal pour commencer la construction. Des astéroïdes pourraient également être utilisés. En effet, le système solaire possède plus de 30 planétoïdes, riches en métaux et autres matériaux de construction, d'un diamètre supérieur à 200 kilomètres et caractérisés par une masse plus de dix fois supérieure à celle estimée de la sphère de statiques.

Signalons aux astronomes qu'une sphère de statiques n'altérerait en rien la beauté du ciel nocturne. Ce ne serait pas le cas d'une sphère d'orbiteurs qui contiendrait l'orbite terrestre (pour que la Terre soit encore éclairée par le Soleil) et occulterait ainsi la totalité des étoiles.

### ***3. Pourquoi construire une sphère de Dyson ?***

Nous ne sommes actuellement pas capables de construire une sphère de Dyson (et nous ne serons peut-être jamais capables de le faire), mais des sociétés extra-terrestres plus vieilles et plus avancées que la nôtre pourraient s'être lancées dans l'aventure. On ne peut que difficilement imaginer les motivations d'une race extra-terrestre, mais il paraît plausible que la construction d'une sphère de Dyson pourrait être entamée pour répondre au besoin d'une population croissante toujours plus avide d'énergie. Si on examine ce qui se passe sur Terre, on constate que notre consommation énergétique croît sans cesse, au rythme actuel d'environ 1 % par an. Il est facile de montrer qu'une croissance de la consommation énergétique mondiale d'un pour-cent par an conduirait à une consommation égale à la totalité de la puissance rayonnée par le Soleil en « seulement » 3 000 ans (voir la figure 3), un laps de temps infime par rapport aux données astronomiques habituelles. D'autre part, Dyson estime que la construction d'une sphère d'orbiteurs pourrait être réalisée en moins d'un millénaire. Il est amusant de constater la coïncidence des chiffres. Une société pourrait donc en théorie maintenir pendant plusieurs millénaires un taux de croissance élevé. Cette croissance devrait cependant s'arrêter avec l'achèvement de la sphère de Dyson.

Des projets très sérieux de construction de grands panneaux solaires en orbite terrestre sont à l'étude [4,5]. Ils pourraient fournir, dans le futur, une fraction importante de l'énergie utilisée sur Terre, si les obstacles économiques qui empêchent actuellement leur réalisation sont un jour levés. Ces stations spatiales pourraient être considérées comme l'ébauche d'une sphère de Dyson.

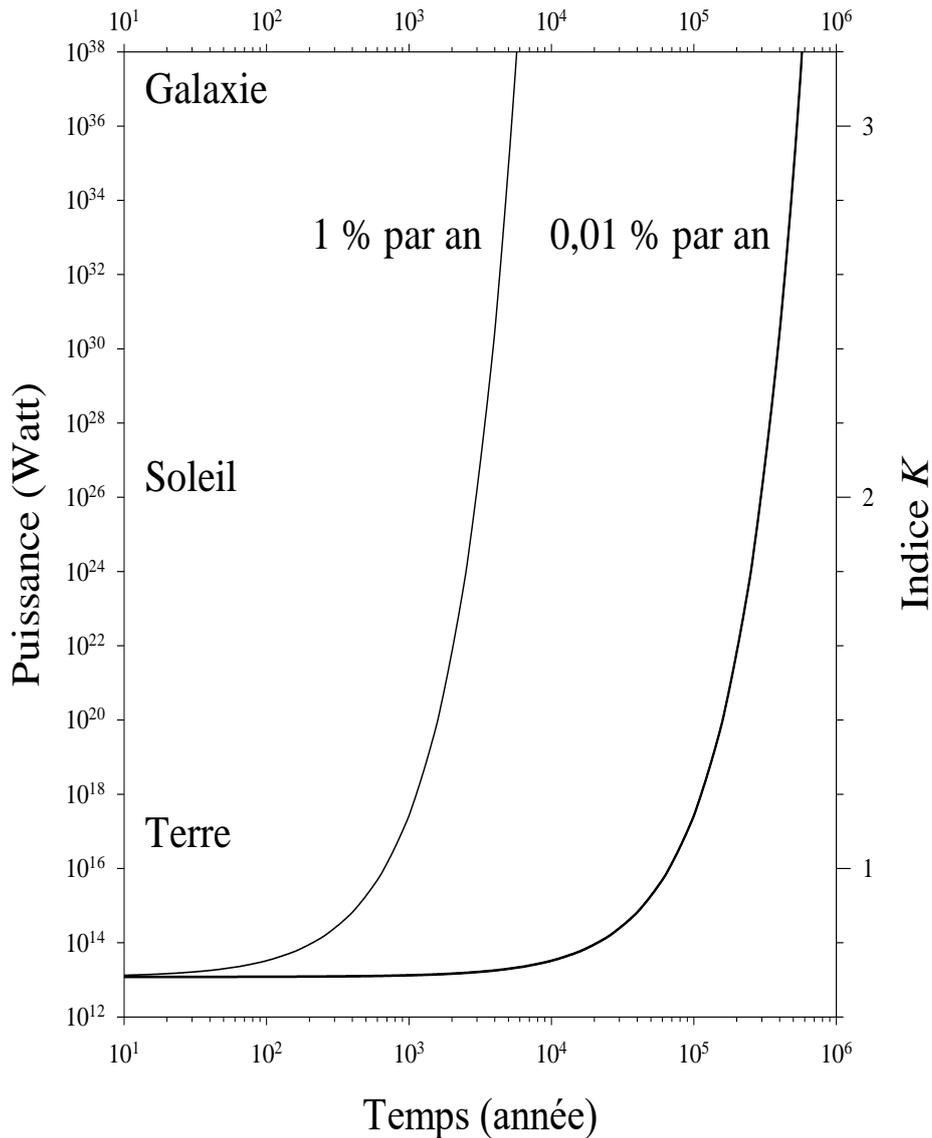


Figure 3 : Croissance exponentielle.

#### 4. Conséquences observationnelles

Aucune machine ne peut utiliser de l'énergie avec une efficacité de 100 %. Si des sociétés extra-terrestres technologiquement très avancées ont construit des sphères de Dyson, elles ne peuvent complètement utiliser la puissance de leur étoile. Une partie de l'énergie captée sera inévitablement dissipée sous forme de chaleur, c'est-à-dire de rayonnement infrarouge. Un objet noir d'une taille comparable au diamètre de l'orbite terrestre émettant de grandes quantités d'infrarouge pourrait être détecté à des distances astronomiques de l'ordre de plusieurs centaines à plusieurs milliers d'années-lumière [66].

De nombreuses sources de radiations infrarouges ont déjà été détectées, aussi bien dans notre Galaxie que dans l'espace extragalactique. La plupart de ces émissions sont attribuées à des poussières interstellaires chauffées à quelques centaines de degrés par des

étoiles voisines. Comment distinguer ces sources naturelles d'une éventuelle sphère de Dyson construite par une supercivilisation extra-terrestre ? Peut-être en cherchant des signatures supplémentaires, comme des émissions radio anormalement élevées. Mais cette méthode de détection semble difficile à mettre en œuvre.

Il est intéressant de constater que des civilisations extra-terrestres pourraient être, en théorie, décelées à leur insu par leur manifestation d'« astrotechniques », c'est-à-dire de travaux modifiant la structure d'un système solaire dans son ensemble. D'autres civilisations pourraient cependant désirer entrer volontairement en contact avec des intelligences vivant sur d'autres étoiles. Les techniques qui peuvent être employées dans ce but seront décrites dans le chapitre suivant.

## 4. Le projet SETI

Dans le chapitre précédent, je signalais que des civilisations extra-terrestres pouvaient nous révéler leur présence à leur insu en se livrant à des travaux remodelant la structure de leur système solaire. Il n'est cependant pas interdit d'imaginer que, si des sociétés technologiques extra-terrestres existent, elles soient intéressées par une communication avec d'autres formes d'intelligence vivant autour d'autres étoiles. Dans ce cas la méthode la plus pratique, pour ces sociétés, consiste à émettre dans l'espace un message radio en direction des étoiles qui semblent propices au développement de la vie intelligente. C'est dans ce but qu'un certain nombre de scientifiques tentent de capter d'éventuels signaux artificiels délibérément émis. Ces entreprises portent le nom générique de SETI<sup>7</sup> (Search for Extra-Terrestrial Intelligence) [9,11,18,19].

### 1. Pourquoi les ondes radio ?

Les ondes radio, les rayonnements infrarouges, la lumière, les rayons X sont ce que l'on appelle des ondes électromagnétiques. Elles se propagent dans le vide à la vitesse de la lumière (environ 300 000 km/s). Les ondes radio se distinguent des autres ondes électromagnétiques par leur fréquence plus basse (ou autrement dit par leur longueur d'onde plus élevée). À titre d'exemple, les fréquences utilisées par les émetteurs radio FM sont comprises dans la bande de 88 à 108 MHz (1 mégahertz, MHz en abrégé, signifie 1 million de vibrations par seconde).

Profitons-en pour introduire la notion importante de largeur de bande de fréquence. Pour ne pas se gêner mutuellement, les émetteurs FM doivent utiliser des fréquences d'émission différentes. Supposons que 200 émetteurs se partagent la bande 88-108 MHz ; chacun disposera alors d'une largeur de bande de 0,1 MHz ou 100 kHz (kilohertz).

La vitesse de la lumière dans le vide représente la vitesse limite dans l'Univers. Alors que les ondes électromagnétiques se déplacent à cette vitesse, aucun objet matériel ne peut l'atteindre<sup>8</sup>. Les ondes radio sont faciles à produire et, pour autant que la puissance d'émission soit suffisante, elles peuvent être détectées sur des distances interstellaires. Les ondes radio apparaissent donc comme le moyen le plus pratique pour communiquer d'étoile à étoile. Rappelons que les distances entre étoiles se mesurent en années-lumière. À titre d'exemple, un signal radio émis depuis la Terre mettra plus de quatre ans pour atteindre notre étoile plus proche voisine, alpha Centauri.

D'autres types de signaux se propagent également à une vitesse proche ou égale à celle de la lumière : les neutrinos et les ondes gravitationnelles. S'il n'est pas impossible que des

---

<sup>7</sup> Récemment popularisé par le film *Contact* de Robert Zemeckis avec Jodie Foster [19].

<sup>8</sup> Nous verrons dans le chapitre 5 combien il est difficile d'accélérer un astronef pour lui communiquer une vitesse proche de celle de la lumière.

sociétés extra-terrestres très avancées puissent communiquer avec ce type d'ondes, extrêmement difficiles à produire et à détecter, il nous faut nous concentrer sur les ondes électromagnétiques plus accessibles à notre technologie et avec lesquelles nous savons qu'il est possible de transmettre de l'information.

Recherchons les conditions dans lesquelles un signal radio pourra être perçu le plus loin possible. De nombreux objets, nébuleuses gazeuses, pulsars, radiogalaxies, etc., émettent naturellement dans le domaine radio. Il faut donc choisir une gamme de fréquences pour laquelle le ciel ne soit pas trop « lumineux ». Sinon, détecter un signal artificiel extra-terrestre reviendrait à vouloir photographier des étoiles en plein jour. On peut montrer que, pour une énergie totale donnée transportée par une onde, il y a d'autant moins d'information transportée que la fréquence est élevée. En conséquence une civilisation, désirent transmettre le maximum d'information pour un budget énergétique donné (la puissance transmise à son émetteur), ne doit pas utiliser des ondes de fréquence élevée. Il faut également tenir compte de la présence inévitable du rayonnement cosmologique, résidu de la radiation qui emplissait l'Univers juste après le *Big Bang*. Enfin, la vapeur d'eau dans l'atmosphère terrestre absorbe une partie du rayonnement radio. Tenant compte de tous ces effets, la plage favorable pour SETI va de 1 à 10 GHz (1 gigahertz, GHz en abrégé, signifie 1 milliard de vibrations par seconde), c'est-à-dire les rayonnements dont la longueur d'onde va de 30 à 3 cm.

Dans le cas d'un signal délibérément émis pour porter loin, il y a intérêt à ce que l'énergie émise soit contenue dans une bande de fréquence aussi étroite que possible. Les calculs montrent en effet que le signal sera alors plus intense pour une quantité d'énergie donnée et que les effets des parasites seront limités. Cependant la largeur d'un signal délibéré ne peut pas être aussi étroite que l'on veut. Lors de leurs trajets, les ondes radio interagissent avec les électrons du milieu interstellaire et voient ainsi leurs caractéristiques se modifier légèrement. Ces électrons sont certes peu nombreux (environ une centaine par centimètre cube), mais ils sont en nombre suffisant pour que, sur des parcours de quelques dizaines d'années-lumière, des ondes de quelques gigahertz, qui au départ auraient toutes la même fréquence, se trouvent à l'arrivée dispersées dans une bande de l'ordre du dixième de hertz. Il est donc inutile d'émettre sur des largeurs de bande inférieures à 0,1 Hz.

On peut maintenant se représenter l'immense défi devant lequel SETI est placé : la « fenêtre » radio (de 1 à 10 GHz) contient 100 milliards de canaux (de 0,1 Hz) de communication possible. Chaque région du ciel susceptible d'émettre doit donc idéalement faire l'objet d'une surveillance constante sur tous les canaux possibles. Nous verrons dans les sections suivantes ce qu'il est possible de réaliser.

Les artisans du projet SETI insistent beaucoup sur l'importance que pourrait revêtir le contact avec une intelligence extra-terrestre. Même une très petite quantité d'information serait susceptible de modifier profondément notre société. La totalité de l'ancienne culture grecque, qui influença profondément la nôtre, peut être contenue sur un ou deux CD-Rom (voir chapitre 1). Une telle quantité d'information pourrait être transmise en quelques

minutes. On peut à peine imaginer ce que pourrait représenter la réception de l'équivalent d'une « encyclopédie galactique » à usage des civilisations « sous-développées » (comme la nôtre ?).



*Antenne de 305 m de diamètre de l'observatoire d'Arecibo à Porto Rico.*  
[Wikipédia]

## ***2. Les pionniers de SETI***

La réussite éventuelle du projet SETI repose sur deux idées. Premièrement, il faut que des sociétés technologiques éprouvent le besoin de communiquer, c'est-à-dire consacrent des moyens importants pour émettre des messages radio à travers la Galaxie. Cette idée ne semble pas invraisemblable ; on peut supposer que la curiosité est un trait commun à toutes les formes de vie qui développent une technologie. De plus, des civilisations très avancées pourraient sans doute très facilement consacrer une part de leur importante production énergétique à la communication [2]. Deuxièmement, il faut que la Galaxie compte un nombre relativement important de civilisations avancées. Pour que la distance moyenne entre deux sociétés soit inférieure à 1 000 années-lumière, il faut que leur nombre dans la Galaxie soit supérieur à 100 000. Plus la distance qui sépare deux civilisations augmente, plus leurs possibilités de communication diminuent.

Giuseppe Cocconi et Phil Morrison ont pour la première fois démontré, dans un article de la revue *Nature* de 1959, qu'il serait techniquement possible de communiquer au travers des espaces interstellaires avec d'éventuelles civilisations extra-terrestres. La même année, le jeune américain Frank Drake (auteur de l'équation qui porte son nom, voir chapitre 2) propose à son patron de thèse de construire un récepteur spécial pour se mettre à l'écoute de signaux éventuels. Son directeur Otto Struve le soutint dans cette entreprise et mit à sa disposition le tout nouveau radiotélescope de 24 m de diamètre à Greenbank, en Virginie. Pendant un an, Drake mena son programme d'écoute radio, baptisé OZMA<sup>9</sup>, sans succès. Il faut dire qu'avec

---

<sup>9</sup> Le nom Ozma est extrait du titre d'un livre de Frank Baum sur le monde magique d'Oz.

son détecteur à un canal il ne s'est intéressé qu'à deux étoiles proches ressemblant au Soleil, tau Ceti et epsilon Eridani. Qu'importe l'échec, la méthode est lancée pour des décennies et Frank Drake entre dans l'histoire.

### ***3. SETI au présent***

Explorer des milliards de canaux d'ondes radio décimétriques représente un défi gigantesque qui nécessite de gros moyens techniques et financiers et une technologie adéquate. C'est l'avènement des gros ordinateurs qui a réellement permis au projet SETI de devenir raisonnablement efficace. Vers la fin des années septante, la NASA commence à s'intéresser au projet. Rapidement, deux stratégies se dessinent. Une première consiste à examiner les mille étoiles les plus proches semblables au Soleil, avec la capacité de détecter des signaux faibles et sporadiques. Une deuxième recherche réalisera un balayage complet du ciel mais avec une sensibilité de détection moindre. En 1988, après une décennie d'études préliminaires, la NASA lance officiellement le programme et les observations commencent en 1992 (date anniversaire, symbolique, de la découverte du Nouveau Monde). Malheureusement, un an après l'inauguration du programme SETI, le congrès américain coupe tout financement NASA pour cette agence. Pendant cette courte période d'observation, la recherche sur cible avait visé 24 étoiles de type solaire, tandis que le balayage avait couvert environ un sixième du ciel.

#### *a. Le projet Phoenix*

Le programme sur cible a pu être repris trois mois après son arrêt, sous le nom de projet Phoenix, par le « SETI Institute » en Californie [19]. Son président Frank Drake a réussi à rassembler un financement régulier annuel de plusieurs millions de dollars à partir de donations privées.

Les observations ont commencé en février 1995 à l'aide de l'antenne de 64 m de diamètre à Parkes en Australie. C'est le plus grand radiotélescope de l'hémisphère sud. Actuellement, les écoutes se poursuivent avec l'antenne de 45 m de diamètre au « National Radio Astronomy Observatory » en Virginie. Environ 1 000 étoiles de type solaire, toutes situées à une distance inférieure à 150 années-lumière, seront examinées dans la bande de fréquence de 1 à 3 GHz. Près de 29 millions de canaux de 1 Hz de largeur peuvent être examinés simultanément. On peut mesurer le progrès accompli depuis le projet OZMA.

#### *b. Le projet SERENDIP*

D'autres programmes de recherche existent [19] : parmi ceux-ci SERENDIP (Search for Extra-terrestrial Radio Emission from Nearby Developed Intelligent Populations), supporté par l'Université de Berkeley en Californie. Le dernier et le plus performant

analyseur de fréquences de ce projet, SERENDIP IV, analyse actuellement les signaux perçus par le radiotélescope d'Arecibo à Porto Rico. SERENDIP IV est capable d'analyser 168 millions de canaux dans une bande de 100 MHz de largeur toutes les 1,7 secondes autour de la fréquence de 1,42 GHz. Avec ses 305 m de diamètre, l'antenne de l'observatoire d'Arecibo est la plus grande du monde.

Il faut signaler que toutes les écoutes de signaux artificiels extra-terrestres sont menées en parallèle avec les programmes de recherche plus traditionnels de la radioastronomie. Les antennes ne sont pas construites spécifiquement pour le projet SETI. Les fonds alloués aux écoutes servent essentiellement à financer le personnel scientifique, la construction des analyseurs de fréquences et parfois la location du temps d'écoute sur une antenne<sup>10</sup>.

