PM GAYRAL
F5XG 2016
©emily mills
Propagation
des ondes

Table des matières

1. L'ionosphère 3
2. L'onde de sol 4
3. La ligne de vue 4
   3.1. Hauteur de l'antenne 4
   3.2. Réflexion des ondes 5
4. L'onde d'espace 5
5. Les cycles de taches solaires 6
6. Diffusion par météorites (Meteor Scatter) 7
7. Aurores polaires 7
8. Sporadiques E 7
9. Conduits troposphériques 8
10. Previsions de la propagation 8
11. Plan des bandes Ondes Courtes décamétriques 9

Table des illustrations

Figure 1 Les couches supérieures de l'atmosphère 3
Figure 2 Détail de l'ionosphère jour/nuit 3
Figure 3 L'onde de sol 4
Figure 4 la propagation en ligne droite 4
Figure 5 Différentes réflexions des ondes 5
Figure 6 Propagation multi-bonds 5
Figure 7 Taches solaires 6
Figure 8 Ondes de sol 6
Figure 9 Meteor Scatter : Diffusion par météorites 7
Figure 10 Sporadiques Es 7
Figure 11 Conduction Troposphérique 8
Figure 12 Exemple de calcul 8
Figure 13 Plan des bandes OC radioamateur 9

 © F5XG 2016

La propagation des ondes

Les ondes radio se propagent comme la lumière c'est à dire en ligne droite.
Mais il y a des exceptions notamment pour les ondes courtes utilisées par exemple dans le monde radioamateur. Grosso modo cela va de 1,8MHz à ~50MHz, mais l'effet est encore apparent (quoique très atténué) jusque vers les UHF (~450MHz).

Il y a de nombreux aspects cruciaux dans la propagation des ondes, parmi les principales :

- L'onde de sol
- La ligne de vue (ou ligne directe)
- L'onde d'espace

1. L'ionosphère

L'ionosphère est la partie supérieure de l'atmosphère, qui va environ de 50 à 420 km d'altitude.

L'ionosphère est ionisée par les radiations solaires, qui cassent les atomes en enlevant un électron les transformant en ions positifs.

L'ionosphère a un rôle très important dans l'électricité atmosphérique.
Elle a une grande importance en pratique parce que, entre autres fonctions, elle influe sur la propagation des ondes radio dans les zones proches et éloignées de la terre.

La Figure 1 ci-contre détaille les hauteurs des couches supérieures de l'atmosphère

