

## Chapitre 7 : La propagation

par Pierre Cornélis, ON7PC rue J. Ballings, 88 1140 Bruxelles

*Depuis toujours, les radioamateurs ont essayé de comprendre quels étaient différents mécanismes qui pouvaient influencer la propagation des ondes.*

*D'une façon générale on pourrait dire que la propagation c'est tout ce qu'il y a entre l'antenne d'émission et l'antenne de réception...*

*Très vite les radioamateurs se sont aperçus que la façon dont les ondes se propagent dépend de la bande de fréquence, ainsi les phénomènes en HF sont totalement différents de ceux en VHF ou en UHF. S'agissant des bandes décimétriques, on a remarqué que la hauteur de l'antenne au-dessus du sol, le type d'antenne utilisée, la fréquence utilisée étaient déterminants. Mais d'autres facteurs relatifs à la nature du terrain, aux conditions météorologiques, ainsi que la **hauteur** et la **densité** des couches de l'ionosphère peuvent aussi influencer la propagation de ces ondes.*

*Les phénomènes sont donc complexes et compliqués. Si on résume parfois le chapitre propagation et à quelques notions élémentaires, on sait aussi que le sujet n'est pas aussi simple. Si la propagation était bonne hier et aujourd'hui, on sait très bien qu'on ne peut rien prévoir pour demain et si on se risque à faire une prévision ce sera toujours avec x % de chance. Par ailleurs des études ont été menées par les scientifiques, et en abordant le sujet on remarque d'emblée que la propagation est liée à une multitude de phénomènes physiques et pour chacun d'eux il existe tout au plus un "modèle" mathématique (ou physique) qui n'est qu'une ébauche. Quoiqu'il en soit nous essayerons de "faire le tour de la question", sachant bien que la réalité est bien plus compliquée.*

*Une fois de plus ce chapitre est décrit dans l'esprit "HAREC +", c.-à-d. que vous trouverez toute la matière de l'examen HAREC , "+" une série d'informations que nous pensons être utiles ou indispensables au radioamateur.*

## 7.1. Eléments fondamentaux concernant les ondes électromagnétiques<sup>1</sup>

Tout d'abord avant de parler de "la propagation des ondes ", il faudrait peut être parler des **ondes** elles-mêmes. Dans nos cours de physique, nous avons rencontré

- les ondes mécaniques, rappelons nous de la corde que l'on agite, la pierre jetée dans l'eau et qui crée une onde à la surface de l'eau,
- les ondes acoustiques, rappelons nous des ondes créées par un diapason, un tuyau d'orgue ou une corde de violon...

Mais ici nous aborderons les ondes électromagnétiques.

### 7.1.1. Qu'est ce qu'une onde électromagnétique ?

Excellente question à laquelle on pourrait répondre "Une onde électromagnétique, c'est de l'énergie qui voyage...". Mais une façon d'aborder le sujet est de refaire les expériences de Hertz.

### 7.1.2. Les expériences de Hertz<sup>2</sup>

C'est Heinrich Hertz (1857-1894) physicien allemand qui a démontré l'existence des ondes électromagnétiques. On peut refaire les expériences de Hertz mais avec du matériel plus moderne, ou plus précisément avec des appareils de radioamateur<sup>3</sup>.

#### 7.1.2.1. L'existence du champ électromagnétique

On utilise une antenne et un générateur de haute fréquence. A une certaine distance de l'antenne, on place un second dipôle avec une petite lampe au centre (figure a). On constate que la lampe s'éclaire ! Et pourtant il n'y a pas de connexion électrique, oh merveille ! Comment expliquer cela ?

Si la lampe s'éclaire c'est qu'il y a un courant qui traverse la lampe, c'est donc qu'il y a des électrons en mouvements.

Ces électrons ne peuvent circuler que le long du dipôle. Et pourtant il n'y a pas de générateur qui puisse mettre ces électrons en mouvements !

Il y a donc **un champ électrique induit dans le dipôle**, et celui-ci met en mouvement des électrons et ces électrons à leur tour font briller la lampe.

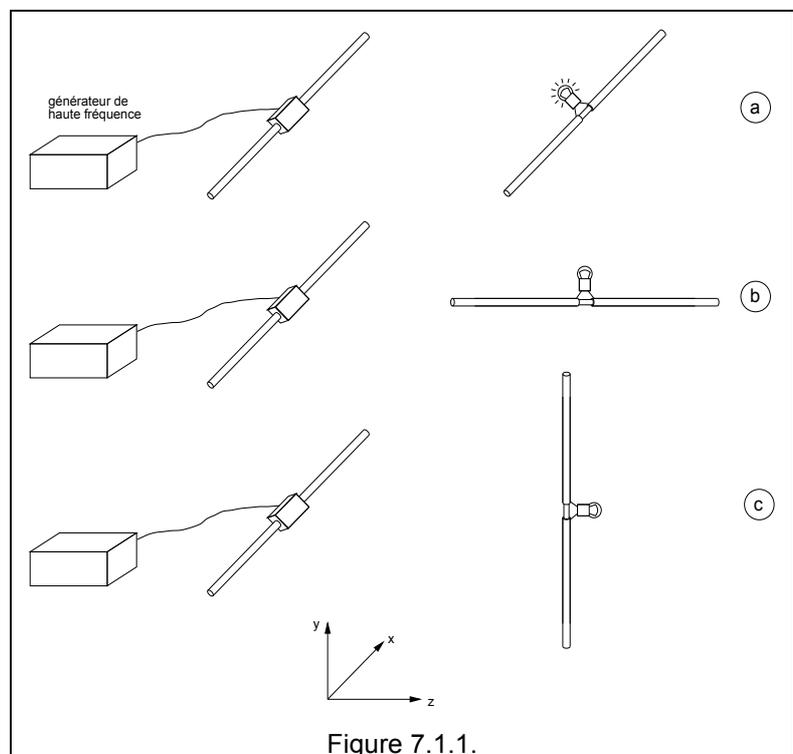


Figure 7.1.1.

<sup>1</sup> Bien que ce chapitre ne fasse pas partie de la matière à connaître pour l'examen HAREC, il nous a semblé intéressant de commencer ce chapitre par une approche expérimentale.

<sup>2</sup> Ce paragraphe est un intermède qui n'est pas au programme HAREC.

<sup>3</sup> Voir Annexe 1.

Si maintenant on met le dipôle avec l'ampoule perpendiculairement au dipôle d'émission (figure b) : l'ampoule ne s'éclaire pas ! Et si on met le dipôle dans le 3ème axe (figure c), perpendiculaire aux deux autres : l'ampoule ne s'éclaire pas. Le champ électrique est donc une grandeur vectorielle et son sens est parallèle au dipôle d'émission.

Le dipôle avec la lampe constituent un détecteur de champ électrique. On pourrait faire un détecteur de champ magnétique en faisant une boucle fermée par une ampoule électrique.

On refait la même expérience (figure a). Lorsque la boucle est perpendiculaire au dipôle la lampe s'éclaire, dans les deux autres axes la lampe reste éteinte.

Il y a donc aussi un champ magnétique est perpendiculaire au dipôle et donc ce champ est aussi une grandeur vectorielle !

Nous sommes ici en présence **d'une onde électrique et d'une onde magnétique** qui forment une onde électromagnétique.

Peut-on dissocier les phénomènes ?

Grâce au montage décrit, on peut encore faire quelques expériences très intéressantes :

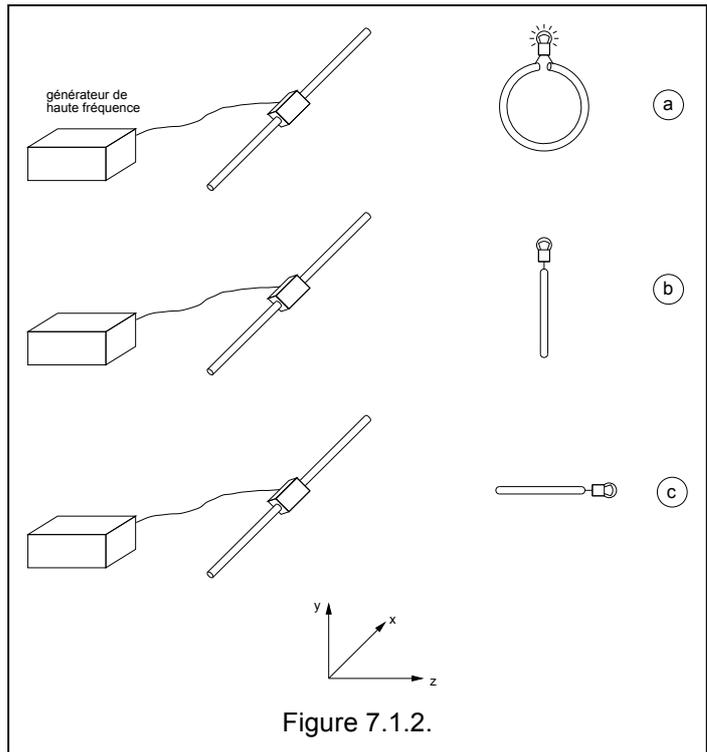


Figure 7.1.2.

### 7.1.2.2. Certains matériaux laissent passer les ondes électromagnétiques et d'autres pas ...

Si on utilise le détecteur de champ électrique par exemple, et si on intercale une tôle en aluminium (1 m x 0,5 m) la lampe s'éteint. Le même phénomène se produit avec une tôle en fer, et aussi avec toutes les tôles métalliques. Ce qui veut dire qu'une plaque métallique ne laisse pas passer les ondes électromagnétiques.

Si on fait la même expérience avec une plaque de bois ou de plastic on constate que les ondes ne sont pas arrêtées par ces matériaux. Il y a donc deux types de matériaux : ceux qui laissent passer les ondes électromagnétiques et ceux qui ne les laissent pas passer.