#### ***4. SETI dans le futur***

Après de nombreuses années de silence radio, faut-il continuer SETI ? Certains scientifiques, comme par exemple le physicien Frank Tipler [20], pensent que le projet SETI ne peut qu'échouer car il n'y a pas d'extra-terrestres dans la Galaxie (ce point de vue sera exposé plus loin). D'autres, plus modérés, voire enthousiastes, sont d'un avis complètement différent. Je reproduis ici les réflexions de Jean Heidmann [9], astronome fort impliqué dans le projet SETI. À son avis, SETI doit continuer pour plusieurs raisons :

- un signal artificiel d'origine extraterrestre peut être capté demain ;
- les investissements en hommes et en matériel sont assez modestes : sur environ 7 000 astronomes professionnels, moins d'un pour-cent sont engagés à des degrés divers dans ce type de projet, et les crédits mondiaux avoisinent 6 millions de dollars par an ;
- les retombées technologiques de l'entreprise peuvent être importantes, comme la reconnaissance de signaux en milieu brouillé ;
- la découverte d'un signal aurait sans doute des conséquences fondamentales sur l'idée que nous avons de notre situation dans l'Univers ;
- SETI est maintenant bien implanté dans le contexte international de la recherche fondamentale (voir la section précédente) ;
- après trois décennies d'existence on constate que la technologie de SETI double son efficacité tous les huit mois environ ; cette croissance vertigineuse est due aux progrès constants et rapides de l'électronique et de l'informatique ;
- l'humanité possède maintenant le savoir-faire pour communiquer par-delà des distances interstellaires ; elle ne peut pas ne pas utiliser une technologie aussi prometteuse.

---

<sup>10</sup> Grâce à Internet, vous pouvez également participer activement aux recherches [19].

On peut accepter ou non les arguments ci-dessus, mais il est fort probable qu'au siècle prochain il y aura suffisamment de scientifiques croyant à la valeur de SETI pour continuer les recherches. Le problème est que d'ici quelques dizaines d'années, les activités humaines auront parasité complètement les capacités d'écoute sensible des radiotélescopes. Ces instruments seront complètement aveuglés par le rayonnement radio intense des multiples satellites géostationnaires. Pour sauver la radioastronomie, et en particulier le projet SETI, une seule solution : construire des radiotélescopes dans l'espace.

La face cachée de la Lune semble être l'endroit idéal. Ce lieu est le seul endroit relativement accessible qui soit presque encore vierge des pollutions humaines. Les radiotélescopes devraient idéalement être construits dans un cratère lunaire, dont les remparts protégeraient les appareils de tous les parasites radio générés par des activités sur le sol lunaire. Il est en effet fort possible que dans quelques années la Lune soit colonisée par un nombre important d'êtres humains. Ce cratère devrait être proche de l'équateur lunaire pour permettre un accès au ciel entier. Il faut qu'il soit assez grand pour accepter de vastes déploiements et avoir un sol relativement uni pour permettre ces déploiements. Ces critères conduisent tout droit au cratère *Saha*, une enceinte de 100 km de diamètre délimitée par un fort rempart de 3 000 m de haut, par 103° E de longitude et 2° S de latitude sélénographiques.

Préserver *Saha* de la pollution humaine pour assurer un avenir à la radioastronomie est un projet qui pourrait rallier la vaste communauté scientifique que ce genre d'études intéresse. Évidemment, nous ne pourrions pas rapidement construire de vastes antennes sur la Lune. Cependant, suite à la découverte récente d'eau sur notre satellite, différentes agences spatiales manifestent leur intérêt pour un retour de l'homme sur la Lune. Cette fois il ne s'agirait pas d'une « petite excursion » mais bien de l'installation d'une présence humaine permanente. Dans une telle perspective, il est aisément envisageable de poursuivre de vastes programmes de recherche sur la Lune.

Signalons que, pour le moment, nous nous contentons d'écouter. Actuellement, il n'est prévu d'émettre qu'en cas de contact, pour répondre. Espérons que toutes les sociétés technologiques extra-terrestres, si elles existent, n'ont pas le même comportement ...

## 5. Les transports interstellaires

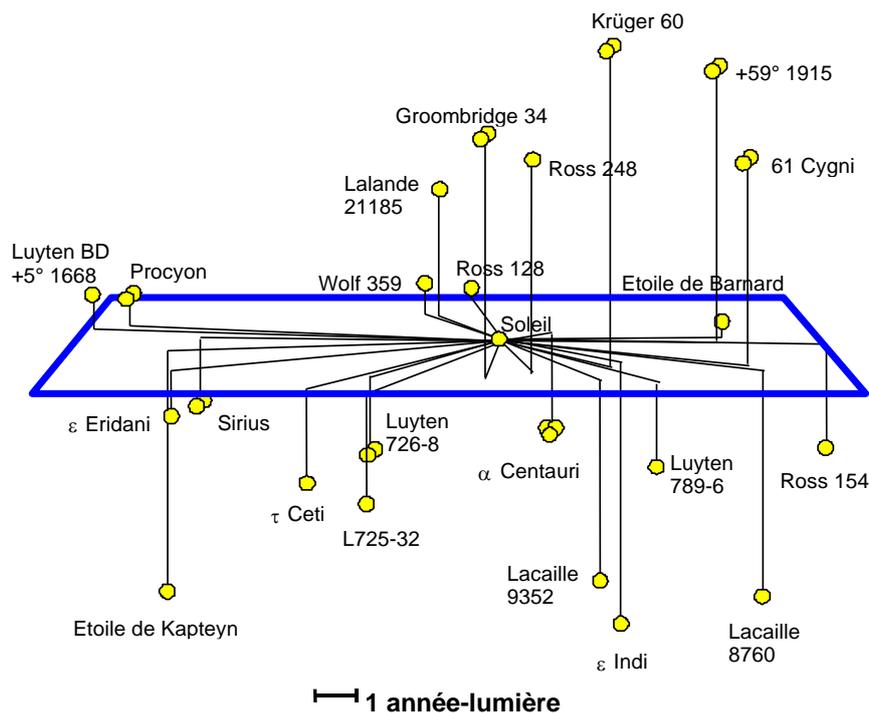
### 1. Vers les étoiles

Dans le chapitre précédent, je vous entretenais des tentatives de communications par ondes radio – qui ont été tentées dans le cadre du projet SETI – avec d'éventuelles civilisations extra-terrestres. On peut assez naturellement se demander si un contact physique sera un jour possible. Mais pour que « E.T. » vienne nous voir, ou pour que nous nous déplaçons jusqu'à lui, il faut être capable de franchir le grand vide interstellaire. Certes, une telle entreprise est impossible aujourd'hui, mais la science et la technologie de notre époque nous permettent cependant d'entrevoir certains des moyens réalistes qu'il faudra sans doute mettre en œuvre pour atteindre les étoiles [14,21,22].

Pourquoi le voyage vers les autres étoiles pose-t-il tant de problèmes ? Situons-nous d'abord dans l'Univers. L'étoile la plus proche de notre Soleil est Proxima du Centaure (voir la figure 4). Cette étoile appartient à un système triple, Alpha du Centaure, distant de 4,3 années-lumière. Cela signifie que la lumière émise par ces astres met 4,3 années pour nous parvenir. Notre système solaire fait partie d'un vaste système stellaire, la Galaxie, de forme lenticulaire et d'un diamètre d'environ 100 000 années-lumière. Le Soleil est situé dans la périphérie de la Galaxie, à environ 30 000 années-lumière du centre. Nous occupons une région de faible densité d'étoiles où la distance moyenne entre deux astres est d'environ 7 années-lumière. La grande galaxie la plus proche est située à plus de deux millions d'années-lumière. L'Univers contient des milliards d'autres galaxies encore beaucoup plus lointaines.

Il existe dans l'Univers une vitesse limite qu'aucun objet ne peut dépasser. Cette vitesse limite est la vitesse de la lumière dans le vide, qui vaut environ 300 000 km/s. Ce fait, qui peut sembler étrange, est un résultat de la théorie dite de la relativité restreinte due à Albert Einstein, théorie dont toutes les prédictions ont été vérifiées expérimentalement. Le vaisseau spatial le plus rapide que l'on puisse imaginer ne pourra jamais que s'approcher de cette vitesse sans jamais l'atteindre, ni la dépasser. Je dois ajouter que le voyage à des vitesses supérieures à la vitesse de la lumière semble bien tout à fait impossible. Certains physiciens ont bien évoqué la possibilité de passer d'un point à l'autre de l'Univers en utilisant des « raccourcis » dans l'espace-temps, dont les trous noirs seraient des portes d'entrée [23,24]. En théorie il serait possible, en utilisant judicieusement ces raccourcis, non seulement de franchir des distances astronomiques en des temps très courts, mais aussi de voyager dans le temps, passé ou futur. Ceci ouvre bien sûr la porte à toutes sortes de paradoxes temporels défiant la logique et la causalité. Dans l'état actuel des connaissances, il semble que ces constructions théoriques, toutes rigoureuses et attrayantes qu'elles soient, restent à jamais... des constructions théoriques.

Bien que la vitesse de la lumière soit beaucoup plus grande que les vitesses auxquelles nous sommes habitués sur Terre, elle se révèle être très petite pour réaliser un voyage



**Figure 4 :** Étoiles les plus proches de notre système solaire, en trois dimensions. Les distances sont représentées à l'échelle, mais pas les diamètres des étoiles, qui devraient être représentées par des points. Toutes les étoiles connues en 1989 dont la distance à notre Soleil est inférieure à 13 années-lumière sont indiquées.

interstellaire. Les étoiles les plus proches, situées à quelques années-lumière, sont donc à des années de voyage, et plus probablement à des dizaines, voire des centaines ou des milliers d'années de voyage. En effet, comme nous allons le voir, les astronefs capables de traverser le grand vide interstellaire ne pourront probablement atteindre qu'une petite fraction de la vitesse de la lumière.

Nous ne nous intéresserons dans cet article qu'aux systèmes de propulsion les moins spéculatifs qui aient été imaginés, et dont certains ont déjà fait l'objet d'études très approfondies. Cela signifie se limiter essentiellement aux fusées à propulsion nucléaire.

## 2. Le principe de la fusée

Le seul type d'astronef qui ait été utilisé à ce jour est la fusée. La propulsion d'une fusée est assurée par l'éjection, à haute vitesse, de gaz à travers une tuyère située à l'arrière du véhicule. Plus le gaz est chaud, plus la vitesse d'éjection est élevée. La vitesse maximale que peut atteindre une fusée dépend de deux facteurs : la vitesse d'éjection des gaz d'échappement et le rapport entre les masses initiale et finale de la fusée (voir la note « Fusée non-relativiste »). La masse finale de la fusée est sa masse après que tout son carburant ait été épuisé, tandis que la masse initiale est la masse finale plus la masse du carburant. Une augmentation importante de la quantité de carburant par rapport à la structure même de la

fusée n'améliore que très peu la vitesse finale, et pose en outre de nombreux problèmes technologiques. Le rapport de masse reste de toute façon limité par la masse finale qui comprend la charge utile, les réacteurs et les réservoirs de carburant (ceux qui ne sont pas largués en cours de vol). La vitesse finale de la fusée dépend par contre très fortement de la vitesse d'éjection des gaz, qui est liée à la quantité d'énergie par unité de masse que peut délivrer le carburant. Dans ce domaine d'importantes améliorations sont possibles par rapport aux techniques actuelles.

### Fusée non-relativiste

Soit  $R$  le rapport entre la masse initiale de la fusée et sa masse après épuisement complet du carburant. Soit  $V_E$  la vitesse d'échappement des gaz, constante par rapport à la fusée. Alors l'accroissement total de vitesse  $\Delta V$  d'une fusée à un étage est donné par la formule suivante :

$$\Delta V = V_E \ln R$$

où le symbole « ln » représente le logarithme népérien. Cette relation est valable pour autant que  $\Delta V$  et  $V_E$  soient petits devant la vitesse de la lumière, et que la fusée se trouve dans le vide loin de toute source de gravitation. Elle a été établie par l'ingénieur russe Konstantin Tsiolkovski (1857-1935). On constate qu'il faut donc un important accroissement de  $R$  pour obtenir une augmentation significative de  $\Delta V$ . Ce phénomène est illustré dans le tableau suivant :

$R$	$\Delta V / V_E$
10	2,30
100	4,61
1000	6,91

Les fusées conventionnelles utilisent des réactions chimiques pour chauffer les gaz d'échappement. Les vitesses maximales que l'on peut espérer ainsi atteindre sont de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres par seconde. Les fusées chimiques ne nous permettront donc pas d'atteindre les étoiles. Mais d'autres sources d'énergie existent : la fission nucléaire, la fusion nucléaire et l'annihilation matière-antimatière.

La *fission nucléaire* est la rupture d'un noyau atomique avec libération d'énergie. Par exemple, un noyau d'uranium 235 absorbant un neutron se casse en deux noyaux plus petits et libère plusieurs neutrons. Ces neutrons peuvent à leur tour provoquer d'autres fissions et engendrer ainsi une réaction en chaîne utilisée dans les réacteurs nucléaires et la bombe atomique. La *fusion nucléaire* (ou fusion thermonucléaire) est la combinaison, à très haute température, de noyaux atomiques légers donnant un noyau atomique plus lourd et un important dégagement d'énergie. Par exemple, deux noyaux de deutérium, au sein d'un plasma dans un réacteur, peuvent fusionner pour donner un noyau d'hélium 3 et un neutron, si la température atteint ou dépasse 100 millions de degrés. Le deutérium, également appelé hydrogène lourd, possède un noyau atomique composé d'un proton et d'un neutron. Le noyau atomique de l'hélium 3 est composé de deux protons et d'un neutron. Les processus de fusion

nucléaire sont responsables du dégagement d'énergie des étoiles et sont utilisés sur Terre dans les bombes thermonucléaires. D'actives recherches sont en cours pour en faire un procédé industriel de production d'énergie propre et abondante. L'antimatière est également un carburant possible, mais je n'en parlerai pas dans cet article [38].

Le tableau 3 indique quelle quantité d'énergie, exprimée en kilowattheures, peut fournir un gramme de chaque « carburant ». Les écarts entre les rendements sont impressionnants. Examinons ce que l'on peut réellement espérer obtenir de ces nouveaux

Source d'énergie	1 gramme fournit
Chimie	0,004 kWh
Fission nucléaire complète	20 000 kWh
Fusion nucléaire complète	100 000 kWh
Annihilation matière-antimatière	25 millions kWh

**Tableau 3** : Rendement de différentes sources d'énergie.

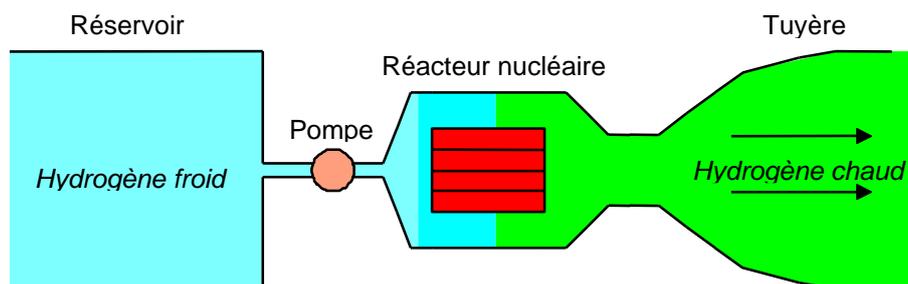
procédés.

### ***3. La fusée nucléaire classique***

Les fusées à propulsion nucléaire ont déjà été développées et testées aux États-Unis [21], mais elles n'ont jamais volé<sup>11</sup>. Le principe en est simple et est illustré sur la figure 5. Un réacteur nucléaire est utilisé pour chauffer un fluide, appelé fluide opératoire, qui est envoyé dans une tuyère pour être évacué vers l'extérieur et assurer la propulsion. Le facteur limitant les performances est la température, qui doit être maintenue suffisamment basse pour empêcher la fonte du cœur du réacteur. Dans ce cas la vitesse d'éjection des gaz est limitée. Il existe des projets de réacteurs nucléaires avec un cœur liquide, voire gazeux ; dans ce cas la température des gaz pourrait être augmentée. Mais, même dans ces conditions, on ne peut pas espérer qu'un vaisseau spatial nucléaire dépasse les 200 km/s. Les fusées à propulsion nucléaire existeront certainement un jour et permettront des déplacements rapides entre les planètes, mais elles ne nous mèneront pas aux étoiles.

---

<sup>11</sup> Essentiellement pour des raisons politiques. Il est en effet très difficile de faire admettre l'envoi de matériel radioactif dans l'espace.



**Figure 5 :** Principe de fonctionnement d'un propulseur à énergie nucléaire. Les divers éléments du dessin ne sont pas représentés à l'échelle.

D'intenses efforts de recherche sont mis en œuvre de par le monde depuis des dizaines d'années pour maîtriser la fusion thermonucléaire. La fusion contrôlée de noyaux atomiques légers en noyaux plus lourds permettra de libérer de grandes quantités d'énergie. Pour le moment, les réacteurs expérimentaux ne peuvent même pas produire suffisamment d'énergie pour s'auto-alimenter. On peut cependant raisonnablement espérer qu'un jour ces recherches aboutiront<sup>12</sup>.

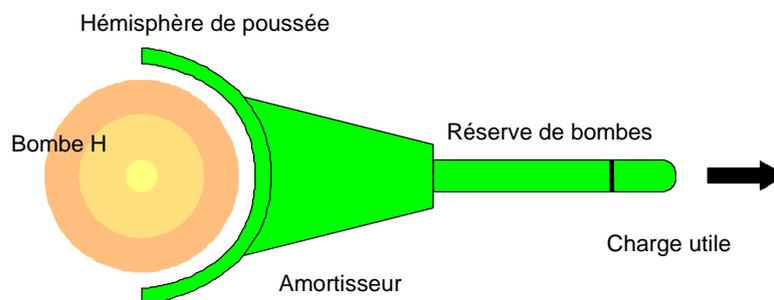
Dès la mise au point de réacteurs à fusion contrôlée, les scientifiques pourront travailler sur des moteurs fusée utilisant ce procédé. Les réactions de fusion se passent au sein d'un gaz de particules ionisées, le *plasma*. La température de ce gaz est si élevée qu'il doit être maintenu en place par des champs magnétiques très intenses ; un tel dispositif est appelé « bouteille magnétique ». La conversion d'un réacteur en propulseur ne nécessitera sans doute que la réalisation d'une légère « fuite » de la bouteille magnétique, l'expulsion du plasma chaud à vitesse élevée fournissant la poussée. Une fusée de ce type pourrait atteindre une vitesse de 10 000 km/s, c'est-à-dire 1/30 de la vitesse de la lumière.

Le problème est que les appareils à fusion actuellement envisagés sont trop lourds par rapport à la quantité d'énergie qu'ils produisent, et il n'est pas certain que l'on puisse réaliser des fusées avec un rapport poussée sur masse suffisant pour atteindre des vitesses élevées dans un temps d'accélération raisonnable. Si les fusées à fusion ne sont pas trop lourdes, elles pourront nous conduire aux étoiles.