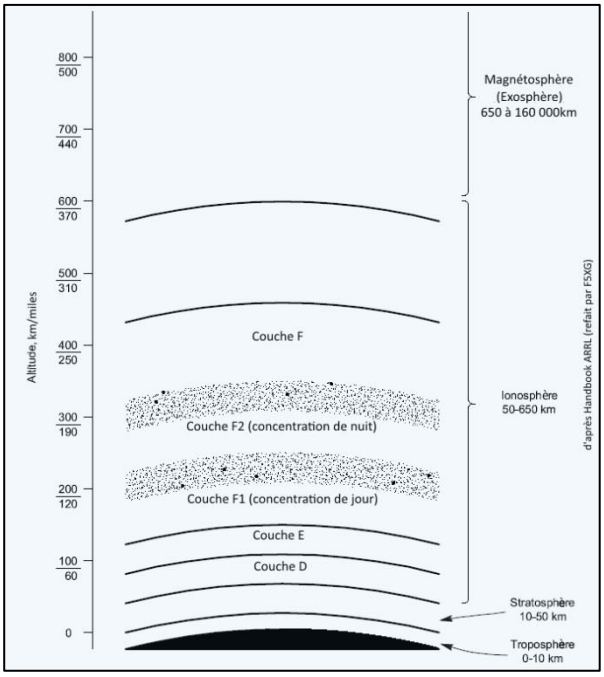

Figure 1 Les couches supérieures de l'atmosphère

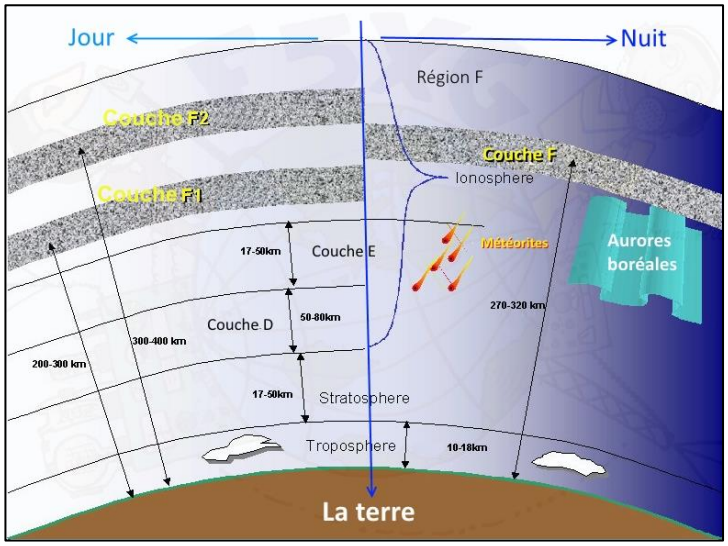

Figure 2 Détail de l'ionosphère jour/nuit

La couche F a une particularité :

- Le jour elle est composée d'une concentration de deux couches :
  - F1
  - F2
- La nuit il y a recombinaison de ces couches en une unique couche : la couche F

Voir la Figure 2

2. L'onde de sol

Les fréquences basses suivent la courbure de la terre par l'intermédiaire de la propagation dite en onde de sol.
En fait ce sont réellement les fréquences les plus basses qui sont efficaces en onde de sol : c.à.d. les ondes kilométriques (G.O.) et hectométriques (P.O.).
Les ondes «collent» à la surface du sol et donc épousent la courbure terrestre.
Les ondes de sol sont notre moyen de communiquer localement sur les fréquences HF (Figure 3).

Le sol n'étant pas un conducteur électrique parfait, les ondes de sol sont rapidement atténuées car elles suivent la surface de la terre.

L'atténuation est proportionnelle à la fréquence rendant de ce mode utile uniquement pour les fréquences basses et très basses des bandes amateurs (voir ci-dessous (HF)).

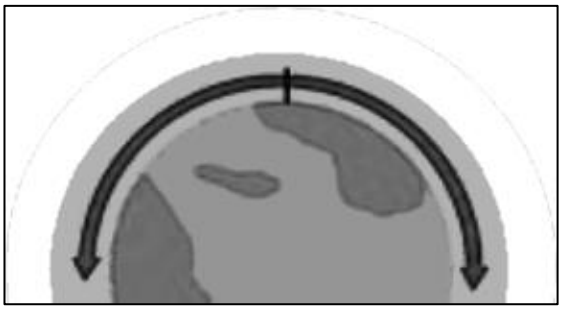

Figure 3 L'onde de sol

(HF) ces fréquences ont une couverture limitée par onde de sol.
Les longueurs d'onde HF les plus couramment utilisées sont 160 m, 80 m, 40 m, 30 m, 20 m, 17 m, 15 m, 12 m et 10 m.
(Voir PlandesbandesOC)

3. La ligne de vue

La ligne de vue est la propagation directe des ondes radio entre les antennes qui sont visibles l'une à l'autre. Ceci est probablement le plus habituel des modes de propagation radioélectrique dans les bandes VHF et les fréquences supérieures.

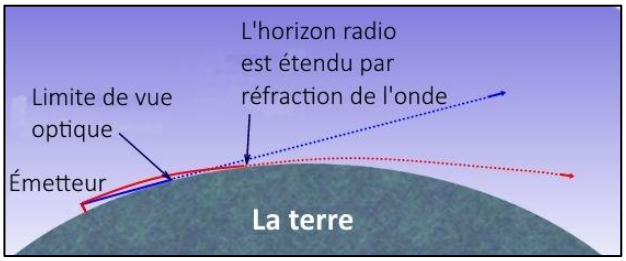

Figure 4 la propagation en ligne droite

La distance maximale pour les transmissions radio entre deux personnes se tenant debout sur la surface de la terre est d'environ 40 km, cela est dû à la courbure de la terre.
Ceci est appelé l'horizon radio (Il est un peu plus étendu que la vue directe car les ondes radio sont légèrement courbées, mais plus la fréquence augmente moins cette courbure est effective)

3.1. Hauteur de l'antenne

Pour étendre la portée des communications en VHF et des fréquences supérieures on augmente la hauteur de l'antenne.
Une antenne à 3 mètres de hauteur équivaut à doubler la puissance émise, ou bien à doubler la distance de transmission.

