

Manuel internet des radioamateurs (extraits)

(site de F5ZV <http://f5zv.pagesperso-orange.fr/RADIO/RM/RM.html>)

L'ionosphère

Définition

L'ionosphère est une région de l'atmosphère située entre la mésosphère et la magnétosphère, c'est à dire entre 60 et 800 km d'altitude. Elle est constituée de gaz fortement ionisés à très faible pression (entre $2 \cdot 10^{-2}$ mbar et $1 \cdot 10^{-8}$ mbar) et à haute température (-20 à +1000°C).

Principe

La pression de l'air qui constitue l'atmosphère diminue à mesure que l'on s'éloigne de la surface du sol. Au-delà de 60 km d'altitude, l'atmosphère n'agit plus guère comme filtre du rayonnement solaire et cosmique, les rayons UV et X sont de plus en plus agressifs et provoquent une ionisation des molécules de l'air en arrachant des électrons aux atomes les constituant. Dans la partie basse de l'ionosphère la densité est encore élevée, un électron peut retrouver rapidement un ion positif : la « recombinaison » est rapide. Dans les couches les plus hautes, la recombinaison est plus lente et l'ionisation ne disparaît que lentement après que le rayonnement solaire se soit interrompu avec le coucher du Soleil.

Étude de l'ionosphère

Le sondeur vertical est une sorte de radar dont la fréquence est variable entre 1 et 30 MHz. L'émetteur envoie des impulsions très brèves qui sont réfléchies à une altitude dépendant de la fréquence et de la densité électronique dans l'ionosphère. La mesure du temps séparant l'impulsion émise et la réception de l'écho permet de calculer l'altitude à laquelle s'est effectuée la réflexion. Le tracé de cette altitude en fonction de la fréquence est un ionogramme. Sur la figure ci-contre on peut voir que pour la fréquence de 5 MHz, la couche F2 renvoie l'onde émise verticalement à une hauteur virtuelle de 290 et de 330 km environ. Depuis 1960, les satellites artificiels et sondes spatiales ont permis une meilleure compréhension des phénomènes ionosphériques.

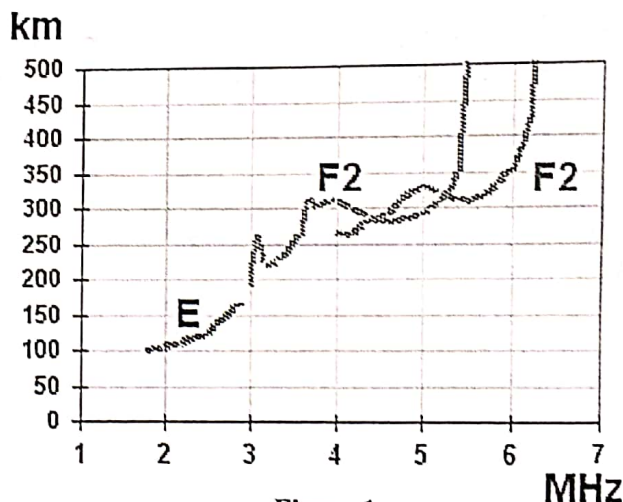


Figure 1

Les couches

On distingue généralement 3 couches aux propriétés particulières vis-à-vis de la propagation des ondes.

Couche D : altitude de 60 à 90 km, pression 2 Pa, température -76°C densité électronique 10^{10} m^{-3} . Absorbante pour les ondes de fréquence inférieure à quelques MHz, elle disparaît immédiatement après le coucher du Soleil.

Couche E : altitude de 90 à 120 km, pression 0,01 Pa, température -50°C densité électronique 10^{11} m^{-3} . Constituée d'oxygène et monoxyde d'azote moléculaires ionisés et d'ions météoritiques. Diurne et présente tout au long du cycle solaire. Elle réfléchit les ondes de quelques MHz jusqu'à une fréquence limite qui dépend de l'angle d'incidence de l'onde sur la couche et de la densité de celle-ci.

Couche F : altitude de 120 à 800 km, pression 10^{-4} Pa, température 1000°C densité électronique maximale 10^{12} m^{-3} . Très dépendante de l'activité solaire, elle est particulièrement présente pendant les maxima du cycle solaire. Son altitude fluctue en fonction du rayonnement solaire et se décompose pendant la journée en deux sous-couches F1 et F2. Elle s'atténue disparaît la nuit plusieurs heures après le coucher du Soleil mais il arrive qu'elle persiste toute la nuit lors des maxima d'activité solaire. Comme pour la couche E, son rôle est essentiel pour la propagation des ondes courtes.

