

Propagation

(Nota : ce cours est inspiré du travail de F8SH, F5NB, F6DDR, F5LRL, F6FTC pour ne citer qu'eux)

Les êtres humains ont depuis leur origine communiqué entre eux. D'abord en utilisant leur voix, des sons produits par des tam-tams, puis la vue avec les signaux de fumée, le télégraphe Chappe. Le code morse, transmis par des fils, grâce à l'avènement de l'électricité a permis d'augmenter considérablement les distances de communication, jusqu'aux ondes radio, faisant naître de nouvelles sciences, l'étude de l'atmosphère et la propagation des ondes.

1° Introduction – L'atmosphère

L'atmosphère est la couche gazeuse qui entoure la Terre, son épaisseur ne dépasse pas 1000km, la densité des gaz diminue avec l'altitude. Déjà, vers 5000m d'altitude, la densité de l'air est si faible qu'il est difficile de respirer.

La vie n'est possible sur terre que parce que l'atmosphère nous protège, filtre les rayonnements solaires et cosmiques nocifs.

Les ondes radio se déplacent en ligne droite dans un **milieu homogène**. L'horizon, du fait de la courbure de la Terre n'est qu'à 5 km environ pour un homme de 1,80m, 90 km en haut du Mont-Saint-Vincent. Au delà de l'horizon, les ondes radio se perdent dans l'espace.

Comment, dans ces conditions, faire des contacts à grande distance, faire communiquer deux êtres humains éloignés l'un de l'autre ?

Le schéma ci-dessous montre que l'atmosphère est organisée en couches, appelées couche D, couche E, couche F. C'est grâce au rayonnement solaire qui **ionise** les gaz qui la compose, qu'elle peut, dans certaines conditions réfléchir les ondes radio des moyennes fréquences jusqu'aux VHF, pour les rediriger vers la Terre.

C'est dans l'ionosphère, qui est la région la plus élevée de l'atmosphère terrestre, entre 80 et 600km, voire jusque vers 700km, que se produisent les phénomènes de **réflexion, réfraction, diffraction, absorption**.

En dessous de 100km, l'atmosphère est composée principalement de molécules d'oxygène et d'azote. Au dessus de 150km d'oxygène atomique (couche F1 et F2) et entre les deux se situe une zone de transition, la couche E.

La composition et la densité de l'ionosphère sont propices à l'ionisation dû au rayonnement solaire dans l'ultraviolet pour les couches E et F, et au rayonnement X pour la couche D.

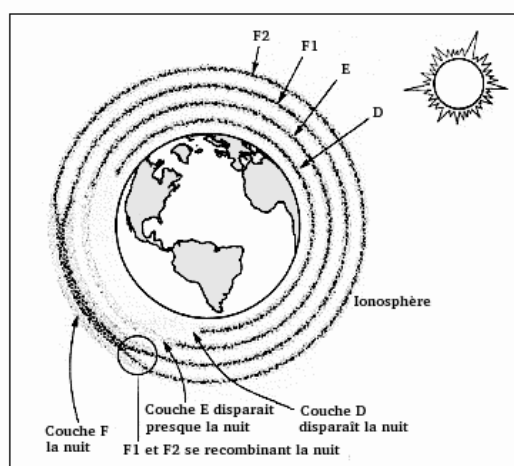
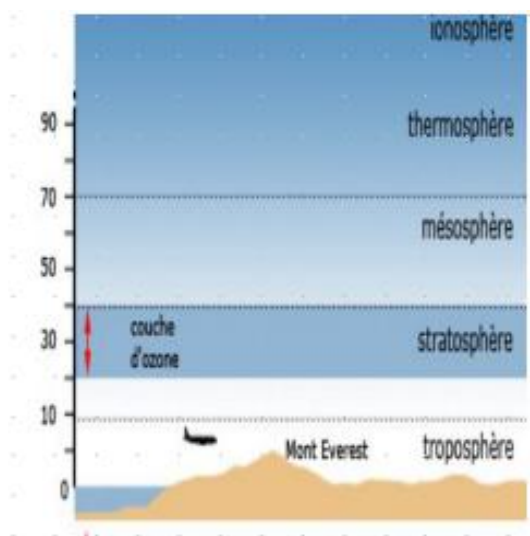


Figure 3 - Vue simplifiée des couches de l'ionosphère sur une période de 24 heures



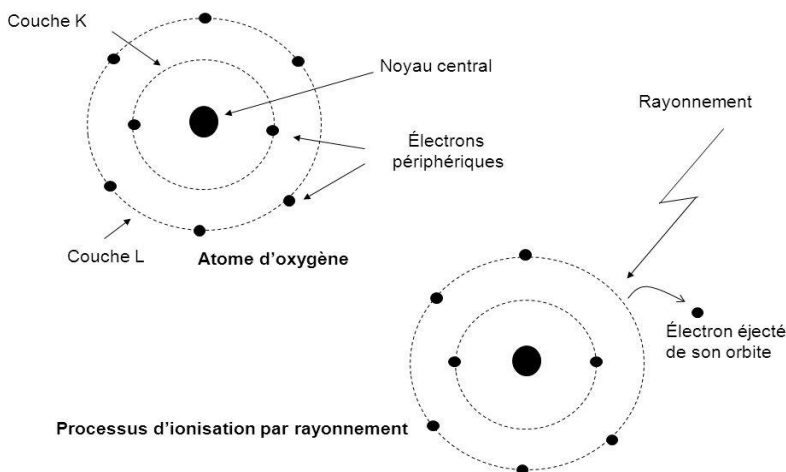
2° - Un brin d'histoire

C'est Galilée qui, vers 1610, remarqua la présence sur le disque solaire de taches sombres grâce à la première lunette astronomique. Puis Rudolf WOLF 1810/1893, mathématicien, physicien, chercheur et Directeur de l'observatoire de Zurich observa le soleil durant 46 ans.

Durant cette période il découvrit la majorité de nos connaissances actuelles sur l'activité solaire. Notamment le cycle court (11 ans), et un cycle plus long, non encore confirmé de 55 ans, les éruptions solaires qui engendrent les taches solaires. Il étudia les aurores boréales qui suivent les périodes de fortes activités du soleil...

3° - L'ionisation de l'atmosphère

Principe d'ionisation



Propagation HF - André F6EWX - Jean-Marie F5AQB - Radio-Club F6KJJ MJC du Pays de Tullins (38) - 14/11/2008 - page 23

Le rayonnement ultraviolet solaire est à l'origine de l'ionisation, il agit sur une partie des molécules et atomes atmosphériques. Ce rayonnement très énergétique arrache un ou plusieurs électrons de la couche externe des atomes. Un plasma est ainsi créé qui contient des nombres égaux d'électrons et d'ions positifs (les atomes amputés de leurs électrons périphériques).

L'énergie est transférée à l'électron sous forme d'énergie cinétique (la vitesse).

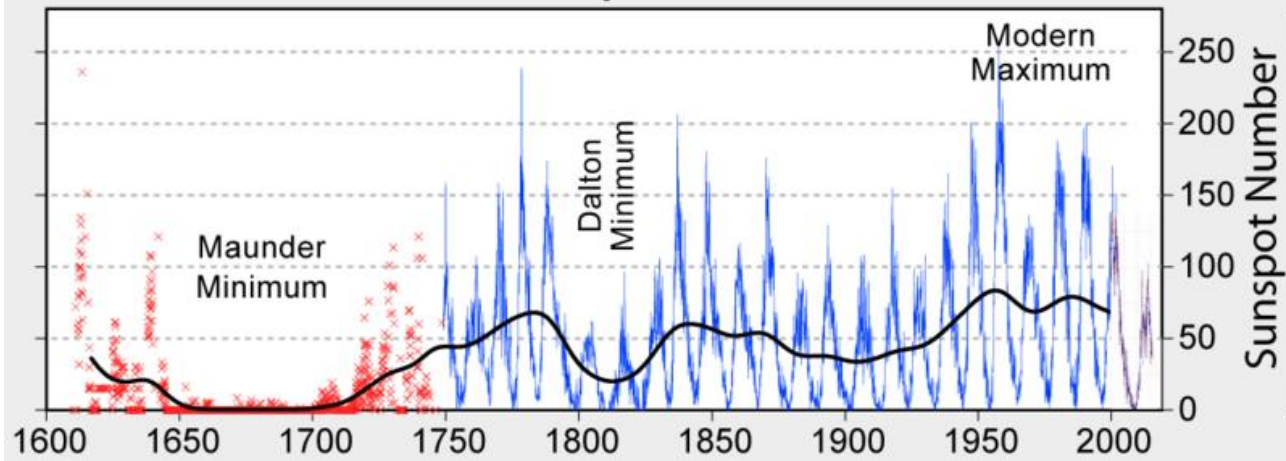
La densité de l'air qui constitue l'atmosphère diminue à mesure que l'on s'éloigne de la surface du sol. À partir de 60 km d'altitude l'atmosphère agit comme filtre absorbant du rayonnement solaire, notamment sur les rayons ultraviolets et X dont l'énergie est complètement absorbée dans la thermosphère. Ainsi, la surface terrestre est protégée de ces rayons agressifs dont l'énergie se perd dans des réactions déchirant des molécules (dissociation) ou leur arrachant un électron, c'est l'ionisation.

