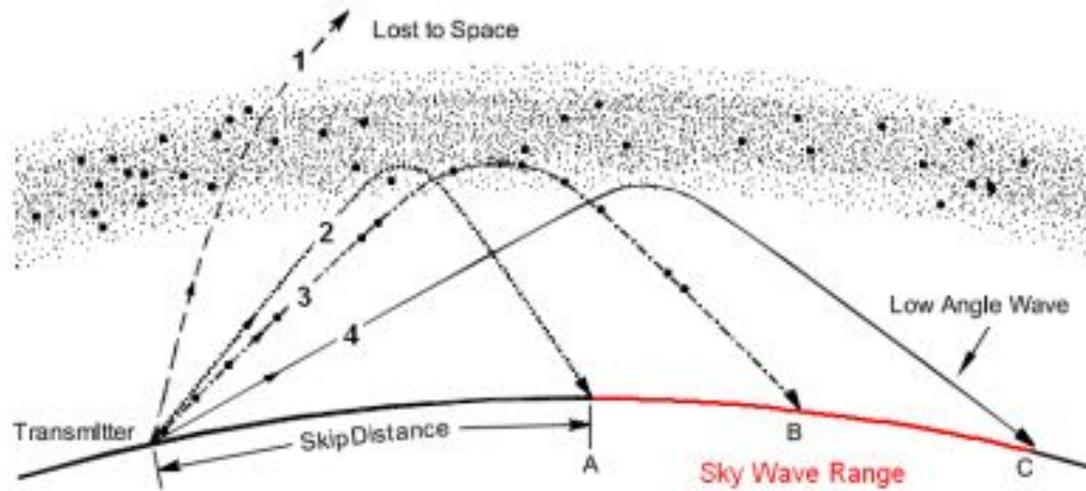


La propagation des ondes radio



Définition

Etude de la façon dont se propage une onde électromagnétique dans l'espace ou dans des lignes.

Pour faire simple, une onde radio est proche d'un rayonnement lumineux car la plupart des phénomènes d'optique géométrique (réflexion...) s'appliquent aussi dans la propagation mais évidemment l'influence de la fréquence de l'onde est déterminante pour sa propagation.

Il est fréquent que deux ou plusieurs phénomènes s'appliquent simultanément au trajet d'une onde : réflexion et diffusion, diffusion et réfraction... Ces phénomènes appliqués aux ondes radioélectriques permettent souvent d'établir des liaisons entre des points qui ne sont pas en vue directe.

Les différents phénomènes théoriques de propagation

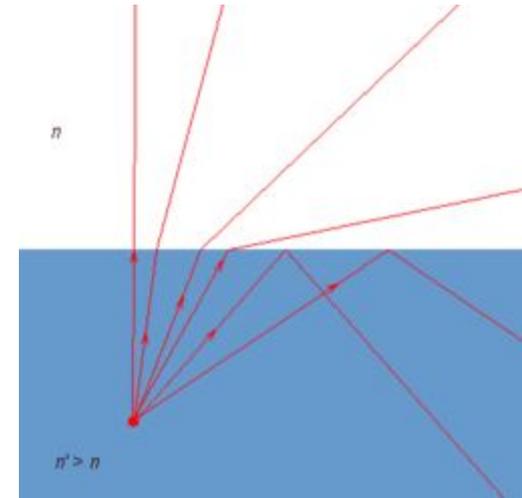
Réflexion des ondes radio

Une onde peut se réfléchir sur une surface comme le sol, la surface de l'eau, un mur ou une voiture. On parle de réflexion spéculaire lorsque l'onde se réfléchit comme un rayon lumineux le ferait sur un miroir. Une onde dont la fréquence est de l'ordre de quelques mégahertz peut se réfléchir sur une des couches ionisées de la haute atmosphère. La réflexion d'une onde est plus généralement diffuse, l'onde se réfléchissant dans plusieurs directions ainsi qu'un rayon lumineux frappant une surface mate. Une antenne ou un miroir paraboliques fonctionnent de façon similaire..



Réfraction des ondes radio

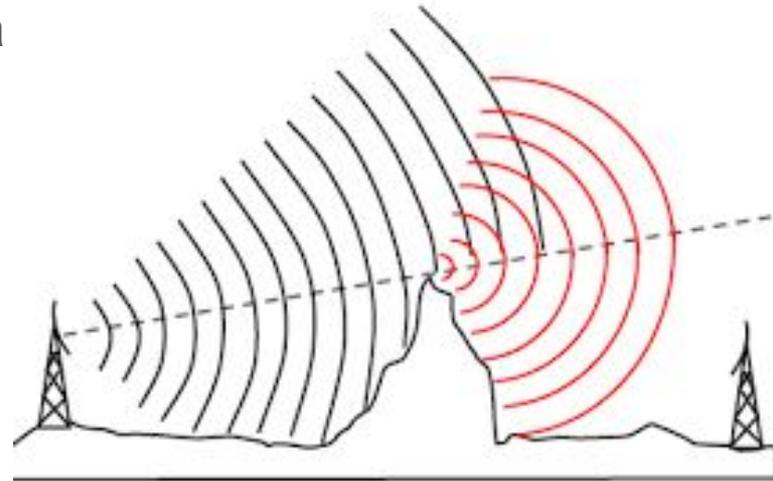
Comme un rayon lumineux est dévié lorsqu'il passe d'un milieu d'indice de réfraction n_1 à un autre d'indice n_2 , une onde radio peut subir un changement de direction dépendant à la fois de sa fréquence et de la variation de l'indice de réfraction. Ce phénomène est particulièrement important dans le cas de la propagation ionosphérique, la réflexion que subit une onde décimétrique dans l'ionosphère est en fait une suite continue de réfractions. Il est possible de reproduire avec une onde radio dont la longueur d'onde est de quelques centimètres à quelques décimètres le phénomène observé avec une lentille ou un prisme en optique classique.