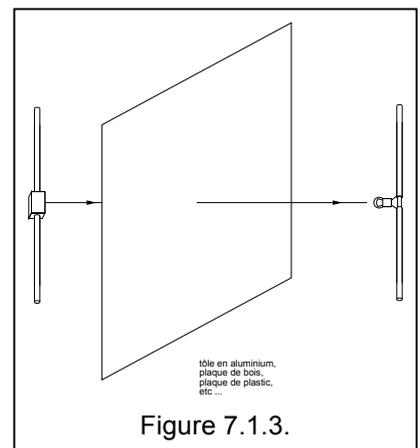
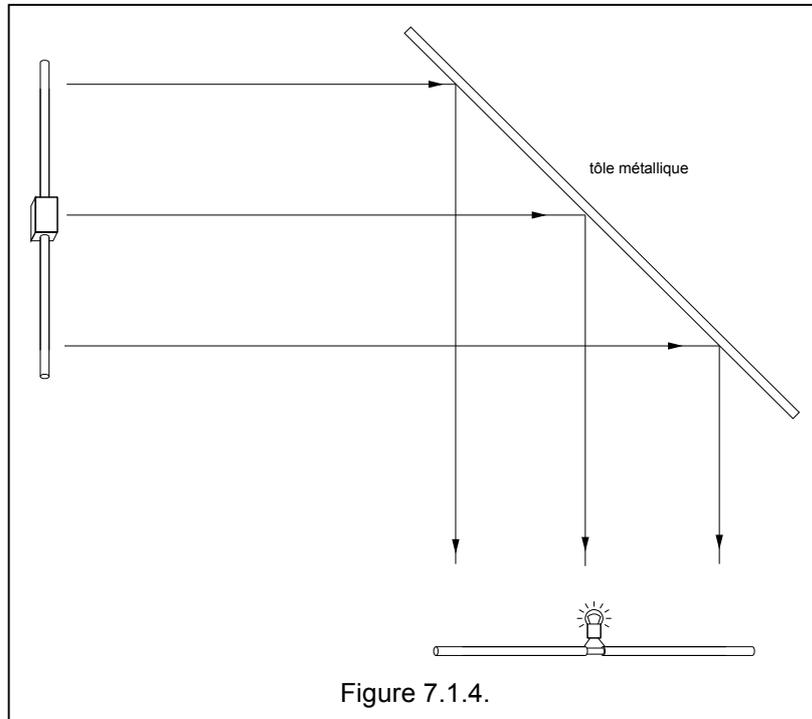


Figure 7.1.3.

**7.1.2.3. Le phénomène de réflexion**

Si on met une antenne et un dipôle détecteur de champ électrique à 90°, la lampe est éteinte. Mais si on place une plaque métallique obliquement à l'antenne, on constate que la lampe s'éclaire à nouveau si le détecteur de champ électrique se trouve dans une position particulière. La plaque réfléchit donc les ondes électromagnétiques, tout comme un miroir réfléchit les ondes lumineuses.



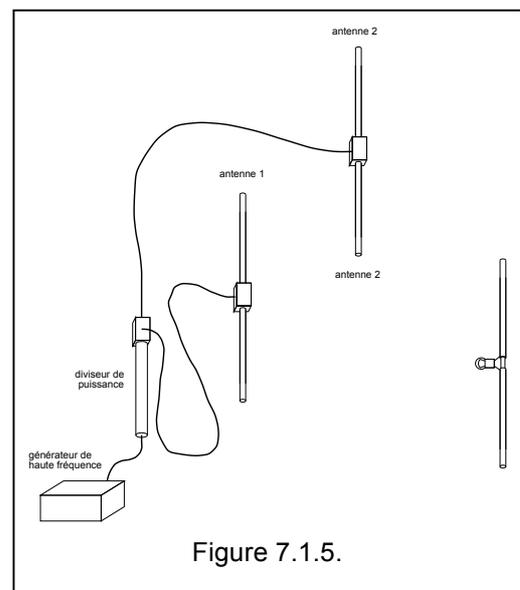
**7.1.2.4. Le phénomène d'interférence**

Le dispositif peut être légèrement modifié de façon à produire deux sources d'ondes électromagnétiques pour cela le signal est séparé en deux, grâce à un coupleur d'antenne. Pour cette expérience il est plus facile également de disposer les dipôles verticalement.

En promenant un détecteur on remarque des endroits où la lampe éclaire plus fort et d'autres endroits où elle est éteinte.

Ceci s'explique par la combinaison des champs, à certains endroits les champs produits par les antennes 1 et 2 se renforcent à d'autres ils s'annulent.

On peut aussi repérer les distances où la lampe est éteinte. Cette distance est égale à la longueur d'onde.



**7.1.2.5. La longueur d'onde**

Le dispositif suivant est différent : on utilise un générateur de haute fréquence et une ligne de transmission.

En promenant une ampoule le long de cette ligne, on remarque qu'elle s'éclaire à certains endroits et est éteint à d'autres. On trouve donc des nœuds et des ventres de tension. La distance entre deux points où l'ampoule éclaire au maximum est égale à la longueur d'onde. On peut ainsi mesurer la longueur d'onde avec un mètre ruban.

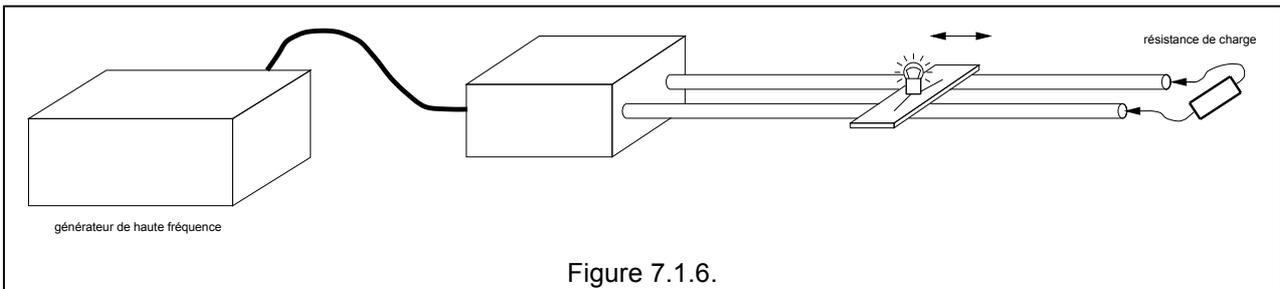


Figure 7.1.6.

Bien sûr cette méthode n'est pas très précise car on ne peut pas déterminer le maximum d'intensité qu'à 2 ou 3 mm près. Le résultat est le même entre les minimum d'éclairement.

**7.1.2.6. La vitesse de la lumière**

En faisant le produit de la longueur d'onde et de la fréquence ( $c = \lambda f$ ) on obtient la célérité. Ici aussi, quoique la précision de la mesure soit assez grossière on obtient des résultats spectaculaires.

Et si on fait la même expérience avec d'autres fréquences, on constate ("oh merveille") que le produit est constant dont  $c = \lambda_1 f_1 = \lambda_2 f_2 = \lambda_3 f_3 = \lambda_n f_n$  etc ... La vitesse  $c$  est donc une constante.

**7.1.2.7. Les ondes stationnaires**

Dans le montage ci-dessus, on charge la ligne avec une résistance. Puis on promène un détecteur de tension électrique (notre ampoule) le long de la ligne. On constate que pour une "certaine" valeur de la résistance de charge il n'y a plus de maximums et des annulations ... On dit que la ligne est adaptée.

Lorsque la ligne est ouverte ou en court-circuit ou terminée par une résistance autre que celle obtenue ci-dessus, il y a des maxima et des minima. On dit que la ligne est désadaptée et qu'il y a un taux d'ondes stationnaires.

**7.1.2.8. La polarisation des ondes électromagnétiques**

On reprend notre premier montage avec le dipôle et le détecteur de champ électrique. On utilise ensuite un support en bois qui contient plusieurs tubes de cuivre.

Selon la position des tubes de cuivres (position verticale ou horizontale), le détecteur de champ électrique s'allumera ou non. On reproduit exactement le même phénomène que celui produit par un verre polarisé en optique.

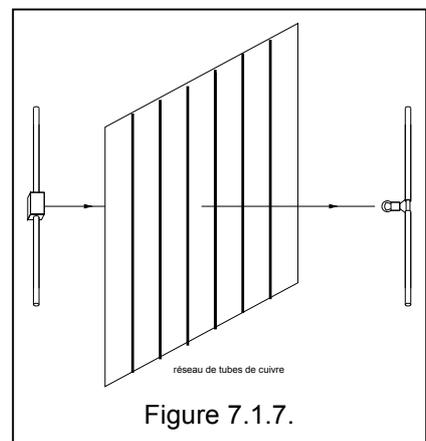


Figure 7.1.7.

### **7.1.3. Le spectre des ondes électromagnétiques**

La "radio" appartient à un ensemble de rayonnements électromagnétiques, cet ensemble comporte également les infrarouges, la lumière visible, les ultraviolets et les rayons X

rayon-X	$3 \times 10^5$ THz	10 Å et moins
ultraviolet	800 THz à $3 \times 10^5$ THz	4000 Å à 10 Å
lumière visible	400 à 800 THz	8.000 à 4000 Å
infrarouge	300 GHz à 400 THz	1 mm à 0,0008 mm
ondes radio	10 kHz à 300 GHz	30.000 km à 1 mm

On sait qu'un Hertz c'est un cycle par seconde<sup>4</sup>.

<b>1 Hertz (Hz) = 1 cycle par seconde (c/s)</b>
---

mais nous avons aussi des multiples:

$$1 \text{ kiloHertz} = 1 \text{ kilocycles par seconde}$$

$$1 \text{ MégaHertz} = 1 \text{ Mégacycles par seconde}$$

On sait aussi que la distribution de courant domestique et industriel est à 50 Hz et que nos petits émetteurs portables fonctionnent dans la bande des 144-146 MHz, mais 1 Tera Hertz est quelque chose de gigantesque en effet  $1 \text{ THz} = 1\,000 \text{ GHz} = 1\,000\,000\,000\,000 \text{ Hz}$  ! De même pour les unités de longueurs d'onde le mètre et le millimètre tout le monde sait ce que c'est, mais l'Å c'est une mesure que nous n'avons pas l'habitude de manipuler tellement c'est petit ici aussi pour rappel  $1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$  !

Une onde électromagnétique résulte de l'interaction d'un champ électromagnétique et d'un champ électrique qui sont orthogonaux.

### **7.1.4. Polarisation des ondes**

Par polarisation d'une onde on entend le sens du champ électrique, celui-ci peut être vertical ou horizontal, on parlera de

- la **polarisation verticale** si le sens du champ électrique est vertical.
- la **polarisation horizontale** si le sens du champ électrique est horizontal.

Dans ces cas on dira aussi que l'onde a une polarisation linéaire. On obtient ces polarisations en plaçant simplement un dipôle verticalement ou horizontalement.

Mais le sens du champ électrique peut aussi varier de direction, on dit alors que la polarisation est circulaire et on considérera alors

- la polarisation en sens horlogique, ou de **polarisation circulaire droite**, ou dextrogyre ou de RHP ("Right Hand Polarisation"), ... lorsque le champ électrique tourne dans le sens horlogique ....et,
- la polarisation en sens antihorlogique, ou de **polarisation circulaire gauche**, ou lévogyre ou de LHP ("Left Hand Polarisation"), ... lorsque le champ électrique tourne dans le sens antihorlogique.

On obtient des ondes en polarisation circulaire à l'aide d'antennes hélicoïdales ou en montants 2 antennes perpendiculaires l'une à l'autre et en les alimentant au moyen d'un dispositif spécial

(Voir aussi le chapitre des antennes).

