

# PROPAGATION DES ONDES

Par JEAN PAUL 14 AT 698

**La propagation (radioélectrique), ce mot magique attirera toujours ma curiosité. Bien que les prévisions nous permettent certains espoirs de liaison, nous ne pourrions que constater s'ils se sont ou pas réalisés, la propagation radioélectrique n'étant pas une science exacte.**

Les prévisions ne prennent pas en compte les phénomènes instantanés ou ceux qui seront connus à posteriori comme l'ionisation des couches de l'ionosphère. L'angle de propagation de l'onde et les caractéristiques électriques des milieux qu'elle va traverser resteront inconnus. Vouloir établir un bilan de liaison va nous conduire à un ensemble complexe d'équations et nous serons obligés de faire des approximations et d'envisager des cas simplificateurs. Mais il est intéressant de connaître quelques aspects ou phénomènes particuliers qui nous permettront de mieux comprendre certaines conditions de propagation.

## BREF RAPPEL HISTORIQUE

En 1898 Guglielmo MARCONI réalise une liaison entre l'île de WIGHT et le bateau « PRINCE OF GALLES », puis le 28 mars 1899 une transmanche de 46Km. Le 12 décembre 1901 il établit la première liaison télégraphique par ondes hertziennes entre la CORNOUAILLE en ANGLETERRE et TERRE NEUVE.

Ces liaisons furent rapidement expliquées aussi bien en AMERIQUE qu'en ANGLETERRE et également en FRANCE, grâce à la découverte en 1880 par des géophysiciens d'une haute atmosphère ionisée et donc conductrice d'électricité.

Mais les liaisons en ondes courtes furent jugées sans intérêt par des septiques et abandonnées à des amateurs perspicaces. Que ces décideurs en soient encore aujourd'hui remerciés !

## REPARTITION DE L'ATMOSPHERE TERRESTRE

L'atmosphère qui entoure notre planète est divisée en trois grandes régions dont deux influencent particulièrement la propagation radioélectrique des ondes courtes :

- La troposphère d'altitude maximum 50Km est la partie basse de cette atmosphère ou comme nous le verrons par la suite influence la propagation des ondes et conduira à définir un horizon radioélectrique supérieur à l'horizon optique.
- L'ionosphère est située à une altitude comprise entre 50 et 1000Km, avec entre 50 et 400 Km les célèbres couches D, E, F<sub>1</sub> et F<sub>2</sub>. L'ionisation de ces couches et notamment des couches F qui permet des liaisons grandes distances par réfraction ou réflexion des ondes courtes. Parmi les causes d'ionisation de ces couches, la principale est l'effet photoélectrique dû au rayonnement solaire dans les ultraviolets. L'activité solaire (nombre de taches) et la densité gazeuse déterminent un nombre d'ions par unité de volume qui varie avec l'altitude et la position du soleil. Cette activité solaire est cyclique et sa période est voisine de 11 ans.
- Au-dessus de 1000 Km d'altitude la magnétosphère, avec entre 5000 et 15000 Km la ceinture de radiation de VAN ALLEN qui est une zone agressive pour tous les matériels électroniques embarqués sur les satellites, est peu intéressante pour la propagation des ondes courtes. Celles qui atteindront cette région seront perdues car elles ne reviendront jamais à une station terrienne.

La propagation d'une onde radioélectrique dépend des caractéristiques de cette onde (longueur, angle d'attaque du milieu) et des caractéristiques électriques du milieu (permittivité, conductivité, indice de réfraction et ionisation).

Les ondes de fréquence égale à quelques dizaines de KHz peuvent se propager dans le sol. Des mesures montrèrent que les ondes moyennes se propagent, jusqu'à quelques centaines de Km de l'émetteur en s'affaiblissant avec l'éloignement, principalement en suivant la surface du sol et sont appelées des ondes « de sol ».