Évolution des différentes couches en fonction de l'heure

L'ionisation variant énormément en fonction du cycle solaire, de la saison, de l'heure du jour... les couches qui nous intéressent évoluent dans les mêmes proportions. Le diagramme ci-contre, très grossier, pourrait correspondre à une journée d'été sous une latitude moyenne de l'hémisphère nord, en période de maximum du cycle solaire. On peut y voir le dédoublement de la couche F en F1 et F2 en même temps que l'apparition de la couche E et de la couche D pendant la journée.

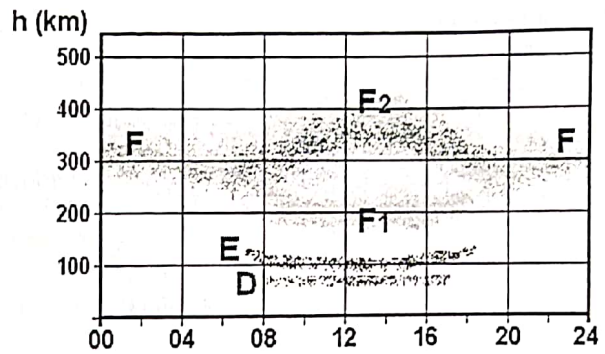


Figure 2

Profil d'ionisation

La densité électronique N varie non seulement en fonction de l'altitude mais aussi en fonction de l'époque et de l'heure. Sur le diagramme ci-contre sont représentées en fonction de l'altitude :

- courbe de gauche, la variation de N la nuit
- courbe de droite, la variation de N le jour.

Ces valeurs sont un exemple-type correspondant à une latitude moyenne. Elles peuvent être assez différentes en fonction de l'activité solaire. À droite des courbes sont indiquées la position approximative des différentes régions D, E et F. Le profil d'ionisation permet de déterminer la fréquence critique ainsi que la hauteur virtuelle à laquelle s'effectuent les réflexions des ondes.

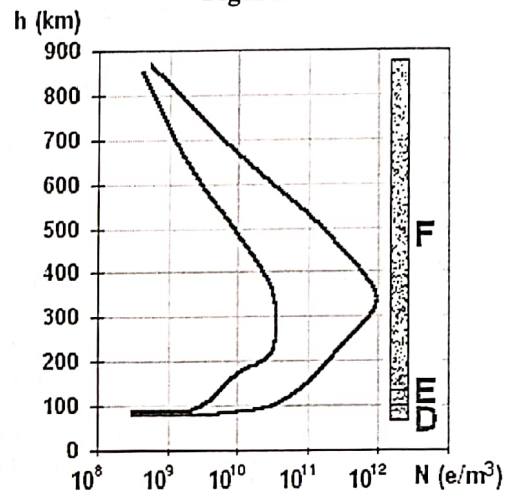


Figure 3

Sondage ionosphérique et hauteur virtuelle

Le sondage ionosphérique vertical

En émettant des impulsions très brèves (100 μ s, par ex.) dans une antenne rayonnant verticalement et en mesurant la durée Δt séparant l'instant d'émission et celui de la réception de l'écho, on peut mesurer l'altitude à laquelle se trouve la couche réfléchissante. Le dispositif permettant ce genre de mesure est une sorte de radar appelé *sondeur ionosphérique* ou *ionosonde*. Une série de mesures est effectuée régulièrement, tous les quarts d'heure par exemple, et consiste à mesurer à un moment donné l'altitude de réflexion en fonction de la fréquence, entre 1 et 15 MHz. Les courbes obtenues, appelées *ionogrammes*, permettent aussi d'étudier la densité électronique dans différentes régions de l'ionosphère en fonction de la fréquence, de l'activité solaire, de l'heure du jour, de l'époque de l'année... Ces mesures, effectuées à partir de nombreuses stations réparties sur le globe, sont très précieuses pour établir des prévisions de propagation des ondes courtes.

Altitude de réflexion

Ci-contre est représenté le trajet d'une onde émise par l'émetteur E pour parvenir au récepteur R. E et R sont très proches l'un de l'autre pour un sondage vertical. On voit que, plutôt qu'une réflexion pure s'effectuant à l'altitude h , il s'agit d'une suite de réfractons qui courbent progressivement le rayon et le renvoient vers le bas. Ce que l'on appellera réflexion s'effectue à l'altitude réelle h mais on mesurera l'altitude virtuelle h' telle que $h' = c\Delta t/2$ où c est la célérité de la lumière et Δt la durée séparant l'émission de l'impulsion de la réception de son écho. La différence de trajet parcouru entre h et h' est due à la vitesse de propagation légèrement plus faible des ondes dans ce milieu que dans le vide. La connaissance de la hauteur virtuelle est importante pour les calculs de prévisions de propagation, en particulier de la distance maximum effectuée par bond.

