

LES LIAISONS TERRE — LUNE — TERRE

Bilan de Liaison

Matériel à mettre en œuvre

Exemples numériques

Quelques photos



Antenne parabolique construite par l'auteur. Diamètre = 10,50 m

*Franck Tonna, F5SE **

Reims, septembre 2009.

* kozton@free.fr

LIAISONS TERRE-LUNE-TERRE

1) Introduction

Le principe des liaisons Terre–Lune–Terre, tant "professionnelles" qu' "amateur", est d'utiliser la Lune comme réflecteur passif. Des premiers essais d'échos lunaires furent effectués en 1946 par les militaires américains. La même année, des expérimentations similaires furent menées en Hongrie par le professeur Zoltan Bay, qui fit plus tard une brillante carrière aux USA. D'un côté comme de l'autre, les résultats obtenus furent très mitigés, et l'idée d'utiliser la Lune d'une manière "professionnelle" fut rapidement abandonnée dès l'apparition des premiers satellites artificiels.

Les premiers essais "amateur" furent entrepris aux Etats-Unis sur 144 MHz dès 1953, et la première liaison bilatérale *via la Lune* entre deux radio–amateurs eut lieu en 1960, sur 1296 MHz, avec du matériel "professionnel" prêté pour la cause par des constructeurs de matériel militaire, chez qui travaillaient des radio–amateurs. Mais ce n'est vraiment qu'au début des années 1970 que l'activité Terre–Lune–Terre (Earth–Moon–Earth, ou *EME*) a réellement démarré dans les rangs des radio–amateurs passionnés, sans aide particulière de l'extérieur.

Comme la Lune est toujours présente (depuis déjà 4,5 milliards d'années, paraît-il...), et que ses dimensions et sa distance sont connues avec une très grande précision, il est très facile de dresser un bilan de liaison, afin de déterminer avec exactitude les différents paramètres de l'équipement à mettre en œuvre pour établir de telles liaisons. C'est ce bilan qui est explicité dans le détail au cours des paragraphes suivants.

2) Affaiblissement* de parcours aller et retour

2.1) Affaiblissement dans le sens Terre→Lune:

D'une manière générale, on appelle affaiblissement de parcours A le facteur liant la puissance reçue P_R à la puissance émise P_E par la relation:

$$A = \frac{P_R}{P_E} \quad (2.1)$$

où $A \leq 1$ dans tous les cas.

Le signal radio–électrique partant de la Terre arrive sur la Lune. La puissance reçue par la Lune dépend de la distance Terre–Lune d'une part, et de l'aire de capture de la Lune d'autre part. La notion d'aire de capture tient compte de plusieurs facteurs qui ne seront pas détaillés ici. L'aire de capture est également désignée sous le nom de section de capture efficace.

De plus, on suppose que le signal rayonné à partir de la Terre, se diffuse uniformément dans tout l'espace. On parle alors de rayonnement isotrope. Dans de telles conditions, la puissance du signal capté par une surface S située à une distance D de la source est directement proportionnelle à cette surface, et inversement proportionnelle au carré de la distance.

Soit S_L la section efficace de la Lune, l'affaiblissement A_{TL} dans le sens Terre→Lune s'écrit alors:

* - Les termes *atténuation* ou *perte(s)* sont également fréquemment utilisés. *Affaiblissement* est le terme recommandé.

$$A_{TL} = \frac{S_L}{4\pi D^2} \quad (2.2)$$

2.2) Affaiblissement dans le sens Lune→Terre:

Dans le sens Lune→Terre, la Lune renvoie la fraction de signal reçu un peu partout dans l'espace. Une faible partie — celle qui sert à définir la section efficace (voir plus loin) — "retombera" sur la Terre. L'affaiblissement de parcours en retour obéit aux mêmes lois qu'à l'aller, d'où:

$$A_{LT} = \frac{S_T}{4\pi D^2} \quad (2.3)$$

où:

A_{LT} : Affaiblissement de parcours Lune→Terre ($A \leq 1$)

S_T : Section efficace de l'antenne chez l'observateur terrestre

2.3) Affaiblissement globale Terre → Lune → Terre:

L'affaiblissement Terre→Lune→Terre a, pour valeur globale, le produit de l'affaiblissement à l'aller par l'affaiblissement au retour:

$$A = A_{TL} \cdot A_{LT} \quad (2.4)$$

soit:

$$A = \frac{S_L}{4\pi D^2} \cdot \frac{S_T}{4\pi D^2} = \frac{S_L \cdot S_T}{16\pi^2 D^4} \quad (2.5)$$

On connaît la section efficace de la Lune. Elle est donnée par la relation simple suivante:

$$S_L = \alpha \pi r^2 \quad (2.6)$$

où:

r : Rayon géométrique de la Lune, en mètres.