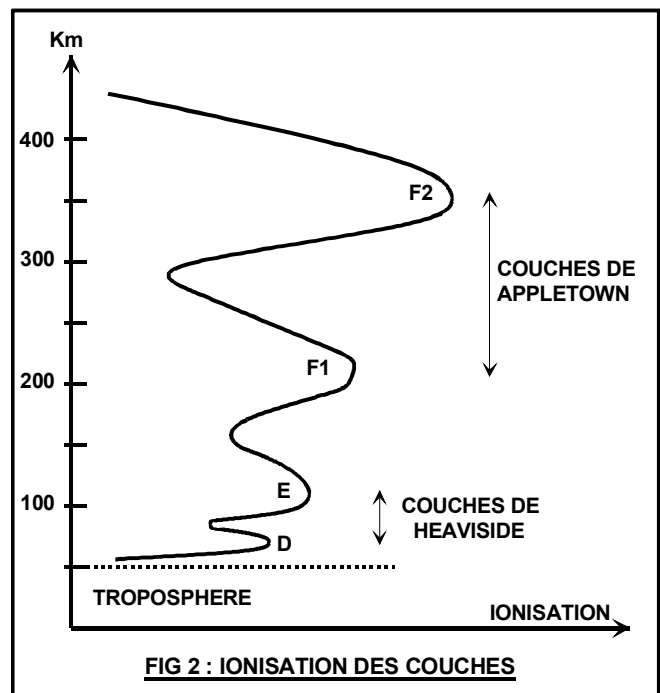
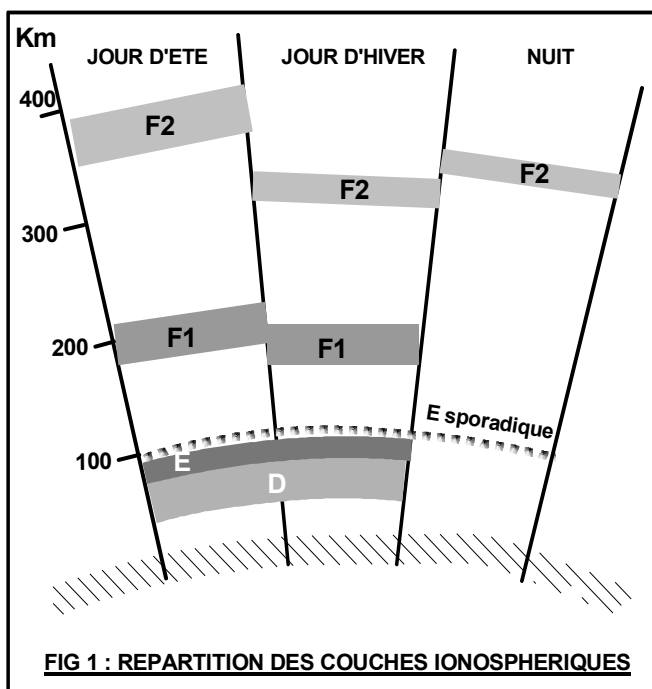
Pour des ondes de fréquences  $< 30/60$  MHz le principal mode de propagation passe par la réfraction dans l'ionosphère, sur les couches D et parfois E si  $F < 300\text{KHz}$  et sur la couche  $F_2$  si  $3 < F < 30\text{MHz}$ .  
Les ondes de fréquence  $> 30/60$  MHz traversent l'ionosphère.

Pour avoir une idée des possibilités de réception ou d'émission à un moment donné, il est nécessaire de connaître les principes fondamentaux de la transmission des ondes courtes.

En plein jour il se forme dans l'ionosphère à différentes altitudes les couches ionisées D (à 70 Km), E (à 100Km),  $F_1$  (à 200 Km) et  $F_2$  (à 350-400 Km). Après le couché du soleil le rayonnement ultraviolet disparaît ainsi que l'ionisation qu'il provoque, seule la couche  $F_2$  se maintient plus ou moins jusqu'au jour suivant. A certaine époque, la nuit la couche E se maintient avec un très fort niveau d'ionisation. Elle est alors appelée E sporadique.

On admet que cette couche est due à des pistes ionisées de météores et de météorites pénétrant dans l'atmosphère et à un effet de frottement entre des vents très violents qui soufflent parfois dans des directions opposées à l'altitude de la couche E. Cette couche n'offre d'intérêt pratique que pendant des périodes à faible activité solaire. Lorsqu'elle existe des fréquences notablement supérieures à la MUF de la couche  $F_2$  peuvent être réfléchies, de sorte qu'elle remplit les fonctions de la couche  $F_2$ .

L'ionisation de la couche  $F_2$  dépend directement du rayonnement solaire incident. Une forte irradiation du soleil provoque une couche épaisse ou fortement ionisée, qu'une onde a peu de chance de traverser. Elle réfléchira les ondes très courtes (10 à 16m). Pendant la nuit l'irradiation de la couche cesse, le degré d'ionisation diminue et la couche devient plus faible et seules les ondes plus longues (30 à 50m) sont encore réfléchies.



On parle alors d'ondes de jour ou ondes diurnes et d'ondes de nuit ou ondes nocturnes. Si la fréquence à utiliser pour établir une liaison dépend de l'heure du jour ou de la nuit, elle est aussi fonction de la saison car la position du soleil par rapport à la terre étant différente l'été de l'hiver. Le soleil se trouve vertical au-dessus de l'équateur le 21 mars et le 22 septembre, le 21 juin il est vertical au-dessus du tropique du Cancer et le 21 décembre au-dessus du tropique du Capricorne. Il est donc normal que l'hiver l'ionisation de la couche  $F_2$  soit supérieure dans l'hémisphère Sud et l'été dans l'hémisphère Nord.

Un autre facteur qui influence la liaison entre un émetteur et un récepteur est leurs positions l'un par rapport à l'autre. Le trajet de l'onde entre eux détermine si on doit parler d'onde diurne ou d'onde nocturne et s'il existe une transition jour nuit. Pour des fréquences utilisant plus particulièrement la couche  $F_2$ , on orientera l'antenne directive de telle manière que l'onde se propage au maximum en zone de jour pour bénéficier d'une ionisation plus importante le jour que la nuit. Il est donc important de connaître la position de la transition jour nuit (ligne grise).