<sup>4</sup> Les "anciens" physiciens, électroniciens et bien sûr aussi les anciens radioamateurs parlent encore en "cycle par seconde" !

**7.1.5. Relation longueur d'onde - fréquence**

La fréquence  $f$  et la longueur d'onde  $\lambda$  sont liées par la relation

$$c = \lambda f = 300\,000\,000 \text{ m/s}$$

dans laquelle  $c$  est la vitesse de la lumière<sup>5</sup> et vaut **299.792.458 m/s** ou grosso modo 300.000.000 m/s,  $\lambda$  est la longueur d'onde en mètre et  $f$  est la fréquence en Hertz. Pratiquement cette formule peut être mise sous la forme

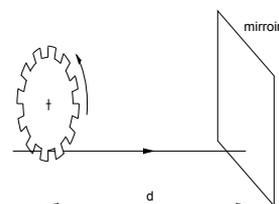
$$\lambda_{(m)} = 300 / f_{(MHz)}$$

C'est la formule fondamentale que tout radioamateur doit connaître par coeur et avec laquelle il doit pouvoir jongler. C'est pourquoi nous allons proposer quelques exercices.

Cachez la colonne de droite avec les solutions, faites l'exercice, puis comparez.

<u>Problème :</u>	<u>Solution :</u>
$f = 145 \text{ MHz} , \lambda = ?$	$\lambda = 2,068 \text{ m}$
$f = 435 \text{ MHz} , \lambda = ?$	$\lambda = 0,689 \text{ m}$
$f = 1296 \text{ MHz} , \lambda = ?$	$\lambda = 0,231 \text{ m}$
$f = 50 \text{ MHz} , \lambda = ?$	$\lambda = 6 \text{ m}$
$f = 621 \text{ kHz} , \lambda = ?$	$621 \text{ kHz} = 0,621 \text{ MHz}$ donc $\lambda = 484 \text{ m}$
$f = 88 \text{ MHz} , \lambda = ?$	$\lambda = 3,4 \text{ m}$
$f = 3,5 \text{ MHz} , \lambda = ?$	$\lambda = 85,7 \text{ m}$
$f = 7 \text{ MHz} , \lambda = ?$	$\lambda = 42,85 \text{ m}$
$f = 14 \text{ MHz} , \lambda = ?$	$\lambda = 21,42 \text{ m}$
$f = 21 \text{ MHz} , \lambda = ?$	$\lambda = 14,28 \text{ m}$
$f = 28 \text{ MHz} , \lambda = ?$	$\lambda = 10,71 \text{ m}$
$f = 12 \text{ GHz} , \lambda = ?$	$\lambda = 0,025 \text{ m} = 25 \text{ mm}$
$f = 40 \text{ GHz} , \lambda = ?$	$\lambda = 7,5 \text{ mm}$
$f = 50 \text{ Hz} , \lambda = ?$	$50 \text{ Hz} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ MHz}$ donc $\lambda = 6\,000\,000 \text{ m} = 6\,000 \text{ km}$
$f = 60 \text{ Hz} , \lambda = ?$	$\lambda = 5000 \text{ km}$
$f = 145 \text{ MHz} , \lambda = ?$	$\lambda = 2,068 \text{ m}$
$\lambda = 1800 \text{ m} , f = ?$	$f = 0,166 \text{ MHz}$ ou $166 \text{ kHz}$
$\lambda = 160 \text{ m} , f = ?$	$f = 1,875 \text{ MHz}$

<sup>5</sup> Fizeau a réalisé en 1848 une expérience pour déterminer la vitesse de la lumière : il a fait tourner une roue dentée devant un miroir et il a envoyé un pinceau de lumière dans l'espace d'une dent. Si on ne voit pas la lumière revenir, c'est que le temps de parcours de la lumière est égal au temps de la rotation d'une dent. Ainsi, si la roue à 360 dents, si la distance est de 7500 m et si on observe ce phénomène pour une vitesse de rotation de 27,5 tours/ sec, cela signifie que : si une dent occupe 1/720 ième de tour et  $t = \text{angle}/\text{vitesse de rotation} = (1/720)/27,5 = 5,05 \cdot 10^{-5}$  sec et donc la vitesse de la lumière est égale à  $c = 2 d / t = 2 \times 7500 / 5,05 \cdot 10^{-5} = 2,97 \cdot 10^8 \text{ m/s}$  !



Dans la littérature on aussi la "longueur d'ondes" pour désigner une bande de fréquence. C'est une approche qui date du début de la radio. Ceci permet tout au plus de savoir de quelle bande de fréquence on parle

à la plage de fréquence ...	correspondent des longueurs d'ondes exactes de ...	mais dans la pratique on parle de la ...
3,500 à 3,800 MHz	85,71 à 78,94 m	bande des 80 m
7,000 à 7,100 MHz	42,85 à 42,253 m	bande des 40 m
14,000 à 14,350 MHz	21,42 à 20,90 m	bande des 20 m
21,000 à 21,450 MHz	14,28 à 13,98 m	bande des 15 m
28,000 à 29,700 MHz	10,71 à 10,10 m	bande des 10 m
144 à 146 MHz	2,08 à 2,05 m	bande des 2 m
430 à 440 MHz	0,697 à 0,681 m	bande des 70 cm
1240 à 1300 MHz	0,241 à 0,230 m	bande des 23 cm

Outres nos bandes radioamateurs, il y a aussi d'autres utilisateurs. En radiodiffusion par exemple, au lieu de donner la longueur de la bande, on parle plutôt en qualifiant la longueur d'ondes de longues moyennes ou courte. Et quand est venue la télévision, on a donné des chiffres romains aux bandes.

	fréquences	bande des	utilisé pour
ondes longues (OL)	150 à 275 kHz		radiodiffusion, balises, radiophares
ondes moyennes (OM)	520 à 1605 kHz		Radiodiffusion
ondes courtes (OC)	5,850 à 6,410 MHz	49 m	Radiodiffusion
	8,970 à 9,860 MHz	31 m	Radiodiffusion
	11,450 à 12,480 MHz	25 m	Radiodiffusion
	14,670 à 16,000 MHz	19 m	Radiodiffusion
	17,000 à 18,750 MHz	16 m	Radiodiffusion
	20,700 à 22,800 MHz	13 m	Radiodiffusion
télévision VHF	47 à 68 MHz	bande I	
radiodiffusion FM	87,5 à 108 MHz	bande II	
télévision VHF	174 à 230 MHz	bande III	
télévision UHF	470 à 862 MHz	bande IV-V	
télévision par satellite	11700 à 12700 MHz	bande VI	

Mais, il existe d'autres façons de classer les bandes:

dénomination			
<b>LF</b>	Low Frequency	0,03 à 0,3 MHz	
<b>MF</b>	Medium	0,3 à 3 MHz	
<b>HF</b>	High	3 à 30 MHz	encore appelées bandes décamétriques
<b>VHF</b>	Very High	30 à 300 MHz	encore appelées bandes métriques
<b>UHF</b>	Ultra High	300 à 3000 MHz	
<b>SHF</b>	Super High	3000 à 30000 MHz	

Enfin on définit **micro-ondes** comme tout ce qui est au dessus de 1 GHz !

## **7.2. Les propagations en fonction des bandes de fréquences**

En tant que radioamateur, nous avons la chance de pouvoir expérimenter des radiocommunications avec des ondes radio allant de 137 kHz à quelques 47 GHz. Ainsi,

- dans la bande LF (de 0,03 à 0,3 MHz), donc pour la bande 137 kHz, la propagation se fait essentiellement par **onde de sol**, c-à-d que les ondes se propagent près du sol et sont guidées par le sol. La portée peut atteindre quelques milliers de km.
- dans les bandes MF (de 0,3 à 3 MHz) donc pour la bande 1,6 MHz, dans la journée la propagation se fait par onde de sol avec une portée de quelques centaines de km, mais la nuit il apparaît aussi une propagation par onde ionosphérique
- dans la bande HF (de 3 à 30 MHz), donc pour nos bandes 80 m à 10 m, la propagation par onde de sol se réduit à une dizaine de km pour la bande 10 m à une petite centaine de km pour la bande 80 m. Mais le mode de propagation essentiel et probablement le plus spectaculaire est la **propagation ionosphérique**.
- dans les bandes VHF et UHF (de 30 MHz à 3000 MHz) la propagation se fait essentiellement par **onde de ciel**, mais d'autres modes permettent des communications à très longues distances
- enfin pour les bandes micro-ondes (> 1 GHz) la propagation se fait essentiellement à vue directe

Un tout premier mode de propagation, un peu théorique, est la **propagation en espace libre**, c-à-d celui où on imagine une antenne d'émission et une antenne de réception sans aucun élément environnant (pas de sol, pas de mer, pas d'obstacle, rien ...). Ce cas n'est pas seulement théorique, il est également présent dans les liaisons point à point très bien dégagées.

Nous allons donc examiner les modes de propagation.

### 7.3. Propagation par ondes de sol

Lorsqu'on examine la formation des ondes pour une antenne verticale, on distingue des lignes de force du champ électrique (fig. a), celles-ci se referment sur la terre, et des lignes de forces du champ magnétiques (fig b) qui sont concentriques à l'antenne.

Ces deux composantes donnent lieu au champ électromagnétique qui se propage en suivant le sol. Ce type de propagation est donc lié à la présence du sol, et à ses caractéristiques (conductivité et coefficient de perméabilité).

La propagation par onde de sol est produite par des antennes verticales et donc en polarisation verticale, elle n'existe pratiquement pas des antennes à polarisation horizontale.

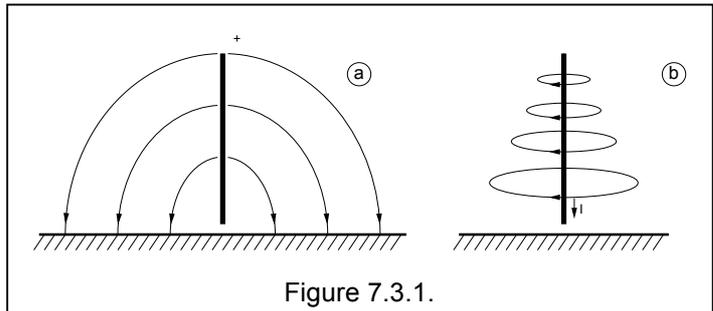


Figure 7.3.1.

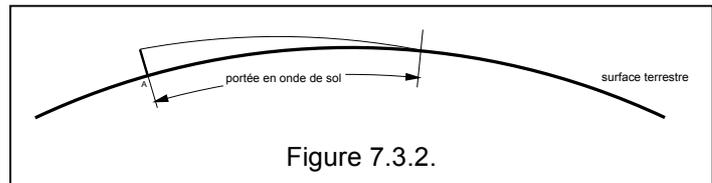


Figure 7.3.2.