Diffraction des ondes radio

Lorsqu'une onde rencontre un obstacle de grande dimension par rapport à la longueur d'onde, celle-ci pourra être arrêtée par cet obstacle. Ce sera le cas d'une colline, d'une montagne, etc. Cependant, dans une certaine mesure, l'onde pourra contourner l'obstacle et continuer à se propager derrière celui-ci, à partir des limites de cet obstacle. Ainsi, une onde ne sera pas entièrement arrêtée par une montagne, mais pourra continuer à se propager à partir du sommet de la montagne, vers la plaine qui se trouve derrière...

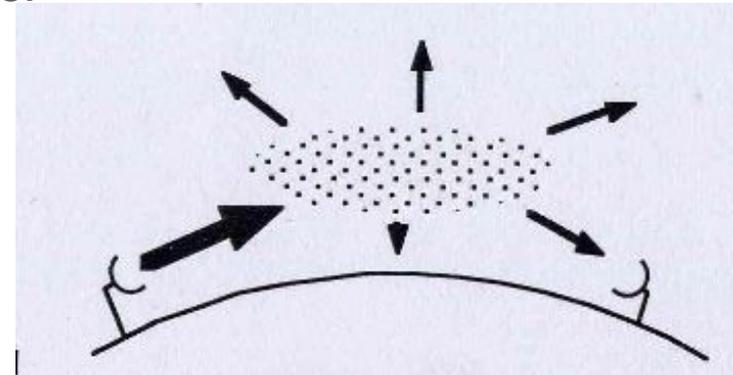
Ce franchissement de l'obstacle se fera avec une atténuation, parfois très importante.



Diffusion des ondes radio

Le phénomène de diffusion peut se produire quand une onde rencontre un obstacle dont la surface n'est pas parfaitement plane et lisse. C'est le cas des couches ionisées, de la surface du sol dans les régions vallonnées (pour les longueurs d'onde les plus grandes) ou de la surface des obstacles (falaises, forêts, constructions...) pour les VHF et +. Comme en optique, la diffusion dépend du rapport entre la longueur d'onde et les dimensions des obstacles ou des irrégularités à la surface des obstacles réfléchissants.

Ces derniers peuvent être aussi variés que des rideaux de pluie ou les zones ionisées de la haute atmosphère lors des aurores polaires.



Et aussi

- Interférence de deux ondes radio
- Effet Faraday

Les différents type de propagation (par altitude)

Onde de Sol

L'onde de sol est une onde de surface. Elle se propage en suivant la surface de la Terre comme une onde guidée suit la ligne qui lui sert de rails. La ligne, ici est le sol. S'il est bon conducteur (océan, marais...) l'affaiblissement du champ électrique sera modéré et la portée sera plus grande, surtout sur les fréquences plus élevées. S'il est isolant (sol gelé, désert...), l'onde de sol sera atténuée très rapidement. Sur mer la portée est nettement plus grande, surtout pour les fréquences élevées. Sur 10 MHz (bande 30m) la portée qui était de 10km sur sol moyen passe à 100 km sur mer.



Bandes : Toutes, + efficace en montant en fréquence

Distances : qqs dizaines de km

Liaisons à vue

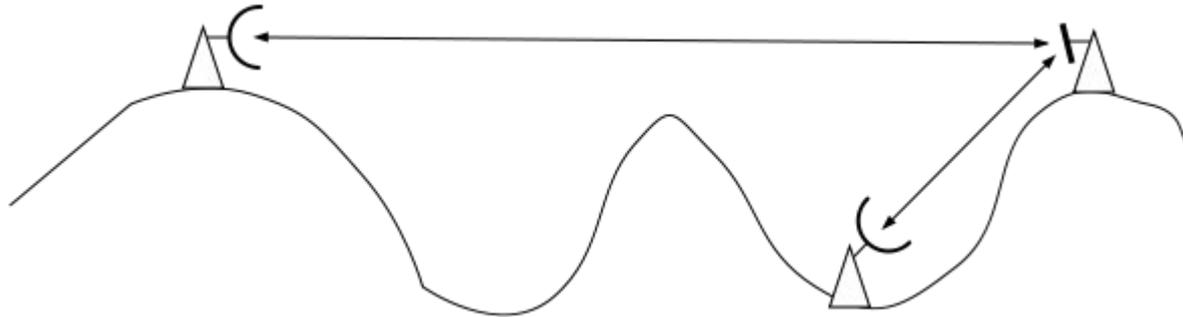
Plus sa fréquence augmente, plus le comportement d'une onde ressemble à celui d'un rayon lumineux. Les faisceaux hertziens permettent des liaisons à vue, comme le Télégraphe de Chappe, mais par tous les temps et avec des débits d'informations des milliards de fois plus élevés. Des obstacles de petites dimensions peuvent perturber la liaison