Dans la partie basse de l'ionosphère, la densité de molécules d'air est encore élevée, les collisions entre électrons et ions sont fréquentes ; 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 diminue que lentement après que le rayonnement solaire s'interrompt avec le coucher du Soleil. C'est la raison des coupures rapides des liaisons via la couche E sporadique ES.**

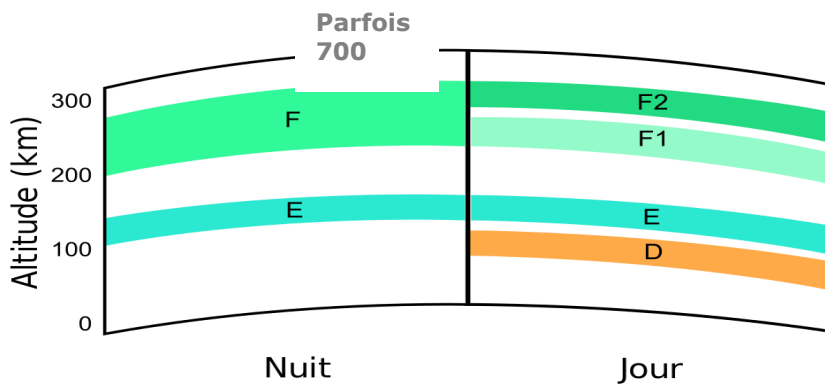
Une ionisation très localisée et pendant une très courte durée peut être provoquée par les chutes de météorites.

Comme nous le verrons plus loin, **l'indice SFI** ou "**Solar Flux Index**" ou "**indice du flux solaire**" témoigne de l'activité du soleil vers la Terre, ionisant par la même occasion les couches atmosphériques, il agit donc sur les effets de propagation. Plus le flux solaire est élevé, plus la couche ionosphérique renverra par réflexion les ondes HF.

400 Years of Sunspot Observations



Ci-dessus **l'indice SN aussi SSN ou " SunSpot Number "** ; c'est le nombre de tâches ou groupes de tâches solaires visibles à la surface du soleil. L'activité solaire est très dense autour des tâches solaires et leur rayonnement intense a pour effet d'ioniser les couches de l'ionosphère induisant une meilleure réflexion aux fréquences élevées.



A retenir : les molécules de l'ionosphère, bombardées par le rayonnement solaire perdent un électron ou plusieurs sur leur couche périphérique, et ces milliards de milliards d'électrons forment un plasma qui réfléchit les ondes électromagnétiques en direction du sol. Durant la nuit les électrons retournent à leurs molécules, c'est la recombinaison.

4° - Variations de l'ionosphère

L'ionisation des couches ionosphériques est fortement corrélée au flux solaire reçu par la Terre.

On distingue cinq types de variations :

- Variations journalières dues à l'angle zénithal du soleil
- Variations saisonnières dues à l'orbite elliptique de la Terre et à son inclinaison sur l'écliptique. Noter leurs inversions pour les deux hémisphères.
- Variations cycliques dues aux cycles de 11 ans et de 55 ans de l'activité solaire.
- Variations géographiques.
- Perturbations liées à l'activité solaire à court terme.

4-a) - Variations journalières

Elles sont liées à l'angle zénithal du soleil au niveau des couches. En un lieu, l'ionisation est maximum au midi solaire du lieu.

Après la disparition du soleil (nuit), l'ionisation cesse et les recombinaisons provoquent une diminution de la densité ionique. Les recombinaisons étant importantes pour la couche D, celle-ci disparaît rapidement pendant la nuit.

La densité de la couche E baisse fortement, sans disparaître.

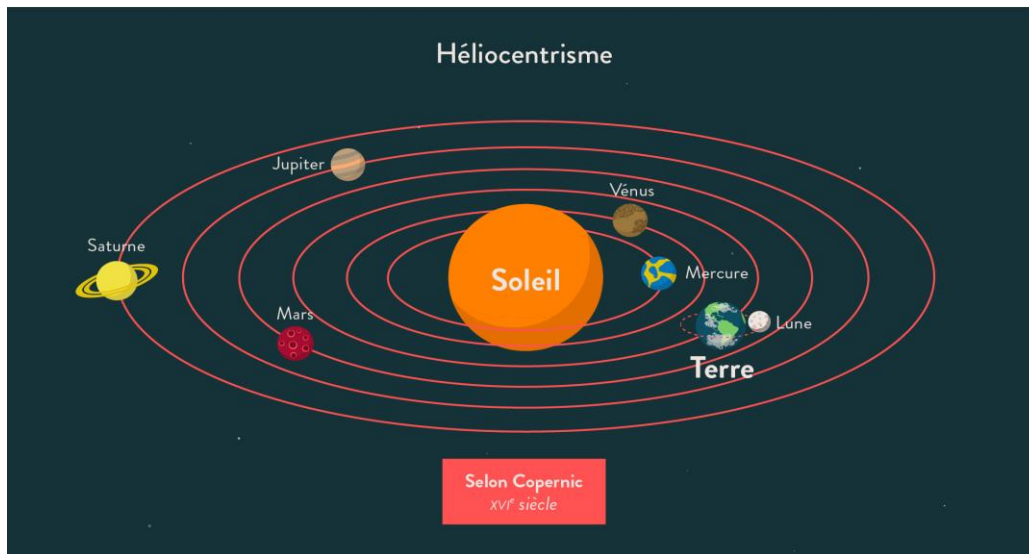
La couche F1 n'existe plus, elle s'est combinée avec la couche F2.

La couche F2 ne subit qu'une baisse modérée de son ionisation grâce à un échange d'ions avec la réserve que constitue la magnétosphère.

L'aube et le crépuscule sont des instants particuliers, car les effets du soleil se font sentir progressivement selon l'altitude des couches.

4-b) - Variations saisonnières et cycliques

Elles sont fonction de la position héliocentrique de la Terre et de la distance Terre Soleil.



Les variations saisonnières affectent surtout la couche E et la couche F1 qui peut disparaître pendant l'hiver.

Les périodes d'équinoxe sont en général les plus perturbées.

Les variations cycliques sont liées aux cycles de 11 ans et d'environ 55 ans de l'activité solaire, mesurée par le nombre de Wolf R (SSN). **Nous débutons actuellement le cycle solaire 25.**

L'augmentation d'activité se fait surtout sentir sur la couche F2 pendant la période hivernale. Les effets du cycle solaire sont moins sensibles aux faibles latitudes.

A retenir : Activité solaire importante → flux solaire reçu par la terre important → forte ionisation des couches → meilleure réflexion des ondes sur les couches ionosphériques. Durée du cycle 11 ans. La nuit la F1 et la F2 ne forme plus qu'une seule couche F.

5° - Caractéristiques des différentes couches

5-a) – Couche “D”

On la trouve entre 55 à 90 km d'altitude. Elle est peu ionisée par les UV et les X durs uniquement pendant le jour, la recombinaison est très rapide. Elle atténue les ondes qui la traversent et varie peu avec le cycle solaire.

En journée, lorsqu'elle est “activée” par le rayonnement solaire, elle absorbe les ondes jusqu'à 5MHz, empêchant toute propagation ionosphérique sur le 1,8 MHz et le 3,5 MHz.

La nuit, son ionisation est 1% de celle de jour (tout passe au travers).

A savoir : pas de fréquence critique, elle ne renvoie pas les ondes, ne les dévie pas, ne les réfracte pas, elle bloque toute propagation du 1,8 MHz au 5 MHz la journée, de nuit elle laisse tout passer. Elle se trouve entre 55 et 90km d'altitude.

5-b) – Couche “E” : de 90 km à 140 km d'altitude.

L'azote et l'oxygène sont ionisés par les UV courts et les X uniquement durant la journée.

La recombinaison est rapide mais elle permet des propagation jusqu'à la nuit avancée.

La propagation est imprévisible. Elle est possible des bandes décamétriques plutôt hautes, jusqu'au 144MHz.

De 5 à 20MHz elle a un skip (distance entre deux stations) unique de 2300 km.

Elle permet des combinaisons de sauts multiples avec la couche “F”, jusqu'à 6000 km, parfois plus.

A savoir → Elle renvoie les ondes, les dévie, les réfracte, elle participe à des liaisons courtes et jusque 6000km du 15m au 6m par combinaison de sauts multiples avec la couche “F”. Par réflexion sur la seule couche E, la distance maximum du skip est de 2160km.