<sup>12</sup> Les prévisions « optimistes » actuelles sont qu'un réacteur industriel pourrait être opérationnel vers 2050.

#### 4. La fusée nucléaire à impulsions

Si nous n'avons pas encore la maîtrise de la fusion contrôlée, nous parvenons à la réaliser de manière explosive dans des bombes thermonucléaires, dites bombes H. Un des plus vieux projets de vaisseau interstellaire est justement propulsé par ce genre de bombes. L'idée d'utiliser des explosifs nucléaires comme système de propulsion a été proposée par le mathématicien Stanislaw Ulam en 1946 [21,25]. Le principe est illustré dans la figure 6. Un astronef emporte avec lui une réserve de bombes H. Régulièrement il éjecte une bombe derrière lui par un orifice percé dans un « hémisphère de poussée ». À quelques dizaines de mètres en arrière du vaisseau, la bombe explose et ses débris vont frapper l'hémisphère, qui absorbe le choc et retransmet la poussée à l'ensemble du vaisseau.



**Figure 6 :** Principe de fonctionnement d'un vaisseau spatial nucléaire à impulsions. Les divers éléments du dessin ne sont pas représentés à l'échelle.

Il peut sembler extraordinaire que quoi que ce soit survive à quelques dizaines de mètres d'une explosion thermonucléaire. Pourtant le principe de la propulsion par impulsions a été testé expérimentalement avec succès. De 1958 à 1965, le programme spatial américain a consacré un budget de 11 millions de dollars à la conception d'un vaisseau interplanétaire, baptisé *Orion* [21,25], propulsé par impulsions nucléaires<sup>13</sup>. Les chercheurs et ingénieurs du projet n'espéraient rien de moins que d'atteindre Mars en 1965 et Saturne en 1970. Le projet *Orion* a été arrêté en 1965 à la suite de la signature du traité interdisant les explosions nucléaires dans l'atmosphère.

En extrapolant cette idée, le physicien Freeman Dyson a imaginé les plans d'un vaisseau interstellaire gigantesque capable d'emporter une charge utile de 20 000 t [21,25,26], dans une mission sans retour de colonisation d'un système solaire étranger. D'après les estimations de la NASA [27], une telle charge utile devrait suffire aux besoins d'un équipage de près de 2 000 personnes. Elle comprend la structure toroïdale<sup>14</sup> permettant d'assurer une

<sup>13</sup> Le coût total du projet *Orion* avait été estimé à environ 1/20 du coût total du programme Apollo qui s'est élevé à 25 milliards de dollars.

<sup>14</sup> Avec une « généreuse » allocation de 35 m<sup>2</sup> de surface en moyenne par personne.

pesanteur artificielle par rotation, le blindage contre les rayons cosmiques, l'air, l'eau, la biomasse pour l'alimentation, les réacteurs nucléaires fournissant l'énergie et le matériel nécessaire à la colonisation du système de destination. Le diamètre de l'hémisphère de poussée serait de 100 m, ce qui donne une idée des dimensions du vaisseau. Sa masse totale s'élèverait à 400 000 t <sup>15</sup>, dont les trois quarts seraient constitués de 300 000 bombes H <sup>16</sup>. En éjectant une bombe toutes les trois secondes, l'astronef gagnerait une vitesse de 5 000 km/s en cinq jours, en consommant les 2/3 de sa charge en bombes. Cela lui permettrait d'atteindre Alpha du Centaure en deux siècles et demi. Le reste des bombes lui permettrait de ralentir pour s'arrêter dans le système de destination. D'après les experts du domaine, la technologie nécessaire à la construction d'un tel vaisseau devrait être à notre portée. Il s'agit sans doute du projet le plus réaliste qui ait jamais été conçu à ce jour. Le problème est surtout d'ordre économique, puisqu'en 1968 le coût du vaisseau de Dyson était évalué à 10 % du produit national brut des États-Unis.

Heureusement, les progrès de la science ne s'arrêteront pas de si tôt. On peut espérer que les scientifiques et les ingénieurs du futur trouveront des solutions pour réaliser des voyages interstellaires plus rapidement et plus confortablement que par les moyens qui ont été proposés à ce jour.

## ***5. Conclusion***

Tous les modèles possibles de vaisseaux interstellaires n'ont pas été passés en revue dans le présent article. D'autres concepts que la fusée ont été avancés : le voilier propulsé par laser ou encore le statoréacteur interstellaire [14,21,22]. Mais tous ceux qui ont été proposés jusqu'à présent nécessitent pour leur réalisation des avancées technologiques importantes et des moyens matériels considérables. La puissance requise pour la propulsion de ces engins excède de très loin les ressources énergétiques de la Terre. Seule l'exploitation des richesses de notre propre système solaire fournira à l'humanité les moyens nécessaires au vol interstellaire. Une société n'ayant pas résolu ses problèmes économiques ne pourra pas se permettre de dilapider ses ressources dans une entreprise aussi coûteuse. Pour toutes ces raisons, on ne peut espérer une mission habitée vers les étoiles avant un ou plusieurs siècles, et ce pour autant qu'aucun obstacle technologique majeur n'interdise à tout jamais le voyage interstellaire.

---

<sup>15</sup> Masse équivalente à celle d'un pétrolier à pleine charge.

<sup>16</sup> Ceci correspondrait à plus de dix fois la totalité de l'arsenal nucléaire mondial actuel.

## 6. La colonisation de la Galaxie

Dans la classification des civilisations technologiques proposée par l'astronome russe N. S. Kardashev, une civilisation de type I est capable d'utiliser autant de puissance que celle qu'elle reçoit de son étoile. Une civilisation peut atteindre le stade II en construisant une sphère de Dyson, ce qui lui permet de capter une fraction importante de la puissance émise par son étoile. Il est maintenant temps d'évoquer la possibilité pour une société d'atteindre le stade III, c'est-à-dire la capacité d'utiliser la totalité de la puissance émise par la galaxie qui l'abrite.

Comme je l'ai déjà signalé dans le chapitre 1, une civilisation de type III ne doit pas être confondue avec ce que les auteurs de science-fiction appellent un « empire galactique », c'est-à-dire de vastes régions d'une galaxie soumises à un pouvoir central, éventuellement distant de plusieurs centaines, voire de plusieurs milliers d'années-lumière. Les distances entre les étoiles et la vitesse des communications par radio (à la vitesse de la lumière) rendent impossible la cohésion de mondes trop distants ; un message émis de la planète capitale à destination d'une planète éloignée de 300 années-lumière ne sera reçu que 3 siècles après son envoi. Cela n'empêche nullement les échanges culturels et scientifiques à travers le vide interstellaire, pour autant que certaines sociétés soient prêtes à partager gracieusement leurs connaissances. Il est même possible qu'il résulte de ces échanges une véritable communauté d'esprit à l'échelle d'une galaxie [2].

La création d'une société de type III n'est possible que si le transport de personnes et de matériels peut être réalisé entre deux étoiles. Il n'y a encore aucune certitude que cela sera possible un jour. J'ai toutefois présenté dans le chapitre 5 des arguments en faveur de la faisabilité du voyage interstellaire. Pour examiner le problème, imaginons que l'espèce en route vers le stade III soit la nôtre et, donc, que nous avons finalement pu maîtriser la technologie du voyage interstellaire. Cela soulève une question importante : combien de temps faudrait-il à l'espèce humaine pour se répandre dans la Galaxie et s'installer même dans les régions les plus lointaines ?

Il est naturellement très difficile de donner une réponse sensée à une telle question. Une limite inférieure est donnée par la taille de la Galaxie, dont le diamètre vaut environ 100 000 années-lumière. Même avec des astronefs voguant à une vitesse proche de celle de la lumière, il faudrait des centaines de milliers d'années pour simplement la traverser. Avec des vaisseaux plus lents, le temps de traversée peut devenir des centaines ou des milliers de fois plus grand encore. Le temps de colonisation sera forcément plus important, mais de combien ?



*Vision de la Galaxie, reconstituée par ordinateur, telle qu'elle apparaîtrait à un observateur situé à 60 000 années-lumière du centre galactique, dont la ligne de visée fait un angle de 10° avec le plan galactique. Le Soleil (invisible à cette échelle) est localisé au centre de l'image<sup>17</sup>.*

[Jon Lomberg]

Pour évaluer la durée présumée de colonisation de la Galaxie, différents modèles, inspirés de la démographie humaine, ont été examinés [6,13,14,17,28]. L'idée de base est assez simple. Une société, ayant développé un haut niveau de technologie et possédant des ressources économiques suffisantes, envoie plusieurs missions de colonisation vers ses plus proches voisins. Là, les colons fondent de nouvelles civilisations qui vont voir leur population et leurs ressources économiques progresser. Lorsqu'elles auront atteint un stade de développement suffisant, elles enverront à leur tour des missions de colonisation interstellaire. Dans le cadre de ces hypothèses simples, la vitesse  $V$  de propagation du front de colonisation est donnée par la formule suivante :

$$V = \frac{D}{T_d + T_c}$$

où  $D$  est la distance moyenne entre deux colonies,  $T_d$  le temps nécessaire pour franchir cette distance, et  $T_c$  la durée qui s'écoule entre le moment où la colonie se fonde et celui où elle peut envoyer de nouvelles missions de colonisation.  $(T_d + T_c)$  est donc bien le temps nécessaire pour que le front de colonisation franchisse la distance  $D$ . Plus le temps de voyage entre deux étoiles ou le temps d'évolution de la colonie est grand, plus la vitesse de

---

<sup>17</sup> Cette peinture, réalisée grâce à la collaboration de l'artiste Jon Lomberg avec plusieurs astronomes, est disponible sous forme de poster auprès de l'association «The Planetary Society» (<http://planetary.org/society/society.html>).

propagation du front est lente. Il est à noter que c'est le temps le plus long ( $T_D$  ou  $T_C$ ) qui domine la dynamique d'expansion.

Le temps de voyage entre deux sites de colonisation dépend de la vitesse moyenne  $V_A$  des vaisseaux interstellaires. Il est donné par la formule :

$$T_D = \frac{D}{V_A}$$

La population  $N_0$  amenée par le ou les vaisseaux interstellaires de colonisation sera sans doute assez faible. On peut supposer que la colonie ne sera capable de lancer de nouvelles missions interstellaires que lorsque sa population aura suffisamment augmenté jusqu'à atteindre un nombre  $N_c$  important. Si on suppose une loi de croissance de la population classique, de type exponentiel, avec un taux de croissance  $\alpha$ , alors le temps  $T_C$  de croissance de la colonie, pour passer de  $N_0$  à  $N_c$  membres, est donné par la relation<sup>18</sup> :

$$T_C = \frac{1}{\alpha} \ln \left( \frac{N_C}{N_0} \right)$$

où « ln » représente la fonction logarithme naturel ou népérien. On peut supposer une loi d'augmentation exponentielle car les ressources dans le nouveau système solaire seront abondantes et la place ne manquera pas.

Essayons maintenant de chiffrer cette vitesse d'expansion. Le Soleil se trouve dans une région de relativement faible densité d'étoiles, avec une distance moyenne entre étoiles d'environ 7 années-lumière. On peut faire l'hypothèse minimaliste que les missions de colonisation ne s'intéresseront qu'aux étoiles les plus proches. On peut donc prendre pour le paramètre  $D$  une valeur moyenne de 5 années-lumière. Dans l'hypothèse où l'astronef de Dyson, décrit dans le chapitre 5, est finalement choisi comme moyen de transport, on obtient une vitesse  $V_A$  approchant les 5 000 km/s. Tout ceci nous donne un temps de voyage  $T_D$  de l'ordre de 3 siècles.

Toujours dans l'hypothèse du vaisseau de Dyson, la population initiale  $N_0$  de la colonie pourrait atteindre 2 000 personnes. Pour déterminer la valeur de  $N_c$ , on peut remarquer qu'une nation comme les États-Unis a réussi à elle seule à financer un vaste programme spatial comprenant des missions lunaires. On peut raisonnablement supposer qu'une société du futur de 1 milliard d'individus, encore mieux armée du point de vue de la technologie et de la robotique, puisse lancer au moins une mission interstellaire de colonisation. Le temps de croissance de la colonie va en fait dépendre de manière critique du taux de croissance  $\alpha$ . Le taux de croissance mondial actuel est estimé à près de 2 % par an. Dans les sociétés primitives agricoles des débuts de l'humanité, le taux de croissance devait avoisiner 1 ‰ par an. Une valeur comprise entre ces deux extrêmes semble raisonnable pour une société dynamique (il faut certainement l'être pour entreprendre une telle aventure) en pleine expansion. Cela nous

---

<sup>18</sup>  $N_C = N_0 \exp(\alpha T_C)$ , écrit sous la forme habituellement rencontrée de la loi de croissance des populations.

donne un temps de croissance  $T_c$  qui va de 700 ans à 13 000 ans. Il est clair que la dynamique d'expansion sera contrôlée par le taux de croissance de la colonie, à moins que les vaisseaux de colonisation soient extrêmement lents.

Finalement, ces chiffres nous donnent une vitesse de propagation du front de colonisation qui va de  $4 \cdot 10^{-4}$  à  $5 \cdot 10^{-3}$  année-lumière par an. Autrement dit, la Galaxie peut être colonisée par l'espèce humaine en une durée comprise entre 16 et 200 millions d'années. Il peut paraître absurde de spéculer sur des intervalles de temps aussi longs, alors que personne ne peut prédire l'évolution de notre société, même sur des périodes de quelques années seulement. Les chiffres donnés ici sont des ordres de grandeur, imposés par des contraintes physiques et biologiques.

Certains ont cru pouvoir établir un parallèle entre la colonisation éventuelle de la Galaxie et l'expansion humaine dans les îles de l'océan Pacifique. Un peuple de marins aventuriers, utilisant des innovations technologiques (le canoë « bicoque »), a mis plusieurs siècles (25 environ) pour traverser l'immense océan et découvrir des îles vierges, sur lesquelles il s'est installé. Cette extraordinaire aventure du peuple polynésien est certes impressionnante, mais on peut se demander s'il est vraiment possible de la comparer à l'expansion humaine dans l'« océan » interstellaire. La durée des voyages entre deux colonies est très différente dans les deux cas de figure, de quelques semaines dans le Pacifique à plusieurs générations entre deux étoiles. De plus, la pression démographique, sans doute le principal moteur de l'expansion polynésienne, n'existera pas dans le cas des colons de l'espace. En effet, d'une part on peut supposer que des sociétés très évoluées seront capables de contrôler leur démographie. D'autre part, il est peu probable que les voyages interstellaires servent à déplacer les excédents de population. La capacité des astronefs ne dépassera sans doute pas quelques milliers ou dizaines de milliers de colons. De plus, une étoile complètement entourée d'autres systèmes habités n'offrira plus de possibilité de colonisation.

Si la pression démographique ne peut pas être invoquée, quels pourraient être les motifs poussant des hommes et des femmes à se lancer dans une périlleuse entreprise de colonisation galactique ? Une première raison qui vient à l'esprit serait la menace de destruction du Système solaire par une catastrophe cosmique comme la mort du Soleil ou l'explosion d'une supernova proche (les radiations émises par l'explosion d'une étoile située à quelques dizaines d'années-lumière de la Terre pourraient y détruire les formes de vie supérieure). Dans ce cas, le déplacement de population se limiterait sans doute au premier système solaire accueillant. Personnellement, je crois que la raison qui fera que l'humanité se répandra dans l'espace est tout simplement l'esprit d'aventure, le besoin pour l'homme d'atteindre de nouveaux horizons, quel qu'en soit le prix, quels qu'en soient les risques. Ce moteur de l'espèce humaine ne s'éteindra pas avec l'avènement de la technologie et continuera, comme par le passé, à faire reculer les limites du possible. Dans le chapitre 7, je développerai un scénario possible pour le futur de l'humanité conduisant assez naturellement à l'expansion vers les espaces interstellaires.

Deux raisons ont parfois été avancées pour nier la possibilité de la colonisation galactique. Une première raison est la nécessité de trouver des planètes accueillantes dans un système solaire étranger pour pouvoir fonder une colonie viable. Il n'est en effet pas certain que des planètes de type terrestre soient monnaie courante dans la Galaxie. En fait des hommes ayant passé toute leur vie dans l'environnement artificiel et parfaitement contrôlé d'un vaisseau spatial n'ont probablement pas besoin de planètes habitables pour vivre. Il leur sera seulement nécessaire de trouver des matériaux en grande quantité pour construire de nouveaux habitats spatiaux plus vastes et plus confortables [4,14]. Ces matériaux, sous forme d'astéroïdes ou de comètes, doivent pouvoir se trouver autour de chaque étoile, en vertu des théories modernes de formation des systèmes solaires. Une deuxième raison invoquée est que l'espèce humaine pourrait finir par se désintéresser des vols spatiaux. Je ne crois pas que cette raison soit valable car si l'homme arrive à essaimer sur quelques systèmes, il me paraît très peu probable que toutes les nouvelles sociétés ainsi formées connaissent une évolution culturelle convergente. Il suffit à un moment donné qu'une seule civilisation décide de poursuivre la colonisation pour que celle-ci ne s'arrête qu'avec l'occupation totale de la Galaxie.

Ces considérations nous amènent à penser que la durée de colonisation de la Galaxie pourrait être assez courte vis-à-vis de l'âge de la Galaxie, qui est évalué à environ 10 milliards d'années. Les conséquences importantes de cette remarque seront discutées dans le dernier chapitre.

Dans le chapitre 3, j'ai signalé qu'une civilisation de stade II pourrait être détectée à de grandes distances (par ce qu'on appelle des « fuites d'astrotechnique »), à condition qu'elle ne soit pas située dans une région trop éloignée de nous dans la Galaxie, ou qu'elle n'occupe pas un emplacement qui nous soit masqué par des nuages de gaz ou de poussières. Une civilisation de type III, ayant donc « domestiqué » sa galaxie par la construction d'un grand nombre de sphères de Dyson, serait détectable sur des distances intergalactiques de plusieurs millions d'années-lumière. En effet, la luminosité intrinsèque d'une galaxie, son rayon, ainsi que la vitesse moyenne de déplacement des étoiles à l'intérieur de cette galaxie, sont des caractéristiques mesurables depuis la Terre. Ces deux dernières quantités sont liées à la masse de cette galaxie tandis que la première dépend de cette même masse émettant de la lumière sous forme d'étoiles. Si une civilisation habitant cette galaxie capte une fraction appréciable de cette lumière pour ses besoins propres, les liens naturels existant entre ces trois quantités n'existeront plus et la galaxie présentera des caractéristiques inhabituelles. Une récente étude menée sur un échantillon de 137 galaxies [29] ne semble pas indiquer qu'une civilisation de type III existe dans notre environnement galactique proche. Toutefois des recherches supplémentaires sont nécessaires pour confirmer ou infirmer ces conclusions.