La propagation par onde de sol est essentiellement utilisée en radiodiffusion, pour les OL et les OM. Elle est également utilisée en HF pour des liaisons mobiles où l'antenne la plus appropriée pour être montée sur un véhicule est une antenne verticale ("fouet").

En espace libre, le champ est égal à

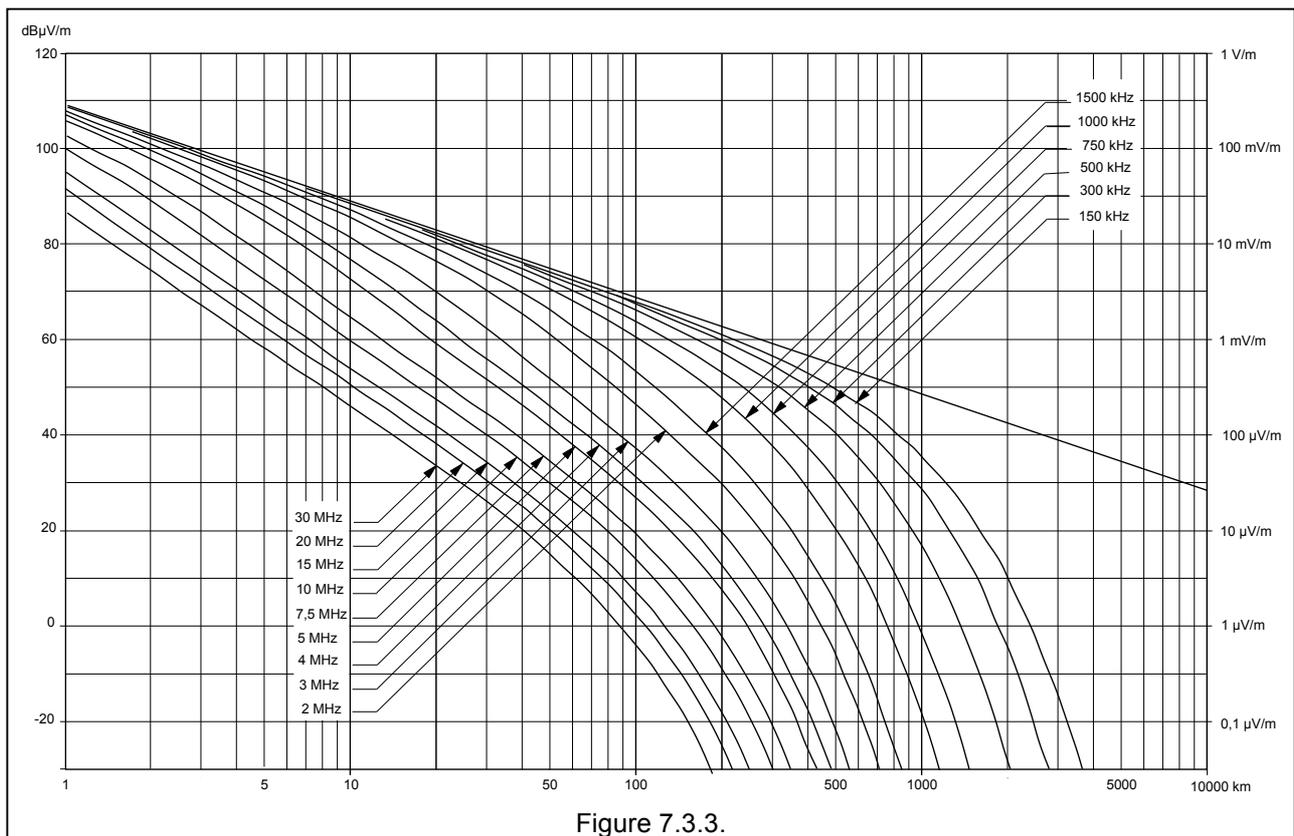
$$E_{(mV/m)} = 173 \sqrt{P_e(kW)} (1/d_{(km)})$$

Mais le long de la surface terrestre, le champ diminue plus rapidement. La distance moyenne que l'onde de sol parcourt avant de s'évanouir dépend donc non seulement des caractéristiques du sol, mais aussi de la fréquence.

La propagation par onde de sol est fortement influencée par la conductivité. Plus la conductivité est grande, plus grand sera le champ électrique. Le champ au dessus de la mer est donc beaucoup plus important que le champ au dessus d'un sol rocailleux.

Il existe des courbes qui donnent le champ en fonction de la distance<sup>6</sup>. Nous avons retenu comme exemple, celle qui donne la propagation pour une bonne conductibilité du sol (conductivité =  $\sigma = 20$  mS/m , constante diélectrique  $\epsilon = 40$ ).

<sup>6</sup> Recommandation ITU-R P.368-7



Il est important de remarquer que ces courbes donnent des valeurs de champs électriques et sont normalisées pour un émetteur de 1 kW. Un émetteur dont la puissance serait "x" dB au dessus de 1 kW donnera un champ "x" dB au dessus de la valeur du champ exprimée en dBµV/m.

En modulation d'amplitude, le champ électrique minimum nécessaire pour obtenir un rapport S/B de 26 dB avec une profondeur de modulation de 30 % est de

- 66 dBµV/m pour les bandes kilométriques (OL),
- 60 dBµV/m pour les bandes hectométriques (OM),
- et 40 dBµV/m pour les bandes décamétriques (OC) et pour les modulations DBL et BLU <sup>7</sup>.

Ce type de propagation est fortement utilisé pour la radiodiffusion en ondes moyennes par exemple, pour les liaisons entre les navires, pour les liaisons entre véhicules (militaires, par exemple), mais n'est pas utilisé par les radioamateurs pour faire du "DX", la propagation par onde de sol permet tout au plus de faire des contacts "locaux" et essentiellement dans les bandes basses (40, 80 et 160 m).

<sup>7</sup> Recommandation ITU-R BS.703

### Applications:

1. Pour la radiodiffusion sur 620 kHz, on souhaite un niveau de 60 dB $\mu$ V/m. Quelle est la puissance de l'émetteur afin de couvrir un rayon de 200 km.

#### Solution

A l'intersection de la courbe 600 kHz et de 200 km on peut lire un champ de 58 dB $\mu$ V/m.

Comme il nous faut 60 dB $\mu$ V/m, il faudra donc 2 dB de plus que la puissance de référence (1 kW) soit 1,584 kW

2. Quelle est la portée d'une station de radioamateur en SSB, pour une puissance de 100 W et pour les différentes bandes radioamateurs?

#### Solution

Le champ minimum pour les OC est de 40 dB $\mu$ V/m. A l'intersection de chaque bande de fréquence et de 40 dB $\mu$ V/m, on peut lire le résultat

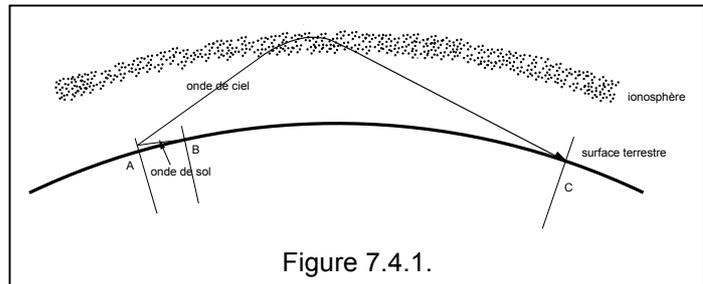
3,5 MHz	75 km
7 MHz	38 km
14 MHz	22 km
21 MHz	18 km
28 MHz	15 km

On peut considérer que ces distances sont des valeurs moyennes de la portée par onde de sol pour des stations de radioamateur et, pour rappel, les ondes de sol ne sont produites qu'avec des antennes verticale !

## 7.4. Propagation ionosphérique en dessous de 30 MHz

Par opposition à l'onde de sol que nous avons vu au paragraphe précédent, il y a aussi la propagation par ondes de ciel, celle-ci utilise les couches ionisées de l'atmosphère.

Pratiquement les communications "DX" établies entre radioamateurs, en dessous de 30 MHz se font par ondes de ciel.



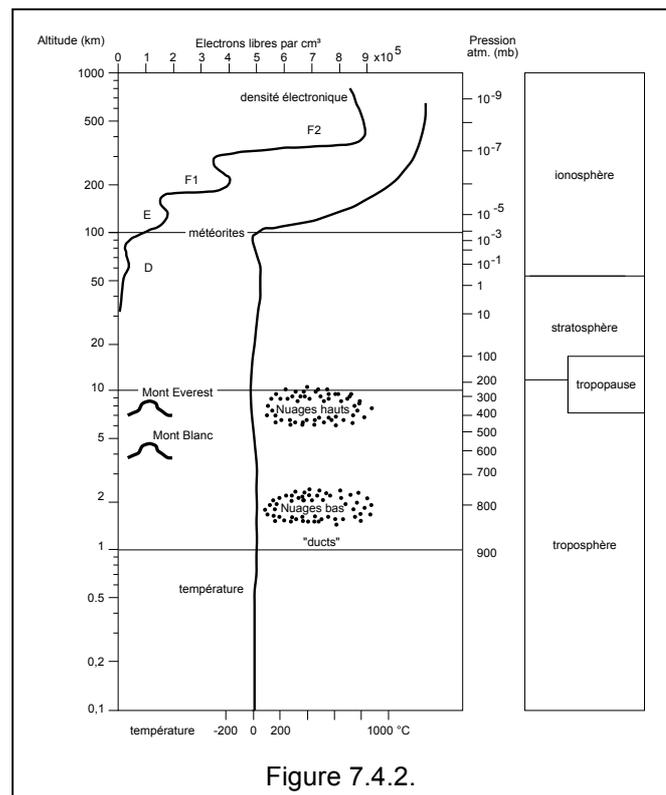
Lorsque l'onde a quitté l'antenne d'émission, elle se dirige vers le ciel où elle rencontre des couches ionisées. Cette région s'appelle l'**ionosphère**. L'ionosphère commence à environ 50 km de la terre et va jusqu'à 400 km. L'ionosphère est en fait un milieu dans lequel l'onde va être réfractée, à tel point que l'onde peut retourner vers la terre.

Les distances que l'on peut atteindre avec les ondes de ciel sont beaucoup plus grandes que celles obtenues avec les ondes de sol.

### 7.4.1. L'atmosphère

L'atmosphère peut être divisée en plusieurs zones :

- la troposphère qui s'étend de 0 à 10 km, et dans laquelle ont lieu la plupart des phénomènes météorologiques (nuage, pluie, ...). Le sommet du Mont Everest est encore dans l'atmosphère ... C'est cette couche qui nous intéressera plus tard pour l'étude de la propagation en VHF-UHF.
- la stratosphère
- l' **ionosphère** qui s'étend de 50 à 100 km et qui est caractérisée par une pression relativement basse (de 1 à  $10^{-9}$  millibar), par des températures allant de 20 à  $1000^{\circ}\text{C}$  et par la présence d'électrons libres avec une densité de 1 à  $10 \times 10^5$  électrons par  $\text{cm}^3$ . C'est cette couche qui nous intéresse pour la propagation dans les bandes décimétriques.