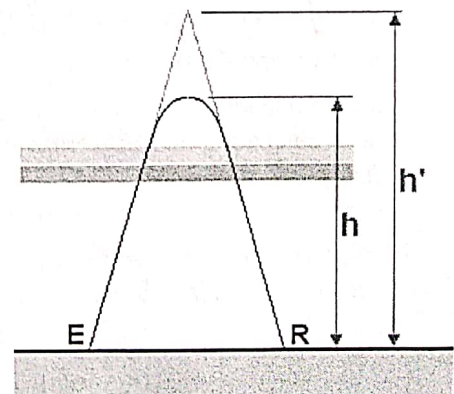
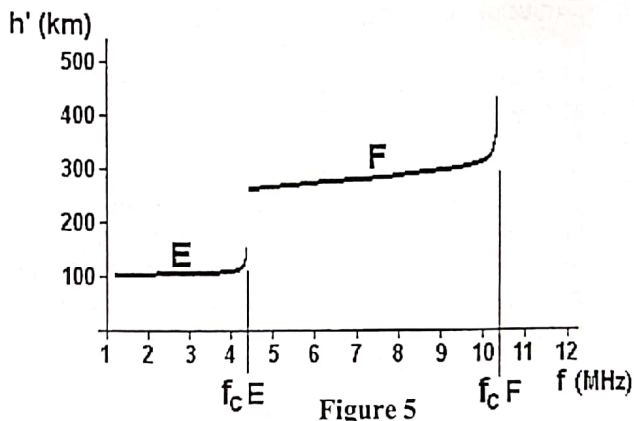


Figure 4

Hauteur virtuelle en fonction de la fréquence

La mesure de la hauteur virtuelle du point de réflexion à l'aide du sondeur vertical permet de mettre en évidence la couche E et la couche F. La figure ci-contre schématise grossièrement un ionogramme où apparaissent :

- la couche E, réfléchissante jusqu'à environ 4 MHz et se situant à une altitude variant de 100 à 120 km.
- la couche F, qui était masquée par la couche E en dessous de 4 MHz et qui réfléchit le signal du sondeur jusqu'à une fréquence limite d'environ 10 MHz.



Variation de la hauteur virtuelle h' en fonction de l'heure du jour

Les couches ionisées où s'effectue la réflexion de l'onde évoluent beaucoup en fonction de l'heure de la journée : plus dense en milieu de journée, disparaissant (couche D, E et F1) ou s'atténuant (couche F2) pendant la nuit. Comme la hauteur réelle à laquelle s'effectue la réflexion dépend de la densité électronique dans la couche (et de la fréquence), la hauteur virtuelle pour une fréquence donnée va changer au cours du temps.

Conditions de la réflexion ionosphérique d'une onde

On parle communément de réflexion des ondes sur les couches ionisées de l'ionosphère mais il s'agit en réalité de multiples réfractations successives. L'affirmation « Une onde électromagnétique se propage en ligne droite, comme un rayon lumineux » n'est vraie que dans un milieu homogène et isotrope, c'est à dire dans lequel la vitesse de propagation de cette onde est la même en tout point et quelle que soit la direction. La vitesse de propagation dépend de l'indice de réfraction correspondant à la fréquence de l'onde.

Indice de réfraction

La formule qui permet de calculer l'indice de réfraction n du milieu

ionisé est : $n = \sqrt{1 - \frac{81 N}{f^2 10^{12}}}$ avec N la densité électronique (m^{-3})

et f la fréquence en MHz.

Exemple : Variation de l'indice de réfraction pour la fréquence de 9MHz en fonction de l'altitude. On voit que la réflexion s'effectue à l'altitude de 320 km, lorsque l'indice de réfraction s'annule.

altitude (km)	N (m^{-3})	n
100	$3 \cdot 10^{10}$	0,99
120	$6 \cdot 10^{10}$	0,96
160	$1 \cdot 10^{11}$	0,94
200	$3 \cdot 10^{11}$	0,83
250	$6 \cdot 10^{11}$	0,63
300	$9 \cdot 10^{11}$	0,31
320	$1 \cdot 10^{12}$	0

Tableau 1

Réflexion d'une onde dans une couche ionisée

Comme l'indice de réfraction varie en continu, l'onde est déviée progressivement par réfraction. On peut imaginer une tranche d'ionosphère comportant un nombre de niveaux limités et d'indices de réfraction variant de n_6 à n_0 . En passant du milieu 7 au milieu 6 avec un angle d'incidence i_{67} le rayon est dévié d'un angle θ_{67} . Le même phénomène se produit en passant du milieu 6 au milieu 5 et ainsi de suite. L'indice de réfraction diminue au fur et à mesure que l'ionisation augmente.

