

que la bande de fréquences comprises entre un et trois gigahertz est la mieux adaptée aux communications interstellaires : premièrement, nos techniques fonctionnent bien pour cette partie du spectre ; deuxièmement, les molécules interstellaires et les nuages de poussière absorbent peu ces ondes, sauf aux fréquences d'émission de l'hydrogène neutre, vers 1,42 gigahertz. Enfin, le rayonnement de fond de la Voie lactée n'est pas trop fort dans cette gamme.

La propagation des ondes radio dans l'espace correspond à des variations périodiques du champ électrique et magnétique. Ces variations se propagent ensemble à la vitesse de la lumière, soit 300 000 kilomètres par seconde. La distance maximale à laquelle une onde radio est détectée dépend de cinq facteurs principaux : l'environnement électromagnétique du récepteur, la sensibilité du récepteur, la puissance du signal émis, et la taille des antennes d'émission et de réception. Examinons successivement ces facteurs.

Le bruit électromagnétique est omniprésent dans la Galaxie. Les rayonnements électromagnétiques peuvent être cohérents, c'est-à-dire structurés régulièrement, tels les signaux d'un émetteur radio, ou bien incohérents, telles des impulsions aléatoires d'où résulte le grésillement d'un récepteur radio quand il est entre deux stations. Ce rayonnement incohérent est le bruit électromagnétique.

Tout corps dont la température est supérieure au zéro absolu émet des rayonnements (du bruit) à toutes les fréquences. La fréquence pour laquelle l'intensité de ce rayonnement est maximale dépend de sa température absolue. Par commodité, les physiciens caractérisent parfois le bruit par la température d'un «corps noir» fictif qui serait la source de bruit, par exemple dans un système de communication.

Ce bruit limite les capacités de communication. Un signal n'est capté que si sa puissance, sur l'antenne de réception, est au moins égale à celle du bruit environnant : de même, dans une pièce bruyante, deux personnes ne se comprennent que si leurs messages se distinguent du bruit ambiant.

Dans l'amplificateur d'un récepteur radio, le bruit provient de deux sources : une composante externe est due à l'antenne et à l'environnement, et une composante interne est engendrée par les circuits électroniques d'amplification. Aujourd'hui, on sait fabriquer des récepteurs dont le bruit interne est de l'ordre de quelques kelvins seulement. En revanche, on ne maîtrise généralement pas le bruit qui provient de l'environnement externe. C'est donc lui qui limite les performances d'un système de réception de haute qualité, tels ceux que l'on utilise en astronomie.



Le bruit externe provient du sol (pour les antennes construites sur une planète), de l'atmosphère planétaire, du fond diffus galactique, des sources astronomiques d'émission radio à l'intérieur et à l'extérieur de la Galaxie, et du fond diffus cosmologique, qui est une relique du Big Bang. Sur la Terre, pour un récepteur à la pointe de la technique, protégé des rayonnements du sol par un écran, toutes ces sources réunies, y compris le bruit interne du récepteur, engendrent un bruit de fond de température égale à environ 15 kelvins.

Quelle doit être la puissance émise pour qu'une antenne de réception lointaine reçoive un signal supérieur à ce bruit? Observons tout d'abord que la puissance du bruit dans le récepteur dépend de la gamme de fréquences, ou bande passante, du récepteur : comme le bruit est réparti sur tout le spectre, plus on restreint la bande passante du récepteur, plus l'énergie du bruit reçu est faible. Par conséquent, pour détecter un signal faible, on doit limiter la largeur de bande à la plus petite valeur compatible avec le signal attendu.

À l'inverse, plus la bande passante est large, plus la quantité de données que l'on peut envoyer est grande. Par exemple, la parole humaine nécessite une bande passante de 2,5 kilohertz environ, et un signal de télévision classique occupe une bande passante de 4,5 mégahertz. Pour notre étude, fixons-nous un débit d'information de cinq bits par seconde. En fonction des valeurs relatives du signal et du bruit, une bande passante d'environ 2,5 hertz est nécessaire. Cette bande passante permet d'envoyer le message «bonjour» en sept secondes, en supposant que cinq bits sont nécessaires pour coder chaque caractère.

Ayant déterminé une bande passante et une température de bruit, reprenons la question initiale : quelle doit être la puissance du signal, sur l'antenne réceptrice, pour qu'il sorte du bruit? La puissance de bruit est le produit de la constante de Boltzmann (notée k , elle est égale à $1,38 \times 10^{-23}$ joule par kelvin) par la température absolue de bruit (15 kelvins) et par la bande passante du système de détection, soit 2,5 hertz. Ainsi, on trouve une puissance de bruit de $5,2 \times 10^{-22}$ watt. Le récepteur doit recevoir des signaux ayant au moins cette puissance pour

les détecter. Supposons que l'antenne ait une surface de un mètre, la puissance nécessaire serait alors de $5,2 \times 10^{-22}$ watt par mètre carré.