### 7.4.2. L'ionosphère

L'ionosphère est la partie la plus haute de l'atmosphère, elle s'étend de 60 à 1000 km d'altitude et elle est soumise aux rayonnements solaires, ce qui a pour effet de les ioniser.

L'ionosphère se compose de couches de densités électroniques fort différentes, que l'on peut décomposer en :

- la **mésosphère** : c'est une couche composée d'ozone et qui s'étend de 50 à 85 km,
- la **thermosphère** qui est une zone qui agit principalement en absorption des rayons ultraviolets de longueur d'onde inférieure à 2000Å et
- l'**exosphère** qui s'étend entre 600 et 1000 km qui est composée presque uniquement d'hydrogène et dont la densité est très faible.

Lorsqu'une onde passe d'un milieu vers un autre, il se produit, comme en optique, un phénomène de réfraction qui répond à la loi de Descartes. Pour l'air normal, au niveau de la mer, et pour des conditions de température et de pressions moyennes  $n = 1,000300$ , tandis que pour l'ionosphère on peut dire que :

$$n = \sqrt{1 - \frac{81 N}{f^2}}$$

où N est la densité d'électrons par  $\text{cm}^3$   
f est la fréquence exprimée en kHz...

Cette relation montre que le phénomène de réfraction est lié à la densité électronique et à la fréquence.

L'atmosphère est essentiellement composée d'oxygène et d'azote avec des traces d'hydrogène, d'hélium et d'autres gaz. Ces gaz sont habituellement neutres, mais lorsqu'ils sont soumis aux rayonnements ultraviolets du soleil, des électrons peuvent être libérés et les atomes sont chargés positivement. Ces atomes chargés positivement sont appelés ions et le processus qui les crée est appelé **ionisation**. Les ions et les électrons libres ont par la suite tendance à se recombiner pour reformer un atome électriquement neutre.

Les différentes couches ont reçu des lettres pour les désigner.

La **couche D** est la plus basse, elle est située dans une partie relativement dense de l'atmosphère entre 50 et 88 km (= 30 à 55 miles). Les ions formés dans cette région ont une durée de vie très courte, ils se recombinent avec des électrons libres pour redevenir rapidement des atomes neutres. Le degré d'ionisation dépend fortement de la manière dont la lumière solaire frappe cette couche. A midi, l'ionisation est proche de son maximum et au coucher du soleil elle disparaît.

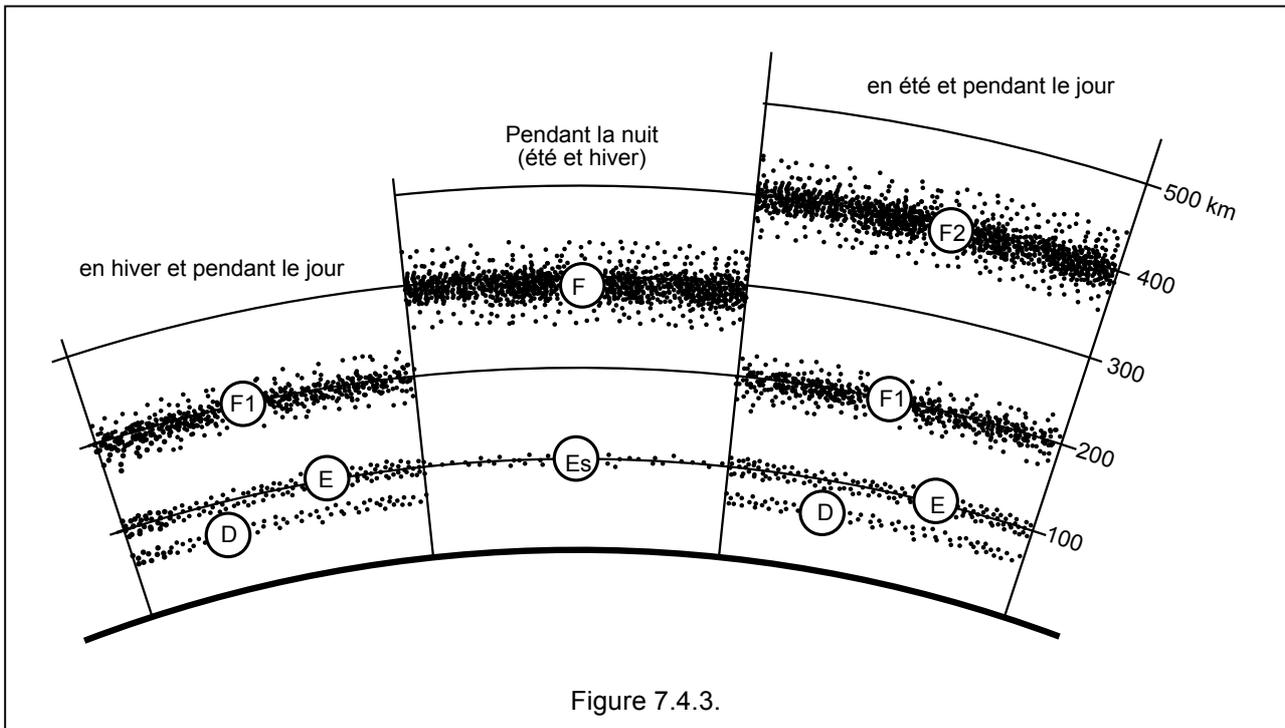
La couche D n'affecte pas la réfraction des ondes radio. L'effet principal de la couche D est d'absorber l'énergie des ondes radio. Lorsqu'une onde radio traverse la couche D elle libère une partie de son énergie aux ions. Les fréquences basses sont plus absorbées que les fréquences élevées. L'absorption augmente aussi avec le degré d'ionisation donc aussi, l'absorption sera plus prononcée à midi, et l'absorption est responsable pour les portées relativement courtes dans les bandes inférieures (160, 80 et 40 mètres).

Ensuite vient la **couche E** qui apparaît à environ 100 km (= 60 à 70 miles) A cette hauteur, l'atmosphère est encore assez dense et l'ionisation produite par le soleil ne dure pas longtemps. La couche E va réfracter les ondes uniquement pendant les heures diurnes. Comme la couche D, la couche E atteint une ionisation maximum vers midi et tôt dans la soirée, l'ionisation redevient très faible. L'ionisation atteint un minimum juste avant le lever du soleil. En utilisant la réfraction sur la couche E, une onde peut atteindre au maximum 2000 km en un bond.

La **couche F** est responsable des communications à grande distance. C'est une couche très vaste qui va de 160 à 420 km en fonction de la saison de l'heure et de l'activité solaire. L'ionisation atteint un maximum juste après midi, et diminue graduellement après le coucher du soleil. A cette altitude les électrons et les ions se recombinent lentement, de telle façon que la couche F reste ionisée même pendant la nuit, atteignant un

minimum juste avant le lever du soleil. Après le lever du soleil, l'ionisation augmente rapidement pendant les premières heures, puis plus lentement pour atteindre un maximum vers midi.

Pendant la journée la couche F se divise en deux couches **F1 et F2** avec des centres respectivement aux environs de 224 et 320 km. Mais ces altitudes peuvent varier avec la saison, à midi en été la couche F2 peut se situer à 480 km. Pendant la nuit, les deux couches F se recombinent. La couche F1 n'intervient pas fortement dans les communications radioamateur à longue distance. En un seul bond, l'onde radio peut atteindre 4000 km par réfraction sur la couche F2.



Un petit tableau pour résumer :

	<b>de jour</b>	<b>de nuit</b>
couche D	50 à 90 km	disparaît
couche E	env. 100 km	disparaît
couche F1	env. 250 km	se recombinent
couche F2	entre 300 et 400 km	

### 7.4.3. Hauteur virtuelle et fréquence critique

Lorsque l'onde atteint une couche ionisée elle subit une réfraction, ce phénomène est progressif.

Toutefois on considère le phénomène comme une réflexion (comme en optique) et on définit une **hauteur virtuelle**, qui serait celle où une réflexion donnerait les mêmes effets au sol (même distance).

La hauteur virtuelle peut se mesurer à l'aide d'une sonde (une "ionosonde"). On envoie une série d'impulsions vers le ciel (antenne pointée vers le ciel) et on mesure le temps entre l'émission et la réception de l'onde réfléchie. Cette mesure de temps est convertie en distance, ce qui permet de mesurer la hauteur virtuelle et d'obtenir un diagramme appelé ionogramme.

Un ionogramme se présente comme indiqué ci-contre. On distingue nettement 3 niveaux de réflexions, respectivement sur les couches E, F1 et F2.

On remarque qu'il y a des réflexions entre 2 et 6,9 MHz (environ). Dans ce cas on dit que la **fréquence critique** est de 6,9 MHz.

Si on dépasse la fréquence critique, l'onde n'est plus réfléchie, mais elle passera au travers des couches<sup>8</sup>.

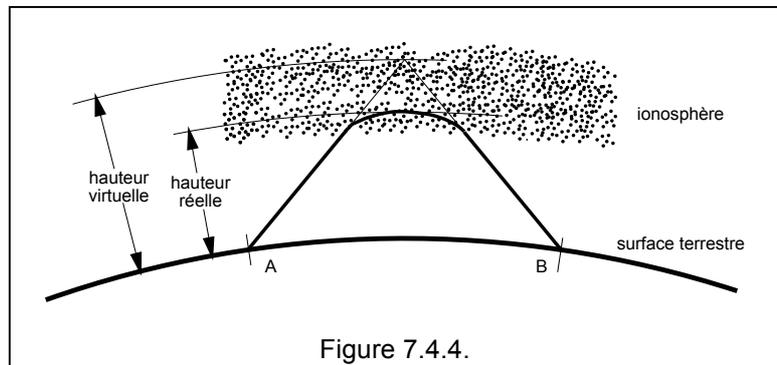


Figure 7.4.4.