La distance en vue directe $D_{(km)}$ est déterminée par la formule :

$$D_{(km)} = \sqrt{h_{(km)} + (12742 + h_{(km)})}$$

Ceci est la raison pour laquelle on place un répéteur sur un point haut de façon à augmenter l'efficacité de couverture en VHF, UHF et sur les fréquences supérieures.

Il faudra porter une attention particulière aux pertes de transmission de la ligne d'alimentation entre l'émetteur et l'antenne, utiliser le meilleur câble coaxial possible ayant le moins d'affaiblissement linéique/m.

Les signaux radio VHF et UHF se propagent toujours en ligne directe, à ligne de vue.

3.2. Réflexion des ondes

Les signaux radio VHF et UHF ne peuvent pas traverser les objets non métalliques, le signal sera absorbé par les murs de bâtiments (les signaux UHF passent mieux car c'est une courte longueur d'onde

La réflexion par le plan de sol peut également avoir un effet réfléchissant lors de la propagation en ligne de vue.

Se déplacer quelques dizaines de centimètres peut améliorer la réception en raison de la propagation dite multi-trajets.

Les ondes radio peuvent être diffractées sur les arêtes vives d'un bâtiment ou tout autre objet solide, c'est l'effet de bord.

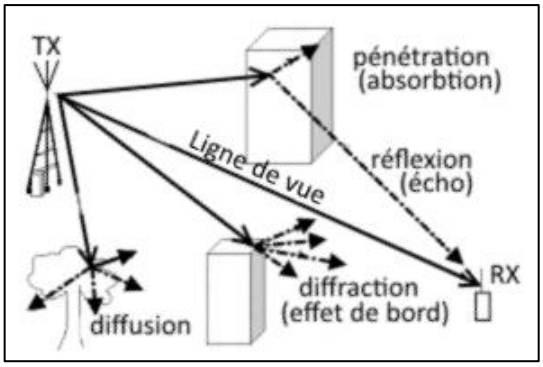

Figure 5 Différentes réflexions des ondes

Il ne doit exister aucun obstacle lors de la propagation ligne de vue entre un satellite et une antenne parabolique ou bien lors de la réception des signaux de télévision d'un émetteur de télévision local.

Les radiocommunications mobiles peuvent être périodiquement bonnes et mauvaises provoquant une variation de la réception décrite comme l'effet de piquets de clôture de parc, un peu comme voir en se déplaçant une lumière à travers un rideau à lames verticales.

4. L'onde d'espace

C'est l'un des modes qui dépend de la réfraction des ondes radio dans l'ionosphère, qui est constituée d'une ou plusieurs couches ionisées dans la haute atmosphère. (Voir Figure 2)

La couche F2 est la couche la plus importante pour les longues distances de jour, pour la propagation HF à multiples bonds.

Bien que les couches F1, E et D ont également des rôles importants.

C'est plus particulièrement de nuit que l'on peut faire des contacts par bonds multiples (la couche F est reformée), à longue distance (appelés DX).

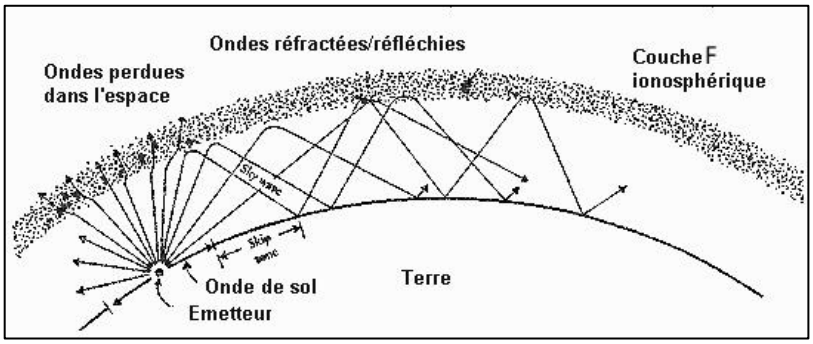

Figure 6 Propagation multi-bonds

Lorsque l'on entend et donc entrer en contact avec de nombreuses stations dans une bande elle est dite «ouverte».