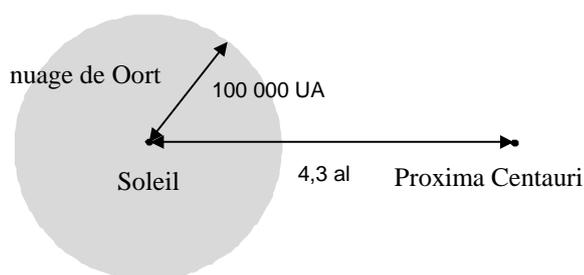
## 7. Les nomades cométaires

Dans le chapitre précédent, j'évoquais la possibilité que l'espèce humaine (ou une société intelligente extra-terrestre) maîtrise un jour la technologie du voyage interstellaire, et finisse par occuper la totalité de la Galaxie en voyageant d'étoile en étoile au moyen de vaisseaux à propulsion nucléaire. Il est cependant possible d'imaginer des scénarios de colonisation galactique sans faire appel à des astronefs rapides. Pour comprendre comment cela pourrait se réaliser, il nous faut avant toute chose parler d'objets fort appréciés des astronomes amateurs : les comètes.

### 1. Le nuage de Oort

Les comètes sont ces petits astres, de quelques centaines de mètres à plusieurs dizaines de kilomètres de diamètre, qui parcourent les environs du Système solaire sur des orbites très excentriques [30]. Lorsqu'une comète s'approche du Soleil, elle voit la surface de son noyau se vaporiser sous l'action des rayons solaires, ce qui engendre la chevelure et la queue si caractéristiques de ces objets célestes.

La distribution des orbites des comètes a conduit l'astronome néerlandais Jan Oort à avancer que celles que nous observons ne sont qu'une toute petite partie d'un immense « réservoir » de comètes situées pour la plupart très loin du Soleil et impossibles à détecter [31]. Actuellement, il semble bien établi que le Soleil est effectivement entouré d'un nuage de comètes, à peu près sphérique, appelé « nuage de Oort », dont le rayon pourrait atteindre une extension de plus de 100 000 UA (UA est le symbole de l'unité astronomique qui équivaut à la distance moyenne Terre-Soleil, environ 150 millions de km). Une distance de 100 000 UA



*Taille approximative du nuage de Oort du Soleil comparée à la distance qui nous sépare de l'étoile la plus proche.*

correspond à environ 1,6 année-lumière ; cela signifie que l'extrême limite du nuage de Oort se situerait à un peu plus du tiers de la distance qui nous sépare de Proxima Centauri, l'étoile la plus proche de notre Soleil. Le nuage de Oort pourrait contenir plus de 6 000 milliards d'objets de tailles diverses (et peut-être plus encore). La distance moyenne entre deux de ces comètes est d'environ 10 UA, ce qui correspond au rayon de l'orbite de Saturne. En supposant une masse moyenne de 40 milliards de tonnes pour une comète, la masse contenue dans le nuage de Oort pourrait s'élever à environ 40 fois celle de la Terre.

Les comètes du nuage de Oort sont pour la plupart très faiblement liées au Soleil et parcourent leur orbite avec des périodes pouvant dépasser plusieurs millions d'années. Elles

sont donc assez sensibles à toutes les influences gravitationnelles, très faibles mais permanentes, provenant du milieu interstellaire. Ces perturbations sont de trois types. Premièrement, les étoiles proches du Soleil peuvent, en s'approchant du nuage de Oort, perturber les trajectoires cométaires ; on estime qu'en moyenne 10 étoiles s'approchent du Soleil à moins de 4 années-lumière tous les millions d'années. Deuxièmement, le Soleil traverse occasionnellement de gigantesques nuages moléculaires interstellaires dont la masse peut atteindre le million de masses solaires. De telles rencontres qui ont lieu à quelques centaines de millions d'années d'intervalle sont aussi la cause d'altérations orbitales pour les comètes. Enfin, tout comme les océans terrestres subissent des effets de marée dus à l'action conjuguée de la Lune et du Soleil, le nuage de Oort est soumis à des effets de marée dus à l'attraction du plan de la Galaxie et du bulbe galactique, attractions qui s'exercent dans des directions différentes. Ces diverses influences altèrent occasionnellement la trajectoire des comètes. Une faible partie de ces objets plonge vers le Système solaire, ce qui va nous permettre de les observer. Une plus grande partie quitte le nuage de Oort, échappant définitivement à l'attraction du Soleil. Les scientifiques ont de bonnes raisons de croire qu'un grand nombre des étoiles de notre Galaxie sont également entourées de nuages cométaires. S'il en est ainsi, l'espace interstellaire doit être littéralement « peuplé » de comètes, avec une distance moyenne entre deux objets estimée entre 1 000 et 6 000 UA (une année-lumière équivaut à plus de 63 000 UA) [32].

La composition chimique des comètes nous est encore en grande partie inconnue. Cependant des estimations peuvent être réalisées en se basant, d'une part sur l'analyse spectroscopique des gaz émis par les noyaux cométaires, et d'autre part sur les modèles de formation des comètes. Le tableau ci-dessous reprend certains des éléments que pourrait contenir une comète de 500 milliards de tonnes. On constate qu'une part importante du noyau est constituée d'eau (sous forme de glace) et que des quantités appréciables d'éléments de base de la chimie organique et de métaux peuvent être présents. La quantité de deutérium que l'on peut s'attendre à trouver naturellement dans l'eau, ainsi que les masses attendues de matières fissiles sous forme d'uranium et de thorium, sont également indiquées.

## ***2. Les richesses cométaires***

Les trajectoires des comètes et leur composition chimique sont telles que certains scientifiques ont envisagé la possibilité d'utiliser ces astres pour réaliser des déplacements interstellaires [13,17,32-34]. Deux scénarios, non mutuellement exclusifs, sont envisageables.

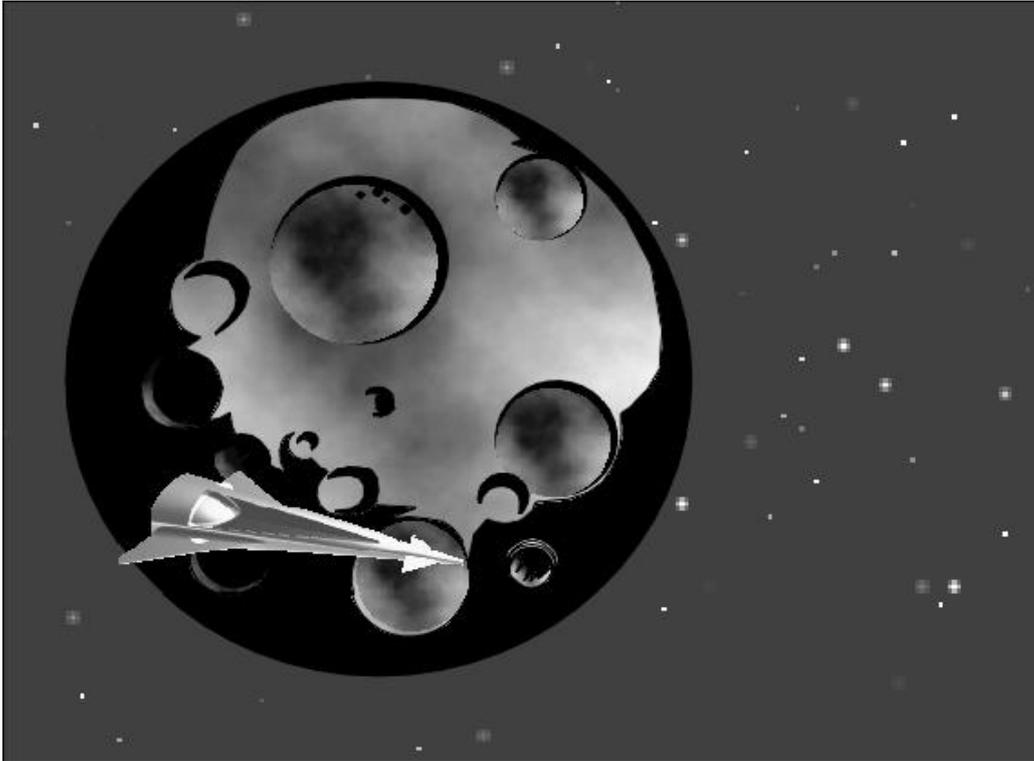
Il est vraisemblable qu'un jour l'homme occupera l'espace de façon permanente, probablement dans de vastes cités spatiales disséminées un peu partout dans le Système solaire [4,14,17]. Ces habitats artificiels, sans doute très vastes pour la plupart, seront construits dans le vide en orbite autour du Soleil ou des planètes, ou sur des planétoïdes. Peu nombreuses au début et construites à proximité de la Terre ou de la Lune, les colonies ne tarderont pas à se multiplier et gagneront progressivement des contrées de plus en plus

<b>Élément</b>	<b>Masse en tonnes</b>
Eau	159 milliards
Carbone	39 milliards
Azote	19 milliards
Silicium	16 milliards
Fer	44 milliards
Aluminium	2 milliards
Deutérium	4 millions
Uranium + Thorium	8 000

*Quantité moyenne de certains des éléments que l'on pourrait trouver dans une comète dont la masse avoisine les 500 milliards de tonnes [32]. Avec une densité moyenne identique à celle de l'eau, le diamètre du noyau serait d'environ 10 kilomètres.*

lointaines du Système solaire. Ainsi, il n'est pas impossible que des comètes du nuage de Oort finissent par être occupées par des colonies humaines de plusieurs milliers de personnes. En effet, une comète de taille raisonnable contient de grandes quantités d'eau et les matières organiques de base (carbone, oxygène, azote) nécessaires à l'établissement et au maintien d'un écosystème accueillant pour les colons. Les roches et métaux indispensables pour construire un habitat confortable et développer une société technologique ne manquent pas non plus.

Par contre, dans ces régions où l'éclat du Soleil rivalise à peine avec celui de la planète Vénus dans le ciel de la Terre, la lumière – et donc l'énergie solaire – n'est plus disponible en grande quantité, comme elle l'est dans le Système solaire intérieur. Pour s'alimenter en énergie les colons devront donc utiliser les ressources de la comète. Pour décider si une comète peut faire vivre une communauté importante, il convient d'abord de déterminer ce que pourrait être la consommation énergétique d'un colon de l'espace. Plusieurs chiffres ont été avancés [17,32-34], mais on peut retenir l'estimation raisonnable de 100 kilowatts, ce qui correspond à 5 fois la consommation moyenne actuelle d'un Américain. Cela peut paraître beaucoup, mais les colons de l'espace n'auront pas la lumière du Soleil pour se chauffer et pour s'éclairer. Une communauté de 1 000 personnes utiliserait donc une puissance moyenne de 100 mégawatts. Une première ressource énergétique possible de la comète est le deutérium. C'est un matériau qui peut être utilisé pour réaliser la fusion thermonucléaire. À condition de maîtriser cette technologie, une comète de taille moyenne de 500 milliards de tonnes pourrait fournir assez de deutérium pour assurer de l'énergie à un millier de colons pendant environ dix millions d'années. Elle pourrait également fournir assez d'uranium et de thorium pour alimenter des réacteurs nucléaires à fission pendant environ 25 000 ans. Il a été également suggéré que les colons pourraient déloger une comète du nuage de Oort et la faire plonger vers le Soleil pour repartir ensuite vers l'espace interstellaire avec une vitesse accrue [33]. Pendant la chute vers le Soleil, qui pourrait durer plusieurs siècles,



*Vision d'un futur possible ? Dans les profondeurs glacées du nuage de Oort, un vaisseau spatial, transportant plusieurs milliers de personnes, s'approche d'un noyau de comète encore inexploité. L'astronef sera bientôt démonté pour fournir aux colons leur premier habitat. Son propulseur nucléaire sera reconverti en centrale énergétique pour fournir, entre autres, chaleur et lumière dans ces régions lointaines où le Soleil ne se distingue pas d'une autre étoile. Plus tard, l'énergie et les matières premières seront extraites du noyau pour permettre le développement de la communauté des « nomades cométaires ».*

l'énergie solaire pourrait être utilisée pour dissocier une grande partie de l'eau de la comète. L'hydrogène et l'oxygène ainsi obtenus seraient stockés pour fournir ultérieurement de l'énergie. Signalons enfin que l'énergie solaire pourrait être également utilisée directement loin dans l'espace interstellaire mais au prix de prouesses technologiques impressionnantes [34].

Il semble donc que les comètes puissent abriter pendant de longues durées des colonies humaines de quelques milliers de personnes<sup>19</sup>. Une fois les ressources d'une comète épuisées, celle-ci pourrait être abandonnée par les colons au profit d'une autre comète voisine. De même, un groupe de personnes au sein d'une communauté cométaire pourrait décider de tenter sa chance ailleurs, quitter sa colonie et en fonder une autre sur un noyau cométaire voisin. Si des hommes choisissent un jour de vivre en petites communautés sur des comètes, il se pourrait que le nuage de Oort se peuple progressivement et que l'humanité occupe des

---

<sup>19</sup> Pour les lecteurs intéressés par un aperçu romanesque de ce que pourrait être la vie sur un noyau de comète, je peux conseiller les trois textes de science-fiction suivants : Gregory Bendford et David Brin, *Au cœur de la comète*, Le Livre de Poche, 1992 ; G. David Nordley, *Les Compagnons de la comète*, Étoiles Vives n° 4, Orion Éditions et Communication, 2<sup>e</sup> semestre 1998 ; Jules Verne, *Hector Servadac*, Le Livre de Poche, 1968. Sur le plan scientifique, il est à noter que les deux premiers textes cités sont assez vraisemblables. Le roman de Jules Verne est quant à lui passablement fantaisiste mais très agréable à lire.

régions de plus en plus éloignées du Soleil. Certaines comètes éjectées du nuage de Oort peuvent être capturées par une étoile voisine. Les hommes pourraient ainsi passer d'un système stellaire à l'autre. Ce processus se répétant d'étoile voisine en étoile voisine, l'espèce humaine pourrait ainsi progressivement coloniser l'espace interstellaire. Au bout d'un milliard d'années environ, la totalité de la Galaxie serait occupée par l'espèce humaine [17].

Il est également possible que les noyaux cométaires ne servent pas d'habitats permanents, mais plutôt de relais pour les voyages interstellaires [32]. Imaginons que l'on puisse fabriquer un vaisseau spatial pouvant entretenir la vie d'un millier de personnes durant des dizaines d'années, et capable d'atteindre une vitesse de l'ordre de 1 000 km/s grâce à des propulseurs à fusion thermonucléaire ou à impulsions nucléaires [14]. En trente ans, le temps d'une génération, la distance entre deux comètes interstellaires pourrait être franchie. Chaque fois qu'une nouvelle comète serait atteinte, l'équipage se réapprovisionnerait en eau, air et matériaux divers pour entretenir les systèmes de survie et éventuellement réparer le vaisseau. Le plein de « carburant » nucléaire pourrait également être fait en puisant dans les immenses réserves de deutérium du noyau. Les colons de l'espace franchiraient ainsi le grand vide entre deux étoiles en sautant de noyau cométaire en noyau cométaire. Cette façon de voyager entre les étoiles permettrait d'éviter de devoir franchir en une seule fois plusieurs années-lumière. Les durées entre chaque escale, bien que longues, ne seraient pas de l'ordre de plusieurs siècles. Les habitats artificiels emportés par les astronefs interstellaires ne devraient pas pouvoir fonctionner des centaines d'années sans être alimentés en matière première. Il suffirait qu'ils restent fonctionnels en isolation complète pendant seulement quelques décennies.

### ***3. Conséquences observationnelles***

La principale difficulté à laquelle devront faire face les sociétés nomades utilisant les comètes sera de repérer un astre de quelques kilomètres de diamètre à des distances de plusieurs centaines – voire plusieurs milliers – d'unités astronomiques. Lorsque les propriétés de réflexion des surfaces des noyaux cométaires dans l'espace profond seront connues, il sera possible de déterminer quels types de mesure sont les plus appropriés pour détecter ces objets. Une recherche directe par observation télescopique serait sans doute fort longue et hasardeuse. Il serait plus efficace d'utiliser des radars ou des lidars<sup>20</sup> qui pourraient balayer le ciel de radiations pour lesquelles les comètes présentent un fort albédo<sup>21</sup>. De hauts flux de rayonnement sont nécessaires pour réussir une détection sur de si longues distances. Ils pourraient être produits de manière similaire à celle envisagée pour générer de hauts flux de rayons X afin de détruire des missiles en plein vol. Étudiée dans le cadre du programme militaire américain IDS, la méthode consiste à convertir l'énergie d'une explosion nucléaire en faisceaux étroits et cohérents de rayons X [35]. Si cette méthode peut être utilisée pour

---

<sup>20</sup> Le lidar (*Light Detection And Ranging*) est l'équivalent d'un radar pour la radiation optique.

<sup>21</sup> L'albédo est la fraction du flux total de lumière incidente renvoyée par une surface.

produire du rayonnement qu'une comète peut fortement réfléchir, alors la détection de petits objets célestes très distants deviendra efficace.

Si la recherche des comètes devient une activité importante pour le développement de l'espèce humaine et son expansion dans l'espace, elle peut l'être tout autant pour des sociétés extra-terrestres poursuivant des buts similaires. Les émissions radar d'une civilisation de nomades cométaires couvrant plusieurs nuages de Oort pourraient être détectables sur des distances astronomiques. Une fois connues les données sur l'albédo des comètes dans l'espace profond, la recherche de tels signaux radar pourrait devenir une activité intéressante pour ceux qui traquent les signes d'intelligences extra-terrestres<sup>22</sup>.

---

<sup>22</sup> Il a été suggéré que d'autres types de sociétés de nomades interstellaires puissent exister [67].

## 8. Les machines de von Neumann

Deux scénarios de colonisation de la Galaxie par une société technologique (humaine ou non) ont été décrits dans les chapitres 5 et 7. Une idée était d'utiliser des fusées à propulsion nucléaire pour voyager entre deux étoiles proches ; une autre possibilité était d'utiliser des noyaux de comète pour assurer la dispersion de la vie dans le vide interstellaire. Dans ce dernier cas, la colonisation d'un grand nombre de nuages cométaires devrait permettre la détection, sur des distances astronomiques, de la civilisation en expansion. Un troisième scénario va maintenant être examiné ; mais pour cela il nous faut faire un détour par les travaux du grand mathématicien John von Neumann sur la cybernétique et les ordinateurs.

### *1. Le constructeur universel*

Pendant la seconde guerre mondiale, John von Neumann travaillait à Los Alamos comme conseiller sur la conception de la bombe atomique. Très rapidement, il se désintéressa des problèmes liés à l'énergie nucléaire pour se consacrer à une tâche qui allait l'occuper pour le reste de ses jours : les ordinateurs et plus précisément la théorie des automates. Pour von Neumann, le concept d'automates s'applique à l'ensemble des ordinateurs, dont il fut le premier à entrevoir les implications révolutionnaires. Un automate est une machine dont le fonctionnement peut être décrit strictement en termes mathématiques. Les recherches de von Neumann avaient pour but d'établir une théorie générale prévoyant la conception et le fonctionnement de tels appareils. D'un point de vue pratique, ces travaux devaient déboucher sur la réalisation de machines beaucoup plus complexes et sophistiquées que celles qui existaient à l'époque et même que celles qui fonctionnent aujourd'hui. John von Neumann mourut avant d'avoir pu mettre au point sa théorie mais il eut la satisfaction de voir ses intuitions confirmées par les travaux des... biologistes.