α : Facteur de correction tenant compte des pertes par absorption du sol lunaire, combiné à d'autres facteurs. Globalement, on a: $\alpha \approx 0,065$

Dans un premier temps, pour simplifier les calculs, on prend comme hypothèse le fait que l'observateur est équipé de l'antenne isotrope, dont la directivité est égale à l'unité. On comprendra plus tard le bien fondé de cette hypothèse (§ 5 et § 6). Cette antenne a pour section efficace:

$$S_T = \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (2.7)$$

où:

λ : Longueur d'onde de travail, en mètres

La relation (2.5) s'écrit alors:

$$A = \frac{\alpha \pi r^2}{4\pi D^2} \cdot \frac{1}{4\pi D^2} \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (2.8)$$

qui, après regroupement et réduction, donne finalement:

$$\boxed{A = \frac{\alpha r^2 \lambda^2}{64\pi^2 D^4}} \quad (2.9)$$

où, pour résumer:

- A : affaiblissement de parcours aller-et-retour ($A \leq 1$).
- α : facteur de réflectivité de la Lune ($\alpha \simeq 0,065$).
- r : rayon de la Lune, en mètres.
- λ : longueur d'onde de travail, en mètres.
- D : distance observateur–Lune, en mètres.

La relation (2.9) est souvent appelée *équation du radar*.

On peut remplacer dans (2.9) la longueur d'onde λ par la fréquence f . On obtient alors:

$$A = \frac{\alpha r^2 c^2}{64\pi^2 f^2 D^4} \quad (2.10)$$

où:

- c : Vitesse de la lumière dans le vide: $c = 299\,792\,458$ mètres par seconde, *par définition*.
- f : Fréquence de travail, en Hertz.

Dans la pratique, on a l'habitude d'exprimer A sous forme logarithmique (décibels, ou dB).

$$A_{\text{dB}} = 10 \log A \quad (2.11)$$

Les relations (2.9) et (2.10) peuvent s'écrire sous forme "logarithmico-numérique", comme suit:

Transcription de (2.9):

$$A_{\text{dB}} = 85,24 + 20 \log \lambda - 40 \log D \quad (2.12)$$

Transcription de (2.10):

$$A_{\text{dB}} = 254,78 - 20 \log f - 40 \log D \quad (2.13)$$

Transcription de (2.13), avec f en MHz et D en km, qui sont les unités pratiques:

$$A_{\text{dB}} = 14,78 - 20 \log f - 40 \log D \quad (2.14)$$

La distance D se calcule en fonction du temps à l'aide des Tables de la Lune. Elle varie entre 356000 et 406000 km.

Pour simplifier, on peut prendre la distance moyenne Terre–Lune, fixée traditionnellement à 384400 km. La fréquence f reste exprimée en MHz:

$$A_{\text{dB}} = -208,61 - 20 \log f \quad (2.15)$$

Le tableau suivant donne les valeurs moyennes de l'affaiblissement dans les bandes allouées aux radioamateurs:

Bande de fréquence	Affaiblissement (facteur)	Affaiblissement (dB)
144 MHz	$6,64 \cdot 10^{-26}$	-251,78
432 MHz	$7,38 \cdot 10^{-27}$	-261,32
1296 MHz	$8,20 \cdot 10^{-28}$	-270,86
2320 MHz	$2,56 \cdot 10^{-28}$	-275,92
3400 MHz *	$1,19 \cdot 10^{-28}$	-279,24
5,7 GHz	$4,15 \cdot 10^{-29}$	-283,82
10 GHz	$1,28 \cdot 10^{-29}$	-288,92
24 GHz	$2,39 \cdot 10^{-30}$	-296,22
47 GHz	$6,24 \cdot 10^{-31}$	-302,05

Au vu de ce tableau, il apparaît clairement que l'affaiblissement aller et retour est considérable. Par exemple, sur 1296 MHz, un signal partant de la Terre avec une puissance de 1 *kilowatt* reviendra sur Terre avec une puissance de... $8,2 \cdot 10^{-25}$ *watt*, soit pratiquement rien !! Exprimée en *picowatts*, cette valeur s'élève à $8,2 \cdot 10^{-13}$ pW, soit encore, 0,8 *millionième de millionième de picowatt*, ou, si on préfère, 0,8 *millionième de millionième de millionième de millionième de watt*...