5-c) - Couche Sporadique “Es”

Elle est très liée aux variations journalières, saisonnières et géographiques. Elle apparaît régulièrement aux basses latitudes en milieu de journée.

Elle est très mince et instable avec une durée de vie de quelques minutes à quelques heures.

La surface d'une “Es” est de l'ordre de 60 à 200km de diamètre. Il peut, y avoir plusieurs “Es” en même temps.

Elle est surtout présente de jour jusqu'en début de soirée du printemps à l'été. Son ionisation est due principalement à la formation d'ions métalliques d'origine météoritique.

Sa densité, maximale du milieu du printemps et l'été est augmentée par l'arrivée d'essaims de météorites, elle peut se combiner avec la couche F, occultant les réflexions dans cette couche, tout en permettant d'excellentes liaisons via la Es pour les fréquences hautes, 28Mhz, 50MHz, 70mhz et parfois 144MHz.

A retenir → La couche “Es” est surtout présente du printemps à l'été, altitude variable entre 60 et 200km, permet des liaisons avec parfois de très forts signaux sur 28MHz, 50MHz sur plusieurs milliers de km et parfois 2500km sur 144MHz.

5-d) – Couches “F” --> “F1 & F2” : entre 150km et 400km

Lors de forte activité solaire, le “F2” peut être présente jusqu'à 700 km d'altitude.

La couche “F1” se trouve à environ 100 km au-dessus de la couche “E”. Elle n'a pas vraiment d'intérêt pour le rebond entre elle-même et la Terre. Par contre elle peut créer avec la couche “F2” un “canal de propagation”, ou les ondes se réfléchissent entre les 2 couches “F”.

La couche “F2” en revanche est essentielle pour les liaisons décamétriques DX (longue distance). Elle se trouve autours de 350 à 400km d'altitude, parfois elle peut monter jusque 700km.

La “F2” est toujours au-dessus de la “F1”, c'est de loin la couche la plus ionisée.

La distance maximum du 1er skip avec la F2 est d'environ 4000km.

A retenir → La couche “F1” n'a pas vraiment d'intérêt pour la propagation des ondes, sauf lorsqu'elle se recombine avec la F2 qu'elle “renforce”.

En revanche la “F2” permet les liaisons intercontinentales. Située au dessus de la “F1”, elle est présente jusque 400km, plus rarement jusque 700km. Son 1er skip est d'environ 4000km.

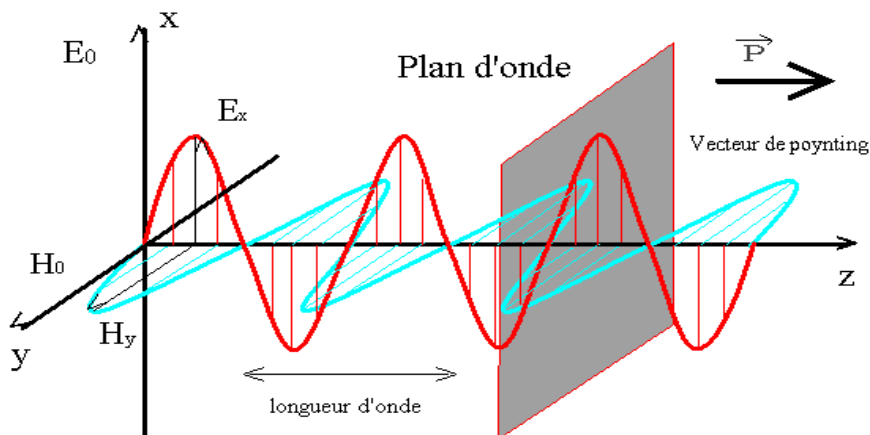
Attention lors de l'examen : Si on vous pose des questions sur la couche “F”, de bien distinguer “F1” et “F2”, si on vous parle uniquement de couche “F”, raisonnez couche “F2”.

6° - Rappel : L'onde hertzienne

C'est la description comportementale de la propagation d'un **champ électromagnétique** décomposable en un **champ électrique E** et un **champ magnétique H**.

L'énergie transportée par l'onde se divise en parts égales entre le **champ E** et le **champ H**.

L'onde Hertzienne est une onde plane. Les vecteurs des champs **E** et **H** sont situés sur un même plan perpendiculaire à la direction de propagation et sont perpendiculaires entre eux.



7° - Rappel : Génération d'une onde hertzienne

- Elle est produite par la **circulation** d'un **courant électrique variable dans le temps**.
- On considère un courant à variation sinusoïdale de période **T** et de fréquence **F = 1/T**.
- On considère une longueur d'onde **λ** qui est le quotient entre la vitesse de propagation de l'onde et la fréquence.

8° - Rappel : Polarisation d'une onde hertzienne

Nous avons vu que c'est la polarisation de l'antenne qui détermine la polarisation de l'onde hertzienne.

Cette polarisation est définie par la direction du vecteur du champ **E** par rapport à la surface terrestre prise comme plan de référence.

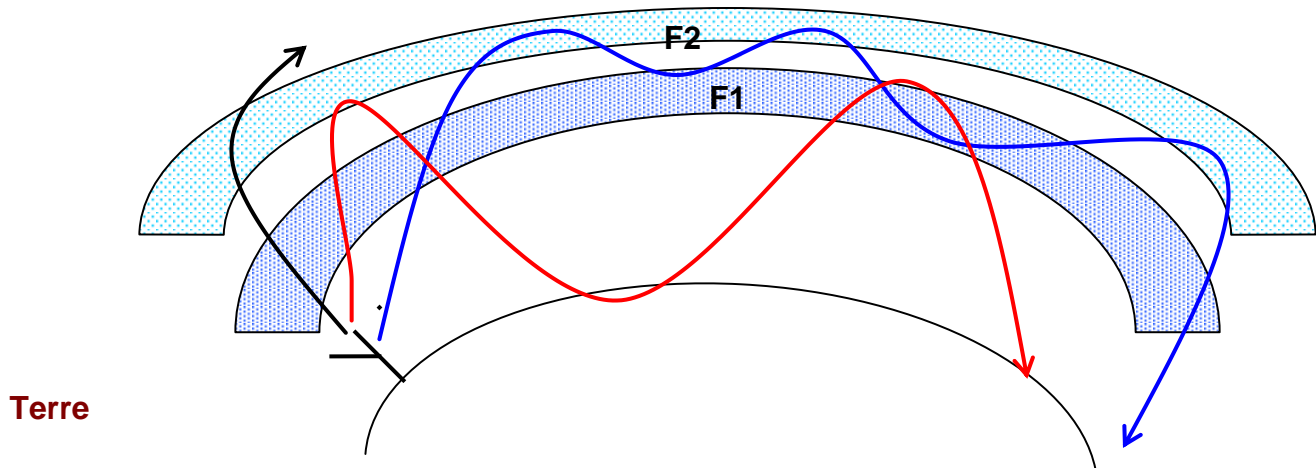
On considère les polarisations linéaires, (verticales ou horizontales) où les vecteurs **E** et **H** gardent un angle constant avec la référence initiale au cours de la propagation.

On considère les polarisations elliptiques, où les vecteurs **E** et **H** tournent autour du plan de référence d'une manière synchrone avec la longueur d'onde.

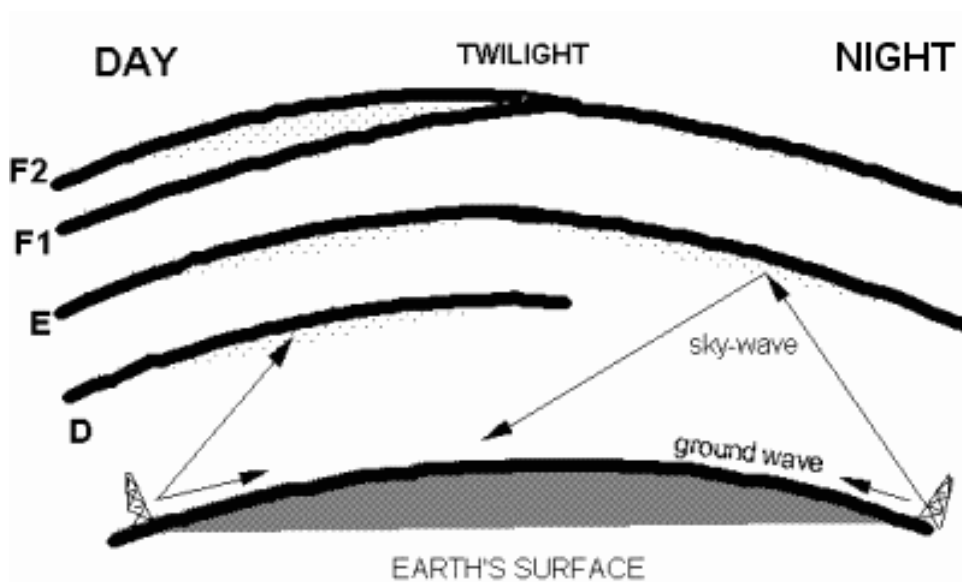
9° - La propagation ionosphérique

C'est un mode de propagation de **champs électromagnétiques** (ondes hertziennes) à l'intérieur de l'atmosphère sur de grandes distances, grâce aux propriétés réfléchives de la **surface terrestre** et **de l'ionosphère**, et à **l'intérieur même de l'ionosphère**. Ce mode met en jeu la propagation des ondes hertziennes dans trois milieux différents :