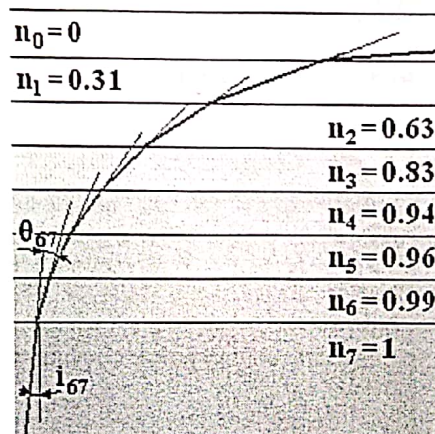


Figure 6

La fréquence critique

Définition

La fréquence critique est la fréquence limite au-dessus de laquelle aucune réflexion n'a plus lieu, l'onde traversant simplement la couche. Il s'agit toujours d'une onde abordant perpendiculairement la couche considérée, à d'autres incidences la fréquence limite est plus élevée et on parle alors de FMU (Fréquence Maximale Utilisable, MUF en anglais). La couche E a une fréquence critique qui est de l'ordre de 3 ou 4 MHz, celle de la couche F peut dépasser 10 MHz quand l'ionisation est intense, en période de maxima du cycle solaire.

Tableau 1

Calcul de la fréquence critique

À une densité électronique N donnée correspond une fréquence de plasma qui se calcule à l'aide de la formule simplifiée $f = 9\sqrt{N}$ avec N : densité électronique en m^{-3}
 f : fréquence en Hz. Pour cette fréquence et cette ionisation, l'indice de réfraction n s'annule. Lorsqu'une onde de cette fréquence parvient dans ce milieu, sa vitesse de groupe s'annule et elle est alors entièrement réfléchi. Le tableau ci-contre montre un exemple la variation de f en fonction de l'altitude, sous une latitude moyenne, de jour. On voit qu'une onde de fréquence 7,5 MHz sera réfléchi à une altitude inférieure à 300 km et que la fréquence maximum pouvant être réfléchi est égale à 9 MHz.

altitude (km)	N (m^{-3})	f (MHz)
100	$5 \cdot 10^{10}$	2,0
200	$3 \cdot 10^{11}$	4,9
300	$1 \cdot 10^{12}$	9,0
400	$7 \cdot 10^{11}$	7,5
500	$1 \cdot 10^{11}$	2,8
600	$5 \cdot 10^{10}$	2,0

Tableau 2

La fréquence critique f_c est la fréquence maximum qui peut être réfléchi par une couche ionisée compte tenu de sa densité électronique.

Variation de la fréquence critique en fonction de l'heure du jour

La connaissance de la fréquence critique est nécessaire pour établir les prévisions de propagation par bandes en fonction du temps. Les deux courbes ci-dessous correspondent à des latitudes moyennes en période d'activité solaire favorable. On voit que la propagation via la couche E est limitée à la journée et pour des fréquences assez basses.