Pour fixer les idées, 1 kilowatt, c'est en gros la puissance d'un petit fer à repasser, d'un aspirateur, d'une plaque électrique de cuisson "économique", d'un radiateur de chauffage moyen. C'est aussi approximativement la puissance développée par un haltérophile bien entraîné levant en une seconde à l'arraché une masse de 100 kg.

Comment peut-on compenser un tel affaiblissement, qui, dans une certaine mesure, pourrait dépasser l'entendement ? Eh bien, l'état actuel de la technique le permet !

Pour établir une liaison radio-électrique unilatérale, trois organes sont nécessaires:

- Un émetteur à une extrémité,
- Un récepteur à l'autre extrémité,
- Une antenne aux deux extrémités, soit *deux* antennes en tout.

Dans le cas de la Lune, compte tenu de la distance parcourue, environ 770000 km, les signaux mettent en gros 2,5 secondes pour accomplir le trajet aller et retour, ce qui donne la possibilité d'entendre ses propres échos. On peut ainsi vérifier soi-même le fonctionnement de son propre

* - Cette bande n'est pas attribuée au service amateur en France.

équipement. Le récepteur, l'émetteur et l'antenne sont au même endroit, mais l'antenne fonctionne *deux fois*: *une fois* en émission, puis *une fois* en réception.

3) Réception

3.1) Le récepteur proprement dit

Quelles que soient sa conception et sa complexité, un système de réception complet peut être réduit à une simple *boîte noire*, que seules sa température de bruit équivalente et sa bande passante suffisent à caractériser. Fondamentalement, le gain du récepteur ne sert qu'à amplifier le bruit de fond, et en présence de signal, à amplifier ce signal superposé à ce même bruit de fond.

La puissance résiduelle de bruit ramenée à l'entrée du récepteur est donnée par la relation:

$$P_r = kTB \quad (3.1)$$

où:

P_r : puissance résiduelle de bruit à l'entrée du récepteur, en watts.

k : constante de Boltzmann, en joule/degrés absolus. $k \approx 1,38065 \cdot 10^{-23}$ J/°K.

T : température équivalente de bruit, en degrés absolus (kelvin).

B : bande passante du récepteur, en hertz.

Dans la pratique, on remplace la température de bruit par un paramètre similaire, le facteur de bruit, lié à la température par la relation suivante:

$$T = T_0(N - 1) \quad (3.2)$$

où:

T_0 : température de référence. $T_0 = 290^\circ\text{K}$ *par convention*.

N : facteur de bruit. $N \geq 1$ dans tous les cas.

Souvent, on exprime le facteur de bruit (*noise figure* en anglais) sous forme logarithmique (dB):

$$NF = N_{\text{dB}} = 10 \log N \quad (3.3)$$

3.2) Liaison entre le récepteur et l'antenne

En règle générale, la liaison entre l'antenne et le récepteur se fait par un dispositif spécifique appelé *ligne de transmission*. Quelle que soit sa nature (câble coaxial, guide d'onde, etc.), elle présente inéluctablement des pertes. Soit M le facteur de transmission de cette ligne. Il est donc toujours ≤ 1 *par définition*. Il en résulte que la puissance recueillie à la sortie de la ligne a pour valeur:

$$P_{\text{Sortie}} = M \cdot P_{\text{Entrée}} \quad (3.4)$$

Mais ce n'est pas tout. Du fait des pertes qu'elle introduit, l'impédance de cette ligne présente une composante "ohmique" pure. Il en découle une augmentation de la température de bruit. La température équivalente de la ligne est donnée par la relation:

$$T_L = T_0(1 - M) \quad (3.5)$$

Remarque importante. Après passage à travers une ligne de transmission, le signal subit non seulement un *affaiblissement*, mais aussi une *dégradation* supplémentaire due à l'augmentation du bruit de fond par la présence même de la ligne. Cet effet est d'autant plus important que le facteur de bruit du récepteur *seul* est bas.

3.3) Température d'antenne

La température d'antenne est la résultante de deux composantes: d'abord, celle due à la résistance "ohmique" de la structure, qui n'est pas un conducteur parfait, et ensuite, celle due au bruit de fond cosmique capté par l'antenne, dont l'intensité dépend de la fréquence utilisée. Il s'avère que la composante "ohmique" reste négligeable, du fait que la résistance de la structure demeure faible (quelques fraction d'ohm au pire) par rapport à l'impédance de l'antenne (50 Ω). Par contre, la composante cosmique reste significative et doit être prise en compte.