Lorsque les conditions de la bande sont telles que l'on entend »rien » ou communiquez avec très peu ou pas de stations la bande est dit être «fermée».

La couche D, lors de sa présence pendant les périodes d'ensoleillement, provoque de perte de signal importante.

Elle absorbe les signaux HF rendant les communications diurnes très difficile en bloquant les fréquences supérieures (14MHz à 50MHz) en les empêchant d'atteindre la couche F2 pour rebondir.

5. Les cycles de taches solaires

Les variations de l'activité solaire se traduisent par des fluctuations de la propagation des ondes radio.
Le nombre de Wolf ou Sunspot Number quantifie l'activité du soleil en fonction du nombre de taches solaires (sursauts solaires, rayonnement corpusculaire, rayonnement électromagnétique).

Pendant les maximums d'activité solaire, ou lors des pics de taches solaires, l'ensemble des bandes HF jusqu'à 30 MHz peut être utilisé généralement 24h/24.

Au cours des minimums d'activité solaire, ou minimum de taches solaires, la propagation sur les fréquences supérieures à 15 MHz est généralement impossible la nuit à longue distance.
On se replie sur les bandes basses : 3,5MHz et 7MHz.

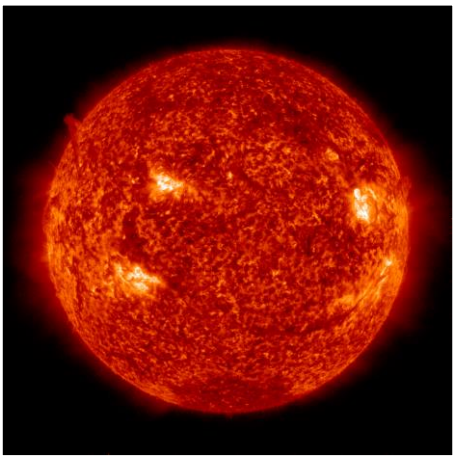

Figure 7 Taches solaires

Les ondes de sol se propagent par courbure des ondes radio.
La propagation par onde de sol fonctionne par ondes de réflexion (réfraction) radio (du rayonnement électromagnétique) à travers l'ionosphère.
Pendant les «pics» du cycle solaire, l'ionosphère devient de plus en plus ionisée par les photons solaires et les rayons cosmiques.
Cela influe sur le chemin (propagation) de l'onde radio de façon complexe qui peut à la fois faciliter ou annihiler les communications locales et interurbaines. (voir Ondes de sol)

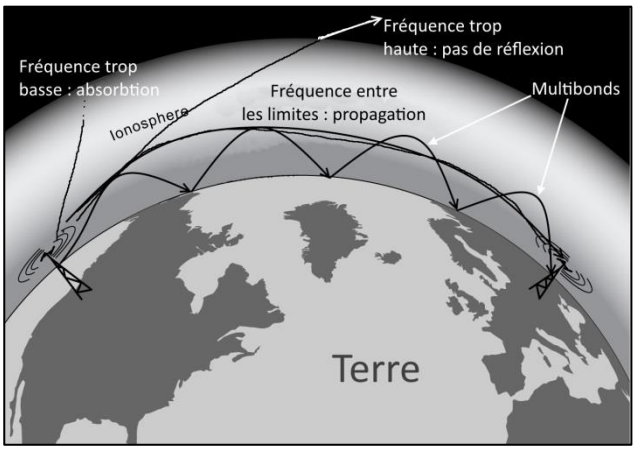

Figure 8 Ondes de sol

La prédiction de propagation par onde de sol est d'un intérêt considérable pour les radioamateurs.
les radioamateurs utilisent le spectre «HF» qui sont les plus stimulés par ces variations solaires et ionosphériques.
Les variations de l'activité solaire affectent la fréquence maximale utilisable (M.U.F. (*Maximum Usable Frequency*)) : la fréquence limite la plus élevée utilisable pour les radiocommunications en ondes courtes.