- l'air
- le sol (au sens large)
- l'ionosphère



10° - Réflexion des ondes électromagnétiques



10-a) – Réflexion sur une surface parfaitement conductrice

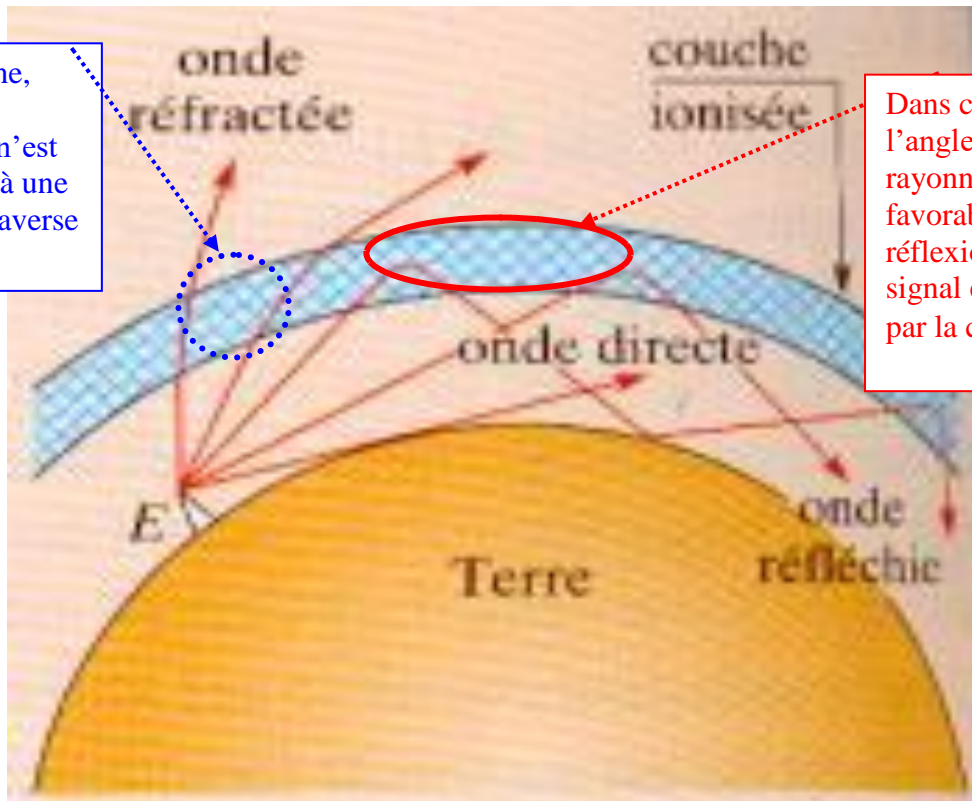
L'onde ne pénètre pas dans un conducteur parfait, si elle arrive sur une surface parfaitement conductrice, elle se réfléchit à la manière de la lumière sur un miroir.

En se réfléchissant, l'onde conserve la direction de son vecteur H, et son vecteur E subit une inversion de sens de 180°.

10-b) – Réflexion sur les couches

Il y a réflexion d'une onde électromagnétique sur une surface quand celle-ci est électriquement différente de son milieu de propagation. Elles n'ont pas le même **indice de réfraction**.

Dans cette zone, l'angle du rayonnement n'est pas favorable à une réflexion, il traverse la couche



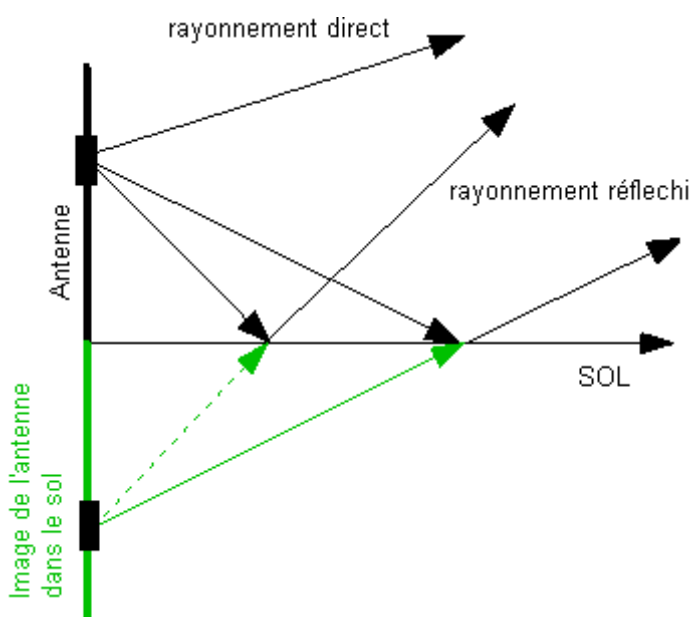
Dans cette zone, l'angle de rayonnement est favorable à une réflexion, le signal est réfléchi par la couche

L'onde pourra subir différentes rotations de phase, en fonction du niveau d'ionisation des couches, la réflexion (coefficient de réflexion et déphasage) dépend de la fréquence et de la polarisation de l'onde émise.

10-c) - Réflexion au niveau du sol

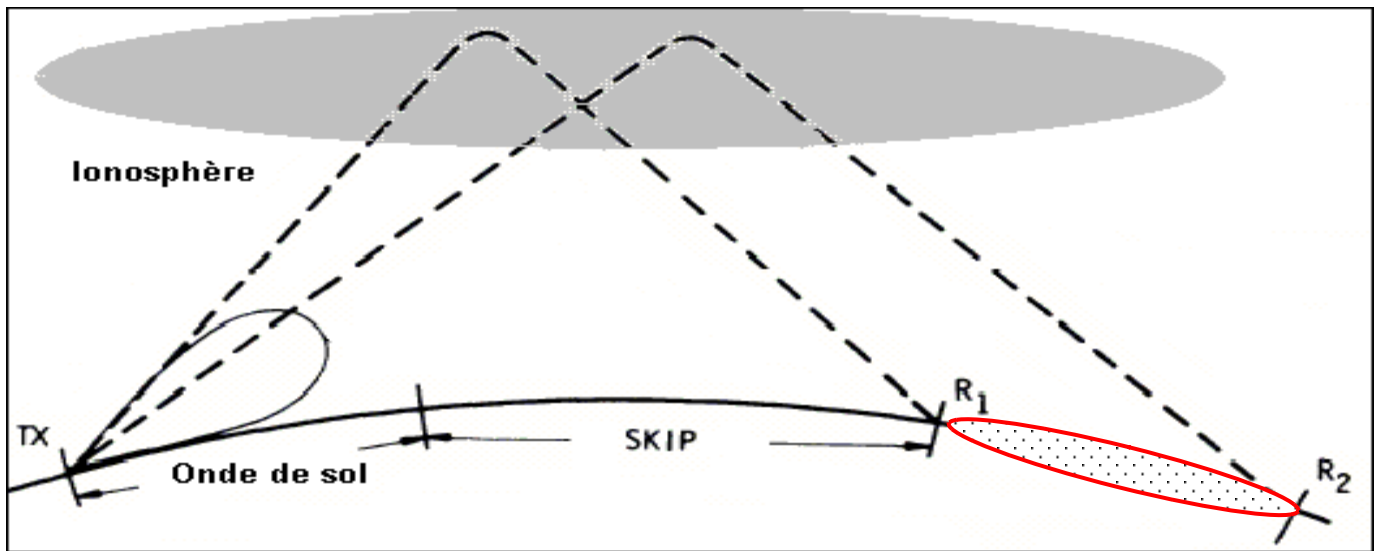
Le rayonnement d'une antenne est la combinaison du rayonnement incident et du rayonnement réfléchi.

L'intérêt est d'avoir un plan de sol le plus conducteur possible, qui favorise le rayonnement réfléchi important.