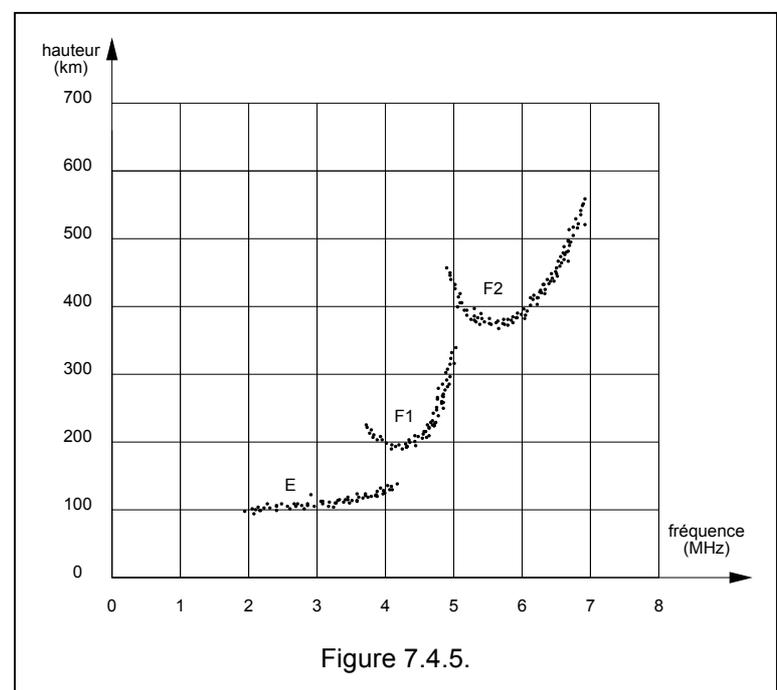


Figure 7.4.5.

<sup>8</sup> Puisque ces courbes représentent des situations typiques, ce serait donc la catastrophe pour les communications à longue distance au-delà de quelques 8 MHz ! PAS DE PANIQUE ! Ce que nous venons de voir ici est une réflexion pour une onde qui part perpendiculairement à la surface de la terre (l'antenne "pointe" vers le ciel), toutefois, nos antennes ne pointent pas vers le ciel, mais plutôt à l'horizon. Et le § 7.3.4. va nous montrer qu'il est possible d'utiliser des fréquences supérieures pour réaliser des liaisons ionosphériques.

**7.4.4. Angle de radiation, angle critique et distance du bond**

La mesure de la hauteur des couches nécessite une antenne qui rayonne vers le ciel, toutefois, pour établir des communications on utilise des antennes polarisées verticalement ou horizontalement et au-delà de la fréquence critique et pour un certain angle il peut y avoir également des réfractions.

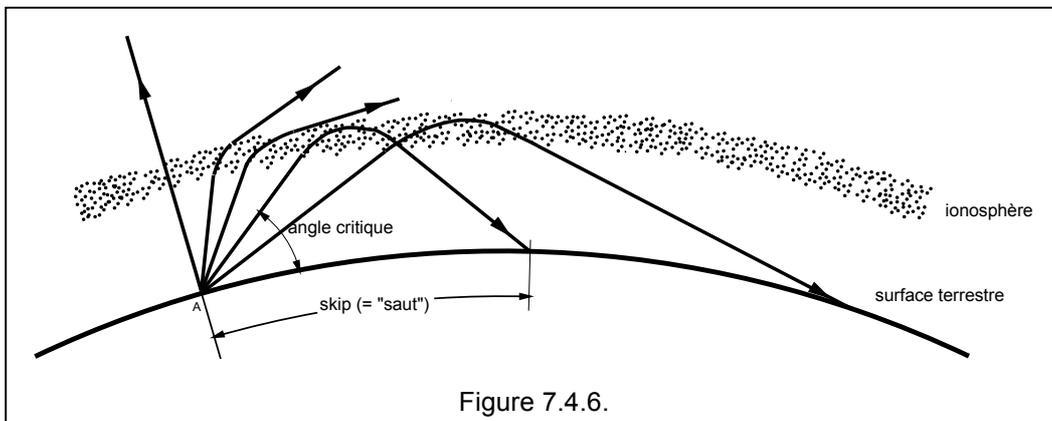


Figure 7.4.6.

Le plus grand angle de radiation qui permet à l'onde de revenir vers la terre, pour des conditions ionosphériques données, est appelé **angle critique**<sup>9</sup>.

<sup>9</sup> On comprend dès lors l'importance du choix de l'antenne. Il est évident que si la plus grande partie de l'énergie rayonnée est dirigée vers le ciel, cette énergie va passer au travers des couches ionisées et ne sera jamais réfléchi vers la terre. Il faudra donc, dans la mesure du possible, que l'antenne fournisse la plus grande partie de son énergie dans un angle inférieur (ou égal) à l'angle critique. D'où l'importance de l'angle de départ et de l'angle d'ouverture (dans le sens vertical) des antennes. Quelques exemples :

<p>a) un <b>dipôle pour la bande 80 m</b>, même s'il est monté à 18 m du sol (ce qui pour une station d'amateur semble "élevé"), n'est en réalité qu'à 0,2 λ. Cette antenne envoie pratiquement toute son énergie dans un angle qui va de +30° à +150°, elle "tire" donc plus vers le ciel que vers l'horizon.</p>	<p>b) une antenne <b>yagi 3 éléments pour la bande 20m</b>, installée sur un pylône de 18 m du sol et avec un sol "moyen" se trouve à un peu moins de 1 λ du sol. Cette antenne possède un angle de départ de l'ordre de 15° et un angle d'ouverture de 16°. Cette antenne n'envoie qu'une très faible partie de sa puissance au zénith.</p>	<p>c) un <b>quart d'onde</b> (quelle que soit la bande ...), avec un sol "moyen" est caractérisé par un angle de départ de 26° et un angle d'ouverture est de 44°. La puissance qui est envoyée vers le ciel est pratiquement nulle.</p>	<p>d) et avec une <b>5/8 d'onde</b> ... l'angle de départ est de 16°, l'angle d'ouverture est de 26°. Toutefois, on voit apparaître un second lobe.</p>

Toutes ces modélisations ont été faites avec EZNEC, un sol "réel" selon le modèle "MININEC".

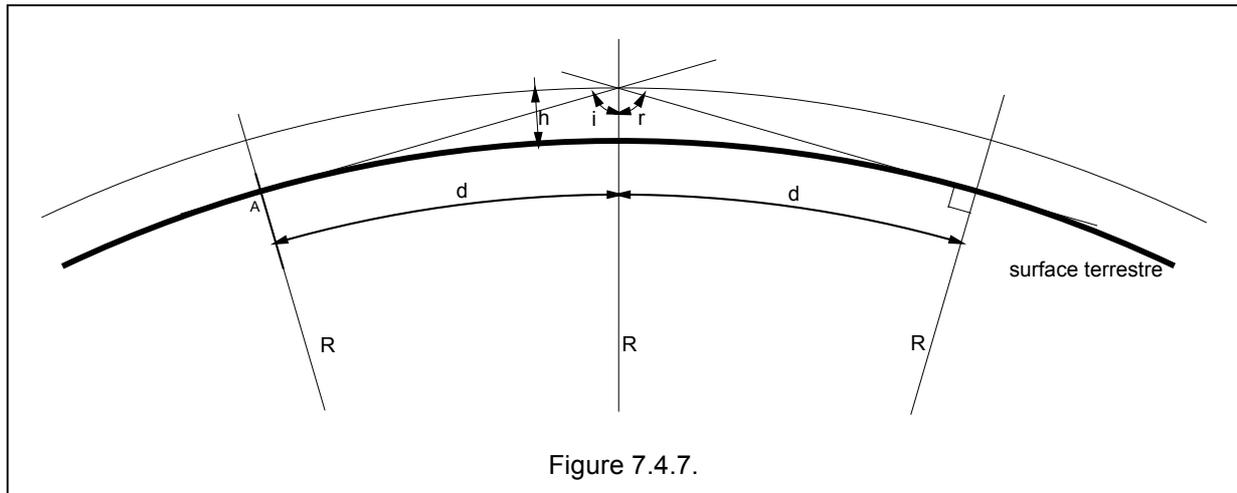


Figure 7.4.7.

Il est possible de calculer la distance maximum que l'on peut réaliser en cas de réflexion sur les couches ionisées en connaissant la hauteur de la couche. Pour cette évaluation, on supposera que la hauteur de l'antenne est faible (par rapport à hauteur de la couche ionisée), que la réflexion se fait de façon parfaite en un point (comme s'il s'agissait d'un miroir...), que l'antenne est pointée à l'horizontale (c.-à-d. que son angle de départ est voisin de 0°). Dans ce cas, la résolution du triangle permet de calculer:

$$D_{\max} = 2 d = 2 R \text{ arc cos } ( R / R + h )$$

avec R = rayon de la terre soit 6371 km.

Lorsqu'on fait ce calcul il faut bien sûr mettre la calculatrice en mode "radian", en effet le calcul de la distance consiste à calculer la longueur de la circonférence intercepté par un certain angle !

Faisons une rapide évaluation pour les couches E, F1 et F2 :

- réflexion sur la couche E à une hauteur de 100 km      D ≈ 2200. km
- réflexion sur la couche F1 à une hauteur de 224 km      D ≈ 3300 km
- réflexion sur la couche F2 à une hauteur de 320 km      D ≈ 4000 km

Il s'agit bien sûr "d'une évaluation" de la distance du bond.

### 7.4.5. Zone de silence

Si on considère la combinaison de la propagation de sol et la propagation ionosphérique, il y a une zone où la distance est telle qu'elle soit supérieure à la portée par onde de sol et inférieure à la distance où se produit la réception de l'onde réfléchi par l'ionosphère. Cette zone s'appelle **zone de silence**.

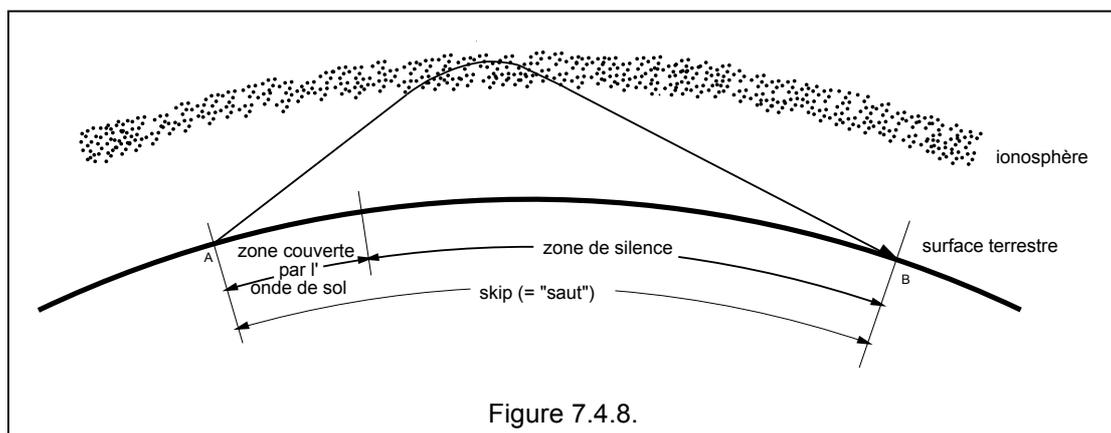
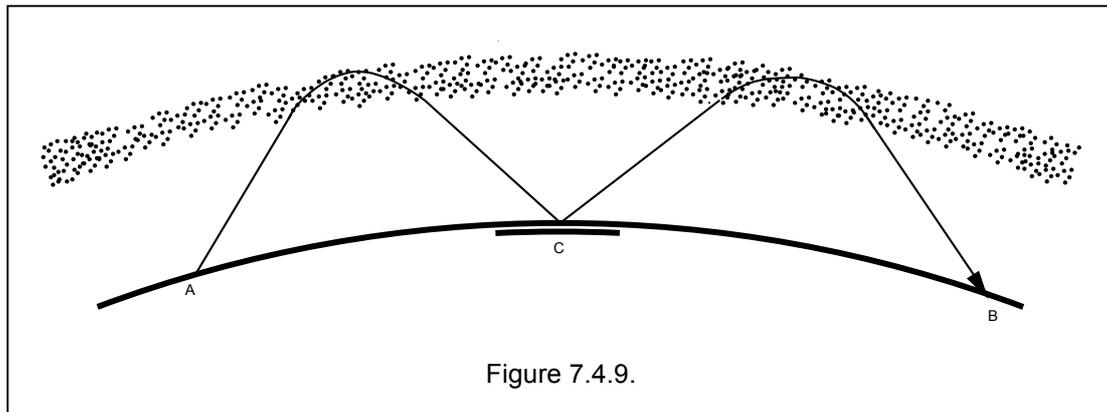


Figure 7.4.8.