 © F5XG 2016

6. Diffusion par météorites (Meteor Scatter)

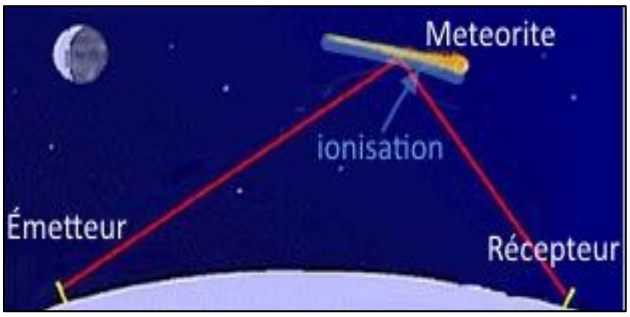

Figure 9 Meteor Scatter : Diffusion par météorites

Cette propagation se fait par réflexion des ondes radio sur les colonnes intensément ionisées de l'air produites par les météores.
Ce mode est de très courte durée, souvent seulement d'une fraction de seconde à quelques secondes par événement.
La propagation par diffusion par météorites permet de communiquer entre stations très éloignées (1.600 km), sans nécessiter une installation de type liaison satellite.
Ce mode est le plus généralement utilisé en VHF et sur 6 mètres (50MHz).

7. Aurores polaires

Les aurores polaires (boréales ou australes) sont provoquées par l'interaction entre les particules chargées du vent solaire et la haute atmosphère.
Les aurores se produisent principalement dans les régions proches des pôles magnétiques, dans une zone annulaire justement appelée « zone aurorale » (entre 65 et 75° de latitude), à une altitude d'environ 100km.

8. Sporadiques E

La propagation sporadique E peut être observée sur les bandes HF et VHF.
Il ne faut pas la confondre avec la propagation HF classique sur la couche E.
La propagation sporadique E se produit à des latitudes moyennes et survient surtout pendant la saison estivale, de mai à août dans l'hémisphère nord et de novembre à février dans l'hémisphère sud.

Il n'y a pas de cause unique pour ce mode de propagation mystérieuse. La réflexion a lieu dans une mince zone d'ionisation à environ de 90 à 150km d'altitude.

Les bandes d'ionisation dérivent vers l'ouest à une vitesse de quelques centaines de km par heure. Il y a une périodicité faible notée au cours de la saison.

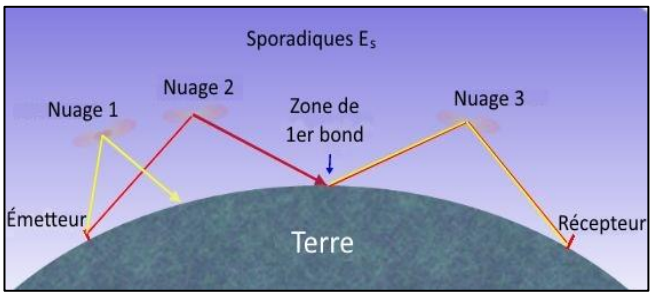

Figure 10 Sporadiques Es

Généralement les sporadiques E apparaissent sur une période de 1 à 3 jours successifs et restent absentes pendant quelques jours pour se reproduire à nouveau.
Ces épisodes débutent généralement à l'aube, et il y a un pic dans l'après-midi et un second pic en soirée. Ils cessent en milieu de nuit.

 © F5XG 2016

9. Conduits troposphériques

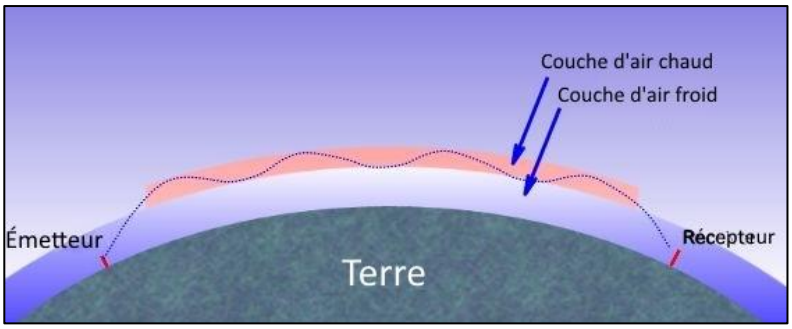

Figure 11 Conduction Troposphérique

Des changements soudains de la teneur en humidité et de la température des profils verticaux de l'atmosphère peuvent aléatoirement affecter la propagation des signaux hyperfréquences, UHF et VHF sur des centaines de kilomètres et jusqu'à environ 2000 km au-delà de l'horizon radio- normal, on appelle cela les conduits troposphériques.