En effet, en septembre 1948, von Neumann donne une conférence intitulée *The General and Logical Theory of Automata*, dont le thème central est l'analyse abstraite d'une machine suffisamment complexe pour pouvoir s'autoreproduire [13,36]. Il démontre qu'un automate autoreproducteur doit posséder 4 composants distincts : le composant A est une usine automatique, un automate qui rassemble des matériaux bruts et les traite à partir d'instructions écrites reçues de l'extérieur ; le composant B est un duplicateur, un automate qui lit une instruction écrite et la recopie ; le composant C est un contrôleur, un automate qui est relié à la fois à A et à B. Quand C reçoit une instruction, il la transmet à B qui la recopie, puis la transmet à A qui la traite, et enfin il remet l'instruction copiée à la machine fabriquée par A en gardant l'original. Le composant D est une instruction écrite indiquant le détail des opérations qui permettent à A de faire fonctionner le système dans son ensemble, A plus B plus C. L'analyse de von Neumann démontre qu'une structure de ce type est logiquement nécessaire et suffisante pour qu'un automate puisse fabriquer une réplique de lui-même. De plus, von Neumann postule que cette structure est aussi celle des êtres vivants. Cinq ans plus

tard Crick et Watson découvrent la structure de l'ADN, permettant une avancée décisive dans la compréhension des mécanismes du vivant. Maintenant, nous connaissons les équivalents biologiques des composants de l'automate autoreproducteur : D est le matériel génétique porteur de l'information, l'ADN et l'ARN ; A sont les ribosomes qui assemblent les acides aminés pour fabriquer les protéines, véritables briques des organismes vivants ; B sont les enzymes ARN et ADN polymérases dont la fonction est la lecture et la copie du matériel génétique ; C sont les molécules contrôlant l'expression des messages et d'autres éléments dont le fonctionnement est encore mal compris [37]. On peut maintenant mieux mesurer l'intuition géniale de ce mathématicien qui comprit de manière théorique le mécanisme fondamental de la reproduction des cellules vivantes.

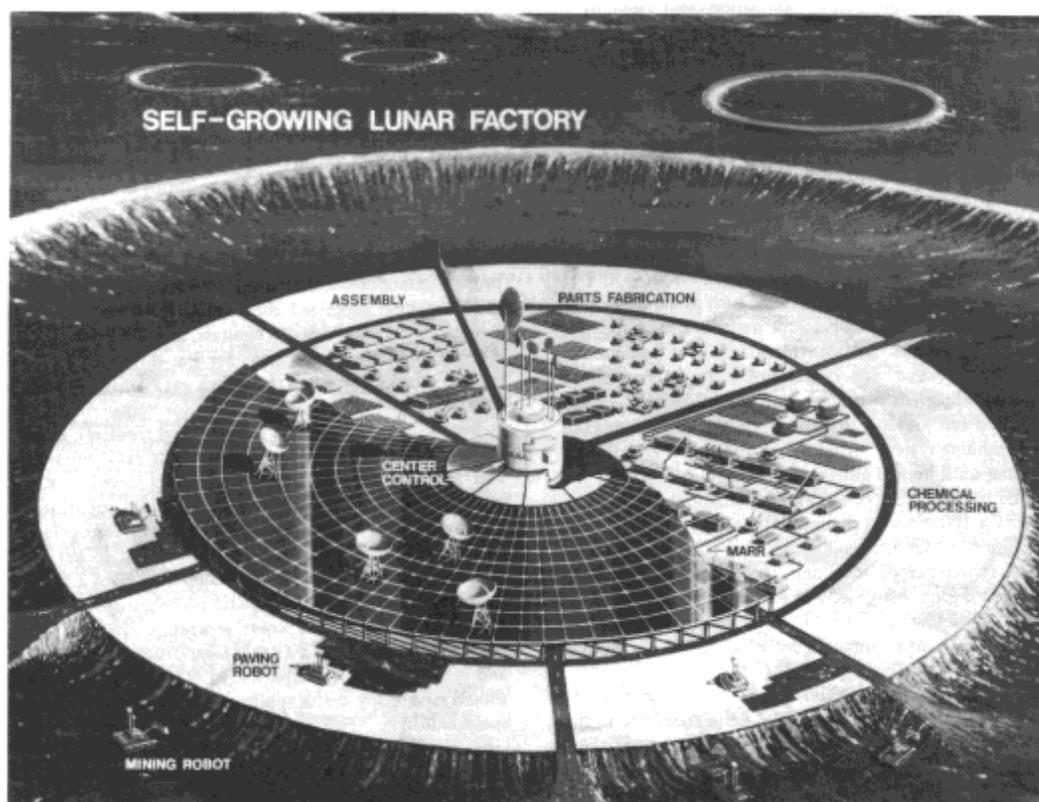
John von Neumann était convaincu qu'il devrait être possible de construire véritablement, et non plus théoriquement, une machine capable de fabriquer une réplique d'elle-même. En fait, une machine autoreproductrice de von Neumann est ce qu'on appelle un constructeur universel qui possède dans sa mémoire ses propres plans de construction. Un constructeur universel serait en outre capable de construire n'importe quoi du moment qu'il possède les instructions nécessaires à cette tâche. Les sciences cybernétiques ont progressé sans cesse depuis les travaux de von Neumann et on peut se demander si un jour il ne sera pas possible de construire et programmer un automate autoreproducteur pouvant être utilisé à des travaux utiles. Prenons un exemple de ce que pourrait accomplir une telle machine.

Un bateau construit par la compagnie « Robot & C<sup>ie</sup> » quitte son port d'ancrage sur la côte australienne. Plus d'un mois plus tard, quelque part dans l'océan Indien, deux bateaux identiques apparaissent au lieu d'un seul. En effet, le navire initial était un automate autoreproducteur qui a construit une réplique de lui-même. Les matériaux de base, carbone, azote, oxygène, ont été extraits de l'eau de mer et de l'air. Les éléments métalliques sont principalement fournis par le magnésium abondant dans les océans<sup>23</sup>. D'autres éléments sont utilisés avec plus de parcimonie. Évidemment, la compagnie n'a pas construit un navire aussi sophistiqué juste pour le plaisir de le voir se reproduire. Le bateau et ses copies sont équipés d'installations de dessalement de l'eau de mer alimentées par l'énergie solaire. La compagnie « Robot & C<sup>ie</sup> » a également installé un peu partout le long des côtes des stations de pompage équipées chacune d'un radiophare. Quand un navire a rempli ses réservoirs d'eau douce, il vient décharger sa cargaison à la station de pompage la plus proche. Il repart ensuite réaliser une copie de lui-même avant de produire et de stocker de l'eau douce. Il est facile de calculer qu'au bout d'un an de fonctionnement il y aura mille bateaux, au bout de deux ans un million, au bout de trois ans un milliard. Le rendement est si prodigieux que les déserts se remettent à fleurir, mais ... quel est donc le défaut du système ? Premièrement, il ne suffit pas d'avoir de l'eau douce en abondance pour faire reverdir les zones désertiques. Il faut de nombreuses infrastructures : stations de pompage, pipelines, fermes, etc. Des dizaines d'années seront nécessaires pour construire tout cela, sans parler du financement que cela exigera. Des

---

<sup>23</sup> Le magnésium est utilisé dans la fabrication d'alliages ultra légers ; l'eau de mer en contient 1,3 kg par m<sup>3</sup>.

machines de von Neumann pourraient évidemment être développées pour réaliser ces installations, mais ce n'est pas le plus grave défaut du système. Dès la troisième année « Robot & Cie » sera en procès avec les autres compagnies maritimes dont les bateaux ne pourront plus circuler, et au bout de quatre ans les automates autoreproducteurs couvriront la totalité de la surface des océans. Cet exemple est tiré de la référence [13], mais on peut imaginer d'innombrables autres utilisations des machines de von Neumann, pourvu que l'on prévoie des systèmes de régulation empêchant un désastre écologique.



*Une usine lunaire assurant sa propre « croissance » : vision d'un futur possible ? Des informations sur le sujet sont disponibles sur le site internet : <http://www.geocities.com/CapeCanaveral/Launchpad/7233/contents.html>.*

Ces machines pourraient être idéalement utilisées dans l'espace. Imaginons que des automates autoreproducteurs puissent extraire du minerai de la planète Mercure, tandis que d'autres transportent ces matériaux à proximité du Soleil pour y construire des stations solaires orbitales. Nous aurions là le moyen idéal de construire une sphère de Dyson assurant à l'humanité un approvisionnement illimité en énergie [13].

Évidemment nous ignorons si l'humanité pourra un jour construire des machines autoreproductrices. Bien que leur construction soit possible en théorie, nous ne savons pas si des difficultés technologiques insurmontables ne rendront pas leur réalisation impossible. Imaginons toutefois que de tels automates soient un jour construits ; quel rapport existe-t-il entre ces machines et la colonisation galactique ? C'est ce que nous allons maintenant examiner.

## ***2. La sonde de von Neumann***

Supposons qu'une civilisation extra-terrestre ait développé à la fois les technologies des machines autoreproductrices et du voyage entre les étoiles. La charge utile d'un astronef interstellaire pourrait être un constructeur universel possédant dans sa mémoire les schémas de construction de lui-même, de son véhicule porteur et de divers instruments scientifiques. Une fois la sonde interstellaire arrivée dans le système solaire visé, elle se mettra à la recherche de matériaux bruts afin d'assurer sa reproduction, astronef porteur interstellaire y compris. Les matériaux ne manqueront pas, que ce soit sous forme de noyaux de comète ou de planétoïdes. De même, l'énergie pourra être abondamment fournie par la lumière du soleil étranger, ou par la fusion du deutérium trouvé dans les glaces cométaires (pour autant que les concepteurs possèdent également la maîtrise de la fusion thermonucléaire). Une fois que la sonde aura fabriqué et envoyé vers d'autres systèmes un certain nombre de copies d'elle-même, elle pourra se mettre à explorer plus en détail le système dans lequel elle se trouve. Une antenne radio, embarquée ou construite sur place, permettra à la sonde de faire part de ses découvertes à ses concepteurs restés dans leur système solaire natal. Quand les nouvelles sondes auront atteint leur système cible, le processus pourra se répéter. La Galaxie pourrait ainsi être colonisée par des sondes de von Neumann extra-terrestres.

Le temps de colonisation galactique dépend de deux facteurs : la vitesse des astronefs et le temps de réplique d'une sonde. Dans l'hypothèse où les véhicules interstellaires sont propulsés par des moteurs à antimatière assurant une vitesse de croisière d'au moins un dixième de la vitesse de la lumière [38], et où la construction des copies des sondes prend un siècle, la Galaxie serait entièrement explorée en environ 3 millions d'années. Si on suppose que les sondes de von Neumann s'accrochent à des noyaux de comète pour se déplacer entre les étoiles et mettent plusieurs millénaires pour se répliquer, le temps de colonisation peut dépasser 200 millions d'années. Dans le pire des cas, la race extra-terrestre ayant eu le courage de faire cet investissement pourra tout connaître de la Galaxie – en quelques centaines de millions d'années – sans avoir dû « mettre le nez dehors ».

Il faut noter que l'investissement économique serait sans doute assez modeste. Si des automates autoreproducteurs peuvent être fabriqués, la recherche et développement de ces machines se fera certainement dans d'autres secteurs que celui de la recherche spatiale (pensons à « Robot & C<sup>ie</sup> »). On ne pourra pas faire l'économie du développement et de la fabrication de véhicules interstellaires, mais quelques-uns seront suffisants. Si on suppose que chaque sonde ne fabrique que deux copies d'elle-même, il suffira de 37 « générations » de machines pour qu'il y ait autant de sondes que d'étoiles dans la Galaxie. L'exploration complète de la Voie Lactée ne coûterait ainsi pas plus cher que l'envoi de quelques sondes interstellaires.

Ce scénario de colonisation galactique par des machines autoreproductrices est longuement développé (et défendu) dans une série d'articles dus au physicien mathématicien américain Frank J. Tipler [39-41] (voir les références [20,42] pour un résumé). Évidemment

les objections pertinentes ne manquent pas ; citons-en deux parmi certaines exposées dans les références [20,42] :

- Il n'est pas évident qu'un programme informatique contrôlant une machine de von Neumann puisse être réalisé. Selon certaines estimations « optimistes », le programme de contrôle d'un constructeur universel devrait compter plusieurs dizaines de millions d'instructions [14]. À titre de comparaison, un logiciel de défense antimissiles balistiques global (système de défense improprement baptisé « Guerre des Étoiles ») pourrait compter 10 millions de lignes de code, tandis que le programme de commande d'un ordinateur central contient de l'ordre de 500 000 instructions [43]. Sera-t-il possible d'écrire un tel programme sans erreurs entraînant un dysfonctionnement grave de l'automate autoreproducteur ? Frank Tipler, lui, estime qu'une machine de von Neumann devrait idéalement posséder des facultés de « raisonnement » comparables à celles d'un être humain<sup>24</sup> (on parle alors d'intelligence artificielle). On estime que  $10^{15}$  bits permettent de coder une personnalité humaine ; ce programme représente donc une quantité d'information qui nécessiterait pour son stockage environ 200 000 CD-ROM. Tipler pense toutefois que la nanotechnologie<sup>25</sup> devrait permettre de construire un ordinateur « intelligent » ne dépassant pas quelques dizaines de grammes [44]. Avec ce genre de technologie, la masse totale d'un constructeur universel serait sans doute très inférieure au millier de tonnes envisagé avec des technologies classiques [14]. Sans partager l'enthousiasme de Tipler, on peut cependant espérer de nombreux progrès dans le domaine de la cybernétique, progrès qui déboucheront peut-être un jour sur la fabrication d'un automate autoreproducteur.
- Les sondes séjourneraient longtemps dans l'espace, de quelques dizaines d'années à quelques milliers d'années. Des pannes et des accidents sont donc inévitables : usure de certains systèmes, rencontres avec des météorites, dégradations dues aux rayons cosmiques, etc. Il faudrait donc que ces machines soient dotées de systèmes autoréparateurs performants et durables. Même dans ce cas, on ne pourrait pas garantir que la sonde soit capable d'accomplir sa mission une fois arrivée à destination. Plus grave, elle pourrait être parfaitement fonctionnelle mais mal exécuter son programme et utiliser sans retenue tous les matériaux disponibles pour se reproduire. On ne peut que frémir en imaginant des hordes de machines de von Neumann « dévorant » la Galaxie aux seuls fins de se répliquer, détruisant sur leur passage tous les écosystèmes qu'elles rencontrent. Une sonde de von Neumann serait donc un engin potentiellement trop dangereux pour qu'une espèce sensée se risque à en construire.

---

<sup>24</sup> Après tout, les êtres humains sont des « machines » de von Neumann, spécialisées pour travailler sur la Terre.

<sup>25</sup> La nanotechnologie est une technologie visant à mettre au point des machines dont chaque composant est une molécule, voire un atome. Étape ultime en matière de miniaturisation, cette technique fait actuellement l'objet de nombreuses recherches, dont, malheureusement, on ne peut garantir l'aboutissement.

### ***3. Conséquences observationnelles***

Une civilisation extra-terrestre qui se serait lancée dans un programme d'exploration de la Galaxie au moyen de machines de von Neumann ne passerait pas inaperçue. Même si les sondes ont pour instruction de ne pas entrer en contact avec des sociétés étrangères, elles pourraient être détectées. Si les astronefs utilisent des systèmes de propulsion à antimatière [68], la lumière visible émise par les radiateurs des moteurs a une signature particulière et peut sans doute être détectée à plusieurs centaines d'années-lumière par les équipements astronomiques actuels [45]. De même, des vaisseaux spatiaux à voile magnétique [45] pourraient être repérés à des distances de plusieurs milliers d'années-lumière par les émissions radio de leur système de propulsion, à condition toutefois de disposer de radiotélescopes en orbite. En grand nombre, de telles sondes trahiraient donc inévitablement leur présence dans notre ciel.

Il se peut aussi que les sondes de von Neumann ne soient pas des astronefs dont les systèmes de propulsion possèdent une signature particulière. On peut cependant supposer que ces engins transmettraient régulièrement les résultats de leurs investigations vers la société qui les a lancés. Dans ce cas, on peut s'attendre à un colossal volume d'information radio traversant la Galaxie, pour peu que quelques générations de sondes aient déjà été créées<sup>26</sup>. En analysant soigneusement le spectre radiofréquence qui nous vient du ciel, les chercheurs du projet SETI (voir chapitre 4) pourraient peut-être finir par détecter les émissaires robots d'une société extra-terrestre hautement technologique.

---

<sup>26</sup> La détection d'un faisceau d'ondes radio transportant les données pourrait ne pas être facile à détecter, car un tel signal doit sans doute être très directionnel puisque destiné à un système stellaire donné.

## 9. Des sondes extra-terrestres dans notre système solaire ?

Comme je l'ai suggéré dans le chapitre précédent, des sociétés d'outre-espace technologiquement avancées ont pu fabriquer et lancer des sondes interstellaires dans le but d'explorer la Galaxie. Dans ce cas, certains de ces appareils ont pu atteindre notre système solaire. À ce jour, il n'y a cependant aucune évidence de la présence de telles sondes. Si elles existent, alors où sont-elles ?

### 1. Des sondes extra-terrestres sont-elles présentes ?

Deux conditions doivent être réunies pour que des sondes extra-terrestres soient présentes dans notre système solaire. Premièrement, il faut que la construction de telles sondes soit technologiquement possible. Deuxièmement, il faut que la Galaxie soit assez vieille pour que ces émissaires robots aient pu nous atteindre. En supposant que ces deux conditions soient remplies, peut-on évaluer la probabilité qu'au moins une sonde interstellaire ait atteint notre environnement proche ? Dans ce but, on peut se baser sur l'équation de Drake qui donne une estimation du nombre  $N$  de civilisations technologiques dans la Galaxie (voir chapitre 2). Alors, le nombre  $N_s$  de sondes présentes dans notre système solaire peut être évalué par la relation suivante [46] :

$$N_s = N \times P \quad \text{avec} \quad P = \frac{f_{ts}}{f_t} \times f_{ls} \times f_{Gs} \times \frac{T_s}{T}$$

$f_{ts}$  : fraction des civilisations possédant la technologie des sondes interstellaires ;

$f_t$  : fraction des civilisations ayant pu développer une technologie avancée ;

$f_{ls}$  : fraction des civilisations ayant lancé des sondes interstellaires ;

$f_{Gs}$  : fraction de la Galaxie visitée par des sondes interstellaires ;

$T_s$  : durée de vie moyenne d'une sonde dans son système de destination ;

$T$  : durée de vie moyenne d'une civilisation technologiquement avancée.

Aucun de ces facteurs n'est aisé à calculer. On peut cependant risquer des estimations. Différentes valeurs de  $N$ , ainsi que leurs interprétations, sont données dans le chapitre 2. Les valeurs possibles vont d'un nombre beaucoup plus petit que l'unité à quelques milliers [46].