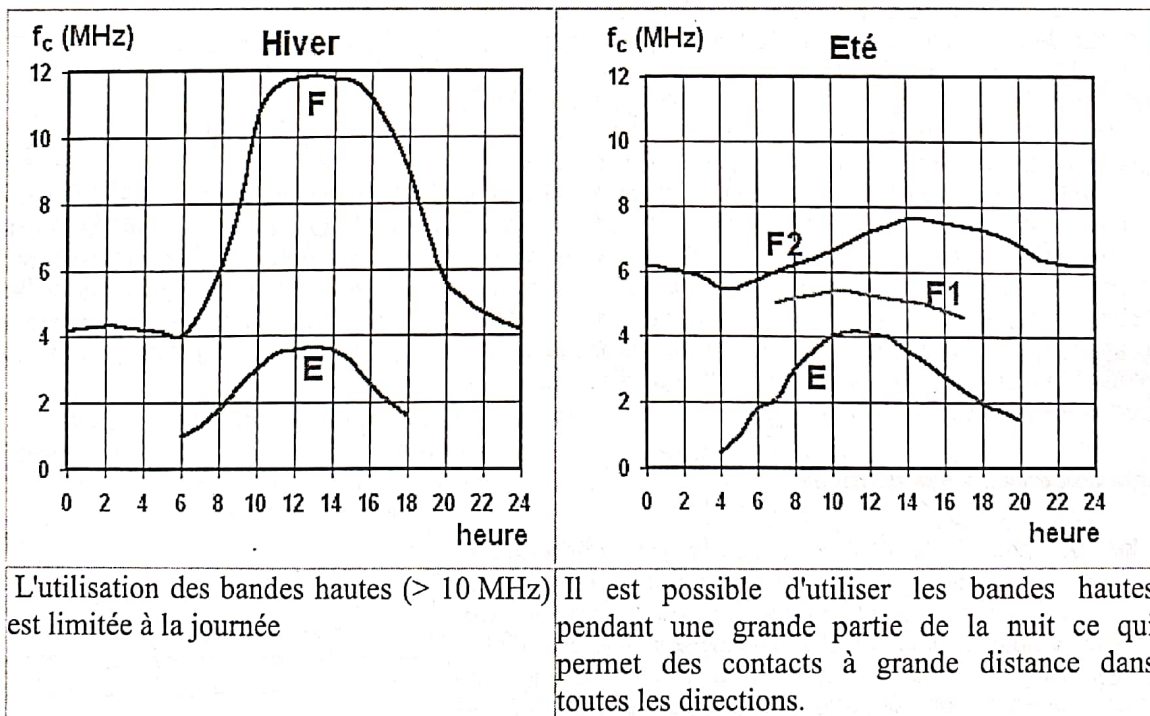


Figure 7

Figure 8

Réflexion simple d'une onde dans l'ionosphère

Les couches E et F peuvent être considérées comme des miroirs pour les ondes courtes dont la fréquence est inférieure à la FMU et permettent d'atteindre indirectement des zones qui seraient totalement masquées par le relief ou simplement par la courbure terrestre ; les ondes radio, comme la lumière, ne se propagent qu'en ligne droite.

Angle critique

Une onde de fréquence supérieure à la fréquence critique peut être réfléchiée par une couche ionisée si l'angle d'attaque θ est inférieur à une certaine valeur appelée *angle critique*. Ce phénomène s'apparente à la réflexion d'un rayon lumineux à la surface d'un plan d'eau claire : en regardant perpendiculairement à la surface de l'eau on peut voir ce qui se passe sous la surface. Si le regard se porte sur un endroit plus éloigné, vers le milieu du plan d'eau alors que l'on se trouve sur une berge, on ne verra que le reflet de la rive opposée. Sur la figure ci-contre sont représentés 4 cas :

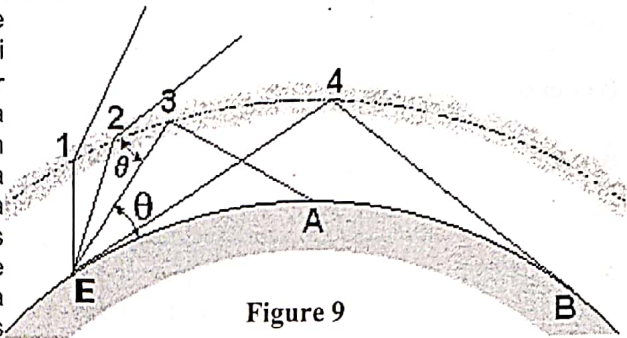


Figure 9

1 - l'angle d'attaque est grand (angle d'incidence i faible) : l'onde traverse la couche sans être notablement déviée.

2 - angle d'attaque $>$ angle critique : le rayon est fortement dévié.

3 - angle d'attaque = angle critique, l'onde est réfléchiée et atteint le point A.

4 - angle d'attaque minimum, au ras de l'horizon : l'onde est reçue au point le plus éloigné qu'il soit possible d'atteindre

La zone couverte par l'onde est comprise entre A et B. À la surface de la Terre elle a une forme de couronne de centre E