Si le maximum d'activité solaire apparaît comme une condition bénéfique à la réfraction des ondes sur les couches de l'ionosphère, dans certains cas, il peut provoquer des phénomènes particuliers d'effet inverse. Lors d'une grande activité solaire des éruptions de la chromosphère peuvent engendrer des « tempêtes magnétiques » modifiant brusquement le champ magnétique terrestre et par conséquent les conditions de propagation des ondes.

Ces « tempêtes magnétiques » se rencontrent le plus souvent dans les régions polaires durant les mois d'hiver et sont accompagnées d'aurores boréales. Dans ce cas la réception des signaux est faible voire nulle et le S-mètre ne dévie que grâce à un bruit intense. Ce phénomène est dû au rayonnement, en direction de la terre, par le soleil de particules chargées qui sont déviées par le champ magnétique terrestre vers les pôles en provoquant de fortes perturbations.

Il se forme également un courant circulaire autour de la terre qui modifie le champ magnétique terrestre en provoquant l'ionisation de la couche E. Une autre conséquence de cette forte activité solaire est les brusques perturbations ionosphériques (sudden ionospheric disturbances SID) provoquées par une grande quantité d'ultraviolets libérés pendant les éruptions. Ils augmentent considérablement l'ionisation et principalement de la couche D, qui présente alors une forte absorption aux ondes devant être réfractées par la couche F<sub>2</sub>. Après quelques heures, l'ionosphère revient lentement dans un état permettant de bonnes conditions de réception.

Enfin le bruit sous ses différentes formes est un élément pouvant perturber la réception. Il peut se répartir en trois grands groupes qui sont :

- le bruit atmosphérique : est dû principalement aux couches orageuses et à l'électricité statique
- le bruit cosmique : De source extraterrestre, le bruit cosmique dont on suppose que la cause provient de diverses nébuleuses qui entourent la voie lactée. L'une des sources la plus puissante est la constellation du Scorpion.
- le bruit industriel : produit par l'homme

## **PROPAGATION A PROXIMITE DE L'ANTENNE**

L'affaiblissement de propagation en espace libre entre deux antennes est fonction de la distance (d) qui les sépare et de la longueur d'onde (λ) suivant la formule :

$$A_0 = 32.5 + 20\log d + 20\log F \quad (d \text{ en m, } F \text{ en MHz et } A_0 \text{ en dB})$$

Dans le tableau N°1 l'affaiblissement est calculé à différentes distances et plusieurs fréquences. On pourra rapidement calculer une autre valeur d'affaiblissement en sachant que lorsque la fréquence ou la distance sont doublées il faut rajouter 6dB.

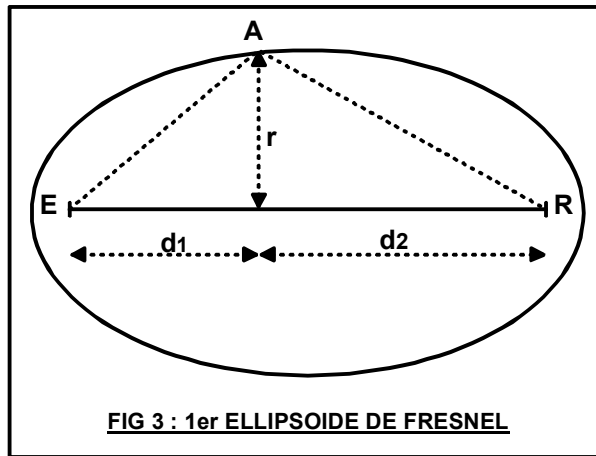
<b>F / d</b>	<b>1 Km</b>	<b>10 Km</b>	<b>100 Km</b>	<b>1000Km</b>
<b>1.8 MHz</b>	37.5 dB	57.5 dB	77.5 dB	97.5 dB
<b>3.5 MHz</b>	43.3 dB	63.3 dB	83.3 dB	103.3 dB
<b>7 MHz</b>	49 dB	69 dB	89 dB	109 dB
<b>14 MHz</b>	55 dB	75 dB	95 dB	115 dB
<b>21 MHz</b>	59 dB	79 dB	99 dB	119 dB
<b>28 MHz</b>	61 dB	81 dB	101 dB	121 dB

**TABLEAU N°1 : Affaiblissement en espace libre**

On considère que la propagation est en espace libre si, dans le premier ellipsoïde de FRESNEL, il n'existe aucun obstacle de quelque nature que ce soit. Le premier ellipsoïde de FRESNEL est celui qui a pour foyers les deux antennes (émission, réception) et tel que la somme des distances d'un point de l'ellipsoïde aux antennes dépasse d'une demi-longueur d'onde la distance entre ces deux antennes (voir figure n°2), soit :

$$EA+AR = ER+\lambda/2$$

Le rayon de l'ellipsoïde en un point quelconque est donné par l'équation suivante :  $r = (\lambda \cdot d_1 \cdot d_2 / d_1 + d_2)^{1/2}$



Dans la zone proche des antennes la formule se simplifie, à la verticale des antennes le rayon est pratiquement égal à  $\lambda/2$  et si  $d_1 \ll d_2$  ou l'inverse alors :

$$r = (\lambda \cdot d_1)^{1/2}$$

Prenons comme exemple  $\lambda = 10\text{m}$ ,  $d_1 = 100\text{m}$  et  $d_2 = 10\text{Km}$  alors  $r = 31.6\text{m}$ , cela signifie qu'à une distance de 100m de l'antenne dans un rayon de 31.6m il ne doit exister un quelconque obstacle (maison, forêt, colline, sol.....etc.). Cette condition n'est jamais obtenue pour des ondes décamétriques et plus longues, il y aura donc toujours des obstacles dans le premier ellipsoïde de FRESNEL. Il faudra ajouter à l'affaiblissement en espace libre celui dû à ces obstacles.