Les paramètres  $f_{ts}$  et  $f_t$  sont intimement liés, à la condition qu'il n'existe pas de barrière technologique insurmontable entre le développement d'une technologie capable de transmettre des signaux radio dans l'espace et celle permettant la construction de sondes interstellaires. D'après la référence [46], on peut supposer  $0,2 \leq f_{ts} / f_t \leq 0,8$ .

Le rapport  $T_s / T$  pourrait être de l'ordre de l'unité. En effet, s'il est possible de fabriquer des systèmes auto-réparateurs et auto-reproducteurs – autrement dit des machines de von Neumann – il serait logique pour une civilisation extra-terrestre de construire des sondes

dont la durée de vie est la plus longue possible, voire supérieure à la durée de vie de la civilisation des constructeurs. Il n'y a pas de contrainte théorique sur la durée de vie d'une sonde de von Neumann ; toutefois, des accidents, des pannes ou des erreurs de construction sont inévitables. On va donc supposer  $1 \leq T_s / T \leq 10$  [46].

Le paramètre  $f_{ls}$  pourrait être assez petit. Toutefois certaines civilisations très avancées et curieuses pourraient être tentées par la grande aventure d'exploration galactique. Supposons  $0,01 \leq f_{ls} \leq 0,2$  [46].

Le nombre  $f_{Gs}$  peut être très petit ou arbitrairement proche de 1. Cela dépend des intentions des créateurs des sondes, de la fiabilité atteinte par ces appareils et également du temps écoulé depuis le lancement des premières sondes. Supposons  $0,01 \leq f_{Gs} \leq 1$  [46].

Le facteur  $P$  multipliant le nombre  $N$  varie ainsi de 0,000 02 à 1,6, couvrant cinq ordres de grandeur. Étant donné les incertitudes pesant également sur le nombre de civilisations technologiques de la Galaxie, une estimation du nombre de sondes présentes dans notre système solaire se révèle donc être une entreprise fort hasardeuse. Toutefois, il n'est pas impossible que  $N_s$  soit de l'ordre de l'unité, voire supérieur. Regardons comment interpréter ce nombre. Bien que  $N_s$  ne soit pas une probabilité au sens mathématique du terme, ce nombre donne une indication de la « chance » qu'une sonde soit présente. Par exemple,  $N_s = 0,5$  implique que des sondes peuvent être dans le voisinage immédiat de 50 % des étoiles de la Galaxie, ou qu'elles sont présentes partout en moyenne 50 % du temps. Un chiffre supérieur à l'unité indique que plusieurs sondes d'origines différentes pourraient être présentes dans un système. N'oublions pas qu'une sonde de von Neumann arrivée à destination peut se répliquer pour maximiser les chances de succès de sa mission.

Notre ignorance sur la valeur de certains des paramètres de cette équation est telle que l'on peut s'interroger sur son utilité. Cette équation a cependant le mérite de rationaliser la question en dressant une liste des paramètres critiques. De plus, on constate qu'un nombre  $N_s$  proche de l'unité semble possible. Actuellement, il n'y a cependant aucune évidence de la présence de sondes extra-terrestres dans notre système solaire. À cela, deux explications sont possibles.

Premièrement, il est possible que  $N_s$  soit élevé sans que cela produise d'évidences observables. Le Système solaire est vaste. De plus les sondes peuvent avoir des activités bien définies qui ne les amènent jamais dans le voisinage de la Terre. Il est également possible que des sondes finissent par quitter le Système solaire une fois leur travail accompli. Des arrivées de sondes peuvent être des événements rares, séparés peut-être par des millions d'années. Des traces de leurs activités pourraient subsister dans l'espace, sous forme de modifications non-naturelles d'astéroïdes ou de débris d'engins laissés sur place [47,48]. Sur Terre, les processus naturels effacent rapidement toute trace éventuelle. Il est également possible que des observations de sondes aient bien eu lieu mais que personne n'ait pu les interpréter correctement. On peut en effet se demander si les éventuelles activités de sondes extra-terrestres dans notre ciel ne pourraient pas rendre compte de certaines observations d'ovnis

qui semblent demeurer inexplicables autrement. Je reviendrai sur ce point dans le chapitre suivant.

Deuxièmement, les valeurs de  $N$  et/ou  $P$  peuvent être petites, donnant à  $N_s$  une valeur proche de zéro. Il faudra sans doute encore de nombreux progrès en astronomie, biochimie et sociologie pour mieux cerner les valeurs raisonnables des paramètres intervenant dans ces grandeurs. Il est à noter que la non-observation de sondes extra-terrestres ne permet évidemment pas de conclure à la petitesse de ces nombres. En effet il existe d'autres raisons que leur non-existence pour expliquer l'absence d'observations.

La suggestion que des sondes extra-terrestres sont présentes dans notre système solaire n'est certainement pas invraisemblable. Pratiquement aucun effort n'a été effectué en vue de leur recherche. De plus il est possible que ces sondes n'aient pas été conçues pour entrer en contact avec d'éventuels habitants des systèmes explorés.

Une recherche active de tels engins donnerait au moins quelques indications sur les valeurs possibles des paramètres  $N$  et  $P$ . Un tel effort ne serait pas en tout cas plus absurde que ceux déployés par le programme SETI (Search for ExtraTerrestrial Intelligence) d'écoute de signaux radio en provenance de civilisations extra-terrestres. Il est clair que si un engin d'origine extra-terrestre était découvert, les conséquences pour l'humanité seraient considérables [49], sans doute encore plus importantes que la découverte d'un signal électromagnétique qui nous viendrait d'une civilisation distante de dizaines ou de centaines d'années-lumière.

## ***2. Détection d'une sonde extra-terrestre***

Si une sonde extra-terrestre est présente dans notre environnement proche, il est raisonnable de penser que cet engin, soit n'est pas intéressé par un contact avec l'espèce humaine, soit est incapable d'établir un contact d'une manière qui nous est compréhensible, soit évite délibérément tout contact. Le comportement d'un objet fabriqué par une intelligence qui nous est complètement étrangère est évidemment fort difficile à prédire. Il est cependant possible que ce comportement change au fur et à mesure qu'évolue notre niveau culturel et technologique. Indépendamment de cela, plusieurs événements pourraient inciter une sonde à établir le contact. On peut citer, par exemple, la détection par cette sonde de l'arrivée dans notre système solaire d'un engin interstellaire provenant d'une autre civilisation extra-terrestre. Une telle coïncidence n'est pas complètement improbable si de nombreuses sociétés technologiques existent dans la Galaxie, ou si une machine de von Neumann est capable de rester en état de fonctionner plusieurs millions d'années dans un même système. La détection d'une menace contre laquelle nous ne pourrions réagir (impact d'un astéroïde géant, explosion potentielle d'une supernova trop proche [50], etc.) pourrait également inciter la sonde à nous contacter. Le plus évident de ces événements est sans doute la découverte de la sonde par l'espèce humaine.

Se pose alors le problème de savoir comment détecter une éventuelle sonde extra-terrestre dans l'espace. Un tel engin est par définition issu d'une technologie supérieure à la nôtre et son mode de fonctionnement pourrait nous être incompréhensible. Une sonde pourrait très bien ne pas utiliser de l'électronique pour le traitement des données, ni les ondes radio pour la communication, ni l'énergie chimique pour sa propulsion. Il y a un risque réel de rater des évidences ou de rechercher de mauvaises signatures. Il serait sans doute facile à un tel engin d'éviter toute forme de détection étant donné la différence entre son niveau technologique et le nôtre. Il est même possible que la sonde ne cherche pas à éviter son repérage, mais que nous n'ayons tout simplement pas réussi à la détecter jusqu'à présent.

Cependant, un véhicule interstellaire consomme de l'énergie, possède une masse et une taille. Il est probable qu'il sera le plus petit possible et le plus économe possible en énergie, exactement comme ceux que nous pourrions essayer de construire. Si l'engin est auto-réparateur et auto-reproducteur, il aura besoin d'accéder à une source de matière première. Les petits corps flottant dans l'espace, à faible gravité de surface, sont des endroits faciles d'accès pour un engin spatial. Ils sont riches en matériaux de toutes sortes et sont pour la plupart actuellement hors de notre portée.

Les endroits potentiels où l'on pourrait s'attendre à trouver une sonde interstellaire sont donc la Lune [48], la ceinture d'astéroïdes [47], le nuage de Oort ou la ceinture de Kuiper. En particulier, un noyau de comète qui s'approche périodiquement de la Terre constitue une base idéale pour une sonde programmée pour nous observer. Une telle comète permet à la sonde d'effectuer une approche en minimisant ses besoins en énergie et en propulsion, ce qui la rend plus difficilement détectable. De plus le noyau cométaire peut fournir à l'engin tous les matériaux dont il a besoin. Un astéroïde en orbite à proximité du Soleil pourrait également abriter une sonde car c'est l'endroit idéal pour explorer le Système solaire interne tout en minimisant les déplacements. Un tel astéroïde est généralement riche en éléments lourds probablement nécessaires à la sonde. L'intense rayonnement solaire peut masquer ses activités tout en lui fournissant de l'énergie en abondance.

Même si nous savions où chercher avec le plus d'efficacité, il faut encore trouver des signatures indiscutables de l'objet :

- De la chaleur inévitablement dissipée par la sonde, essentiellement sans doute par son système de propulsion [45]. Cependant, la machine peut être petite et très efficace.
- Des signes d'accélération brutales, d'apparitions ou de disparitions d'objets depuis des orbites stables autour de la Lune ou de la Terre, ou encore des signes d'entrées ou de sorties rapides de l'atmosphère de la Terre ou d'autres planètes. Cela pourrait engendrer des échos radar, des ondes de choc hypersoniques, voire même des phénomènes météorologiques très localisés.

- Des signaux radio manifestement artificiels échangés entre engins dans l'espace. Ces signaux pourraient être des communications entre la sonde et d'éventuels drones<sup>27</sup> délégués pour des missions d'observation. Toutefois, ces machines pourraient utiliser un système de communication qui nous serait technologiquement inconnu. En imaginant qu'elles puissent émettre et recevoir des faisceaux de neutrinos<sup>28</sup>, nous serions totalement incapables de percevoir ces signaux.
- Des traces de construction sur la Lune ou sur des astéroïdes proches de la Terre (NEO : Near Earth Object), comme par exemple des usines de drones ou des instruments d'observation de la Terre. Cependant ces installations pourraient être facilement camouflées.
- Un intense signal radio non-directionnel avertissant d'autres sondes, issues de la même société extra-terrestre, que le Système solaire est déjà en cours d'étude et qu'il n'est plus nécessaire de s'en approcher. Ce serait une mesure logique pour des sondes de von Neumann très autonomes qui ne reçoivent plus d'ordres directs de leurs constructeurs en raison de l'éloignement, et qui se bornent à leur renvoyer les données collectées. Un faisceau d'ondes radio transportant ces données pourrait aussi être détecté, mais un tel signal doit sans doute être très directionnel puisque destiné à un système stellaire donné.

D'autres signaux pourraient trahir la présence d'un robot extra-terrestre dans la banlieue de la Terre, mais aucun ne semble évident à détecter.

Une autre stratégie consiste à inviter la sonde à se découvrir elle-même. Ce pourrait être le signal qu'elle attend pour commencer un contact. On peut envisager au moins trois médias possibles pour lancer une invitation. Un signal radio ou un signal optique (par laser) pourrait être envoyé vers des sites possibles abritant des sondes. Un troisième moyen pourrait être de « poster » une invitation sur Internet [52]. Le professeur Allen Tough (chercheur de l'organisation SETI) a créé plusieurs pages sur le réseau mondial invitant un éventuel émissaire extra-terrestre à entrer en contact [53]. Cette méthode n'a évidemment fourni encore aucun résultat. On ne peut pas savoir combien de temps une sonde mettrait pour trouver les pages, ni comment elle réagirait à une telle invitation. On ne peut pas plus garantir que ce soit là un stimulus efficace pour initier un contact, mais le coût insignifiant de la méthode fait qu'elle vaut la peine d'être tentée.

### ***3. Conclusion***

Il est difficile d'évaluer la probabilité qu'une sonde extra-terrestre soit présente dans notre système solaire. Il n'est cependant pas impossible qu'un ou plusieurs engins extra-

---

<sup>27</sup> Un drone est à l'origine un petit avion de reconnaissance, sans pilote, télécommandé ou programmé. Par extension, ce mot désigne aussi un petit robot difficilement détectable envoyé dans un but d'observation [51].

<sup>28</sup> Un neutrino est une particule élémentaire sans charge électrique capable de traverser de grandes épaisseurs de matière sans interagir.

terrestres croisent au large de notre planète. Il est tout aussi difficile d'envisager la détection de telles machines d'autant plus qu'elles sont par définition issues de technologies fort en avance sur la nôtre [65]. Une stratégie possible de recherche est d'inviter la sonde à se dévoiler. Aucune des méthodes envisagées à ce jour ne peut garantir le succès en cas de présence effective d'une sonde. Toutefois, ces recherches apparaissent comme complémentaires à celles effectuées dans le cadre du projet SETI.

## 10. Un point de vue rationnel sur le phénomène ovni

Dans le chapitre précédent, j'évoquais la possibilité que des sondes automatiques d'origine extra-terrestre soient présentes dans notre système solaire. Si de tels engins pénètrent notre espace aérien, il est possible qu'ils soient observés, voire qu'ils laissent des traces physiques de leur passage (marques d'atterrissage au sol, enregistrements d'échos radar, photographies, etc.). Serait-ce donc là l'explication du fameux phénomène ovni (Objet Volant Non-Identifié) ? Assurément une telle hypothèse demande une analyse rationnelle. Dans ce chapitre, nous allons tenter d'apporter quelques éléments de réflexion sur ces événements sans pouvoir évidemment donner de solution définitive. Mais avant cela, rappelons l'origine du phénomène.

### 1. Un peu d'histoire

L'histoire commence le 24 juin 1947. Un homme d'affaires américain, Kenneth Arnold, part à bord de son avion privé à la recherche d'un appareil C-46 porté disparu dans la région des monts Cascade. Au cours de son vol, il observe un groupe d'objets de forme arrondie, volant en formation à grande vitesse. L'affaire est rapportée par la presse le lendemain : les « soucoupes volantes » sont nées [54, 55 p. 185].

Par une coïncidence extraordinaire, quelques jours plus tôt, un engin de forme arrondie s'écrase dans une propriété privée près de la base militaire de Roswell. Le 14 juin, le rancher W. W. Brazel en découvre les débris et n'y prête guère attention. Le 5 juillet, il entend parler de l'observation de Kenneth Arnold à la radio. Deux jours plus tard, il se rend au bureau du shérif George Wilcox pour déclarer qu'il a sans doute découvert les restes d'une soucoupe volante. Très vite, les débris sont identifiés par les militaires comme étant ceux d'un ballon-sonde espion muni d'un réflecteur radar. C'est probablement le disque de ce réflecteur qui va être identifié à une soucoupe. De plus, à l'époque, les militaires semblent avoir voulu étouffer l'affaire. Le F.B.I. remet un rapport assez peu clair qui va être interprété par les ufologues<sup>29</sup> comme la preuve qu'il s'est bien passé « quelque chose » à Roswell. Il y a quelques années, une bande vidéo truquée présentait l'autopsie de l'extra-terrestre qui se serait écrasé avec sa soucoupe.

Aujourd'hui, d'après *Time Magazine*, 34 % des Américains sont convaincus que des créatures intelligentes d'autres planètes ont visité la Terre. Parmi eux, 65 % sont convaincus que c'est bien un ovni qui s'est écrasé à Roswell, et 80 % se disent persuadés que leur gouvernement « sait plus de chose à propos des extra-terrestres qu'il ne veut bien le dire ».

---

<sup>29</sup> Un ufologue est une personne qui étudie (plus ou moins sérieusement) tout ce qui semble se rapporter au phénomène ovni. L'acronyme UFO signifie « Unidentified Flying Object », c'est-à-dire OVNI en anglais.

## ***2. Le point de vue d'un scientifique sur le phénomène***

Que penser de tout cela ? Découvrons ensemble le point de vue de Alan Hale [56], co-découvreur de la comète Hale-Bopp et directeur du *Southwest Institute for Space Research*. Chaque fois que l'on se trouve confronté avec des croyances au sujet des ovnis ou des phénomènes paranormaux, il propose de s'appuyer sur trois principes, à savoir :

1. Des déclarations extraordinaires réclament des preuves extraordinaires. La découverte de l'existence d'une vie extra-terrestre intelligente, qui de plus viendrait nous rendre visite à bord de véhicules spatiaux dont les performances semblent défier les lois connues de la physique, serait certainement à ranger parmi les plus extraordinaires découvertes dans l'histoire de la science. Voilà certainement ce que l'on peut qualifier de déclaration extraordinaire. Pour que cela puisse être accepté indiscutablement comme une réalité, il faut disposer de preuves extraordinaires. Quelles pourraient être ces preuves ? D'abord les extra-terrestres eux-mêmes, et pas seulement des récits de personnes qui ont entendu d'autres personnes dire qu'elles ont vu des extra-terrestres. Il faudrait que n'importe qui, et en particulier des scientifiques, puissent les voir, communiquer avec eux. Il faudrait pouvoir examiner leurs vaisseaux spatiaux et apprendre par quels principes ils volent, etc.
2. Si quelqu'un fait une déclaration extraordinaire, il doit apporter la preuve de ce qu'il avance. Ce n'est pas aux autres de prouver qu'il a tort. De plus il faut apporter des preuves directes et convaincantes. Il ne suffit pas d'éliminer quelques explications possibles, puis de s'écrier « Qu'est-ce que cela pourrait être d'autre ? ».
3. Il faut toujours utiliser le principe du rasoir d'Occam<sup>30</sup> : lorsque que l'on est confronté à une série de phénomènes pour lesquels il existe plusieurs explications possibles, il faut toujours choisir l'explication la plus simple qui explique tous les faits. Il est certain que des personnes ont vu, ou ont prétendu voir, d'étranges phénomènes dans le ciel. Il est tout aussi certain que ces gens peuvent se tromper : les témoignages proviennent de personnes qui ne connaissent pas la diversité des phénomènes célestes, les témoins ne sont en général pas préparés à faire des observations scientifiques valables, des idées préconçues peuvent affecter les observations. Il est également certain que des personnes peuvent mentir, pour toutes sortes de raisons. L'explication la plus simple des ovnis est donc que chaque observation est soit une erreur, soit une mystification. Si cette explication est incorrecte, reportez-vous aux deux premiers principes.