Distance de saut et zone de silence

La distance entre l'émetteur E et A, l'endroit où le signal est de nouveau audible, est la *distance de saut* ("skip distance" en anglais). Elle dépend de la fréquence et de la couche utilisée. En pratique on observe des distances de saut allant de 100 à 200 km pour la bande 40 m (7 MHz) jusqu'à 1500 à 2000 km pour la bande 10 m (28 MHz). Ainsi on a une zone (plus ou moins) circulaire centrée sur la position de l'émetteur où aucun signal n'est audible, en dehors de l'onde de sol (zone ES sur la figure). Cette dernière couvre une région circulaire autour de l'émetteur, de rayon ES. Entre S et A se trouve une région en forme de couronne, la *zone de silence*, où le récepteur est trop loin de l'émetteur pour recevoir l'onde de sol et trop proche pour recevoir l'onde d'espace réfléchiée par l'ionosphère. La distance de saut peut varier énormément au cours de la même journée et s'annuler totalement si l'angle critique augmente jusqu'à atteindre 90 degrés en cas de forte ionisation. La zone de silence elle-même n'est pas toujours celle d'un silence absolu mais simplement d'une très forte atténuation. Ce qui permet de contacter malgré tout à un Parisien de contacter tous les départements français sur la bande 10 m.

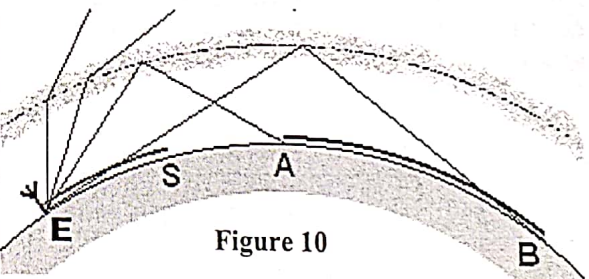


Figure 10

Entre S et A se trouve une région en forme de couronne, la *zone de silence*, où le récepteur est trop loin de l'émetteur pour recevoir l'onde de sol et trop proche pour recevoir l'onde d'espace réfléchiée par l'ionosphère. La distance de saut peut varier énormément au cours de la même journée et s'annuler totalement si l'angle critique augmente jusqu'à atteindre 90 degrés en cas de forte ionisation. La zone de silence elle-même n'est pas toujours celle d'un silence absolu mais simplement d'une très forte atténuation. Ce qui permet de contacter malgré tout à un Parisien de contacter tous les départements français sur la bande 10 m.

Angle de départ, angle d'arrivée

Si les couches E et F étaient des miroirs parfaitement "horizontaux", si l'on peut dire, l'angle de départ de l'onde incidente serait égal à l'angle d'arrivée de l'onde réfléchiée. Ce n'est pas toujours le cas, les régions ionisées étant loin d'être homogènes. Il en résulte des réflexions qui peuvent être dissymétriques, l'onde réfléchiée pouvant être déviée vers la droite ou la gauche, l'avant ou l'arrière. Ce phénomène peut participer à la formation de *fading*.

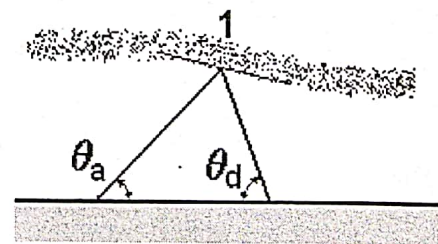


Figure 11

Distance parcourue en un seul bond

Selon que la réflexion s'effectue sur la couche E à 100 km d'altitude ou sur la couche F à 300 km d'altitude, la distance parcourue en un seul bond variera du simple au triple. La distance parcourue dépend aussi fortement de l'angle de départ. En tirant au ras de l'horizon sur la couche F, la distance parcourue pourra être de l'ordre de 4000 km alors qu'elle ne sera que de 600 km avec un angle de départ de 45°. Tous les amateurs de trafic DX savent l'intérêt qu'il y a d'utiliser des antennes à angle de départ le plus faible possible. Le tableau ci-contre donne les distances parcourues par un seul bond sur la couche E et la couche F en fonction de l'angle de départ, en tenant compte de la courbure terrestre.

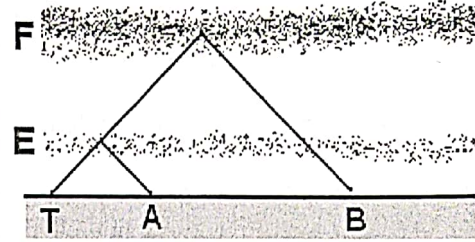


Figure 12

angle de départ	couche E	couche F
0	2200	4000
5	1400	3000
10	1000	2300
20	500	1500
40	250	700
60	120	350
70	75	220
80	35	100

Tableau 3

Pour atteindre les antipodes, un seul bond n'est pas possible. Plusieurs bonds sont nécessaires pour couvrir de grandes distances (DX), soit sur la couche F soit sur la couche E, soit sur les deux.