L'un des obstacles proches de l'antenne est le sol dont le comportement de l'onde vis à vis de cet obstacle influe sur le diagramme de rayonnement de l'antenne. Un milieu est caractérisé par sa constante diélectrique relative (permittivité)  $\epsilon_r$ , sa constante magnétique relative (perméabilité)  $\mu_r$  qui égale à 1 dans un milieu non magnétique et sa conductivité  $\sigma$ . La propagation des ondes dans un milieu dépend de sa conductivité :

- Si  $\sigma = 0$  le milieu est un parfait isolant et l'onde se propage sans atténuation.
- Si  $\sigma$  est faible l'onde se propage avec une atténuation exponentielle en fonction de la distance de pénétration
- Si  $\sigma$  très grand l'onde pénètre peu dans le milieu et l'atténuation est très grande.

L'influence du sol dépend donc de ses caractéristiques électriques et de la longueur d'onde utilisée. Lorsque le sol est éclairé par une onde, il se propage un courant de conduction et un courant de déplacement l'un pouvant être prépondérant par rapport à l'autre en fonction de la fréquence. Pour une fréquence basse et une conductivité du sol élevée tel que :

$$60\sigma \cdot \lambda \gg \epsilon_r$$

le courant de conduction l'emporte et le sol se comportera comme un conducteur. On dira qu'il a un comportement « métallique ».

Si la fréquence est élevée et la conductivité faible tel que :

$$60\sigma \cdot \lambda \ll \epsilon_r$$

le courant de déplacement l'emporte et le sol se comporte comme un diélectrique. On dira qu'il a un comportement « vitreux ».

Dans la zone intermédiaire le sol se comporte comme un « semi-conducteur ». La fréquence séparant ces deux comportements est donnée par la formule :

$$F_0 = 1.8 \cdot 10^4 \cdot \sigma / \epsilon_r \quad \text{avec } F_0 \text{ en MHz}$$

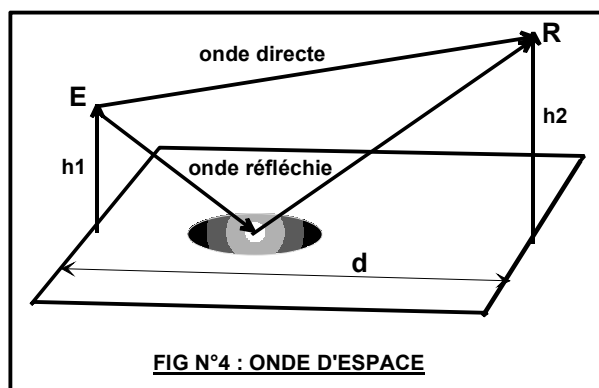
Le tableau n°2 donne, pour des fréquences inférieures à 30MHz, les caractéristiques électriques de différents sols et la fréquence  $F_0$  associée.

TYPE DE SOL	$\epsilon_r$ MOYEN	$\sigma$ MOYEN	$F_0$ (MHz)
Villes régions industrielles	3	$10^{-4}$	0.9
Terrains sablonneux et sec	15	$10^{-3}$	1.2
Pâturages zones boisées sols argileux	20	$10^{-3}$	3.6
Terrains humides	30	$10^{-2}$	6
Eau douce	80	$2 \cdot 10^{-3}$	0.450
Eau de mer	70	5	>1000

**TABLEAU N°2 : Caractéristiques des sols**

Tous calculs faits pour des fréquences <30MHz, on constate que les cinq premiers types de terrains se comportent plutôt comme un diélectrique ou un « semi-conducteur » et l'eau de mer comme un plan métallique. Une conséquence, de ce comportement des sols, est que le diagramme de rayonnement des antennes, dans cette bande de fréquence, sera plus proche de celui d'une antenne isolée dans l'espace que celui d'une antenne avec plan réflecteur.

## **ONDE D'ESPACE**



Dans le cas de deux antennes de hauteurs  $h_1$  et  $h_2$  séparées par une distance  $d$ , l'onde reçue par l'antenne réceptrice est la somme vectorielle du champ de l'onde directe et du champ de l'onde réfléchie comme le montre la figure n°4. Cette onde résultante est appelée onde d'espace. Pour un sol et une fréquence déterminés, les variations de  $h_1$ ,  $h_2$  et  $d$  peuvent donner par rapport à l'espace libre soit un gain de 6dB soit un affaiblissement approchant dans certaines conditions 20dB, alors que la liaison est dégagée de tout obstacle. Cette variation n'est pas purement théorique, elle peut se rencontrer dans le cas d'une liaison entre une station terrestre et un bateau où le point de réflexion sera modifié par la hauteur des vagues.