Un exemple typique en fin d'été, des modifications de la troposphère le matin amènent des signaux provenant de distances allant jusqu'à quelques centaines de kilomètres pendant quelques heures, jusqu'à ce que ce phénomène s'éteigne complètement du fait du réchauffement solaire.

10. Previsions de la propagation

La prévision du mode d'onde réfléchie revêt un considérable intérêt pour les radioamateurs, les marins les communications commerciales aéronautiques, ainsi que pour les radiodiffusions internationales sur ondes courtes.
La propagation en temps réel peut être estimée par l'écoute de balises émettrices spécifiques installées « aux quatre coins du monde ».
Il existe également des programmes de calcul de prévision de propagation. Voir ci-contre

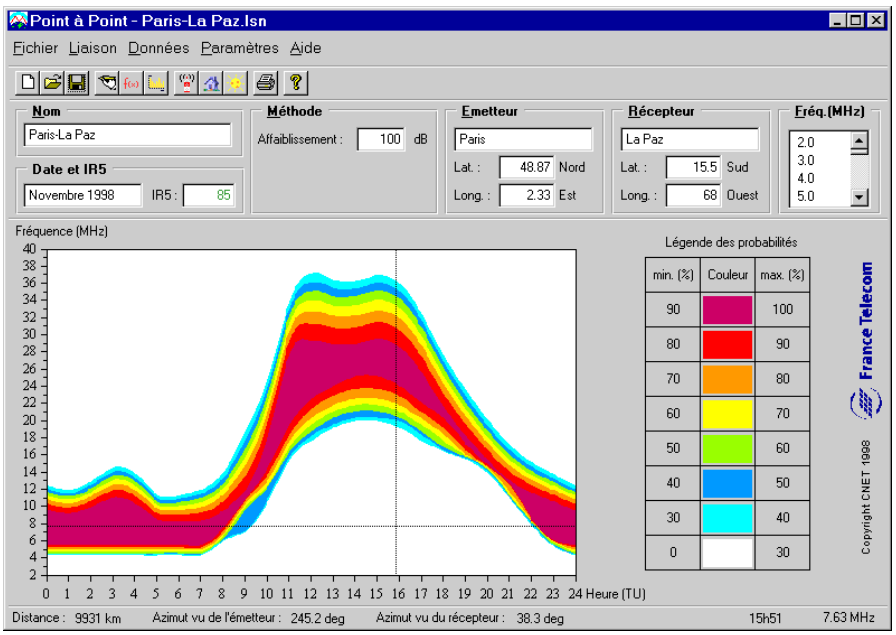

Figure 12 Exemple de calcul

i

11. Plan des bandes Ondes Courtes décamétriques

Ondes Courtes Radioamateur			
BANDE		Limites	
MHz	m (dite)	MHz	
1.8	160	1,810 - 2,000	"décamétrique"
3,5	80	3,500 - 3,800	
7	40	7,000 - 7,200	
10	30	10,100 - 10,150	
14	20	14,000 - 14,350	
18	17	18,068 - 18,168	
21	15	21,000 - 21,450	
24	12	24,890 - 24,990	
28	10	28,000 - 29,700	
50	6	50,000 - 52,000	"métrique"

+ de détails sur :
http://www.r-e-f.org/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=260

Figure 13 Plan des bandes OC radioamateur

Souvent on dit par ex. la bande 40 mètres, pour un contact ou pour nommer un équipement fonctionnant dans la gamme 7,000 à 7,200MHz.

En fait c'est un peu inexact car : $\boxed{\lambda = \frac{300}{F_{MHz}} = \frac{300}{7} = 42{,}86m}$

[i] Références
Wikipedia - https://fr.wikipedia.org/wiki/Propagation_des_ondes_radio
ARRL Handbook - http://www.arrl.org/arrl-handbook-2015
Sierra Foothills Amateur Radio Club 2014 Tech Class - http://www.hsdivers.com/Ham/Mod8.html
Notes de l'auteur