La puissance nécessaire pour que l'émetteur envoie une telle intensité sur l'antenne de réception dépend de la distance entre l'émetteur et le récepteur. Elle dépend aussi du mode d'émission du signal : soit omnidirectionnel (ou isotrope), soit sous forme de faisceau contenu dans un cône étroit. Pour la distance, choisissons arbitrairement 100 années-lumière, soit $9,46 \times 10^{17}$ mètres. Quant au mode d'émission, nous supposons qu'il est omnidirectionnel, car une civilisation qui veut communiquer sa présence ignore où se trouvent ses éventuels correspondants.

Comme la puissance diminue, au cours de la propagation des signaux, comme l'inverse du carré de la distance, nous pouvons calculer la puissance nécessaire d'un émetteur omnidirectionnel situé à la distance fixée : c'est $(5,2 \times 10^{-22}) \times 4\pi \times (9,46 \times 10^{17})^2$, soit $5,8 \times 10^{15}$ watts.

Cette puissance est plus de 7 000 fois supérieure à celle que fournissent toutes les centrales électriques d'Europe. De surcroît, à l'échelle de la Galaxie, 100 années-lumière est une distance minuscule. Seulement un millier d'étoiles se trouvent à moins de 100 années-lumière de la Terre, soit moins d'un millionième de pour cent des étoiles de la Galaxie. Pour avoir une chance de tomber sur une civilisation évoluée, il faudrait atteindre les planètes situées dans un volume d'espace beaucoup plus grand.

Concentrer la puissance?

Plutôt que d'utiliser un système d'émission et de réception isotrope, pourrait-on concentrer les émissions? Considérons le compromis entre la taille de l'antenne de réception et la puissance d'émission requise. Une antenne dont la surface est grande par rapport au carré de la longueur d'onde qu'elle reçoit a un «faisceau» de réception étroit. Quand une telle antenne est pointée vers un émetteur, le gain est élevé. Autrement dit, la puissance nécessaire pour arriver jusqu'au récepteur est inférieure. L'inconvénient de cette méthode (il faut que le faisceau soit pointé dans une direction donnée) est notable, car on ne sait pas où se trouvent les correspondants éventuels.

Quelle est la probabilité d'une communication par cette méthode? Nous avons supposé, dans l'exemple précédent, que l'antenne de réception avait une surface efficace de un mètre carré seulement. Si l'appareil utilisé est une antenne parabolique, son diamètre doit être égal à 1,5 mètre environ. Une telle antenne, fonctionnant avec des ondes de 20 centimètres de longueur, aurait un cône de réception d'environ 11 degrés. À l'intérieur de ce cône, le signal est bien reçu, à condition d'être pointé vers l'émetteur.

En augmentant la taille des antennes de réception, on capte des émissions moins puissantes, mais la taille du cône de réception diminue. Considérons, par exemple, un réseau d'antennes de un kilomètre de côté. Captant des rayonnements de longueur d'onde égale à 20 centimètres, ce réseau aurait un gain un million de fois supérieur à celui de l'antenne de un mètre carré. Malheureusement, sa largeur de faisceau ne serait que de onze millièmes de degré : la puissance d'émission nécessaire serait un million de fois inférieure, mais l'étroitesse du faisceau demanderait une extrême précision de pointage et de suivi.

En utilisant également une antenne de un kilomètre carré pour l'émission du signal, nous améliorons le gain du même ordre de grandeur – mais avec un rétrécissement du faisceau identique à celui de la réception. En supposant qu'un réseau d'antennes de un kilomètre carré émette vers un réseau analogue, la puissance d'émission est réduite à 5 700 watts, mais il est alors très improbable que les faisceaux très étroits de ces antennes viennent à s'aligner.

Le dilemme est classique : avec de petites antennes, la puissance de l'émetteur est considérable, et, avec des antennes gigantesques, les besoins en puissance sont modestes, mais les faisceaux d'émission et de réception sont si fins qu'il paraît difficile que les faisceaux des correspondants se croisent à travers l'étendue de la Galaxie. Même si toutes les solutions intermédiaires sont possibles, les distances gigantesques qui séparent les étoiles requièrent des mesures extrêmes.

Est-ce sans espoir? Non, car les paramètres que nous avons considérés ici, bien que plausibles, sont arbitraires. Si les éventuels correspondants utilisaient des appareils ayant un rapport signal sur bruit inférieur, ou une bande