L'onde de sol

Retour en arrière

Jusque dans les années 1920, la transmission de la TSF s'effectuait sur des fréquences très basses, quelques dizaines à quelques centaines de kilohertz (ondes kilométriques ou myriamétriques). Les physiciens qui étudiaient la propagation des ondes savaient déjà que la portée d'un émetteur était d'autant plus grande que la longueur d'onde était grande. En réalité ils ne s'intéressaient qu'à la propagation par l'onde de sol, délaissant la propagation par l'onde d'espace se réfléchissant sur les couches ionisées.

En écoutant les bandes basses

Sur les fréquences inférieures à 1 MHz (Grandes Ondes, Petites Ondes) on constate que le niveau du signal diminue régulièrement au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'émetteur E. Cette diminution progressive dépend de la conductibilité du sol : l'eau de mer, qui est un assez bon conducteur de courant électrique, favorise la propagation de cette onde qui suit la courbure terrestre : l'onde de sol. Sans l'onde de sol, la station E ne pourrait être entendue au point A, situé au-delà de l'horizon optique, donc hors de vue pour E par le rayon direct (en bleu). Le point B, situé au-delà du seuil d'audibilité de l'onde de sol, ne pourra être couvert qu'au travers d'une onde réfléchie sur l'ionosphère.

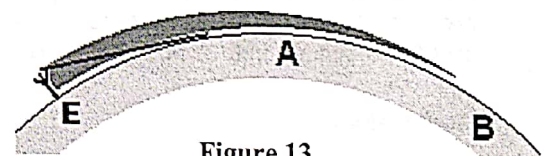


Figure 13

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. La figure ci-contre donne la distance en fonction de la fréquence et le niveau du signal. Partant d'un signal reçu S9 + 40 dB à 1 km de l'émetteur on peut voir que le niveau S9 sera obtenu à 100 km pour une fréquence de 137 kHz et à 10 km pour une fréquence de 7 MHz (bande 40 m). Le

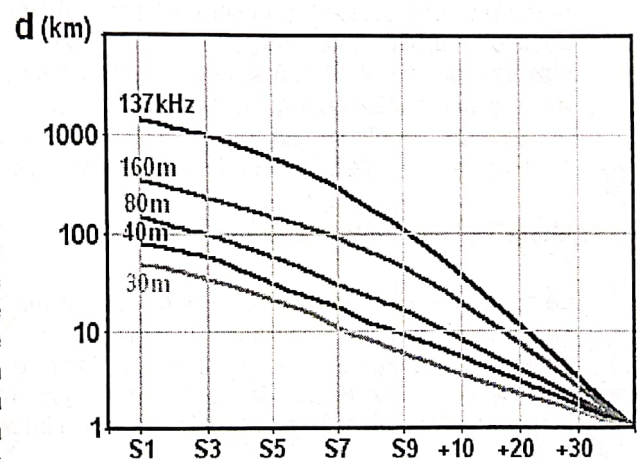


Figure 14

sol est de conductibilité moyenne. Sur mer la portée est nettement plus grande, surtout pour les fréquences élevées. Sur 10 MHz (bande 30 m) la portée qui était de 10 km sur sol moyen passe à 100 km sur mer. Au-dessus de 1 MHz, il arrive que l'onde de sol interfère avec l'onde réfléchiée par l'ionosphère. Cette coïncidence est une des causes de *fading*.

Propagation des ondes au niveau du sol

Selon leur fréquence, la propagation des ondes dans la troposphère est très différente :

- En VLF (Very Low Frequency) et LF, en dessous de quelques centaines de kHz, c'est l'onde de sol qui est prépondérante.
- En HF (de 1 à 30 MHz) la propagation troposphérique est limitée à des distances très faibles.
- Au-dessus de 30MHz c'est l'onde directe soumise à tous les phénomènes de réflexion, réfraction... qui est la plus utilisée.

Les modes de propagation ionosphérique

Atteindre les antipodes en un seul bond n'est pas possible. Pour couvrir de grandes distances, plusieurs bonds sont nécessaires, soit sur la couche F soit sur la couche E, soit sur les deux. On dit alors que pour couvrir le *circuit* Paris-Montréal (5474km) on utilisera vraisemblablement le *mode* 2F.

Modes simples

Pour des distances ne dépassant pas 1000 ou 2000 km, il y a de fortes chances pour que la liaison puisse s'effectuer à l'aide d'un seul rebond sur la couche E ou la couche F. On utilisera un mode 1E ou 1F. Parfois les deux modes sont actifs simultanément, ce qui peut provoquer un renforcement du signal ou un affaiblissement selon le moment.