Lorsque le sol pénètre de façon importante dans le premier ellipsoïde de FRESNEL comme c'est le cas pour les ondes décimétriques, l'angle d'incidence devient faible et l'atténuation totale de la liaison est donnée par l'équation :

$$A_T = 120 + 40 \log d - 20 \log h_1 - 20 \log h_2 \quad (A_T \text{ en dB, } d \text{ en Km et } h_1 \text{ et } h_2 \text{ en m})$$

Elle tient compte de l'atténuation en espace libre et de celle due à l'obstacle représenté par le sol.

## PROPAGATION TROSPHERIQUE

Au niveau de la mer le rayon terrestre varie entre 6356 et 6378Km, pour les calculs de propagation on prend un rayon moyen de 6370Km. En fonction de la hauteur des antennes on peut définir un horizon optique, c'est à dire une distance telle que les deux antennes (l'une au niveau de la mer l'autre à une hauteur h) peuvent se voir. Leurs hauteurs étant très faibles devant le rayon terrestre moyen, on peut utiliser la formule :

$$d \approx (2.R.h)^{1/2} \quad (d \text{ distance entre les 2 antennes et } R \text{ le rayon terrestre)}$$

$$\text{ou} \quad d_1 \approx 3.57(h)^{1/2} \quad (d_1 \text{ en Km et } h \text{ en m)}$$

Si les deux antennes sont à une même hauteur h alors :  $d_2 \approx 7.14(h)^{1/2}$

Lorsqu'on s'intéresse à la propagation des ondes radioélectrique, la troposphère est proche d'un milieu diélectrique dont l'indice moyen (n) de réfraction est peu différent de l'unité. De faibles variations (sur la sixième décimale) vont influencer les conditions de propagation, aussi préfère t-on utiliser le co-indice N ( $N= 10^6.(n-1)$ ).

Il est fonction de la pression partielle de la vapeur d'eau, de la pression atmosphérique et de la température absolue. Mais ces paramètres étant très difficilement connus, on utilise des troposphères de références.

On admet alors que le co-indice N est uniquement fonction de l'altitude h (Km) et que sa décroissance est linéaire avec cette altitude jusqu'à environ 1000m. Le Comité Consultatif International de Radiocommunication (CCIR) fourni sur un planisphère des courbes iso niveaux du co-indice N au niveau du sol ( $N_0$ ) et de son gradient  $N_h-N_0$  pour  $h= 1000m$ .

La troposphère standard est définie pour un gradient de l'indice de réfraction :

$$\Delta N = \delta N / \delta h = - 39$$

La décroissance de l'indice de réfraction avec l'altitude a pour conséquence d'incurver les ondes dans le sens d'une augmentation de la portée au-delà de l'horizon optique défini précédemment. Afin de permettre l'utilisation des formules établies dans le cas d'une propagation rectiligne, on modifie le rayon terrestre de manière que le trajet des ondes reste apparemment rectiligne malgré la courbure due à la réfraction.

Pour cela on applique au rayon terrestre un coefficient :

$$k = 157 / 157 + \Delta N$$

Pour la troposphère standard  $k= 1.33$  et le rayon terrestre équivalent est  $R'= 8472Km$ . En remplaçant R par  $R'$  dans l'équation  $d \approx (2.R.h)^{1/2}$  on obtient :

$$d'_1 \approx 4.12(h)^{1/2} \quad \text{et} \quad d'_2 \approx 8.24(h)^{1/2}$$

Cette distance supérieure à l'horizon optique est appelé horizon radioélectrique. Pour exemple, dans le cas de deux antennes à 10m de hauteur l'horizon optique est égal à 22.58Km et l'horizon radioélectrique à 26.06Km.

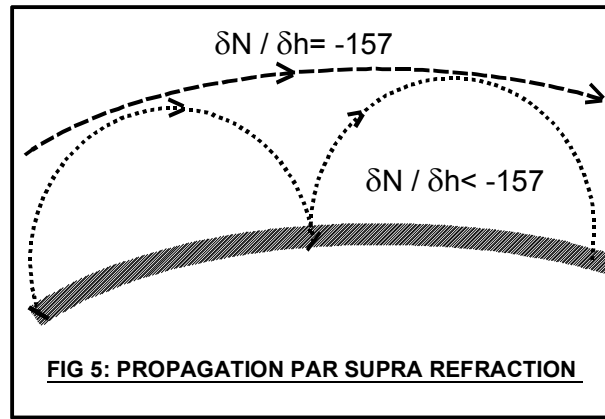
Intéressons nous maintenant aux cas où le gradient  $\Delta N$  est différent de sa valeur  $-39$  en troposphère standard.

Si  $\Delta N > -39$ , les ondes radioélectriques sont moins courbées et ce phénomène d'infra réfraction rapproche les ondes du sol et augmente l'affaiblissement de propagation.

Si  $\Delta N < -39$ , les ondes radioélectriques sont plus courbées et ce phénomène de supra réfraction dans le cas où  $\delta N / \delta h = -157$  conduit à un coefficient k infiniment grand. Le rayon terrestre équivalent étant alors aussi infiniment grand, la terre paraît plate et les ondes se propagent parallèlement à sa surface.