### 7.4.6. Réflexions multiples

On peut bien sûr avoir une propagation avec une seule réflexion sur la couche E, ce type de propagation est désigné par **1E**, ou une propagation avec une seule réflexion en sporadique E est désigné par **1Es**.

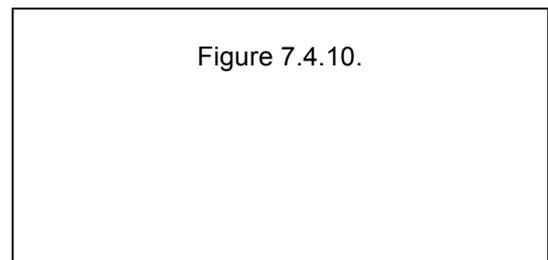


On peut aussi avoir des modes multiples, on peut, par exemple, avoir une propagation avec une deux réflexions sur la couche E, on désigne cette propagation par **2E**. Pour que ce phénomène puisse se produire il faut une réflexion au point C, donc un milieu réfléchissant tel qu'une grande étendue d'eau (mer, océan, grand lac, ...).

Une propagation avec trois réflexions sur la couche F par **3F**.

On peut aussi avoir la combinaison d'une réflexion sur la couche F suivit d'une réflexion sur la couche E, on parle alors de **1F1E**. Ceci s'explique simplement parce qu'à l'endroit de la première réflexion il n'y a pas de couche E, tandis qu'à l'endroit de la deuxième réflexion cette couche existe. De la même manière, la combinaison d'une réflexion sur la couche F suivit d'une réflexion sur la couche Es, elle même suivie d'une réflexion sur la couche F se désigne par **F(Es)F**, etc.

La figure ci-contre représente différentes situations typiques.



### **7.4.7. Fading**

Le fading ou l'évanouissement est un terme utilisé pour décrire des variations du signal reçu. Le fading peut être occasionné par un phénomène naturel tel que des variations des hauteurs des couches ionisées ou des variations d'absorption.

Le fading peut aussi être occasionné par l'homme, par exemple, le passage d'un avion (dans le voisinage de l'antenne de réception) peut créer un signal qui varie rapidement.

#### **7.4.7.1. Trajets multiples ou "multipath" :**

La cause la plus commune de fading est la propagation selon des trajets multiples. A l'émission l'onde emprunte plusieurs chemins pour arriver au récepteur. Comme les trajets sont différents, les amplitudes et les phases sont également différentes. A la réception les différentes composantes reçues peuvent s'annuler ou se renforcer, d'où le fading.

Ce phénomène se rencontre en HF, l'onde émise peut par exemple être partiellement réfléchiée par une couche de l'ionosphère et partiellement par une autre couche.

Le phénomène peut aussi se rencontrer en VHF-UHF et plus particulièrement en "mobile", le signal reçu peut provenir de plusieurs source différentes (voir plus loin) on appelle cela alors du "flutter".

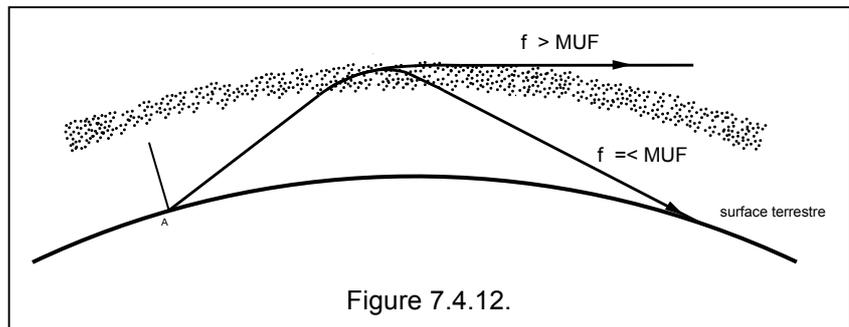
Figure 7.4.11.

#### **7.4.7.2. Fading sélectif**

On parle de fading sélectif lorsque le phénomène affecte une fréquence particulière

### 7.4.8. Fréquence maximale utilisable ou MUF

La fréquence critique est certes très importante, mais les radioamateurs sont plutôt intéressés à la plage de fréquence qui permet de réaliser des liaisons. Ce que la plupart des radioamateurs désirent connaître est la fréquence maximale utilisable ou **MUF** ("Maximum Usable Frequency") pour une distance et pour une certaine heure.



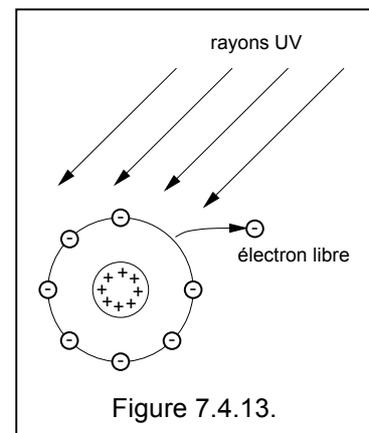
La MUF est la fréquence la plus élevée qui permet à une onde d'atteindre la destination par réflexion sur les couches E ou F. Si la fréquence est supérieure à la MUF, l'onde va traverser les couches ionisées et ne va pas être réfléchi par l'ionosphère. La MUF change en fonction des saisons, mais aussi pendant la journée.

Si nous connaissons la MUF, nous pouvons prévoir quelle est la bande de fréquence qui nous donnera le plus de chances de faire un contact avec une station déterminée.

Si, pour contacter un endroit à une heure précise la MUF est de 17 MHz, cela signifie que la meilleure bande pour tenter le contact est la bande des 14 MHz (20 mètres).

### 7.4.9. Activité solaire et propagation des ondes

Comme nous avons déjà expliqué plus haut, le soleil joue un rôle primordial dans l'ionisation des différentes couches. Les rayons UV ont une énergie telle qu'ils peuvent arracher des électrons aux atomes d'oxygène de la haute atmosphère. Voir figure ci-contre, le cas d'un atome d'oxygène (numéro atomique = 8).



Mais les manifestations du soleil sur notre terre sont diverses. Le jour et la nuit sont déterminés par la terre qui tourne autour du soleil, de même que les saisons dans l'année. Les conditions de propagations sont donc fatalement liées à ces variations.

Il y a aussi des cycles solaires plus longs et plus courts qui affectent la propagation d'une manière sont beaucoup moins évidente.

La durée d'une rotation solaire est de **27 jours**, et dans certains cas on observe une corrélation entre la propagation à 27 jours d'intervalle.

Etudier, ou prévoir la propagation est donc une science liée aux connaissances de l'activité solaire. C'est une science très vaste, très complexe qui sort du cadre du présent ouvrage, mais nous essayerons d'en tracer quelques grandes lignes:

L'énergie du soleil réside essentiellement dans des phénomènes thermonucléaires de transformation de l'hydrogène en hélium. La température superficielle du soleil est d'environ 5750 °C, la température interne est de plusieurs millions de °C. Le soleil est situé à environ 149,5 millions de km de la terre (il faut donc 8 minutes pour que la lumière atteigne la terre !) et le diamètre du soleil est de 1,390 millions de km.

Il y a plus de mille ans on découvrait que la surface du soleil était "tachée", mais ce n'est que depuis 1749 que l'observatoire de Zurich en Suisse tient le registre. A cette époque H. Wolff était directeur de l'observatoire et c'est tout naturellement que le nombre de **taches solaires** s'appela "**nombre de Wolff**" (ou "sunspots" en anglais).

$$R = k ( t + 10g )$$

où k est un facteur qui dépend de l'observatoire (c'est un coefficient de correction)

t est le nombre de taches solaire

g est le nombre de groupes de taches

Le dénombrement des taches dépend bien sûr de la qualité des optiques utilisées<sup>10</sup>, mais aussi des observateurs, ainsi certains observateurs trouveront des taches là où d'autres ne voient rien. Les nombres de Wolff sont comparés entre les divers observatoires et des moyennes sont faites.

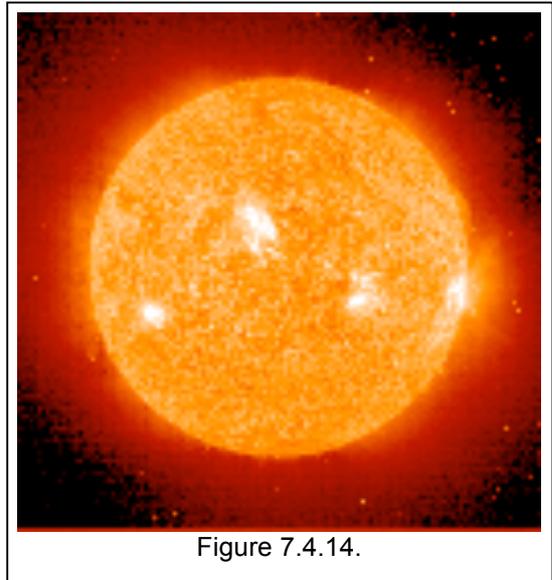


Figure 7.4.14.

D'une façon historique, le cycle datant de 1755 est appelé le cycle solaire numéro 1. Depuis cette date, tous les jours on note l'activité solaire, on fait de moyenne mensuelle, et des moyennes annuelles.

D'après les observations, les cycles solaires ont une période de **11 ans en moyenne**, mais ils peuvent aussi atteindre 9 ou 13 ans. Lorsque le cycle est à son maximum, l'ionisation dans l'atmosphère est également au maximum.