Propagation par réflexion

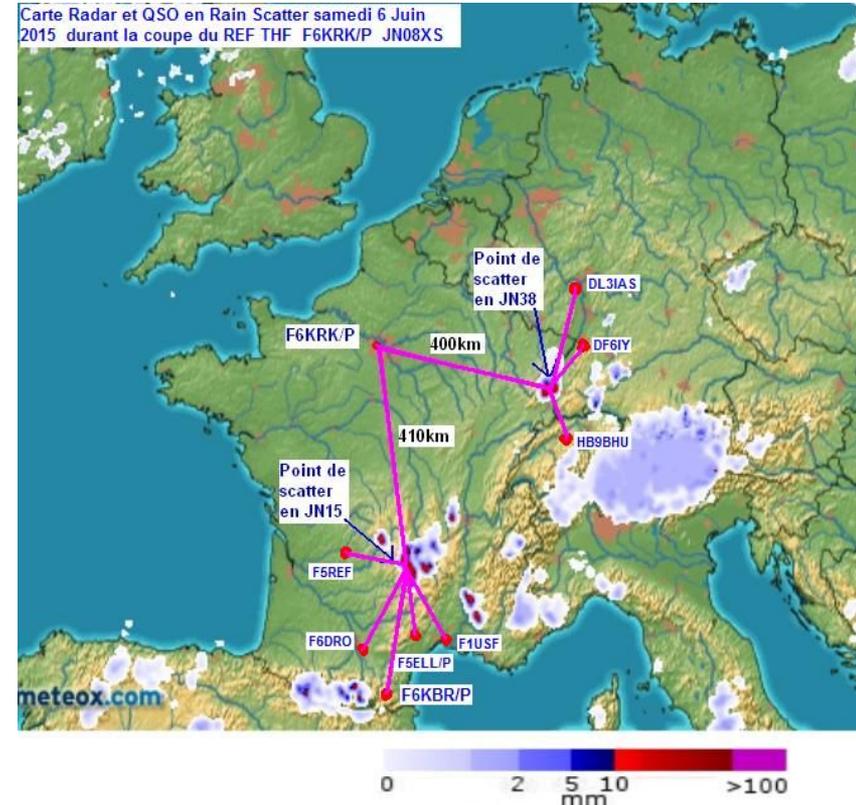
Les ondes se reflètent bien sur les bâtiments mais il est également possible de réaliser des contacts en utilisant les massifs comme le Mont-Blanc ou les Pyrénées (surtout si la surface de réflexion est de la glace).

Les opérateurs Télécom utilisent encore des panneaux réflecteurs en montagne pour des liaisons point à point en SHF.



Propagation Rain Scatter

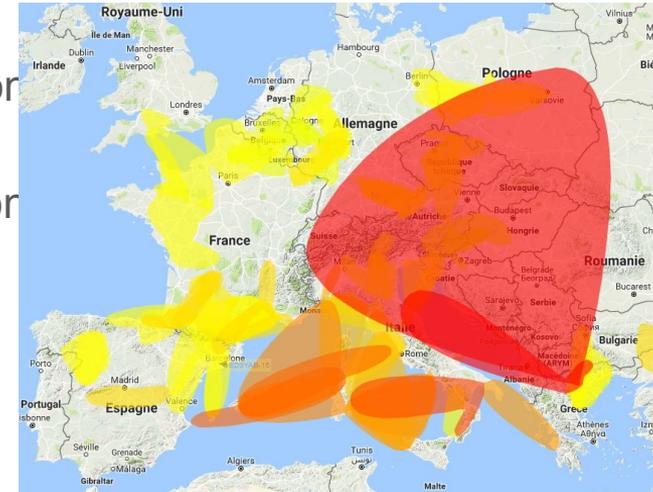
Les nuages orageux permettent à un signal radio d'être diffusé. La période estivale est bien sûr propice à ce type de propagation. Dans un cumulonimbus c'est la zone où la glace commence à fondre dans le nuage qui est la plus efficace et est souvent située à une altitude de 3 à 4 km mais peut monter à une dizaine de km.



Propagation troposphérique

La troposphère est la partie inférieure de l'atmosphère terrestre, qui s'étend du sol jusqu'à une altitude variant d'environ 8 km aux pôles à environ 17 km à l'équateur, et dans laquelle la température décroît assez régulièrement avec l'altitude.

Comme la densité de l'air diminue avec l'altitude, le trajet des ondes est légèrement incurvé vers la Terre. En propagation troposphérique, les ondes accomplissent la totalité de leur trajet dans la couche la plus près du sol. L'onde sera donc peu affectée par les phénomènes atmosphériques (pluie, brouillard, etc.) et les obstacles naturels (montagnes) et artificiels (bâtiments élevés).



Bandes :UHF/SHF
 Distances : jusqu'à 1000 km

Propagation "n'importe quoi" Scatter

Tout élément situé au dessus de nos têtes peut être utilisé comme disperser d'onde radio. Des contacts sont ainsi réalisés en utilisant les coques des avions, de l'ISS.

AircraftScatterSharp Version 1.0.6289.41444

Options Selected Aircraft Data (Metric) 03/22/2017 03:08:44 UTC

Hex Code	Flight Number	Altitude	Message Time
AA7734	SWA2466	9563.1	03/22/2017 03:08:35 UTC

Heading	Speed	Distance	Home->DX Bearing	EL
101	1015.2664	493.69	323.48	-1.60

Home: FN20AG, DX Station: FN12DB, Aircraft: FN03ES, WJ00AA

Lat: 40.2708333, 42.0437245, 43.7869584, 41.41859

Long: -75.9583333, -77.7324066, -79.6069336, -77.31329

km to Plane: 171.6, 78.3, 323.8, 9.0

AZ: 318.57, 143.64

Skew: 4.92, 2.60

EL: 2.50, 0.16, 0.57

Primary Alert: Home, DX Station, Distance, Frequency

PWR: 30, Gain: 37, BW: 500, NF: 1, Take Off: 0.1, km: 35.7, Alt: 482.0, dBm: -141.9, Marg: 4.1, Dop: 556.2