Dans le cas où  $\delta N / \delta h < -157$  le rayon de courbure des ondes est plus grand que le rayon terrestre et les ondes reviennent se réfléchir sur la terre. Ce type de propagation peut se répéter le long d'un trajet lorsque ses conditions d'existence sont maintenues. On constate alors un phénomène de guidage des ondes entre le sol et une altitude où  $\delta N / \delta h = -157$  et non pas une réflexion sur cette couche.

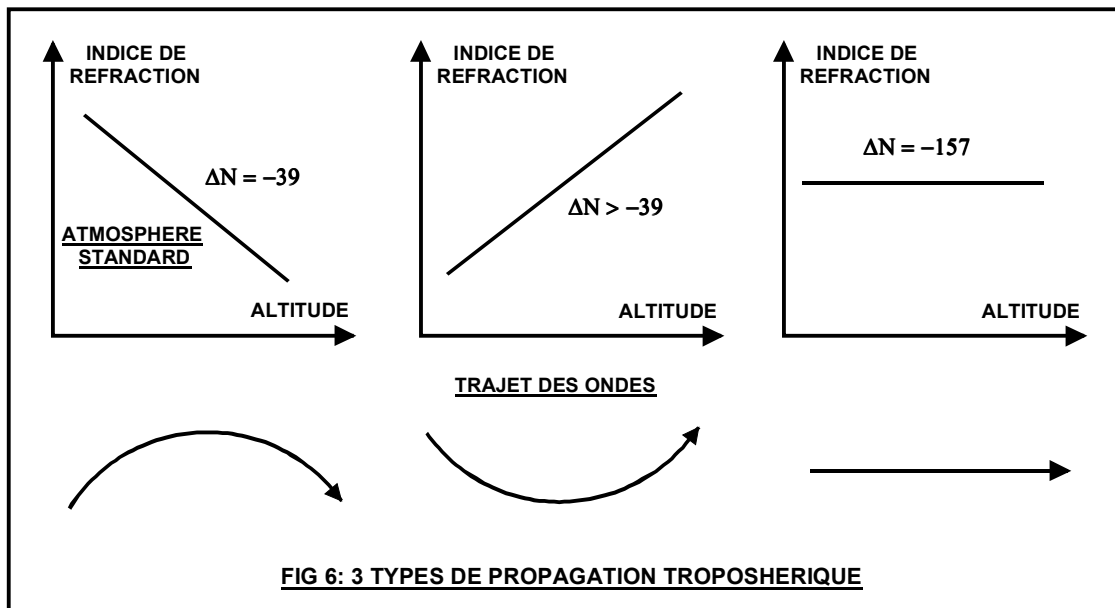
La figure n°5 représente les deux cas rencontrés pour un phénomène de supra réfraction. L'altitude de cette couche d'inversion peut être de quelques mètres à quelques centaines de mètres et la longueur du trajet dépassant les 100Km. Les niveaux reçus sont alors supérieurs à ceux calculés en espace libre.



Citons quelques exemples de conditions atmosphériques permettant l'apparition de ce phénomène de supra réfraction :

- Une couche d'air très humide à la surface de la terre avec au-dessus une couche d'air sec et chaud, donnant simultanément une inversion d'humidité et de température.
- Un déplacement horizontal d'une masse d'air chaud et sec au-dessus d'une masse d'air froid et humide.
- Le déplacement vertical d'une masse d'air qui après s'être refroidie redescend sur une masse d'air plus froide.

La figure n°6 résume les trois cas de propagation troposphérique en fonction du gradient  $\Delta N$  de l'indice de réfraction.



## PROPRAGATION IONOSPHERIQUE

En complément des conditions d'ionisation de l'ionosphère décrites précédemment, il faut préciser que le taux d'ionisation c'est à dire le nombre N d'ions par unité de volume dépend de l'activité solaire mais aussi de la densité gazeuse de l'ionosphère. Ce taux variera donc en fonction de l'altitude. Dans ce milieu ionisé on peut écrire l'équation de la dynamique en fonction de la charge et la masse de l'électron ainsi que du nombre de collisions par seconde et  $m^3$ . En utilisant les équations de MAXWELL permettant de tenir compte des courants de déplacement et de conduction, on en déduit une fréquence appelée « fréquence critique » :

$$F_c = 9(N)^{1/2} \quad (F_c \text{ en Hz et } N \text{ nombre d'électrons par } m^3)$$

Intéressons-nous au comportement d'une onde émise à une fréquence F par rapport à cette « fréquence critique » :