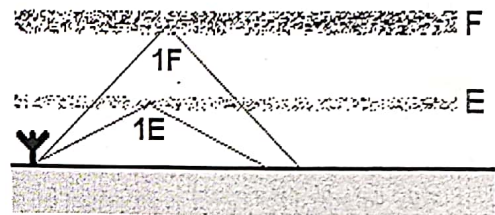


Figure 15

Modes multiples

Si le circuit comporte 2 ou plusieurs rebonds sur la même couche E ou F, on parle de mode multiple : 2E ou 2F, 3F, 4F... On considère qu'il faut un mode 7F pour atteindre les antipodes mais il existe d'autres possibilités. Dans le cas du mode 2F sur la figure ci-contre, le rebond au sol au point 2 peut introduire des pertes plus ou moins importantes selon qu'il se produit sur une étendue glacée ou sur la mer.

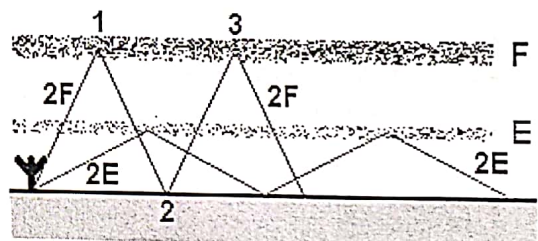


Figure 16

Modes mixtes

Lorsque la propagation du signal fait appel à la couche E d'abord puis à la couche F (ou le contraire) on parle de mode mixte (mode E+F constitué d'un bond avec réflexion sur la couche E puis d'un bond utilisant la couche F ; mode F-E+F qui utilise la couche E sur sa face extérieure -d'où le signe "-" devant le "E"). L'espace entre E et F constitue une sorte de guide d'onde. Ce mode a une particularité qui le rend très performant par rapport au mode 2F : l'onde ne subit que 2 fois l'absorption à la traversée de la couche D et de la couche E : à la montée et à la descente.

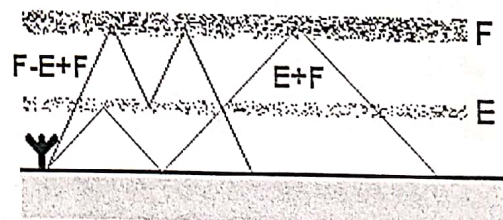


Figure 17

Mode 7F pour atteindre les antipodes

La figure montre à l'échelle la Terre (rayon moyen 6378km) entourée de sa couche F (à 300 km d'altitude). L'espace dans lequel se déplacent les ondes est relativement bas de plafond ! L'onde qui quitte l'émetteur E peut atteindre l'antenne de réception R par plusieurs circuits de longueurs identiques. Une sorte de focalisation favorise les antipodes.

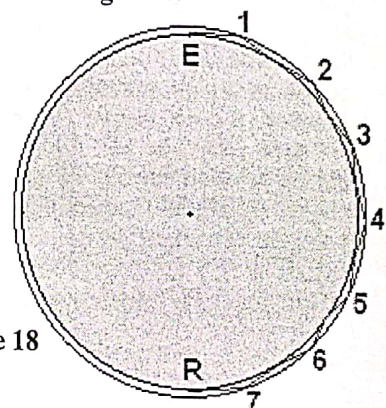


Figure 18

Télécommunications et ionosphère

Approche documentaire MP : à l'aide de données sur l'ionosphère illustrer quelques aspects des télécommunications.

Questions :

1. Pourquoi la couche D disparaît-elle dès le coucher du soleil alors que ce n'est pas le cas de la couche F ?
2. Lors d'un sondage ionosphérique, l'altitude virtuelle est supérieure à l'altitude réelle. L'explication du texte n'est-elle pas incohérente avec la relation du milieu de la page 3 qui indique que l'indice du milieu ionisé est inférieur à 1 ?
3. Quelles parties de la surface terrestre sont les plus favorables à la réflexion des ondes radio ? Pourquoi ?
4. Dans les conditions atmosphériques du tableau 1, page 3, à quelle altitude une onde de fréquence 9 MHz émise du sol avec un angle de départ de 45° est-elle réfléchi ?
5. Dans la formule de la page 3 $n = \sqrt{1 - \frac{81 N}{f^2 10^{12}}}$, quelle est l'origine du facteur 81 ?
6. À l'aide des données du texte, évaluer l'angle de départ pour atteindre les antipodes en utilisant le mode 7F.