Total Path Loss dB: -260.7, Aircraftscatter Angle: 4.6

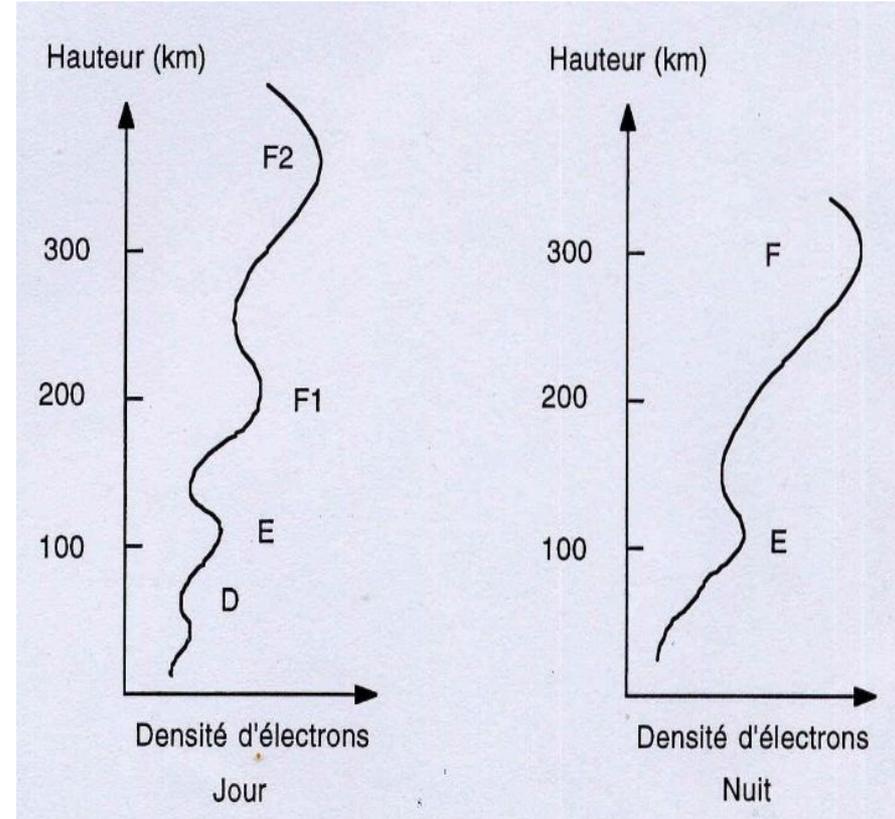
Maximum FE dB: Trosscatter Angle: 4.6

Path Altitude Profile: Home Station vs Obstruction Elevation Profile

Scatter Plot: Hz vs Seconds (Doppler Shift, Heading, Speed)

Propagation ionosphérique

- la **couche D**, de 10km d'épaisseur, située à 70 km d'altitude
- la **couche E**, de 25km d'épaisseur, située à environ 100km
- la **couche F1**, de 20km d'épaisseur, est située à 180 km pendant la journée mais s'élève et rejoint la couche F2 pendant la nuit
- la **couche F2**, d'une épaisseur atteignant 200 km, se situe entre 250km et 400km pendant la journée mais se trouve vers 300km pendant la nuit. C'est la couche la plus ionisée et c'est celle qui joue le rôle le plus important dans les communications radio



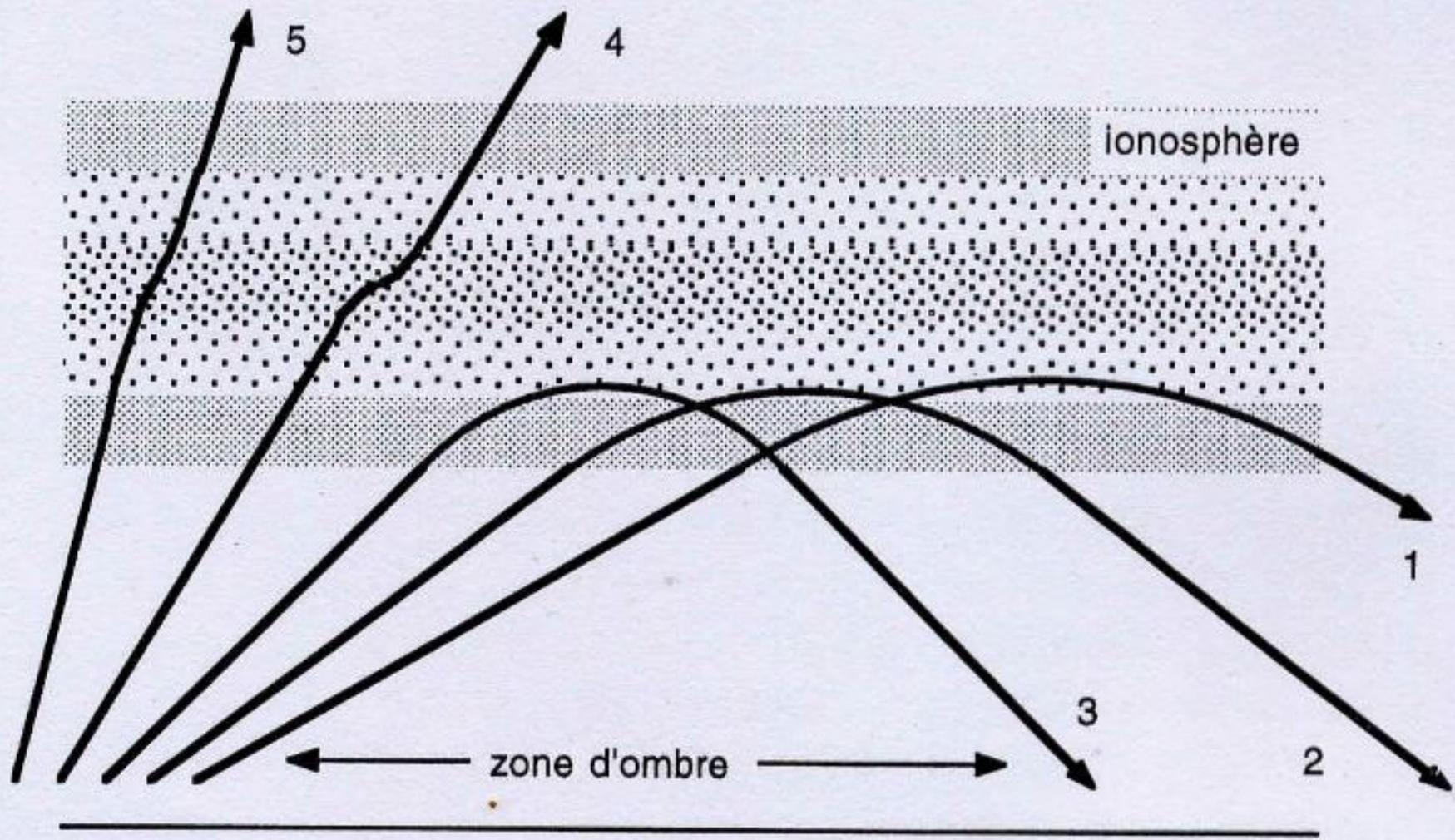
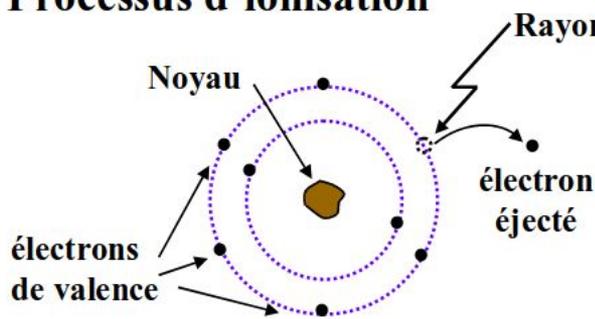