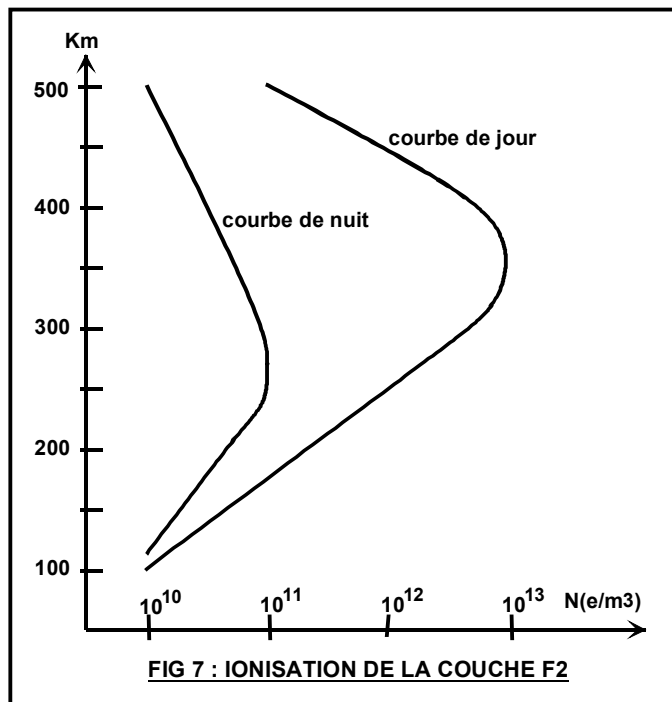
- Si  $F > F_c$ , l'onde traverse la couche ionisée en subissant les lois de la réfraction.
- Si  $F = F_c$  l'indice de réfraction n s'annule et la couche est devenue impénétrable pour l'onde émise.
- Si  $F \geq F_c$  l'onde ne peut pas se propager dans la couche ionisée et elle rebrousse alors son chemin pratiquement sans pertes. Si les pertes de propagation sont négligeables cela est dû, en haute atmosphère au niveau de la couche F<sub>2</sub>, au fait que les gaz sont raréfiés et la couche se comporte alors comme un diélectrique pur d'indice  $n = (\epsilon_r)^{1/2}$  c'est à dire sans perte. Par contre au niveau de la couche D la densité des gaz augmente et cette couche est caractérisée par un indice de réfraction comportant un terme de pertes. On observe alors une absorption partielle des ondes provoquées par les forces de frottement.

A partir de la figure n°7 qui représente le taux d'ionisation de la couche F<sub>2</sub>, le tableau n°3 donne la fréquence critique en fonction de ce taux.

TAUX D'IONISATION	F <sub>c</sub> (MHz)
1*10 <sup>10</sup>	0.9
2.5*10 <sup>10</sup>	1.42
5*10 <sup>10</sup>	2.0
7.5*10 <sup>10</sup>	2.46
1*10 <sup>11</sup>	2.85
2.5*10 <sup>11</sup>	4.5
5*10 <sup>11</sup>	6.36
7.5*10 <sup>11</sup>	7.79
1*10 <sup>12</sup>	9.0
2.5*10 <sup>12</sup>	14.23
5*10 <sup>12</sup>	20.12
7.5*10 <sup>12</sup>	24.64
1*10 <sup>13</sup>	28.46

**TABLEAU N°3 : CALCULS DE F<sub>c</sub>**





Dans une liaison par réflexion sur les couches ionosphériques, le principal problème est la détermination d'une fréquence de trafic adaptée aux conditions atmosphériques instantanées.

La couche F<sub>2</sub> est constituée d'une multitude de couches élémentaires d'indice de réfraction différent. La figure n°8 montre le parcours de l'onde dans ces couches élémentaires.

A chaque couche l'angle de pénétration de l'onde diminue et il ne peut y avoir réflexion sur la couche d'indice n<sub>i</sub> que si φ<sub>i</sub> = 0. C'est à dire lorsque le trajet de l'onde devient tangentiel à la couche n<sub>i</sub>. Cette condition sera vérifiée si :

$$\sin\varphi_0 = F_c / F$$

F<sub>c</sub> étant la « fréquence critique » et F la fréquence d'émission maximum utilisable ou MUF (maximum usable frequency). Si φ<sub>0</sub> augmente, la portée diminue et le rapport F<sub>c</sub> / F détermine une distance minimum en dessous de laquelle l'onde n'est pas réfléchié soit :