Lorsque l'on interroge Alan Hale sur la possibilité d'existence de civilisations extra-terrestres, il déclare que la vie intelligente a pu se développer en beaucoup d'endroits de la Galaxie. Il ajoute que rien ne le rendrait plus heureux qu'un contact avec ces autres formes de vie. Mais avant d'y croire, il veut les voir et ne peut se contenter d'histoires à propos de

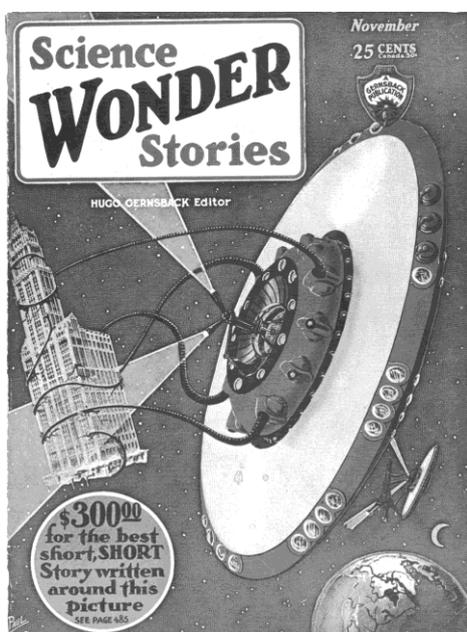
---

<sup>30</sup> Guillaume d'Occam (ou d'Ockham) : théologien et philosophe anglais (1290 environ – 1349 environ). Il appartenait à l'ordre des Franciscains. Il est l'auteur d'un principe de « simplicité » connu sous le nom de « rasoir d'Occam ».

« choses » que certaines personnes auraient pu voir. Alan Hale fait également remarquer que lui-même, qui a passé une grande partie de sa vie à étudier le ciel, a déjà pu observer de nombreux phénomènes, que beaucoup de personnes – moins bien préparées que lui – auraient pu prendre pour des ovnis. Il n’a par contre jamais rien vu qu’il puisse interpréter comme un véhicule spatial extra-terrestre.

### 3. Une tentative d’explication

On peut assez facilement admettre que des phénomènes lumineux dans le ciel (météores, rentrées de satellites artificiels dans l’atmosphère, etc.) puissent être confondus par un œil profane avec un engin volant. Il est a priori plus difficile d’expliquer les récits de contact avec un extra-terrestre, voire d’enlèvement à bord de son véhicule. S’il ne s’agit pas d’une mystification, l’hypothèse de l’hallucination, du rêve éveillé, peut évidemment toujours être envisagée, mais comment en expliquer l’origine ?



**Figure 7 :** Couverture de Frank R. Paul pour le numéro de novembre 1929 du magazine américain de science-fiction « Science Wonder Stories ». [« L’art de la science-fiction 1926-1954 », Éditions du Chêne, 1975]

Michel Meurger nous livre dans son ouvrage [55], sinon une explication, du moins un début de piste pour comprendre l’ampleur et la cohérence dans l’espace (des U.S.A. au reste du Monde) et dans le temps (de 1947 à nos jours) du phénomène. L’auteur y traite de l’évolution dans la science-fiction des récits d’atterrissage d’engins extra-terrestres sur Terre et des enlèvements qui s’ensuivent. Il montre, textes et citations à l’appui, que la quasi-totalité des témoignages relatifs à des « rencontres du troisième type » reproduisent, parfois textuellement, des fictions publiées des années, voire des décennies avant les faits. Il étudie toute une série de thèmes propres à la science-fiction : extra-terrestres macrocéphales, astronefs en forme de disque ou de cigare, enlèvements d’êtres humains par des extra-terrestres, conspiration entre membres du gouvernement et des intelligences venues d’ailleurs, etc. Il esquisse et parfois même retrace de façon exhaustive la généalogie de chaque thème, remontant à ses sources anciennes et la suivant jusque dans ses manifestations

les plus récentes. C’est ainsi que la soucoupe volante apparaît dans les textes des magazines américains et sur les illustrations de couverture (voir figure 7) bien avant l’observation de Kenneth Arnold en 1947. De même le poncif du petit extra-terrestre hostile « à grosse tête » est développé par les auteurs de science-fiction longtemps avant les premiers témoignages de contacts et d’enlèvements (voir figure 8).

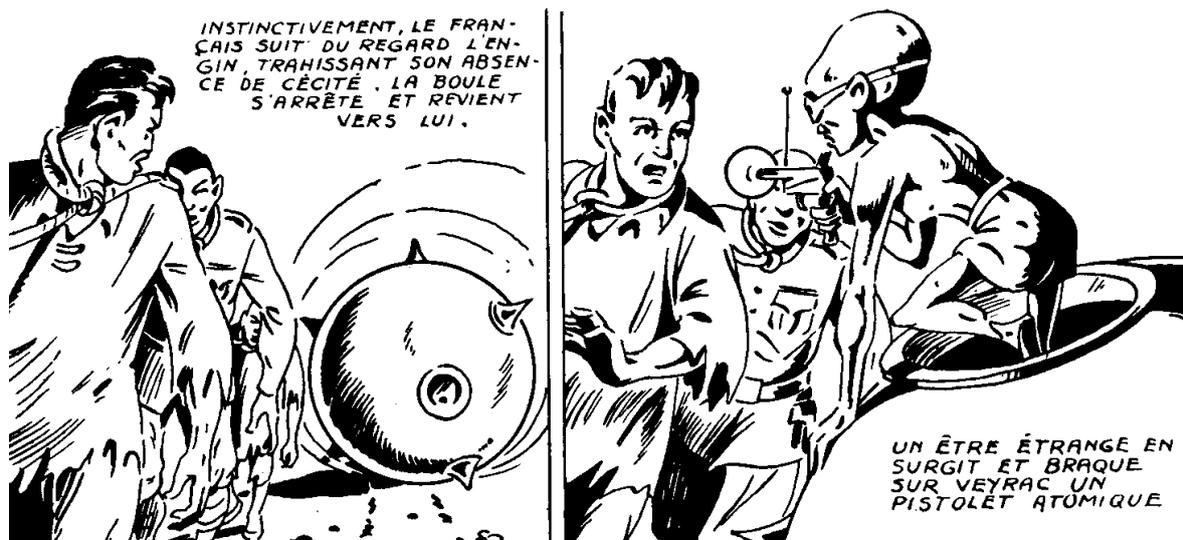


Figure 8 : Le Martien hostile macrocéphale s'échappe des nouvelles américaines de science-fiction pour « contaminer » la bande dessinée européenne. Extrait de « Guerre à la Terre » par Marijac, A. Liquois et Dut, paru initialement dans « Coq Hardi » de 1945 à 1948, réédité en 1999 chez Glénat dans la série « Les grands classiques des années 70 ».

Citons deux cas exemplaires de « rencontres du troisième type ». D'abord une mystification rapportée dans l'ouvrage de Meurger [55]. En janvier 1959, deux Suédois racontent à la presse comment ils ont été agressés par quatre masses informes. Mis en fuite par un coup de klaxon, les créatures sautent dans un disque qui décolle aussitôt. À l'endroit du drame, on trouve une dépression dans le sol, « marque de l'engin extra-terrestre ». Jusqu'en 1988, ce cas figura dans la littérature des récits d'enlèvement, et c'est finalement un ufologue qui, après dix-huit mois d'enquête, démontrera qu'il s'agissait d'une supercherie. Les deux agressés, décédés depuis des suites de l'alcoolisme, avaient simulé les traces d'atterrissage avec une bouteille. L'inspiration du scénario d'enlèvement fut retrouvée dans une bande dessinée de science-fiction, *Tom Trick*, parue dans un hebdomadaire suédois. Cette bande dessinée est connue en français sous le nom de *Luc Bradefér*. On peut constater sur la figure 9 les emprunts à la BD du récit d'enlèvement.

Le cas rapporté dans la référence [57] est encore plus intéressant. Il montre de manière exemplaire comment un homme apparemment normal et de bonne foi peut construire une affabulation extraordinaire à partir d'une méprise. En 1978, une bien curieuse histoire est



Figure 9 : Luc Bradefér aux prises avec les indigènes, plus stupides qu'agressifs, de la planète du silence. Extrait de la bande dessinée américaine « Luc Bradefér » par Paul Norris, publiée en français aux éditions de « SAMEDI-Jeunesse ».

racontée par un gardien de nuit italien. Je vous en livre un résumé. Alors qu'il effectue une ronde, le gardien voit un groupe de lumières mobiles danser dans le jardin d'une propriété privée. Pensant avoir affaire à des voleurs, il tente de lancer un appel radio mais son appareil refuse de fonctionner. Il descend de son véhicule et s'approche de la villa. C'est alors qu'il voit un être vert de haute taille hérissé de piquants et un ovni de forme triangulaire qui émet une lueur éblouissante. Incapable d'en supporter davantage, le pauvre homme s'évanouit. Ses collègues le retrouvent peu après dans un état de panique totale. Cinquante minutes manquent à son emploi du temps. De plus la pelouse de la propriété porte une trace circulaire. Des ufologues italiens soumettent alors le gardien de nuit à une séance d'hypnose pour lui faire retrouver ses souvenirs perdus. On découvre ainsi qu'il a été enlevé à bord de l'ovni.

Cette belle histoire a pourtant une explication bien moins extraordinaire. Voici les conclusions d'une enquête menée par un groupe de chercheurs italiens. Le gardien de nuit ne connaît pas les lieux et ne peut donc pas savoir que les lueurs observées sont des reflets de phares de voiture sur les murs de la villa. Sa panne de radio est tout à fait fortuite, mais on était en pleine vague d'observations d'ovnis en Italie. On peut parier que l'esprit du gardien a commencé à s'échauffer quelque peu. La suite est très simple. En avançant dans l'obscurité, notre homme glisse et reste étourdi une demi-heure. En se relevant, il accroche dans le faisceau de sa lampe un petit sapin, « l'extra-terrestre ». Quant à l'ovni il s'agit sans doute toujours des reflets des phares mais vus de plus près cette fois. La trace circulaire est simplement due à un mouton qui fut quelque temps auparavant attaché à un piquet. Les ufologues italiens vont ensuite parfaire l'histoire en faisant intervenir l'hypnose qui va combler l'amnésie de cinquante minutes par un beau scénario d'enlèvement. Précisons que les ufologues italiens n'ont sans doute pas induit volontairement ces faux souvenirs. Ils peuvent avoir été naturellement créés par l'esprit du gardien de nuit qui s'attendait à ce que la séance d'hypnose confirme son histoire de soucoupe volante.

#### ***4. Conclusion***

Il n'est évidemment pas absurde d'imaginer que quelque part dans la Galaxie, des formes de vie intelligente aient pu se développer et bâtir des civilisations hautement technologiques. Il n'est pas certain que le voyage interstellaire soit réalisable. Mais s'il l'est, alors pourquoi ne pas admettre que des êtres intelligents puissent nous rendre visite ? Peut-être même nous observent-ils en ce moment, éventuellement par l'intermédiaire de sondes automatiques ? Bien que cela soit d'un point de vue scientifique tout à fait possible, je crois qu'il n'existe actuellement aucune preuve solide que le phénomène ovni soit une manifestation de la présence d'extra-terrestres dans notre environnement. Nous examinerons dans le prochain et dernier chapitre les raisons possibles qui font que l'on n'observe pas de créatures extra-terrestres sur Terre actuellement.

# 11. Et si l'homme était seul dans la Galaxie ?

## 1. Introduction

Existe-t-il des créatures intelligentes ailleurs dans la Galaxie ? Cette question est probablement une des plus importantes à laquelle la science moderne tente d'apporter une réponse. Les dix premiers chapitres avaient pour but de préparer cette conclusion dont l'ambition n'est certainement pas de répondre à LA question mais d'apporter quelques éléments de réflexion.

Une estimation scientifique du nombre des civilisations technologiques de la Galaxie est donnée par l'équation de Drake, qui énumère les paramètres critiques intervenant dans le problème. Les évaluations vont de plusieurs milliers (voire millions) de civilisations technologiques à un nombre si petit qu'il est compatible avec le fait que la Terre soit la seule planète abritant actuellement une société scientifiquement avancée.

On peut tenter une autre approche en se demandant quelles sont les causes possibles du fait suivant : *il n'y a apparemment pas d'entités extra-terrestres intelligentes sur Terre actuellement*. Dans la suite, je m'y référerai en tant que « fait A ». Une telle constatation mérite assurément une explication. Partons de l'hypothèse que la Galaxie abrite un grand nombre de sociétés technologiquement avancées. Certaines d'entre elles ont pu éventuellement développer la technologie du voyage interstellaire, et explorer et coloniser la Galaxie (comme nous avons exploré et colonisé la Terre). Cependant, les extra-terrestres ne sont pas ici. En conséquence de quoi, ils n'existent pas.

Je crois que cette explication du fait A est fondamentalement correcte. Cependant, dans la forme brutale présentée ci-dessus, elle est clairement incomplète. Après tout, d'autres explications du fait A sont possibles. On peut les grouper en trois catégories :

1. Des entités extra-terrestres ne sont jamais arrivées jusqu'à nous car le voyage interstellaire est impossible, pour diverses raisons physiques, biologiques ou astronomiques (explications physiques).
2. Si des extra-terrestres ne sont pas venus sur Terre, c'est parce qu'ils ont choisi de ne pas le faire (explications sociologiques).
3. Des civilisations technologiques sont apparues mais qu'elles n'ont pas encore eu le temps de nous atteindre (explications temporelles).



*Vision de la Galaxie, reconstituée par ordinateur, telle qu'elle apparaîtrait à un observateur extérieur. Se pourrait-il que sur ces 100 milliards d'étoiles, seul notre Soleil éclaire une civilisation technologique ?*  
[Jon Lomberg]

Ces trois catégories couvrent pratiquement toutes les explications proposées à ce jour. Dans la suite, nous allons discuter chaque groupe d'explications.

Il convient de signaler que l'explication du fait A que je propose ici apparaît comme très choquante aux yeux de certains scientifiques, pour qui la Galaxie doit *forcément* abriter d'autres créatures intelligentes [2,11,18,58], bien que les raisons de la présence du mot *forcément* soient souvent plus philosophiques que scientifiques. Cependant, l'hypothèse du caractère unique de la vie intelligente terrestre a été développée par d'autres scientifiques tout aussi renommés [6,14,20,58-60].

Il faut également signaler que nier l'existence de civilisations avancées ne signifie pas affirmer que la vie n'existe pas ailleurs que sur Terre. La vie a pu éventuellement apparaître et prospérer sur de nombreuses planètes, sans jamais aboutir à la technologie.

## ***2. Les explications physiques***

Il est vrai que si personne ne peut prétendre que le voyage interstellaire sera un jour possible, personne ne peut non plus prétendre le contraire. Dans le chapitre 5, j'ai présenté un modèle possible de vaisseau interstellaire, que l'on doit au physicien Freeman Dyson. Certains scientifiques pensent que la technologie nécessaire à sa réalisation pourrait bientôt être à notre portée. Le temps de transit entre deux étoiles proches, pour ce type de vaisseau, étant de l'ordre de trois siècles, il faudrait pouvoir maîtriser parfaitement la science des petits écosystèmes isolés pour assurer une vie confortable aux hardis colons de l'espace, et à leurs descendants, durant tout le voyage. Il n'est évidemment pas certain que cela soit possible.

Il n'y a cependant pas de raison de croire que la longévité d'autres créatures intelligentes est similaire à la nôtre. Par exemple, un voyage spatial de quelques siècles

pourrait ne pas être vécu comme une chose pénible, mais comme un interlude divertissant, pour un extra-terrestre vivant plusieurs millénaires. Une autre possibilité est que la constitution d'individus extra-terrestres permette leur mise en hibernation, ce qui ne semble pas être le cas pour des êtres humains. D'autres techniques, encore plus spéculatives, ont été proposées pour rendre le voyage supportable [20].

On pourrait envisager que certaines sociétés scientifiquement très avancées soient capables de construire des astronefs approchant la vitesse de la lumière. Dans ce cas, les temps de voyage entre deux étoiles proches se réduiraient à quelques années. Bien que la faisabilité de tels vaisseaux apparaisse actuellement comme très discutable pour de nombreux scientifiques, la science et la technologie peuvent encore beaucoup progresser.

Certains pensent que le coût économique de la construction d'astronefs interstellaires sera si important qu'aucune société ne rassemblera jamais les ressources nécessaires. Il est vrai que ces vaisseaux représenteront probablement des investissements gigantesques, mais une civilisation qui réussira à exploiter les ressources de son système solaire y trouvera en abondance matériaux et énergie à un coût très faible [5]. Il n'est pas impossible également que des méthodes peu coûteuses de colonisation interstellaire puissent exister (voir chapitres 7 et 8).

Si pour des raisons philosophiques, la solitude cosmique de l'humanité apparaît comme insupportable à certaines personnes, le même type de raison me pousse à croire que le voyage interstellaire doit *forcément* être possible. Si on avait posé la question de la faisabilité d'un avion comme le Jumbo Jet aux spectateurs des premiers vols des frères Wright, la plupart d'entre eux auraient sans doute trouvé la chose technologiquement et économiquement impossible. Bien évidemment, la science du futur tranchera, pas les courants philosophiques ou idéologiques.

### ***3. Les explications sociologiques***

Beaucoup d'explications du fait A tombent dans cette catégorie. Quelques exemples sont :

1. Pourquoi imaginer que tous les extra-terrestres sont pareils à nous ? Il est possible que les civilisations les plus avancées soient principalement intéressées par les arts et la spiritualité, et qu'elles n'ont aucun intérêt pour la conquête spatiale (hypothèse de contemplation).
2. Peut-être les civilisations technologiques finissent-elles par se détruire dans des conflits nucléaires généralisés, ou meurent-elles faute d'avoir pu régler leurs problèmes de pollution (hypothèse d'autodestruction).
3. Il est également possible que les sociétés avancées considèrent la Terre comme une civilisation très primitive avec laquelle il faut éviter le contact pour le moment, de peur de voir notre culture disparaître (hypothèse du zoo cosmique ou de la quarantaine cosmique).

Dans ce cas, des sondes extra-terrestres, habitées ou automatiques, nous observent peut-être depuis l'espace. Leurs activités dans notre ciel pourraient ainsi rendre compte de certaines observations d'ovnis qui semblent demeurer inexplicables autrement. Cette éventualité a été critiquée dans les chapitres 9 et 10.

Il n'est pas possible ici de considérer toutes les variantes de ces différentes explications. Il me semble en fait qu'elles présentent toutes le même point faible. Pour que ces explications sociologiques soient valables, il faut que *toutes* les civilisations avancées obéissent aux comportements décrits plus haut. De plus, une société peut évoluer avec le temps et ses besoins et projets changer. Il faut donc en plus qu'aucune société, à *aucun moment*, ne décide d'entreprendre la colonisation de la Galaxie. En effet, une seule espèce, plus « entreprenante » que les autres, suffit pour que le processus ne s'arrête qu'avec l'occupation totale de la Galaxie (nous en discuterons dans la section suivante). Il faut se rendre compte que si chaque colonie lance seulement deux missions interstellaires, la Galaxie comptera autant de colonies que d'étoiles au bout de 37 « générations » de missions seulement ( $2^{37} \approx 137$  milliards).