Photo ionisation

- **Processus d'ionisation**



Rayonnement d'énergie : $h\nu \geq eV_i$ avec :

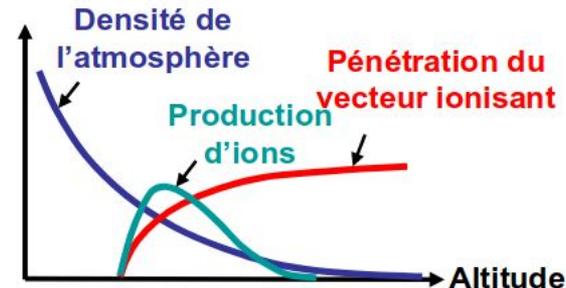
h = constante de Planck

ν = fréquence du rayonnement (Hz)

e = charge de l'électron

V_i = potentiel d'ionisation de l'électron

- L'énergie est transférée à l'électron sous forme d'énergie cinétique. Elle est d'autant plus élevée que la longueur d'onde (c / ν) est petite.
- Parallèlement à l'ionisation, s'effectue un processus de recombinaison d'autant plus important que la densité atmosphérique est élevée.
- Sachant que le rayonnement est absorbé au fur et à mesure de sa pénétration dans l'atmosphère, il existe une région où les deux phénomènes s'équilibrent, et il se forme une couche avec l'ionisation qui décroît de part et d'autre d'un maximum.



Propagation ionosphérique et soleil

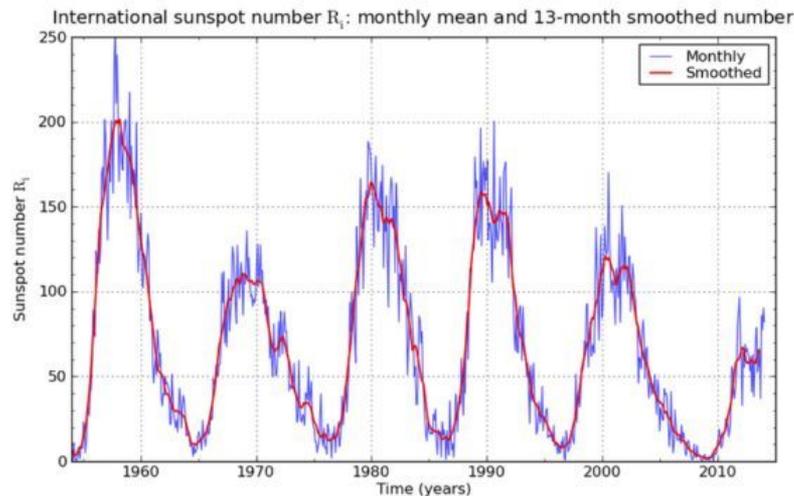
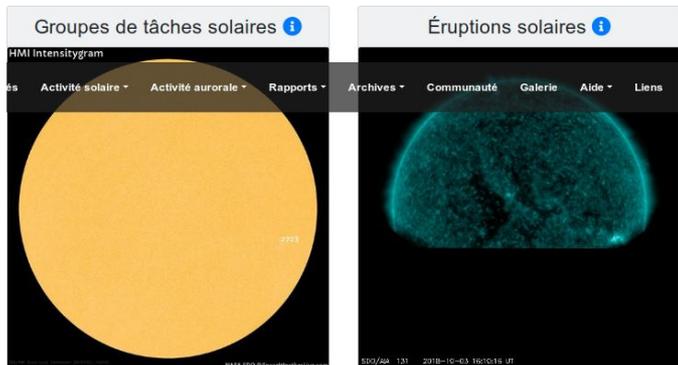
L'activité solaire fluctue sur des périodes de 11 ans. En période de forte activité solaire, la fréquence maximale utilisable (FMU) augmente et autorise des liaisons à grande distance via les bandes hautes (21 MHz et 50 MHz) alors qu'en période de faible activité, seules les bandes basses (1,8 MHz à 7 MHz) sont opérationnelles.

- L'indice SSN ou " Sun Spot Number "

<	50	:	Mauvais		
de	100	à	150	:	Bon
>	150	:	Excellent		

- L'indice SFI ou " Solar Flux Index "

<	100	:	Moyenne		
de	100	à	150	:	Bonne
>	150	:	Meilleure .		