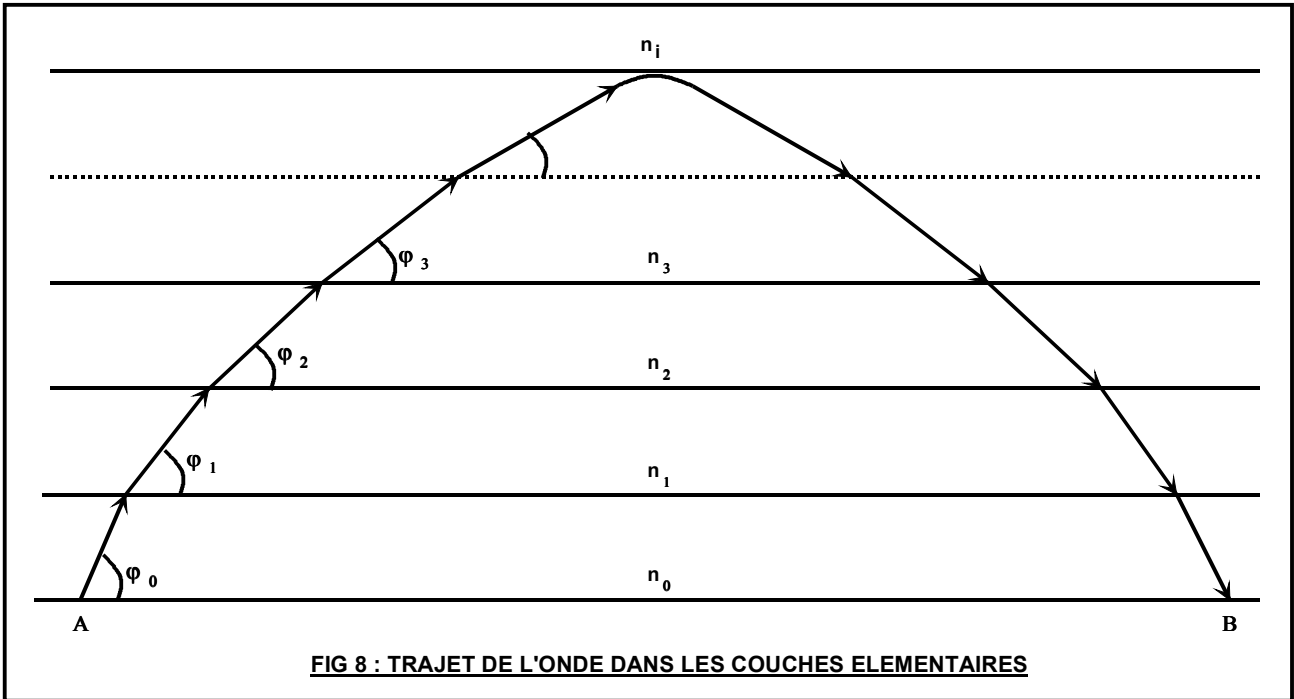
$$d_{\min} = 2.h((F_c / F)^2 - 1)^{1/2}$$

Cette distance minimum est souvent supérieure à la portée de l'onde de sol d'où la présence d'une zone de silence entre les deux antennes.

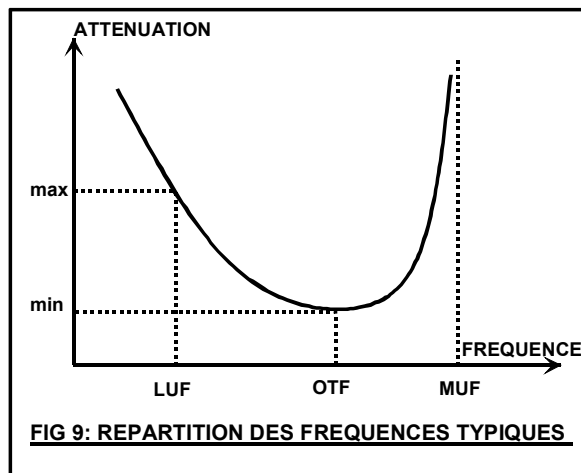
Si F est très peu supérieure à F<sub>c</sub> alors d<sub>min</sub> ≈ h. La portée maximum théorique en un seul bond dépend de la hauteur de la couche de réflexion et du rayon terrestre, elle est obtenue pour un angle de site nul au départ par :

$$d_{\max} = 2(2Rh)^{1/2}$$

Dans le cas où la couche de réflexion est à une altitude de 350Km alors d<sub>max</sub> = 4220Km.



Comme nous l'avons vu précédemment, la principale cause d'affaiblissement de l'onde est la traversée des couches basses de l'ionosphère. Cet affaiblissement augmente lorsque la fréquence diminue. Il existe donc une fréquence minimum LUF (Lowest Usable Frequency) de trafic où l'affaiblissement est maximum et ne permet pas d'établir une liaison. Comme le montre la figure n°9, il existe entre les fréquences LUF et MUF une fréquence appelée OTF (Optimum Traffic Frequency) pour laquelle l'affaiblissement de propagation est minimum et permet d'assurer une liaison pendant 90% du temps.



## **INFLUENCE DU CHAMP MAGNETIQUE TERRESTRE**

La présence du champ magnétique terrestre conduit à définir une fréquence cyclotron qui varie en fonction de la latitude ( $F = 1.6\text{MHz}$  aux pôles,  $F = 1.3\text{MHz}$  pour une latitude de  $45^\circ$  et  $F = 0.7\text{MHz}$  à l'équateur). Il existe alors deux modes de propagation de l'onde, l'un appelé « mode ordinaire » et l'autre « mode extraordinaire ». Lorsque la propagation est perpendiculaire à la direction du champ magnétique terrestre, l'onde ordinaire est polarisée linéairement et l'onde extraordinaire elliptiquement dans un plan perpendiculaire au champ magnétique. Si la propagation est parallèle au champ magnétique, la polarisation de l'onde est linéaire mais tourne proportionnellement à la distance parcourue.

Pour des fréquences de trafic inférieures à la fréquence cyclotron, la propagation de l'onde peut se faire au travers de l'ionosphère en suivant les lignes de force du champ magnétique permettant une liaison entre deux points magnétiques conjugués après un parcours dans la magnétosphère.