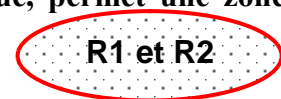
Cette vue illustre l'importance déterminante de la qualité du sol sur l'efficacité du rayonnement d'une antenne verticale (notamment). Si le sol est mauvais conducteur, une partie de l'énergie est absorbée par le sol et transformée en chaleur et bien entendu, n'est pas réfléchi et ne concourt pas au rayonnement global. Une solution fréquemment adoptée consiste à introduire un plan de sol artificiel constitué d'un certain nombre de radars (en général 4, mais c'est très insuffisant, entre 48 et 128 est nettement préférable). Si ce n'est pas compliqué à faire, c'est en revanche un énorme travail de terrassier. F5MDB Walter, est un spécialiste de ce type de plan de sol d'une efficacité redoutable. L'antenne représentée ici est une GPA $\lambda/4$.

10-d) - notion d'onde de sol et du skip

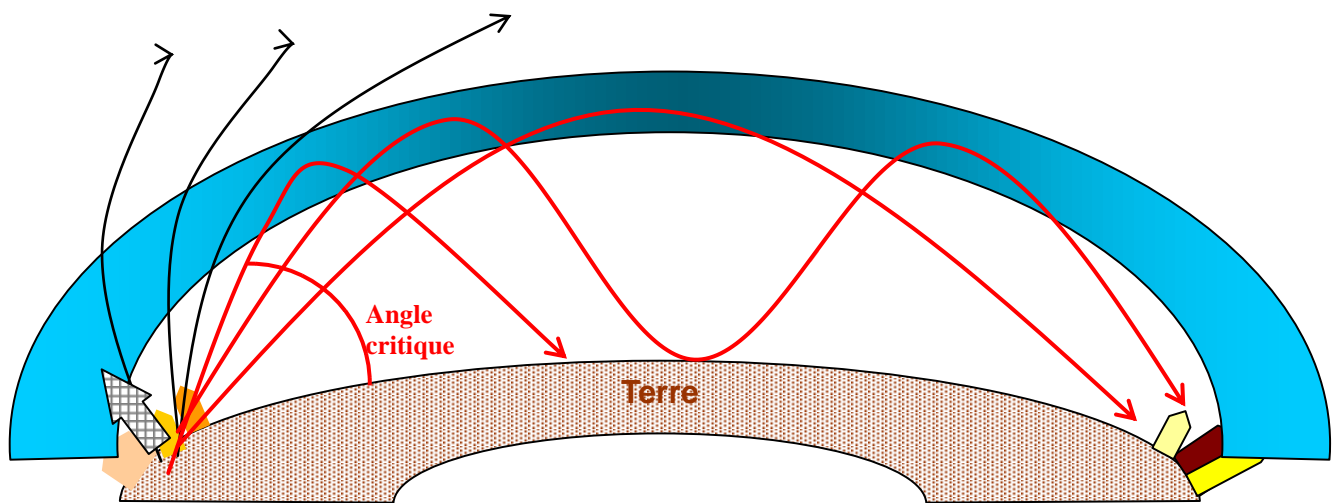


La zone d'onde de sol permet une réception qui s'atténue et disparaît. La propagation de l'onde de sol est directement fonction de la longueur d'onde. Sur 80m l'onde de sol est longue, sur 10 m très peu d'onde de sol.

La propagation par l'onde d'espace, ou par réflexion ionosphérique, permet une zone de réception parfois assez vaste est située entre



10-e) - Notion de l'angle critique



Paris

Bombay

A retenir : L'angle critique est l'angle maximum que forme l'onde et la terre et qui sera réfléchi par l'ionosphère à la fréquence considérée. Elle dépend du diagramme de rayonnement verticale de l'antenne.

La fréquence critique est la fréquence limite au-dessus de laquelle aucune réflexion n'a plus lieu, l'onde traversant simplement la couche ce quelque soit l'angle de départ de l'antenne.

10-f) - Le niveau d'ionisation dans la couche F diminue la nuit.

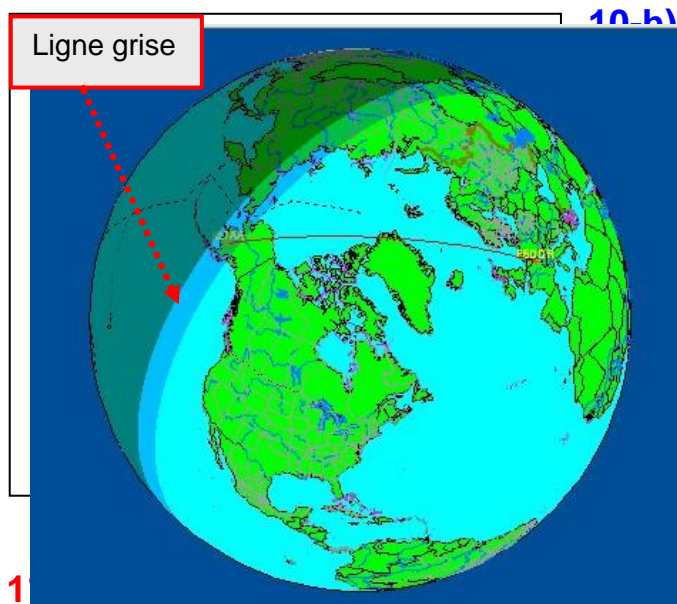
La F1 se recombine avec la F2 la nuit pour ne former qu'une couche « F ». La vitesse de reconstitution est très faible. Le fait que l'ionisation existe toujours pendant la nuit, la couche F peut encore être très intéressante pour les ondes radio.

Les variations solaires affectent l'ionosphère, l'élément important est le nombre de tâches solaires visibles. Les tâches apparaissent à la surface du soleil comme des zones sombres. Les tâches affectent l'ionosphère parce que les zones autour de ces tâches émettent de grandes quantités de rayonnement ultraviolet, principal élément d'ionisation.

A retenir : Forte activité solaire → tâches solaires importantes → meilleure ionisation → bonne propagation.

10-g) - Notion de LONG PATH (LP) et de SHORT PATH (SP)

Certaines contrées lointaines peuvent être contactées en faisant le grand tour (Long Path) du globe plutôt qu'en direct (Short Path). Cette situation est présente selon la saison qui conditionne des ouvertures de propagation et bien sûr en fonction de l'activité solaire. Par exemple, sur 20 mètres en ce moment, Tahiti passe uniquement l'après midi via le Long Path. Au printemps, Tahiti passera le matin via le Short Path. Lorsque vous entendez une station lointaine essayez toujours les 2 chemins, vous risquez d'avoir de belles surprises.



10-h) - La Ligne Grise (gray line) La ligne grise est une étroite zone de démarcation entre jour et nuit. C'est une zone qui définit la transition progressive du jour et de la nuit. Vous pourrez profiter de ce court moment où la GRAY LINE pour contacter les stations situées par cette ligne de démarcation en grand DX, 30m, et 60m.

11

11-a) - PIDB (Perturbation Ionosphérique à Début Brusque) :

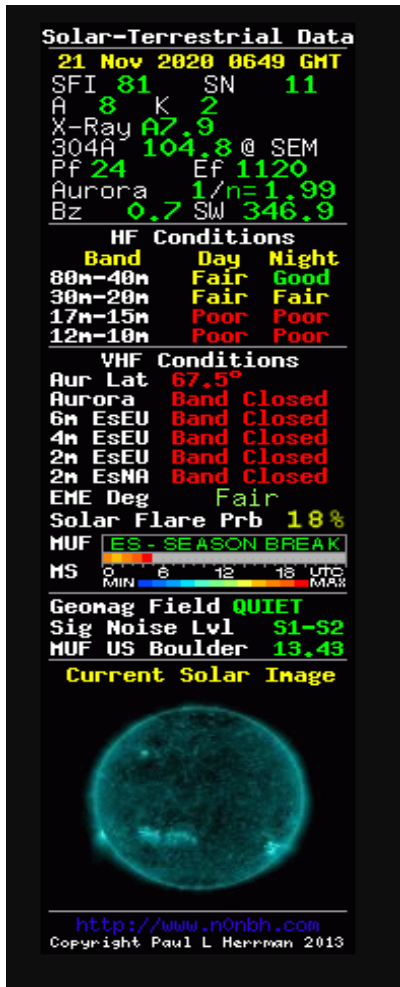
Elle est provoquée par une très forte éruption solaire (éruption chromosphérique). L'arrivée de l'onde de choc provoque une diminution de densité de la couche F aux latitudes élevées et une augmentation aux faibles latitudes.

11-b) - PCA (absorption dans la calotte polaire). Elle est le résultat de l'arrivée de protons solaires qui sont précipités dans les hautes latitudes, là où se referment les lignes de force du champ magnétique terrestre.

11-c) – Absorption dans la couche D. Du fait de l'augmentation de son ionisation, elle atténue les ondes HF, cela peut empêcher toute réflexion sur la ionosphère (black out radio).

A retenir : Une PIDB provoque une diminution de densité de la couche « F » qui affaibli la réflexion. La couche « D » affaiblit les ondes qui la traversent, rarement jusqu'au black-out.