Il n'existe aucune théorie sociologique qui prédise qu'une civilisation avancée va forcément soit s'orienter uniquement vers la spiritualité, soit s'autodétruire, soit réprimer son besoin d'aller de l'avant. L'humanité a toujours manifesté le désir d'explorer et de coloniser son environnement. En vertu de ce que l'on appelle « le principe de médiocrité », qui veut que notre espèce ne doit posséder aucun trait particulier qui la distinguerait des autres formes d'intelligences, ces dernières devraient elles aussi éprouver les mêmes désirs.

#### ***4. Les explications temporelles***

Il est possible que l'absence d'extra-terrestres sur Terre puisse être expliquée par le simple fait qu'ils n'ont pas encore eu le temps de nous atteindre. Pour examiner cette hypothèse plus avant, nous avons besoin de savoir combien de temps mettrait un front de colonisation galactique pour parvenir jusqu'à nous. Pour obtenir une estimation, renversons la question et demandons-nous combien de temps mettrait l'espèce humaine pour se répandre dans la Galaxie et s'installer dans les régions les plus lointaines. Des calculs « raisonnables » montrent que la Galaxie pourrait être totalement occupée par l'homme au bout d'une période allant de 16 à 200 millions d'années (voir chapitres 6 et 8). Ce temps est assez court par rapport à l'âge de la Galaxie, qui est évalué à environ 10 milliards d'années. Il est tout à fait possible que des civilisations nous soient antérieures de quelques millions d'années (sur quelques milliards d'années sans doute nécessaires à l'évolution de la vie intelligente). Leurs représentants auraient donc eu le temps de coloniser la totalité de la Galaxie bien avant l'apparition de l'homme.

Serait-il possible qu'aucun front de colonisation n'ait trouvé le Soleil ? Cette possibilité est étudiée dans la référence [61] à l'aide d'un modèle d'expansion galactique basé sur la théorie de la percolation. Supposons qu'une civilisation avancée envoie des missions de

colonisation vers tous les systèmes solaires proches de son étoile. Les nouvelles sociétés ainsi fondées pourront à leur tour envoyer des vaisseaux vers les soleils voisins. Cependant, en raison des temps énormes de communication radio entre étoiles, il est raisonnable de penser que chaque colonie deviendra assez rapidement culturellement indépendante de la société qui l'a fondée (cette idée n'est pas partagée par tous les scientifiques [2]). Aussi, une nouvelle société peut très bien se désintéresser des voyages spatiaux et décider de ne pas coloniser les systèmes voisins. Soit  $P$  la probabilité moyenne qu'une colonie développe une société colonisatrice. On montre alors qu'il existe une probabilité critique  $P_c$  – qui dépend essentiellement du nombre d'étoiles atteignables par des missions spatiales – telle que :

1. Si  $P$  est inférieur à  $P_c$ , l'expansion s'arrête rapidement, et seule une faible fraction de la Galaxie peut être colonisée.
2. Si  $P$  est de l'ordre de  $P_c$ , des zones arbitrairement grandes de la Galaxie ne sont pas touchées par des fronts de colonisation extra-terrestres. La Terre est alors située dans une de ces zones.
3. Si  $P$  est supérieur à  $P_c$ , de rares petits secteurs de la Galaxie sont non-colonisés. La Terre est située dans l'un d'entre eux.

Il n'existe pas de moyen fiable de calculer  $P$ . De même,  $P_c$  est difficile à estimer : une valeur d'environ 1/3 peut raisonnablement être proposée [61]. Ce modèle est intéressant et pourrait expliquer le fait A. Cependant il ne tient pas compte des éléments suivants :

1. Même dans le cas où  $P$  est inférieur à  $P_c$ , l'existence d'un grand nombre de civilisations ayant entamé un processus d'expansion interstellaire pourrait amener à la disparition des zones vides de colonies.
2. Sur des intervalles de temps de plusieurs dizaines de millions d'années – durées caractéristiques d'expansion interstellaire – le brassage des étoiles dû à leurs mouvements propres et à la rotation différentielle galactique (un tour complet en 200 millions d'années en moyenne) peut amener des systèmes solaires non-habités à portée de vaisseaux de sociétés colonisatrices.
3. Les conclusions du modèle de percolation sont basées sur le fait qu'une société qui a décidé de ne pas coloniser les systèmes voisins ne revient jamais sur cette décision. Or, il est vraisemblable de penser que, sur des durées aussi courtes que quelques centaines d'années, l'évolution culturelle peut amener des changements considérables dans les besoins et désirs d'une société.

Dans le cas d'une expansion due à des sondes de von Neumann (voir chapitre 8), la discussion ci-dessus reste en grande partie valable à condition de donner comme signification à  $P$  la probabilité qu'une sonde puisse accomplir sa mission une fois arrivée à destination. En résumé, il n'est pas impossible que des zones vides de colonisation existent dans la Galaxie, mais il est probable qu'elles finiront par être occupées au bout d'un certain temps.

Il est envisageable que nous ayons été visités dans un lointain passé. Mais dans ce cas, les extra-terrestres n'ont laissé aucune trace de leur passage, du moins nous n'en avons pas encore découvert. Il faudrait surtout comprendre pourquoi ils ne se sont pas installés ici (pour des créatures basées sur la chimie du carbone, la Terre pourrait se révéler être un site de colonisation de tout premier choix, si les planètes comme la nôtre sont finalement assez rares). Ceci nous ramène à la catégorie d'explications précédente.

Il est possible qu'une civilisation extra-terrestre soit actuellement occupée à coloniser la Galaxie. Il faudrait pour cela que cette espèce soit apparue très peu de temps avant nous sur une échelle de temps galactique. Prenons comme unité de temps la plus courte durée estimée pour occuper toute la Galaxie : 16 millions d'années (voir chapitre 6). Si nous considérons que la durée de l'évolution qui a conduit à l'espèce humaine est typique, alors le temps nécessaire pour que la première espèce intelligente devienne capable de développer le voyage interstellaire est d'environ 300 unités de temps (l'âge de la Galaxie étant environ le double). L'explication temporelle de l'absence d'extra-terrestres sur Terre demande que la deuxième espèce intelligente (c'est-à-dire nous) apparaisse moins d'une unité de temps plus tard, ce qui exige donc une remarquable coïncidence [58 chap. 2,59]. Je considère que cette explication, bien que plausible, est peu probable. Il est évident que plus le temps nécessaire pour réaliser une colonisation galactique augmente, plus l'explication temporelle se renforce.

Signalons enfin une théorie intéressante selon laquelle la Galaxie serait actuellement dans un état de transition entre deux états d'équilibre, l'un caractérisé par l'absence de vie intelligente et l'autre par une grande diversité de civilisations [62]. En effet, l'explosion d'une supernova inondant une planète proche de doses massives de radiations est capable de supprimer toute trace de vie, même microscopique, à sa surface [50]. Si ce genre de cataclysme survient avec une fréquence proche de celle de l'apparition de formes de vie intelligente (environ une fois tous les 200 millions d'années), alors les civilisations potentielles sont détruites avant d'avoir pu essaimer dans l'espace. Maintenant que la Galaxie a un peu vieilli, on a des raisons de croire que les cataclysmes cosmiques évoqués ci-dessus se font plus rares. Si cette théorie est correcte, il est possible que plusieurs civilisations aient commencé ou soient sur le point de commencer leur expansion galactique.

## ***5. Conclusion personnelle***

Au cours des dernières années, beaucoup d'astronomes ont suggéré que la vie intelligente était un phénomène courant dans la Galaxie [2,11,18]. Toutefois, l'absence d'extra-terrestres sur Terre est un fait qui mérite certainement une explication. Après examen des réponses possibles, il me semble que deux explications apparaissent plus plausibles que toutes les autres : ou bien le voyage interstellaire est impossible, ou bien nous sommes seuls dans la Galaxie. Jusqu'à ce qu'on démontre la faisabilité ou la non-faisabilité des déplacements entre les étoiles, ou que l'on détecte un signal émanant d'entités extra-terrestres, le débat restera largement ouvert.

Personnellement, je pense que la technologie du voyage interstellaire sera développée un jour, et permettra à l'homme d'essaimer dans toute la Galaxie, même si cette colonisation ne débutera que dans quelques siècles. Je ne peux conclure, à regret, qu'à l'inexistence d'autres civilisations technologiques (la rencontre avec d'autres formes d'intelligence est une perspective tellement fascinante). Il peut sembler surprenant que parmi le si grand nombre d'étoiles que compte la Galaxie, une seule d'entre elles éclaire une civilisation technologique. Toutefois, de futures recherches dans les domaines de la biochimie, de la dynamique de formation de systèmes planétaires ou de l'évolution des atmosphères, pourront peut-être nous aider à mieux comprendre un tel fait.

## Références

- [1] Eric M. Jones, *Where is everybody?*, Physics Today, août 1985, p. 11-13.
- [2] Carl Sagan, *Cosmic Connection, ou l'appel des étoiles*, Éditions du Seuil, 1975, coll. « Points Sciences ».
- [3] Freeman J. Dyson, *Search for Artificial Stellar Sources of Infrared Radiation*, Science, vol. 131, 1960, p. 1667-1668.
- [4] Gerard K. O'Neil, *The High Frontier, Human Colonies in Space*, Space Studies Institute Press, 1989.
- [5] John S. Lewis, *Mining the Sky*, Helix Books, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1996.
- [6] Robert Rood et James Trefil, *L'univers : sommes-nous seuls ?*, Éditions Belfond, 1985.
- [7] Emmanuel Dion, *Invitation à la théorie de l'information*, Éditions du Seuil, 1997, coll. « Points Sciences ».
- [8] George C. Baldwin, *Keeping the ETs Away*, Sky & Telescope, février 1997, p. 6-7.
- [9] Jean Heidmann, *Intelligences extra-terrestres*, Éditions Odile Jacob, 1996, coll. « Opus ».
- [10] P. G. Stanley, *Prospects for Extraterrestrial Life*, Journal of the British Interplanetary Society, vol. 50, n° 7, July 1997, p. 243-248.
- [11] Steven J. Dick, *The Biological Universe*, Cambridge University Press, 1996.
- [12] Jonathan I. Lunine, *The frequency of Planetary Systems in the Galaxy*, in *Extraterrestrials: Where are They?*, Ben Zuckerman et Michael H. Hart édit., Cambridge University Press, 1995, p. 192-214.
- [13] Freeman J. Dyson, *Les dérangeurs de l'univers*, Éditions Payot, 1986, coll. « Espace des Sciences ».
- [14] Nicolas Prantzos, *Voyages dans le futur : l'aventure cosmique de l'humanité*, Éditions du Seuil, 1998, coll. « Sciences Ouvertes ».
- [15] Freeman J. Dyson, *The Search for Extraterrestrial Technology*, in *Perspectives in Modern Physics: Essays in Honor of Hans Bethe*, R. E. Marshak édit., Interscience Publishers, John Wiley & Sons, 1966, p. 641-655.
- [16] Louis Friedman, *Voiliers de l'espace*, Services Complets d'Éditions (SCE), 1989, coll. « L'Étincelle ».
- [17] Marshall T. Savage, *The Millennial Project: Colonizing the Galaxy*, Empyrean Publishing Ltd, 1992.
- [18] F. Drake et D. Sobel, *Is Anyone Out There? The Scientific Search for Extraterrestrial Intelligence*, Delacorte Press, 1992.
- [19] SETI Institute : <http://www.seti-inst.edu/>.
- [20] Frank J. Tipler, *Extraterrestrial intelligent beings do not exist*, Physics Today, avril 1981, p. 9 ; *The author comments*, Physics Today, mars 1982, p. 34.
- [21] Eugene Mallove et Gregory Matloff, *The Starflight Handbook: A Pioneer's Guide to Interstellar Travel*, John Wiley & Sons, 1989.
- [22] Claude Semay, *Le défi technologique des voyages interstellaires*, Bulletin de l'A.B.P.P.C., n° 131, novembre 1996, p. 223-243.
- [23] Lawrence M. Krauss, *La physique de Star Trek*, Bayard Éditions, coll. « Sciences ».
- [24] Kip S. Thorne, *Trous noirs et distorsions du temps*, Nouvelle Bibliothèque Scientifique, Flammarion, 1997.
- [25] Anthony R. Martin et Alan Bond, *Nuclear Pulse Propulsion: A Historical Review of an Advanced Propulsion Concept*, Journal of the British Interplanetary Society, vol. 32, 1979, p. 283-310.
- [26] Freeman J. Dyson, *Interstellar Transport*, Physics Today, octobre 1968, p. 41-45.
- [27] R. D. Johnson édit., *Space Settlements, A Design Study*, NASA SP-413, 1977, p. 46-47.
- [28] Eric M. Jones, *Estimates of Expansion Timescales*, in *Extraterrestrial: Where are They?*, Ben Zuckerman et Michael H. Hart édit., Cambridge University Press, 1995, p. 92-102.
- [29] James Annis, *Placing a limit on star-fed Kardashev type III civilisations*, Journal of the British Interplanetary Society, vol. 52, 1999, p. 33-36.
- [30] André Brahic, *Les comètes*, Presses Universitaires de France, 1993, coll. « Que sais-je ? ».
- [31] Paul Weissman, *Le nuage de Oort*, Pour la Science, n° 253, novembre 1998, p. 60-66.
- [32] David G. Stephenson, *Comets and Interstellar Travel*, Journal of the British Interplanetary Society, vol. 36, p. 210-214, 1983.
- [33] Gregory L. Matloff et Kelly Parks, *Interstellar gravity assist propulsion: A correction and new application*, Journal of the British Interplanetary Society, vol. 41, p. 519-526, 1988.

- [34] Ben R. Finney et Eric M. Jones, *Fastships and Nomads: Two roads to the stars*, in *Interstellar Migration and the Human Experience*, Ben R. Finney et Eric M. Jones édit., University of California Press, 1985, p 88-103.
- [35] Michel Wautelet, *Les armes à laser*, La Recherche, vol. 16, n° 164, mars 1985, p. 372-380. D. M. Ritson, *A weapon for the twenty-first century*, Nature, vol. 328, août 1987, p. 487-490.
- [36] Jean-Claude Heudin, *La Vie Artificielle*, Éditions Hermès, 1994.
- [37] Christian De Duve, *Poussière de vie*, Fayard, 1996, coll. « Le temps des sciences ».
- [38] Robert Forward et Joel Davis, *Les Mystères de l'antimatière*, Éditions du Rocher, 1991, coll. « L'Esprit et la Matière ».
- [39] Frank J. Tipler, *Extraterrestrial Intelligent Beings do not Exist*, Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society, 1980, vol. 21, p. 267-281.
- [40] Frank J. Tipler, *A Brief History of the Extraterrestrial Intelligent Concept*, Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society, 1981, vol. 22, p. 133-145.
- [41] Frank J. Tipler, *Additional Remarks on Extraterrestrial Intelligence*, Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society, 1981, vol. 22, p. 279-292.
- [42] Frank J. Tipler, *Tipler replies*, Physics Today, septembre 1988, p. 142.
- [43] Herbert Lin, *Les logiciels de la Guerre des Étoiles*, Pour la Science, février 1986, p. 22-30.
- [44] Frank J. Tipler, *Travelling to the other side of the universe*, Journal of the British Interplanetary Society, vol. 49, n°4, août 1996, p. 313-318.
- [45] Robert Zubrin, *Detection of Extraterrestrial Civilisations via the Spectral Signature of Advanced Interstellar Spacecraft*, Journal of the British Interplanetary Society, vol. 49, 1996, p. 297-302.
- [46] Richard Burke-Ward, *Possible existence of extra-terrestrial technology in the solar system*, Journal of the British Interplanetary Society, vol. 53, 2000, p. 2-12.
- [47] Csaba Kecskes, *The possibility of finding traces of extraterrestrial intelligence on asteroids*, Journal of the British Interplanetary Society, vol. 51, 1998, p. 175-179.
- [48] A. V. Arhipov, *Earth-Moon system as a collector of alien artefacts*, Journal of the British Interplanetary Society, vol. 51, 1998, p. 181-184.
- [49] Paul Davies, *Are We Alone ? (Implications of the Discovery of Extraterrestrial Life)*, Penguin Books, 1995.
- [50] Serge Jodra, *Hypernova, l'explosion qui a secoué l'Univers*, Ciel et Espace, juillet 1998, p. 62-66.
- [51] Michel Wautelet, *Les micromachines à l'assaut de l'espace*, **Galactée**, n° 12, décembre 1998, p. 26-32.
- [52] Allen Tough, *Small smart interstellar probes*, Journal of the British Interplanetary Society, vol. 51, 1998, p. 167-174.
- [53] Voir le site Internet : <http://members.aol.com/WelcomeETI/7.html>.
- [54] Leon Jaroff, *Did Aliens Really Land?*, Time, vol. 149, n° 25, juin 23, 1997.
- [55] Michel Meurger, *Alien Abduction*, Encrage Édition, 1995 (ouvrage en français).
- [56] Voir le site Internet : <http://www.csicop.org/> (Committee for the Scientific Investigation of Claims of the Paranormal).
- [57] Bertrand Méheust, *En soucoupes volantes, vers une ethnologie des récits d'enlèvements*, Éditions Imago, 1992.
- [58] Jean Heidmann, Alfred Vidal-Madjar, Nicolas Prantzos, Hubert Reeves, *Sommes-nous seuls dans l'univers ?*, Fayard, 2000.
- [59] Michael H. Hart, *An Explanation for the Absence of Extraterrestrials on Earth*, in *Extraterrestrials: Where are They?*, Ben Zuckerman et Michael H. Hart édit., Cambridge University Press, 1995, p. 1-8.
- [60] Peter Douglas Ward et Donald Brownlee, *Rare Earth: Why Complex Life is Uncommon in the Universe*, Copernicus Books, 2000.
- [61] Geoffrey A. Landis, *The Fermi paradox: An approach based on percolation theory*, Journal of the British Interplanetary Society, vol. 51, 1998, p. 163-166.
- [62] James Annis, *An astrophysical explanation for the "Great Silence"*, Journal of the British Interplanetary Society, vol. 52, 1999, p. 19-22.

- [63] Yaël Nazé, *Des planètes par milliers ...*, **Galactée**, n° 23, décembre 2000, p. 35-41.
- [64] Projet Kepler : (<http://www.kepler.arc.nasa.gov/>) ;  
Projet Darwin : (<http://ast.star.rl.ac.uk/darwin/>).
- [65] Scot Lloyd Stride, *An Instrument-Based Method to Search for Extraterrestrial Interstellar Robotic Probes*, *Journal of the British Interplanetary Society*, vol. 54, 2001, p. 2-13.
- [66] C. N. Tilgner et I. Heinrichsen, *A program to search for Dyson spheres with the infrared space observatory*, *Acta Astronautica*, vol. 42, n° 10, p. 607-612.
- [67] M. G. De San, *The ultimate destiny of an intelligent species - everlasting nomadic life in the Galaxy*, *Journal of the British Interplanetary Society*, vol. 34, 1981, p. 219-237.
- [68] Michael J. Harris, *Limits from CGRO/EGRET Data on the Use of Antimatter as a Power Source by Extraterrestrial Civilizations*, *Journal of the British Interplanetary Society*, vol. 55, 2002, p. 383-393.