SILSO graphics (<http://sidc.be>) Royal Observatory of Belgium 01/02/2014

<https://www.spaceweatherlive.com>

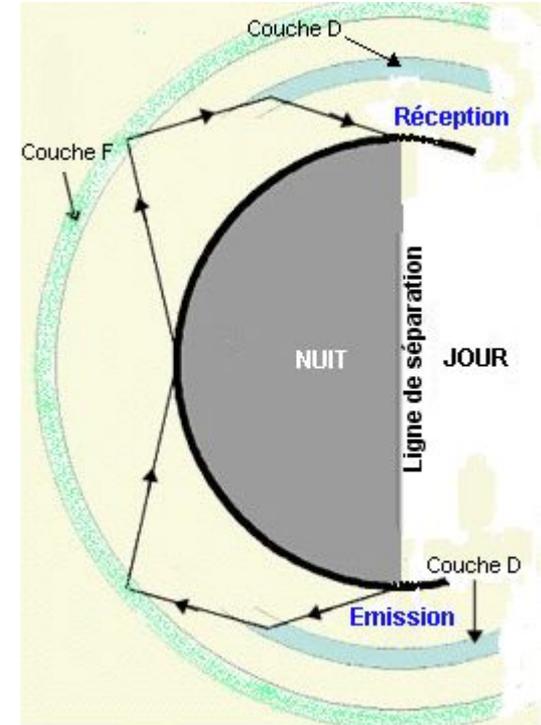
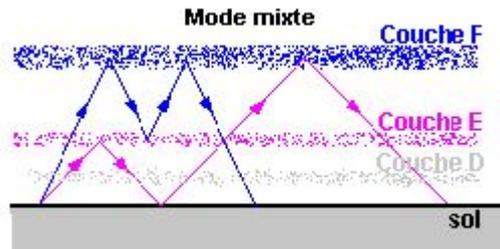
Propagation ionosphérique et...

Les aurores polaires ainsi que les météorites peuvent également ioniser les couches ionosphériques.



Propagation ionosphérique F

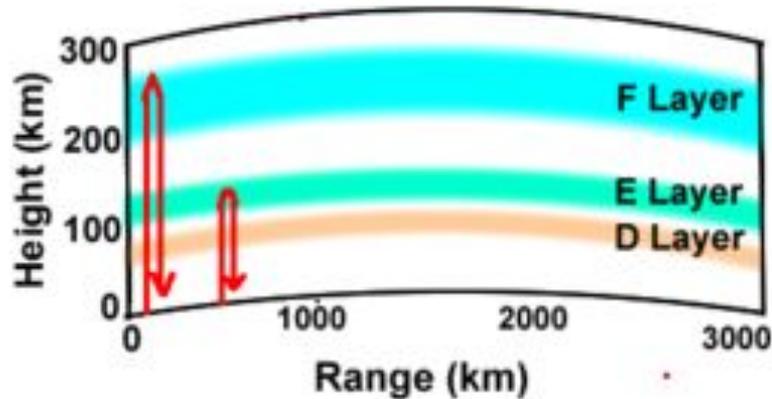
La couche F plus haute est directement liée à l'activité solaire. Au sommet de l'activité elle permet des contacts dans le monde entier en fonction des positions diurnes/nocturnes des stations et des bandes utilisées. Les signaux peuvent se refléter sur la couche ionosphérique plusieurs fois et rebondir sur la surface terrestre mais également via la couche E.



Bandes : basses HF
Distances : ≤ 300 km

Propagation NVIS

Le NVIS est utilisé pour établir un réseau radio dans la bande 1,6 à 12 MHz, en communications locales et régionale dans une zone circulaire inférieure à 300 km. Ce mode de propagation permet en zone de forts reliefs de remplacer un réseau VHF.



Propagation sporadique (Es)

La couche E, instable et erratique, est un excellent réflecteur, mais à cause de son caractère instable, elle ne peut pas être utilisée pour des communications fiables. Elle est responsable de la propagation des bandes hautes HF et de la VHF, dite « propagation sporadique E ». Elle est présente essentiellement l'été la journée. Les signaux peuvent être très importants comme si les stations distantes étaient à quelques kilomètres seulement. En HF, elle permet de contacter des stations aux antipodes.

Sur 6m, >10 000 km (Guadeloupe/Japon)