12° - Les indices solaires et leurs conséquences sur la couche « F » surtout la « F2 »



Source Michel, F5LRL

Pour nous radioamateurs, le soleil a un rôle prépondérant sur la propagation et la qualité des ondes radioélectriques. La surveillance de l'activité solaire et les relevés des scientifiques, permettent de prévoir cette propagation.

En période de forte activité solaire, la fréquence maximale utilisable (FMU) augmente et autorise des liaisons à grande distance via les bandes hautes (24 MHz, 28 MHz et 50 MHz) alors qu'en période de faible activité, seules les bandes basses (1,8 MHz, 3,6 MHz et 7 MHz) sont intéressantes en DX.

Pour réaliser des communications longues distances (DX), il est donc utile de connaître l'état de la propagation. Cette propagation relève de l'étude de mesures exercées par des scientifiques sur le flux solaire et l'activité géomagnétique autour de la terre et dont les résultats sont édités sous forme d'indices. Les indices sont consultables sur différents sites ou applications, notamment :

<https://www.solarham.net/> <https://www.hamqsl.com/solar.html>

L'indice SFI ou " indice du flux solaire " témoigne de l'activité du soleil vers la terre. Plus le flux solaire est élevé, plus la couche ionosphérique renverra par réflexion les ondes HF.

Les valeurs SFI varient de 50 à 300 avec lesquelles on peut déterminer les états de propagation en fonction de la valeur même de la SFI :

- < 50 mauvaise
- > 50 à 100 < moyenne
- > 100 à 150 < bonne
- > 150 excellente (conditions idéales de propagation HF)

L'indice SN aussi SSN concerne l'activité dense autour des tâches solaires.

Cette activité qui a pour effet de ioniser les couches de l'ionosphère avec pour conséquence une meilleure réflexion aux fréquences élevées.

Cet indice varie de 0 à 300. Nous venons de vivre une période où le SSN était entre 0 et 10, (très très faible).

- De 0 à 10 → mauvais → on favorisera le trafic DX bandes basses 80m, 40m, et 30m.
- > 10 à 50 < → moyen → on surveillera la montée du SN pour guetter le DX entre le 30m et le 15m
- > 80 à 120 < → bon → très bonnes ouvertures du 30 au 10m
- > 120 → excellent → excellentes ouvertures sur toutes les bandes hautes y compris le 6m.

Pour Information

Les indices K et A.

Ces indices servent à quantifier l'activité géomagnétique de la terre. Une activité géomagnétique intense, caractérisée par un indice élevé, entraîne indubitablement de piètres conditions radio HF allant jusqu'au silence radio nommé aussi " black out " dû à l'atténuation des ondes radioélectriques dans la couche « D ».

L'indice K détermine une activité géomagnétique relevée toutes les 3 heures. Il représente donc l'activité des dernières heures, il indique une tendance à court terme. Son échelle varie de 0 à 9 et s'interprète de la manière suivante :

- Entre 0 et 3 Conditions meilleures, le champ magnétique est stable, le bruit de bande est faible, bonne propagation.
- Entre 3 et 5 Conditions moyennes, activité magnétique faible, la bande HF est affectée par du bruit de bande, la propagation est un peu dégradée.
- Entre 5 et 9 Conditions mauvaises, forte activité magnétique ou orage magnétique, bruit de bande important, mauvaise propagation.

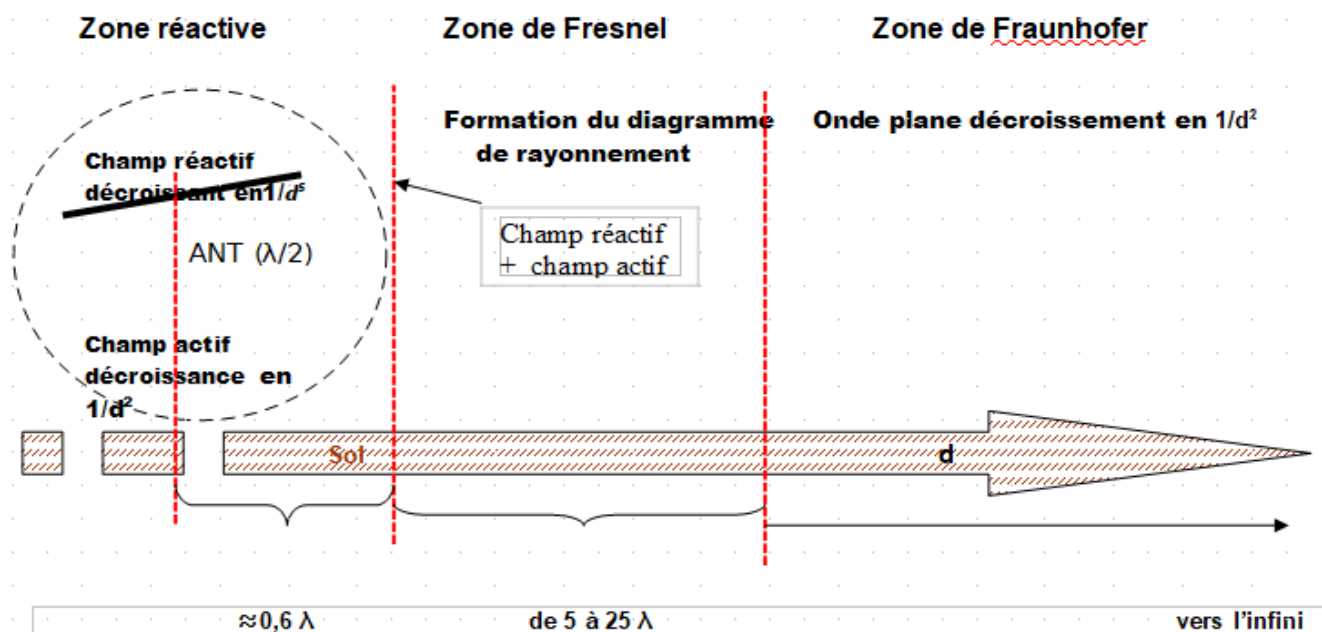
L'indice A détermine l'activité géomagnétique moyenne sur 24 heures. Il indique une tendance à moyen terme. Son échelle est comprise entre 0 et 40 et s'interprète de la manière suivante :

- Entre 0 et 10 Conditions excellentes de propagation et bruit de bande faible.
- Entre 10 et 20 Conditions moyennes de propagation, le bruit de bande augmente.
- Entre 20 et 40 Conditions médiocres de propagation avec un bruit de bande élevé.

A retenir , les meilleures conditions DX HF sont obtenues dès que l'indice du flux solaire est au-dessus de 120 pendant deux ou trois jours consécutifs, un indice SN supérieur à 150 est excellent, tout cela avec des indices « K » faibles . « K » inférieur à 3 et « A » inférieur à 10.

13° - Le rayonnement depuis l'antenne jusqu'au correspondant

13-a) – La propagation de l'onde commence à l'antenne



A retenir

L'antenne doit être suffisamment haute au dessus d'un sol réel pour éviter les pertes par pénétration du champ électromagnétique dans le sol.

13-b) - Importance de l'angle de départ d'une antenne (angle critique)

Angle de départ de l'antenne	via couche E	via couche F
1°	2200 km	4000 km (Skip maximum)
5°	1500 km	3000 km
10°	1000 km	2300 km
20°	500 km	1500 km
30°	350 km	1000 km
40°	250 km	700 km
50°	180 km	500 km
60°	120 km	350 km

Comme vous pouvez le constater, pour le DX, il est extrêmement important de travailler sur l'angle de départ du rayonnement de votre antenne. Plus l'angle sera bas sur l'horizon, plus le trajet vers le correspondant sera court, moins vous aurez d'affaiblissement du signal utile sur trajet de propagation.

A retenir : Plus l'angle de départ de l'antenne est faible plus on favorisera le DX. L'angle critique devra être le plus proche de 0° pour favoriser le grand DX.