Finalement, la puissance résiduelle à l'entrée du système antenne + récepteur a pour valeur:

$$P_r = kB[T_A + T_0(1 - M) + T_0(N - 1)] \quad (3.6)$$

qui se réduit à:

$$\boxed{P_r = kB[T_A + T_0(N - M)]} \quad (3.7)$$

où:

P_r : puissance résiduelle de bruit à l'entrée du récepteur, en watts (W).

k : constante de Boltzmann, en joule/degrés absolus. $k \approx 1,38065 \cdot 10^{-23}$ J/°K.

B : bande passante du récepteur, en hertz (Hz).

T_A : température équivalente d'antenne, en degrés absolus (kelvin).

T_0 : température de référence. $T_0 = 290^\circ\text{K}$ *par convention*.

M : facteur de transmission de la ligne entre l'antenne et le récepteur ($M \leq 1$).

N : facteur de bruit ramené à l'entrée du récepteur ($N \geq 1$).

Il en résulte que tout signal arrivant à l'entrée du récepteur avec une puissance identique à la puissance de bruit sera dans la pratique à la limite de l'audibilité.

Exemple numérique.

Cas 1: le récepteur est relié directement à l'antenne.

Soit un récepteur fonctionnant sur 1296 MHz, avec un facteur de bruit de 0,5 dB et une bande passante de 2500 Hz. Sur cette fréquence, $T_A \approx 3^\circ\text{K}$. Ce récepteur présente alors une puissance résiduelle de bruit telle que:

$$P_r = 1,38065 \cdot 10^{-23} \cdot [3 + 290 \cdot (10^{(0,5/10)} - 1) \cdot 2500] \quad (3.8)$$

Soit:

$$P_r = 1,32 \cdot 10^{-18} \text{ W} \quad (3.9)$$

Soit encore, sous forme logarithmique, par rapport à un watt:

$$P_{\text{rdB}} = -178,8 \text{ dBW} \quad (3.10)$$

Cas 2: on interpose entre l'antenne et le récepteur une ligne présentant une perte de 3 dB.

Facteur de transmission de la ligne:

$$M = 10^{(-p_{\text{dB}}/10)} \quad (3.11)$$

où:

p_{dB} : perte de la ligne, exprimée en dB.

M : facteur de transmission de la ligne.

On a:

$$M = 10^{-3/10} \approx 0,5 \quad (3.12)$$

On applique à nouveau la relation (3.7):

On obtient alors:

$$P_r = 1,38065 \cdot 10^{-23} \cdot [3 + 290 \cdot (10^{(0,5/10)} - 0,5) \cdot 2500] \quad (3.13)$$

Soit:

$$P_r = 6,33 \cdot 10^{-18} \text{ W} \quad (3.14)$$

Soit encore, sous forme logarithmique, toujours par rapport à un watt:

$$P_{\text{rdB}} = -172,0 \text{ dBW} \quad (3.15)$$

On voit immédiatement que la présence d'une ligne présentant une perte de 3 dB entre l'antenne et le récepteur* provoque une dégradation globale de l'ordre de 7 dB, d'où l'intérêt majeur de placer le récepteur* juste au point d'alimentation de l'antenne.

4) Emission

On a vu plus haut que sur 1296 MHz, l'affaiblissement de parcours était voisin de -270 dB. Il manque donc encore 91 dB pour atteindre le seuil de sensibilité du récepteur. Comment rétablir l'équilibre ? On y parvient en augmentant la puissance de l'émetteur, mais surtout, en augmentant le gain des antennes. Si la qualité de la réception est limitée par le bruit de fond résiduel — limite théorique déjà presque atteinte par la technologie actuelle —, à l'émission, il n'existe pas de telle limite. On peut théoriquement utiliser la puissance nécessaire pour obtenir un signal exploitable.

Cependant, il existe des bornes que les "amateurs" dépassent rarement, à la fois pour des raisons techniques (les composants de puissance sont fragiles, relativement difficiles à se procurer et délicats à manipuler) et économiques (ces mêmes composants sont souvent fort coûteux pour un amateur moyen). Ainsi, une puissance de l'ordre du kilowatt est rarement dépassée sur les bandes "basses", et jamais atteinte sur les bandes "hautes". Malgré tout, on verra dans le paragraphe 6 que des puissances nettement plus faibles sont largement suffisantes sur les bandes hautes.