Sur 2m, > 1 000 km

Plusieurs centaines de km au delà

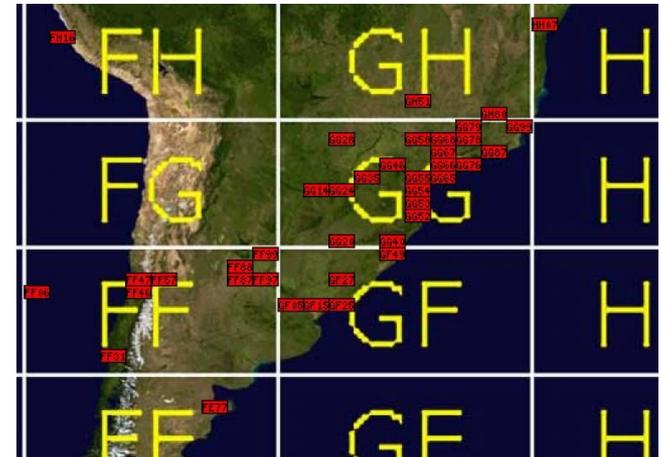
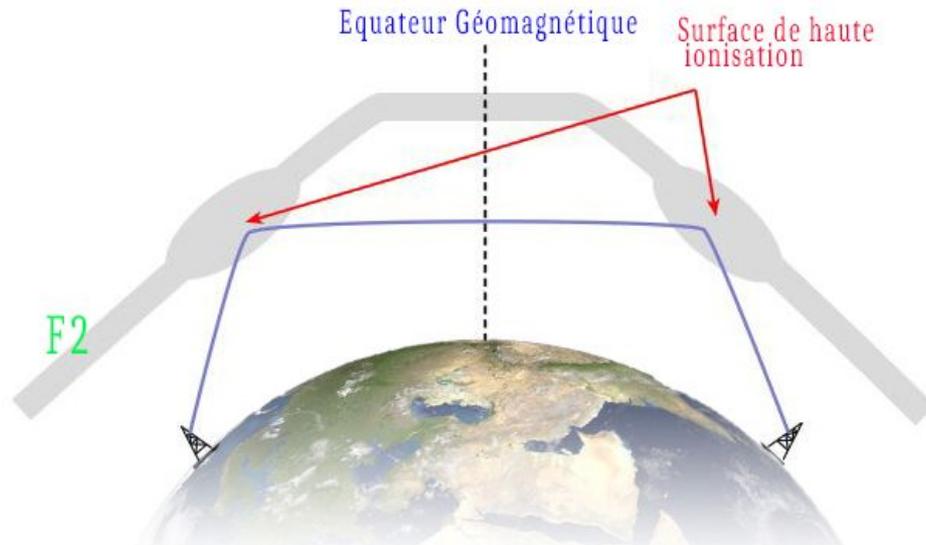
Band	Propagation	Call a	Loc	Call b	Loc	Mode	Date	Distance
144 MHz	TR	D4Z	HK76MU	G3SMT	IO82KV	CW	2018-09-25	4430
144 MHz	TR	D41CV	HK76MU	M0BUL	IO82NG	FT8	2018-09-25	4303
144 MHz	TR	D4Z	HK76MU	GW0KZG	IO81FQ	CW	2018-09-25	4303
144 MHz	TR	D41CV	HK76MU	G4RRA	IO80BS	FT8	2018-09-25	4205
144 MHz	TR	D4Z	HK76MU	EI3KD	IO51VW	CW	2018-08-05	4163

Bandes : haute HF/6m

Distances : qqs milliers de km

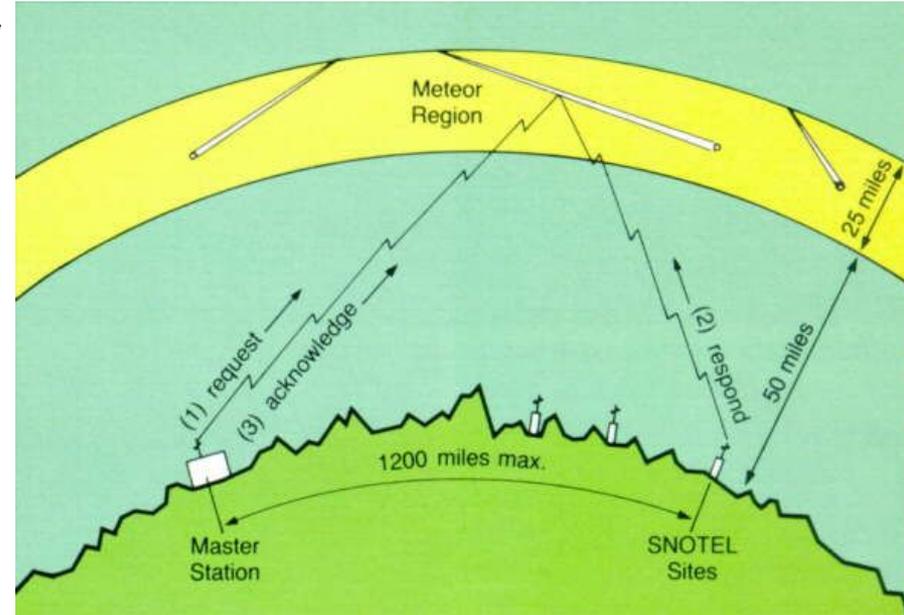
Propagation TEP (Propagation Trans Équatoriale)

En fin d'après-midi et le soir aux périodes proches des équinoxes il est possible de réaliser des contacts avec des radioamateurs dans l'hémisphère opposé. C'est la propagation TEP.



Propagation Meteor Scatter

Chaque jour des milliards de météorites entrent dans l'environnement terrestre avec suffisamment d'énergie pour ioniser les gaz de la haute atmosphère. L'idée consiste donc à utiliser la colonne gazeuse ionisée par la combustion de la météorite, essentiellement dans la couche E, comme réflecteur pour les signaux émis par deux stations distantes. Les fréquences les plus utilisées seront le 50 et 144 MHz et on exploite tant les grosses pluies comme les célèbres perséides que les météorites sporadiques quotidiennes.



Bandes : VHF/UHF/SHF

Distance : 800 000 km

Propagation EME (moonbounce)

Les stations radios sur la Terre doivent voir la Lune en même temps pour communiquer. Le premier QSO date du 10 janvier 1946.