13-c) - Formation du diagramme de rayonnement (source Wikipedia)

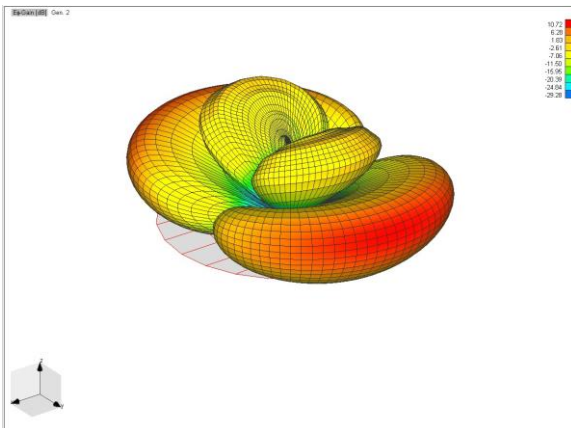
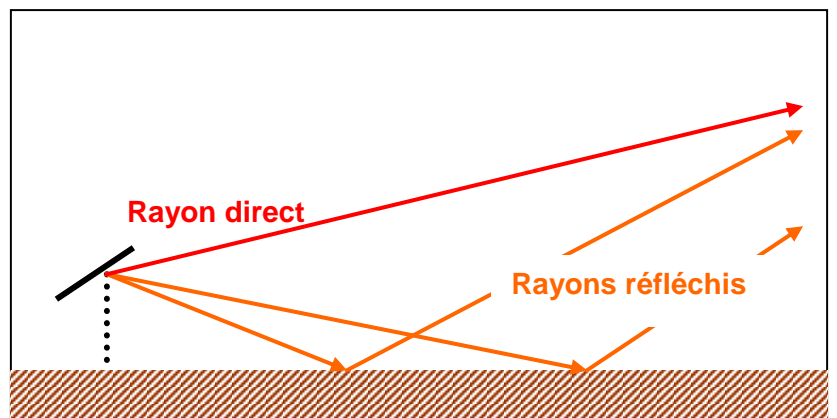


Diagramme de rayonnement du dipôle

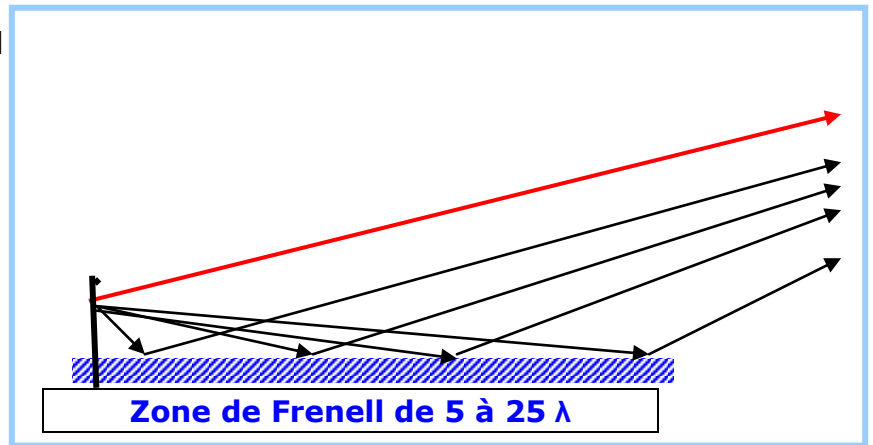


Formation de l'onde utile

Avec une antenne horizontale placée à 1λ et un sol de très bonne qualité, le coefficient de réflexion proche de 1 et le déphasage est proche de 180° . Les rayons (incident et réfléchi) se combinent et le champ électrique peut être multiplié (théoriquement) par deux, soit un gain de 3 dB.

Le sol doit être plan et dégagé sur une distance égale au point le plus éloigné de la première zone de Fresnel (la zone de Fresnel dessine un ellipsoïde autour du point de réflexion).

Ce dessin montre la zone de Fresnel pour une installation d'antenne décimétrique.



Environnement et gain de réflexion

Les gains de réflexions valent pour un terrain dégagé, genre prairie. Ils diminuent si l'onde réfléchie rencontre des obstacles, forêt, arbres touffus, habitations, pylônes, ligne électrique importante...

La rugosité du sol (ondulations, collines), la végétation et les constructions provoquent une diffusion de l'onde réfléchie, ce qui revient à diminuer plus ou moins fortement le coefficient de réflexion au sol.

Le résultat d'un mauvais environnement est une diminution du gain pouvant atteindre -6 dB, voir -12dB ou plus s'il s'agit d'une forêt de conifères denses.

Quel que soit l'antenne, **son rayon direct doit être dégagé**, ce qui oblige à élever les antennes, même verticales, dans un environnement urbain, ou forestier.

Avec une **antenne verticale** en mer ou à proximité immédiate (lagon ou station maritime mobile), le sol est d'excellente qualité. On considère un rendement antenne de 120% et coefficient de réflexion atteignant +8dB. En bord de mer, on favorisera les antennes verticales à gain type VDA (Vertical Dipôle Array) , excellentes pour le DX,

A retenir : La hauteur idéale d'un dipôle est d'environ 1 λ au-dessus du sol, le sol immédiat doit être bien dégagé pour le rayonnement direct, et la zone de Fresnel la mieux dégagée possible pour optimiser le rayonnement réfléchi. La qualité du plan de sol est primordiale pour un bon départ du rayonnement des antenne. L'endroit idéal étant en mer...

13-d) - Absorption ionosphérique

Lors de la traversée de l'onde dans l'ionosphère, la trajectoire des électrons mis en oscillation va être perturbée par des collisions avec des particules ionisées ou neutres.

Une partie de l'énergie cinétique des particules mises en mouvement par l'onde va se dissiper, et l'onde va subir une atténuation. Ce processus est appelé "absorption ionosphérique".

Elle est proportionnelle à la densité ionique et à la fréquence des collisions entre ions et particules neutres. Elle est maximum dans la partie inférieure de l'ionosphère. La majeure partie de l'absorption se produit dans la couche D, c'est la raison de sa forte absorption de nos ondes.

13-e) - Comportement de l'ionosphère en fonction des bandes de Fréquences

ELF-ULF (0,3 à 3 kHz) : Les ondes se réfléchissent sur les couches D le jour et E la nuit. L'ionosphère et le sol forment une sorte de guide d'onde qui permet des liaisons à grande distance avec de fortes puissances.

VLf-LF (3 à 300 kHz) : Absorption quasi permanente

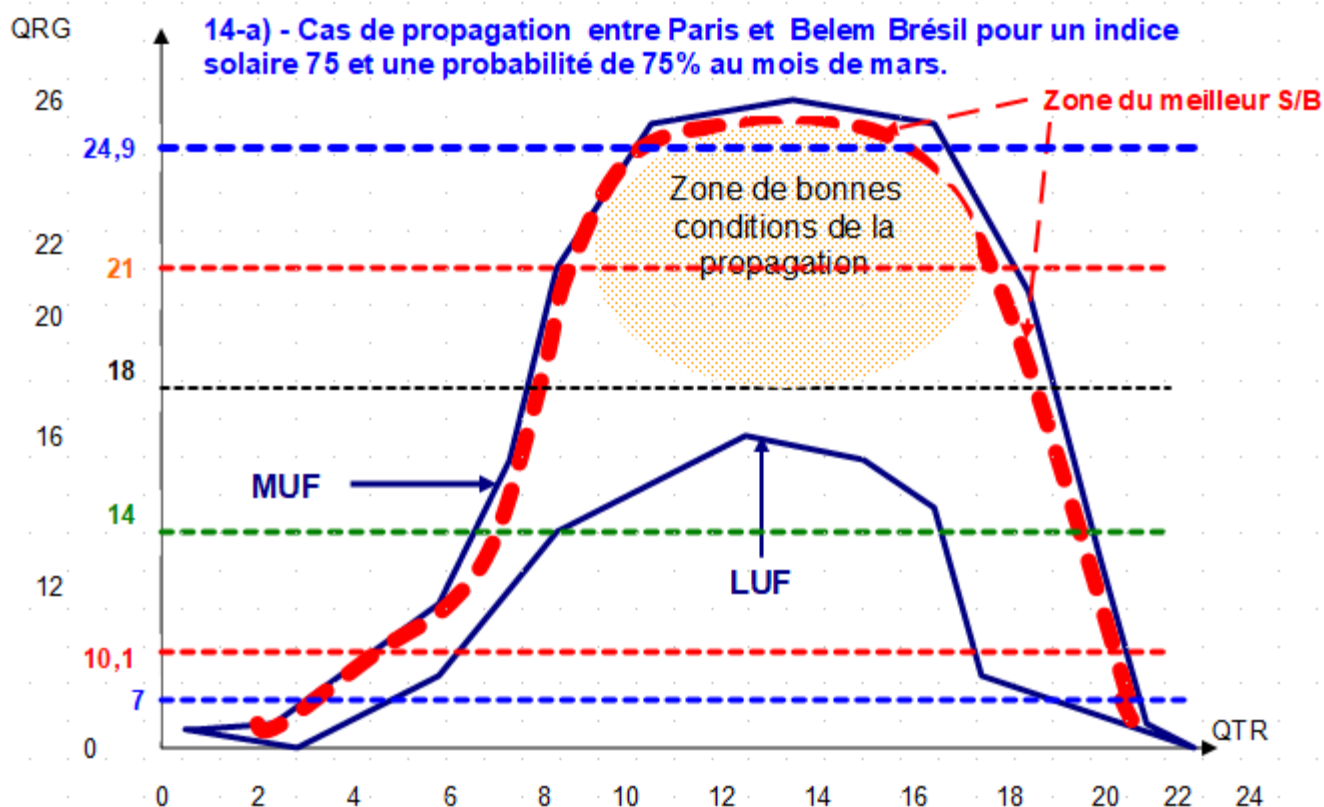
MF (0,3 à 3 MHz) : De jour, les ondes sont absorbées par la couche D. La nuit elles sont réfléchies par la couche E résiduelle.