* -Dans la pratique, c'est en fait l'étage d'entrée du récepteur qu'on place sur l'antenne.

5) Antenne

Dans le cas des liaisons Terre–Lune–Terre, le paramètre principal de l'antenne est son gain. C'est même le paramètre prépondérant.

Par ailleurs, la Lune n'étant pas fixe, il faut corriger en permanence la direction de l'antenne. Cette procédure est appelée *poursuite*, ou encore, *tracking*. Elle peut être manuelle ou automatique. Il ne sera pas fait mention ici des techniques de poursuite.

5.1) Antenne parabolique:

Ce type d'antenne est le plus répandu à partir de 1296 MHz. Le gain d'une telle antenne est donné par la formule suivante:

$$G_{\text{ISO}} \approx 6,4 \frac{D^2}{\lambda^2} \quad (5.1)$$

Soit sous forme logarithmique:

$$G_{\text{dB}} \approx 8,1 + 20 \log \frac{D}{\lambda} \quad (5.2)$$

où:

G_{ISO} : Gain isotrope de l'antenne, exprimé sous forme de facteur.

G_{dB} : Gain isotrope de l'antenne, exprimé en dBi (dB "iso").

D : Diamètre de la parabole, en mètres.

λ : Longueur d'onde de travail, en mètres.

Pour mémoire, on peut citer le cas de la parabole *offset*, d'ouverture elliptique, très répandue dans le grand public. C'est ce type d'antenne qui est majoritairement mis en œuvre pour la réception de la télévision par satellite chez le particulier. Il est par contre relativement peu utilisé par les radio-amateurs.

Son gain est donné par la formule suivante:

$$G_{\text{ISO}} \approx 8,4 \frac{D^2}{\lambda^2} \quad (5.3)$$

Soit sous forme logarithmique:

$$G_{\text{dB}} \approx 9,2 + 20 \log \frac{D}{\lambda} \quad (5.4)$$

où:

D : Longueur du petit axe de l'ellipse, en mètres.

λ : Longueur d'onde de travail, en mètres.

5.2) Groupements d'antennes Yagi-Uda:

Ce type d'antenne est surtout utilisé sur 144 MHz et partiellement sur 432 MHz. Il est en effet aussi possible d'utiliser la parabole sur cette bande. On pourrait qualifier cette dernière de "bande de transition" au niveau des antennes.

L'antenne *Yagi-Uda* (expérimentée et décrite pour la première fois par le Japonais Uda en 1926, puis par Yagi et Uda en 1928) — y compris ses nombreux avatars — est de très loin l'antenne la plus utilisée dans le monde, tant par les particuliers (réception individuelle de la télévision, des centaines de millions d'exemplaires en service dans le monde) que par les radio-amateurs (quelques centaines de milliers).

Le gain de cette antenne peut être estimé par la formule empirique suivante:

$$G_{\text{ISO}} \approx 14,5 \left[\frac{D}{\lambda} \right]^{0,8} \quad (5.5)$$

Soit sous forme logarithmique:

$$\boxed{G_{\text{dB}} \approx 11,6 + 8 \log \frac{D}{\lambda}} \quad (5.6)$$

où:

G_{ISO} : Gain isotrope de l'antenne, exprimé sous forme de facteur.

G_{dB} : Gain isotrope de l'antenne, exprimé en dBi (dB "iso").

D : Longueur de l'antenne, en mètres.

λ : Longueur d'onde de travail, en mètres.

Cette antenne a la propriété de pouvoir fonctionner en groupement, ou *couplage*. Cette méthode simple permet de multiplier le gain d'une antenne seule, dite *antenne-mère*, par le nombre d'antennes couplées.

La formule suivante donne le gain d'un couplage d'antennes.

$$G_{\text{ISO}} \approx n \cdot 14,5 \left[\frac{D}{\lambda} \right]^{0,8} \quad (5.7)$$

Soit sous forme logarithmique:

$$\boxed{G_{\text{dB}} \approx 11,6 + 8 \log \frac{D}{\lambda} + 10 \log n} \quad (5.8)$$

où:

n : nombre d'antennes couplées.

Pour des raisons d'ordre pratique, le nombre d'antennes couplées est la plupart du temps une puissance entière de 2 ($n = 2, 4, 8, 16$, etc.).