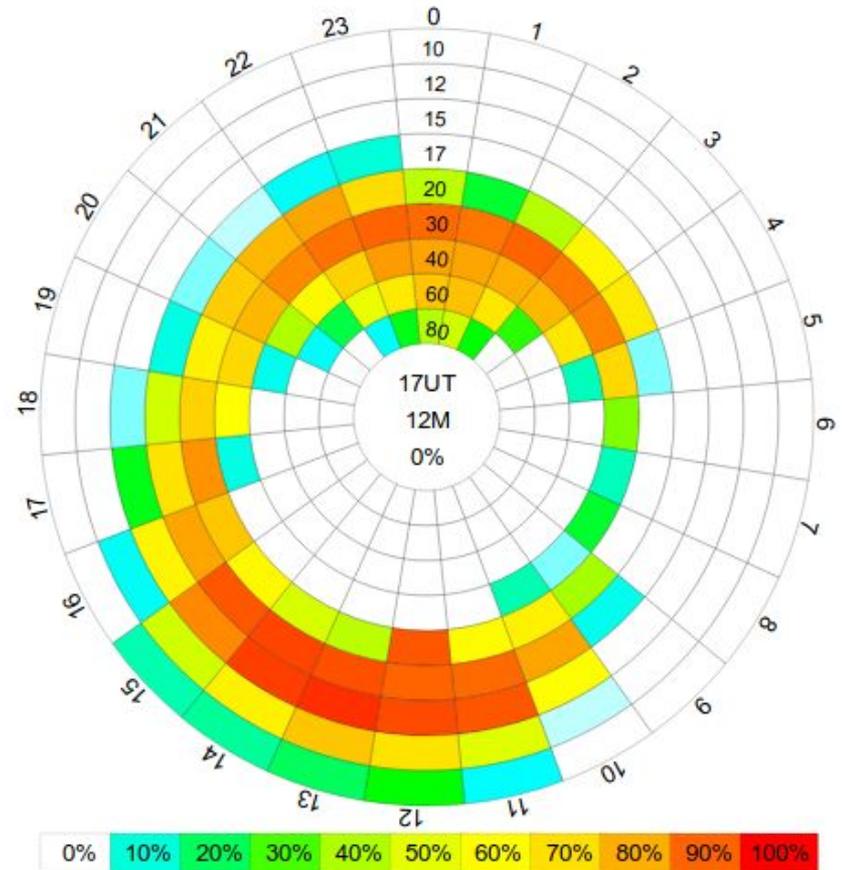
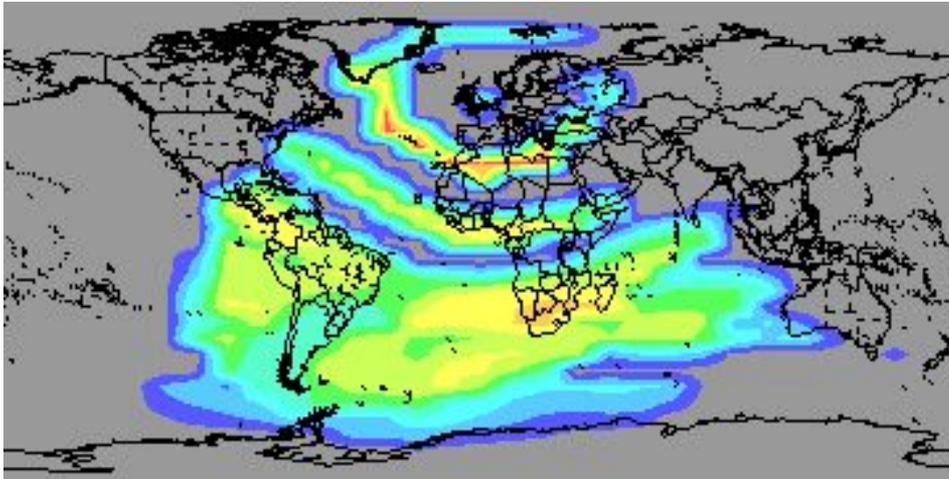
Un signal de 1 kW (+60 dBm/224V) fourni à une antenne de gain de +15 dB pointé vers la lune, avec une antenne de réception de gain de +35 dB pointé aussi vers la Lune alimentant un préamplificateur d'antenne faible bruit. La totalité des gains est de $(60 \text{ dBm} + 15 \text{ dB} + 35 \text{ dB}) = 110 \text{ dB}$. L'atténuation sur la bande 144 MHz est de 252 dB, soit $(110 \text{ dB} - 252 \text{ dB}) = -122 \text{ dBm}$ ($0,177 \mu\text{V}$) soit juste au dessus du seuil de sensibilité d'un récepteur haut de gamme.



<https://www.youtube.com/watch?v=VEHqcs8GZvM>

Prédiction de propagation

Il existe des logiciels de prévision de propagation qui se base sur les vents solaires comme VOACAP (Voice of America Coverage Analysis Program)



Propagation en temps réel

Les radioamateurs ont développés un protocole d'échange de stations entendues en AX25, les DX Cluster, ils permettent de recevoir les indicatifs, heure et fréquence. Ce système a depuis été migré en IP et WEB.

Il existe depuis quelques années des systèmes de suivi en temps réel pour les signaux numériques totalement automatique utilisé par des milliers de radioamateurs comme par exemple pskreporter.info.

Spotter	Freq.	DX	Time	Info	Country
IU6IBX-@	3683.0	IU8DSS	19:00 03 Oct	DIPLOMA CITTA' DI TORINO	Italy
S52GJ-@	1836.0	C31CT	19:00 03 Oct		Andorra
US3IW	3520.6	HG6O	19:00 03 Oct	CW	Hungary
EA2CW	10111.0	DJ70WAE	19:00 03 Oct		Fed. Rep. of Germany
NX5T	18135.5	ZD7FT	19:00 03 Oct	54 in TX	St. Helena
OK2ZI	1821.0	TO6OK	19:00 03 Oct	up 1	Mayotte
EA8ARI	14078.0	SO5WD	19:00 03 Oct	FT8CALL, Trx QSO	Poland
9A6IV	10136.0	RA7KW	19:00 03 Oct		European Russia
KA2NUE	14225.0	DK6PT	19:00 03 Oct	Op Peter 5/9 NYC	Fed. Rep. of Germany
S52GJ-@	1836.0	C31CT	19:00 03 Oct		Andorra
IK1HJQ	28074.0	PY3KN	19:00 03 Oct	JN33VT<->GF49KW	Brazil
N4GID	18140.0	9X0T	19:00 03 Oct	57 into SC, 5 up	Rwanda