HF (3 à 30 MHz) : L'ionosphère est largement mise à contribution pour toute la bande.

VHF (30 à 300 MHz) : Réflexions sporadiques jusque 144MHz, très rarement au-dessus

UHF et au dessus : Pas de réflexion.

14° - La L.U.F. (Fréquence Inférieure Utilisable), la M.U.F. (Fréquence Maximum Utilisable)



Du 40m au 20m, les ouvertures seront courtes le matin et plus longues le soir.
La 17m sera ouvert en journée avec des signaux moyens et Rapport S/B moyen. (QSB + Bruit).
Le 15m sera bien ouvert sur une longue période avec de bons signaux stables.
Le 12m assez longuement ouvert avec d'excellents signaux car il tangente les 95% de la MUF.
Pas d'ouverture sur 10m et au delà.

14-b) - En un lieu de l'ionosphère, une réflexion se fera pour une fréquence inférieure à la MUF

La MUF (Maximum User Frequency) appelée aussi **fréquence critique**, est fonction de la densité maxi de l'ionosphère qui dépend principalement :

- Du lieu géographique
- De l'heure locale
- De la saison

- De l'activité solaire (Nombre de Wolf)

L'angle à l'entrée de l'ionosphère dépend :

- De l'angle de départ de l'antenne
- De la distance du saut
- Et de la hauteur de réflexion

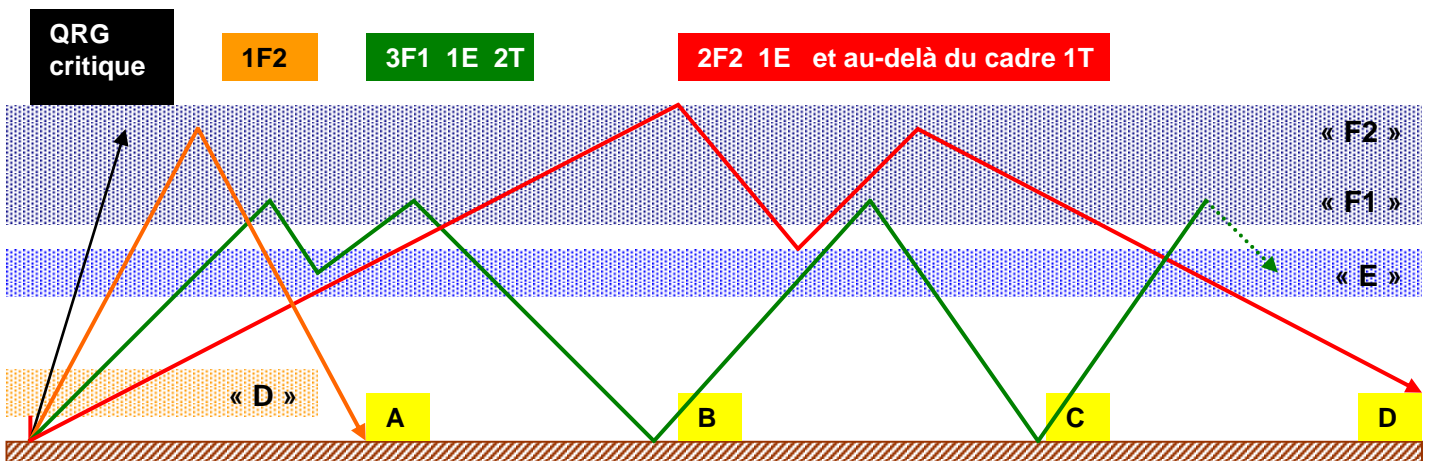
Mais elle devra toujours être supérieure à la LUF du circuit. Sur une fréquence donnée, lorsque la MUF rejoint la LUF, c'est l'extinction de la propagation sur cette fréquence.

La LUF (Lower User Frequency) est fonction de l'absorption ionosphérique :

- elle est fonction de la durée du trajet dans l'ionosphère (distance parcourue) et du nombre de couches traversées
- et de l'affaiblissement maximum tolérable et du Rapport S/B à la réception.
- En augmentant de manière importante la LUF, on peut encore trafiquer dans des conditions acceptables.

A retenir : Si on tangente la LUF, le bruit sera fort, nous aurons du QSB lent, jusqu'à l'évanouissement du signal. Au centre se trouve « la zone de confort de propagation ». Plus on tangente la MUF, plus le signal est fort, avec un excellent rapport S/B. L'inconvénient sera de changer de fréquence souvent pour suivre la MUF.

14-c) - Divers modes de propagation à une ou plusieurs réflexion



- A** 1 seul skip avec une réflexion couche "F" forts signaux. **On parle de trajet "1F2"**
- B** 1er skip avec une réflexion couche F1, une réflexion couche E, une réflexion couche F1. **Trajet "2F1" "1E"**
- C** le skip, avec le 1er skip point B + une réflexion sur la Terre "T" + une réflexion couche "F", ensuite le signal se perd. **Trajet "3F1" "1E"**
- D** 1er skip avec 2 réflexions couche F2 et une réflexion couche E, avec possiblement plus loin plusieurs autres rebonds jusqu'à extinction du signal. **Trajet visible sur le dessin "2F2" "1E"**.

A retenir : pour avoir propagation ionosphérique, la fréquence utile doit être plus élevée que la fréquence critique.

Pour favoriser un skip court, il faut un angle d'élévation important au départ de l'émission comme à l'arrivée de la réception.

Inversement pour un skip long, l'angle d'élévation de part et d'autre sera plus faible.

Tout au long du trajet, le signal s'affaiblit, surtout dans les phase de rebonds, il disparaît. comme le rayon vert.

Imaginons un signal : départ 0°, il rebondira sur l'ionosphère à 2000km, et touchera la terre à 4000km. Si ce signal bénéficie de rebonds multiples inter-couches, il pourrait faire 10.000km avant de retomber sur terre, son atténuation sur la trajet sera faible.

A est appelé simple trajet. **B, C,** sont appelés multi trajets.

Annexes pour information (sauf aurores boréales)

Pertes dues à l'ionosphère

- Il dépend du lieu géographique de l'entrée dans l'ionosphère, de l'angle que fait la direction de propagation avec le champ magnétique terrestre, et de la polarisation de l'antenne émission.
- L'amplitude de l'onde est proportionnelle à la densité résiduelle de l'atmosphère.
- L'amplitude de l'onde est proportionnelle à la durée du trajet dans l'ionosphère.

Pertes dues aux réflexions par le sol

- L'onde qui se réfléchit sur le sol s'affaiblit.
- Si la réflexion a lieu sur la mer la perte est très faible avec un coefficient de réflexion environ à 1.
- Si la réflexion a lieu sur le sol, les pertes seront d'autant plus grandes que le coefficient de réflexion sera faible (désert).

Bruits à la réception

On peut les classer en deux catégories :

1. Bruits objectifs : bruits industriels (parasites), bruits atmosphériques (QRN), et le bruit galactique.
2. Les bruits subjectifs avec les brouillages radios (QRM).

Les bruits atmosphériques proviennent surtout des régions tropicales (orages).

La majorité du bruit industriel est produit par les grandes métropoles, les zones industrielles, les lignes à haute tension, les réseau locaux. Il est aussi irrégulièrement réparti en altitude (plus faible près du sol).

Bruit galactique : il peut être important dans le haut de la bande HF, surtout lors des minima des cycles solaires.

Le bruit galactique est le bruit radioélectrique en provenance des étoiles de notre galaxie. Il est maximum venant de la direction de la voie lactée.

Aurore boréale

Afflux de particules chargées éjectées par le Soleil lors d'une éruption chromosphérique ou lors d'un sursaut solaire important, ces particules viennent bousculer le bouclier de la magnétosphère. Elles sont électrisées à haute énergie et peuvent alors être captées et canalisées par les lignes du champ magnétique terrestre côté nuit de la magnétosphère (la queue) et aboutir dans les *cornets polaires*. Ces particules (électrons et parfois protons) excitent ou ionisent les atomes de l'ionosphère de 60 km à plusieurs centaines de kilomètres. L'ionisation provoquée par cette concentration de charges se traduit par des nuages ionisés réfléchissant les ondes radio et par l'émission de lumière.

A retenir : Des phénomènes de propagation intéressants et instables permettent d'excellente liaisons. Le signal reçu est très déformé avec un effet doppler rendant difficile l'écoute. Le son sourd, grave un peu gutturale. Une trop forte aurore boréale peut bloquer tous les signaux HF dans la zone « D », empêchant toute propagation durant de longues heures. C'est le black out total.