5.2) Autres antennes:

Hormis la parabole et l'antenne Yagi-Uda, d'autres types d'antennes peuvent être employés, surtout sur 144 et 432 MHz. Il s'agit par exemple de couplages de simples dipôles demi-onde, dits *rideaux* de dipôles. C'est ce type d'arrangement qui fut utilisé en 1946, lors des tout premiers essais d'échos sur 111 MHz par les militaires américains. Des antennes de type *rhombique* furent aussi essayées avec succès, mais du fait de leur structure, elles ne sont pratiquement pas orientables. Elles furent vite abandonnées.

6) Bilan de liaison EME entre deux stations A et B

6.1) Bilan global

Dans le cas des liaisons EME, le bilan de liaison est donné par la relation globale suivante, déduite des formules (2.9) et (3.7).

$$S = \frac{\alpha r^2 \lambda^2 P M_E M_R G_1 G_2}{kB [T_A + T_0 (N - M_R)] 64 \pi^2 D^4} \quad (6.1)$$

où:

- S : puissance relative (ou *niveau*) du signal à l'entrée du récepteur, sous forme de facteur.
- α : facteur de réflectivité de la Lune ($\alpha \approx 0,065$).
- r : rayon de la Lune, en mètres.
- λ : longueur d'onde de travail, en mètres.
- P : Puissance utile à la sortie de l'émetteur, en watts (W).
- M_E : facteur de transmission de la ligne entre l'antenne et l'émetteur ($M_E \leq 1$).
- M_R : facteur de transmission de la ligne entre l'antenne et le récepteur ($M_R \leq 1$).
- G_1 : Gain iso de l'antenne d'émission, en facteur.
- G_2 : Gain iso de l'antenne de réception, en facteur.
- k : constante de Boltzmann, en joule/degrés absolus. $k \approx 1,3802 \cdot 10^{-23}$ J/°K.
- B : bande passante du récepteur, en hertz (Hz).
- T_A : température équivalente d'antenne, en degrés absolus (kelvin).
- T_0 : température de référence. $T_0 = 290^\circ\text{K}$ *par convention*.
- N : facteur de bruit ramené à l'entrée du récepteur ($N \geq 1$).
- D : distance Terre – Lune, en mètres (m).

Attention ! Dans la relation (6.1), en supposant que la station A émette et que la station B reçoive, le facteur de transmission de la ligne d'émission se rapporte à la station A et celui de la ligne de réception se rapporte à la station B. Ils pourront être différents dans l'autre sens, en fonction des installations respectives de A et de B.

6.2) Exemples numériques.

6.2.1) Bande 1296 MHz

Fréquence de travail: 1296 MHz, soit une longueur d'onde de 23 cm.

Affaiblissement de parcours aller et retour typique: $A \approx 271,2$ dB.

Température d'antenne typique: $T_A \approx 3^\circ\text{K}$.

Cas 1: stations typiques.

Il s'agit ici des installations les plus fréquentes rencontrées sur la bande 1296 MHz. Les antennes paraboliques sont, soit de *récupération* (militaire, anciennes antennes collectives de réception satellites TV, etc.), soit de *fabrication maison*.

Paramètre	Station A	Station B
Gain de l'antenne	36 dB "iso" (parabole Ø 6 m)	34 dB "iso" (parabole Ø 4 m)
Puissance HF utile	500 W	600 W
Perte de la ligne TX	1,1 dB	0,5 dB
Perte de la ligne RX	0,05 dB	0,05 dB
Facteur de bruit global	0,45 dB	0,55 dB
Bande passante	500 Hz	500 Hz
Niveau des signaux reçus	B reçue par A: +11,7 dB	A reçue par B: +9,5 dB

Une bande passante de 500 Hz ne permet pas d'établir des liaisons en téléphonie. Seule la télégraphie (morse) est utilisable. Avec une bande passante de 2500 Hz, adaptée à la téléphonie, les signaux seraient 7 dB plus faibles, donc encore audibles, mais à la limite de la compréhensibilité.

Cas 2: stations puissantes.

C'est le cas de certaines stations disposant d'espace permettant la construction et l'installation d'une grande antenne. Le tableau suivant est calculé, hormis les antennes, avec du matériel au sol à peine plus performant que celui du tableau précédent.

Paramètre	Station A	Station B
Gain de l'antenne	40,9 dB "iso" (parabole Ø 10 m)	42,1 dB "iso" (parabole Ø 12 m)
Puissance HF utile	1000 W	1000 W
Perte de la ligne TX	0,60 dB	0,50 dB
Perte de la ligne RX	0,02 dB	0,02 dB
Facteur de bruit global	0,40 dB	0,35 dB
Bande passante	2500 Hz	2500 Hz
Niveau des signaux reçus	B reçue par A: +20,5 dB	A reçue par B: +20,8 dB

Ici, les signaux sont parfaitement exploitables en téléphonie, même par une oreille non exercée. La force des signaux est légèrement inférieure à celle délivrée par les téléphones "portables".

6.2.1) Bande 10 GHz

Fréquence de travail: 10368 MHz, soit une longueur d'onde de 29 mm.

Affaiblissement de parcours aller et retour typique: $A \approx 289,3$ dB.

Température d'antenne typique: $T_A \approx 5^\circ\text{K}$.

Il s'agit ici des installations les plus fréquentes rencontrées sur la bande des 10 GHz. Les antennes paraboliques sont, comme pour la bande 1296 MHz, soit de *récupération* (militaire, télécom, anciennes antennes collectives de réception satellites TV, etc.), soit de *fabrication maison*.

Paramètre	Station A	Station B
Gain de l'antenne	48 dB "iso" (parabole Ø 3 m)	51 dB "iso" (parabole Ø 4,20 m)
Puissance HF utile	10 W	10 W
Perte de la ligne TX	0,02 dB	0,02 dB
Perte de la ligne RX	0,00 dB	0,00 dB
Facteur de bruit global	0,45 dB	0,30 dB
Bande passante	500 Hz	500 Hz
Niveau des signaux reçus	B reçue par A: +5,8 dB	A reçue par B: +6,3 dB

Une bande passante de 500 Hz ne permet pas d'établir des liaisons en téléphonie. Seule la télégraphie (morse) est utilisable.

On voit ici que les antennes sont de taille plus modeste. Il n'est même pas nécessaire de dépasser les 4,50 m, car le faisceau de l'antenne sera alors plus petit que le diamètre apparent de la Lune.

De même, une puissance de 10 Watts suffit. Mais il y a encore quelques années, obtenir une telle puissance était extrêmement complexe (tubes à ondes progressives, klystrons, très hautes tensions à manipuler, etc...). Aujourd'hui, les semi-conducteurs ont remplacé ces anciens composants. Avec des transistors, on peut maintenant atteindre les 50 W, mais la technologie reste encore très complexe et difficile à maîtriser.

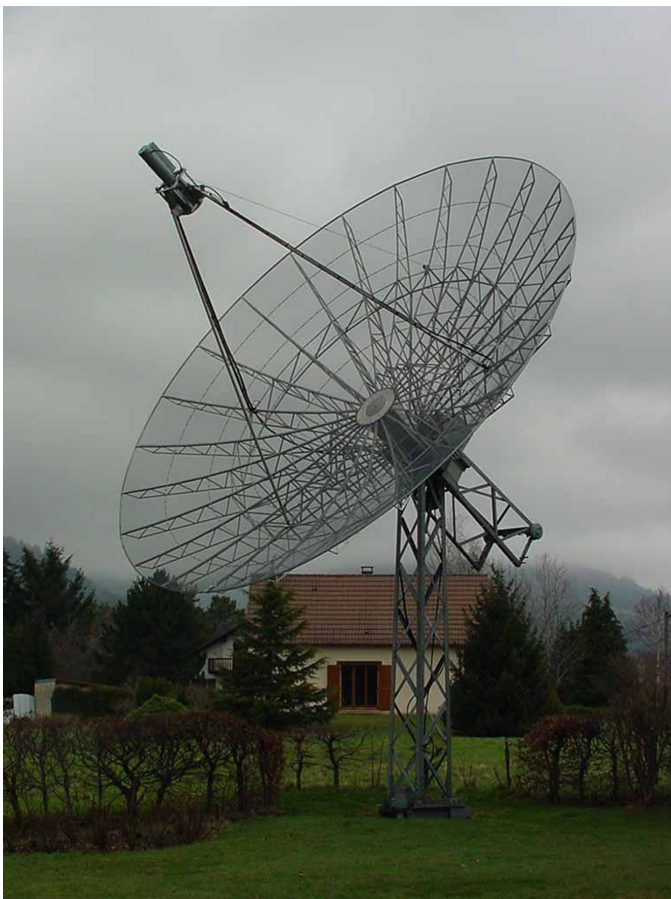
Pour des raisons qui ne sont pas traitées ici, les signaux réfléchis par la Lune sur 10 GHz sont affectés d'une distorsion rendant extrêmement difficile la compréhensibilité en téléphonie, même en présence de signaux forts. Les radioamateurs restent donc fidèles à la bonne vieille télégraphie.

Pour terminer, il est également possible de "décoder" des signaux "noyés" dans le bruit de fond, grâce à des logiciels et des codages de signaux mis au point par un radioamateur hors du commun, le professeur Joseph Taylor (K1JT), récipiendaire du prix Nobel de physique 1993 pour ses travaux sur les ondes gravitationnelles. Le lecteur intéressé par plus de détails pourra se renseigner, via un moteur de recherche bien connu, en entrant les mots-clés suivants: *K1JT*, *WSJT*, *JT65*. Grâce à ces logiciels, il est possible de faire des liaisons lunaires avec des moyens beaucoup plus modestes et l'amateur peut ainsi se "faire la main" avant de passer à l'échelon supérieur, s'il le désire.

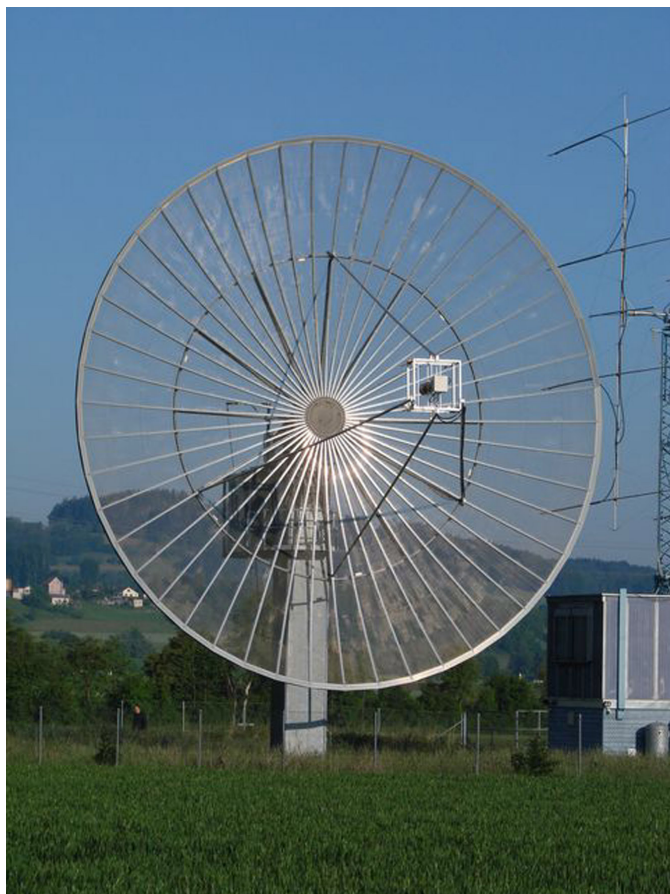
7) Quelques photos...



F6KHM, Radio-Club USAM, Brest,
Finistère, France. $\varnothing = 10,33$ m



F2TU, Philippe, Saint-Dié, Vosges,
France. $\varnothing = 7,80$ m



HB9Q, Dani, Reinach, Argovie,
Suisse. $\varnothing = 15$ m



OK1DFC, Zdenek, Liben,
République Tchèque. $\varnothing = 10$ m



RW1AW, Alex, Saint-Petersbourg,
Russie. $\varnothing = 8 \text{ m}$

On aperçoit une autre parabole...



RW1AW, Alex, Saint-Petersbourg,
Russie.

L'autre parabole, $\varnothing = 6 \text{ m}$

SP6JLW, Andrzej, avec fils et neveu,
Kłodzko, Wrocław, Pologne. $\varnothing = 7 \text{ m}$





SV1BTR, Dimitris, Athènes, Grèce.
 $\varnothing = 4 \text{ m}$



PI9CAM, Radio-Club CAMRAS, Dwingeloo, Pays-Bas. $\varnothing = 25 \text{ m}$

Il s'agit du premier radiotélescope parabolique de cette taille construit au monde dans les années 1950. Mis "à la retraite" à la fin des années 1990, il fut ré restauré par un groupe de radioamateurs hollandais en 2007 – 2008. A nouveau opérationnel, il sert à la fois aux activités radioamateurs et à des activités radioastronomiques à caractère pédagogique.

CAMRAS = C. A. Muller Radio Astronomy Station, dédiée à la mémoire du professeur C. A. Muller, ancien directeur de l'observatoire, lui-même radioamateur à cette époque (PAØCAM).



RN6BN, Sacha, Krasnodar, Russie.

Groupement de 64 antennes de 2x15 éléments croisés,
pour la bande 144 MHz.

Chaque antenne mesure environ 13 m de long.