Au lieu de mesurer l'activité solaire par le nombre de taches, on peut aussi mesurer le **flux radioélectrique solaire** encore noté **SFI** pour **Solar Flux Index**. L'unité de mesure est le Watt par mètre carré pour une bande passante de 1 Hz. Au départ la mesure était faite à 2800 MHz, car on utilisait des récepteurs de récupération de l'armée... mais des relevés sont aussi fait sur 245 MHz, 410 MHz, 606 MHz, 1415 MHz, 2695 MHz, 4995 MHz, 8800 MHz et 14500 MHz.

L'observation a montré un parallélisme entre le nombre de Wolff et le flux solaire :

Nbre de Wolff	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	
Flux solaire	67	80	95	112	130	150	165	185	205	225	245	

En première approximation

$$\text{Flux Solaire} \approx 67 + (0,88 \times \text{Nbre de Wolff})$$

Un flux solaire donne une indication sur les conditions de propagations sur les bandes hautes, c'est-à-dire les bandes 10m ,12m ,15m ,17m , 20m (et même parfois le 50 MHz) :

<70	mauvaises conditions de propagation
80-90	faible condition de propagation
90-100	condition de propagation moyenne
100-150	bonne condition de propagation
> 150	condition de propagation idéale

Des valeurs de SFI élevées (>150) vont permettre de faire de très belles liaison, même pour les stations avec des antennes modestes.

Des valeurs de SFI élevées n'ont presque aucune influence sur les bandes basses c'est-à-dire sur les bandes 30m, 40m, 80m et 160m bandes.

<sup>10</sup> **ATTENTION** : Malgré que nous parlions d'optique ici, il ne faut pas regarder le soleil avec des jumelles ou avec un télescope. Pour l'observation des taches solaires, on projette l'image obtenue sur une feuille de papier et sur cette feuille de papier on redessine les taches solaires.

Toutefois, il existe un retard de 2 à 3 jours entre l'apparition d'un flux solaire favorable et les conditions de propagation effectives.

La station WWW émet des impulsions horaires sur 1,5 , 5, 10, 15 et 20 MHz. Ces signaux peuvent être utilisés pour le calibrage en fréquence. Mais toutes les heures et 18 minutes WWW émet des informations sur l'activité solaire.

#### **7.4.10. Vent solaire et propagation des ondes**

C'est un paramètre qui a surtout été étudié ces 30 dernières années. Le vent solaire varie de 300 à plus de 700 km/s avec une moyenne de l'ordre de 400 km/s. Un vent solaire élevé provient des trous dans la couronne solaire. Un vent solaire important modifie le champ magnétique terrestre.

#### **7.4.11. Activité géomagnétique de la terre et propagation des ondes**

L'activité géomagnétique de la terre influence également les conditions de propagation. Cette activité est mentionnée par 2 indices :

L'**indice K** est une mesure logarithmique, il est mesuré sur une période 3 h et varie de 0 à 9 :

0 à 2	conditions géomagnétiques calmes, peu de bruit de fond, peu de QRN
3	conditions géomagnétiques changeantes ou agitées
4	conditions géomagnétiques actives
5 à 6	lors d'un orage magnétique
7 à 9	orage magnétique majeur avec probablement des périodes de silence radio total

L'**indice A** est une mesure du magnétisme terrestre mesuré sur une période de 24 h. Cet indice peut varier de 0 à 400. Plus il est grand, plus les petits signaux seront absorbés par l'ionosphère. Une valeur de 15 indique de bonnes conditions, une valeur de 30 indique de mauvaises conditions de réflexion via la couche F2.

< 10	conditions géomagnétiques calmes, peu de bruit de fond, peu de QRN
10 à 20	conditions géomagnétiques changeantes ou agitées
20 à 40	Bruit de fond important et apparition d'aurores boréales

#### **7.4.12. Sudden Ionospheric Disturbance ou perturbations solaires soudaines**

Un des phénomènes qui peut rompre soudainement les transmissions par ondes de ciel sont les sursauts solaires, il s'agit d'une grande éruption d'énergie et de matériau de la surface solaire qui entraîne une importante augmentation de la luminosité et aussi de la quantité de rayons UV.

La fréquence d'apparition des sursauts solaires augmente avec l'activité solaire.

Ce phénomène encore appelé "Sudden Ionospheric Disturbance" ou "SID" affecte principalement la couche D qui devient tellement absorbante que toute l'énergie est absorbée. Les bandes basses sont généralement affectées en premier lieu et les communications peuvent parfois encore être possible sur les bandes hautes. Un sursaut solaire peut durer de quelques minutes à quelques heures.

#### **7.4.13. Geomagnetic Disturbances**

Un autre phénomène qui accompagne les sursauts solaires est l'émission de particules chargées qui atteignent la terre après 20 à 40 heures. Lorsqu'elles arrivent près de la terre ces particules sont déviées vers les pôles, l'effet en est donc plus marqué au pôle qu'à l'équateur.

La couche F semble disparaître et les communications à longue distance sur les fréquences les plus hautes sont affectées très fortement.

### 7.4.14. Les aurores boréales

Les aurores boréales ont un effet néfaste sur la propagation dans les bandes décimétriques. Par contre nous verrons plus loin qu'elles peuvent donner lieu à des propagations à grande distance en VHF - UHF.

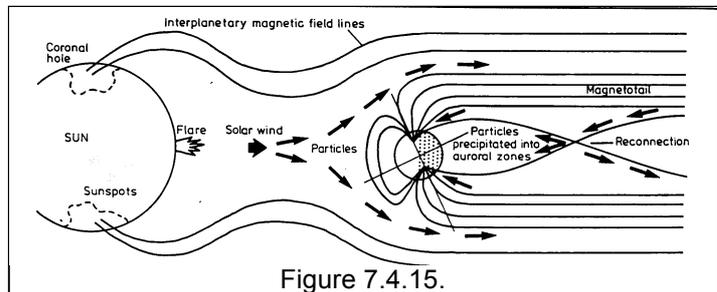


Figure 7.4.15.

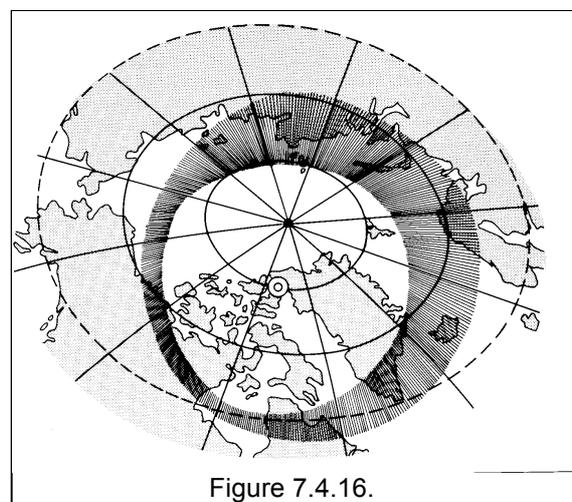


Figure 7.4.16.

### 7.4.15. Long path et Short path

La propagation a lieu habituellement le long d'un arc de grand cercle passant par les points concernés. Habituellement le chemin le plus court ou "**short path**" donne le meilleur résultat, mais il se peut que si chaque station tourne ses antennes de 180° les conditions de propagations soient meilleures c'est ce qu'on appelle le "**long path**". La propagation par long path n'est utilisable que pour des stations situées plus ou moins aux antipodes. Pour ce qui nous concerne les zones concernées sont

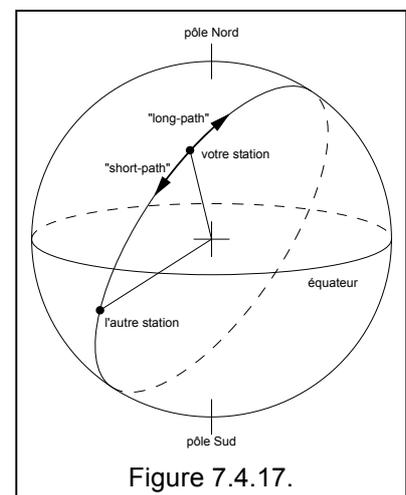


Figure 7.4.17.

### 7.4.16. Propagation le long de la ligne de pénombre

La ligne de pénombre<sup>11</sup> est une ligne, ou plutôt une zone, sur la surface de la terre qui sépare le jour de la nuit. La figure ci-contre illustre cette ligne.

D'un côté de la terre la ligne de pénombre représente une transition du jour vers la nuit ("sunrise"), de l'autre au côté au contraire, elle représente un passage de la nuit vers le jour ("sunset").

La propagation dans une direction perpendiculaire à la ligne de pénombre est très efficace car la couche D disparaît du côté du coucher du soleil et n'a pas encore eu le temps de se former le long du côté lever du soleil.

La ligne de pénombre est exactement verticale (Nord-Sud) aux Equinoxes (21 mars et 21 septembre) et elle est inclinée de 23° au maximum aux Solstices d'été (21 juin) et d'hiver (21 décembre). L'angle où la propagation est la plus favorable varie donc au cours de l'année et le signe de cet angle varie entre le jour et la nuit.

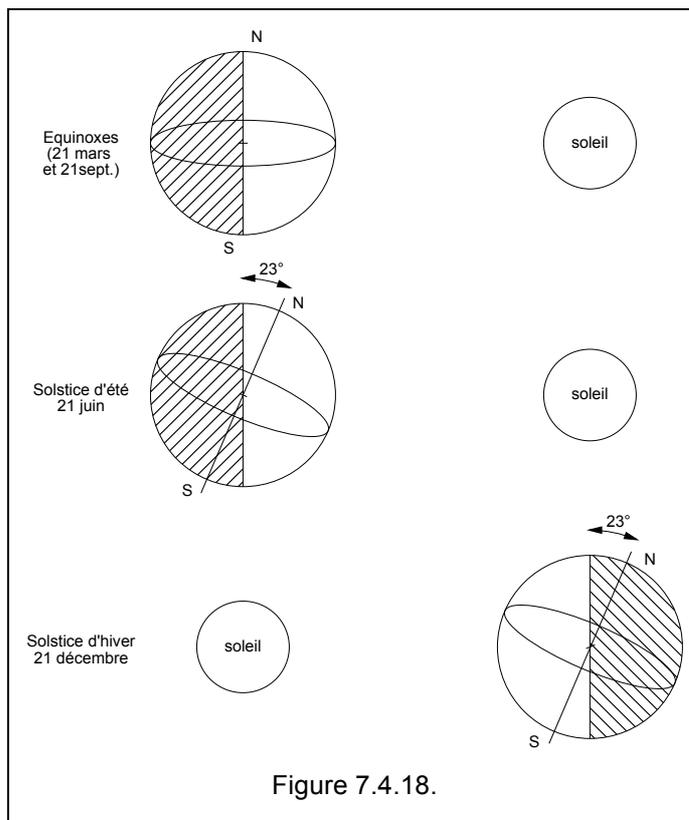


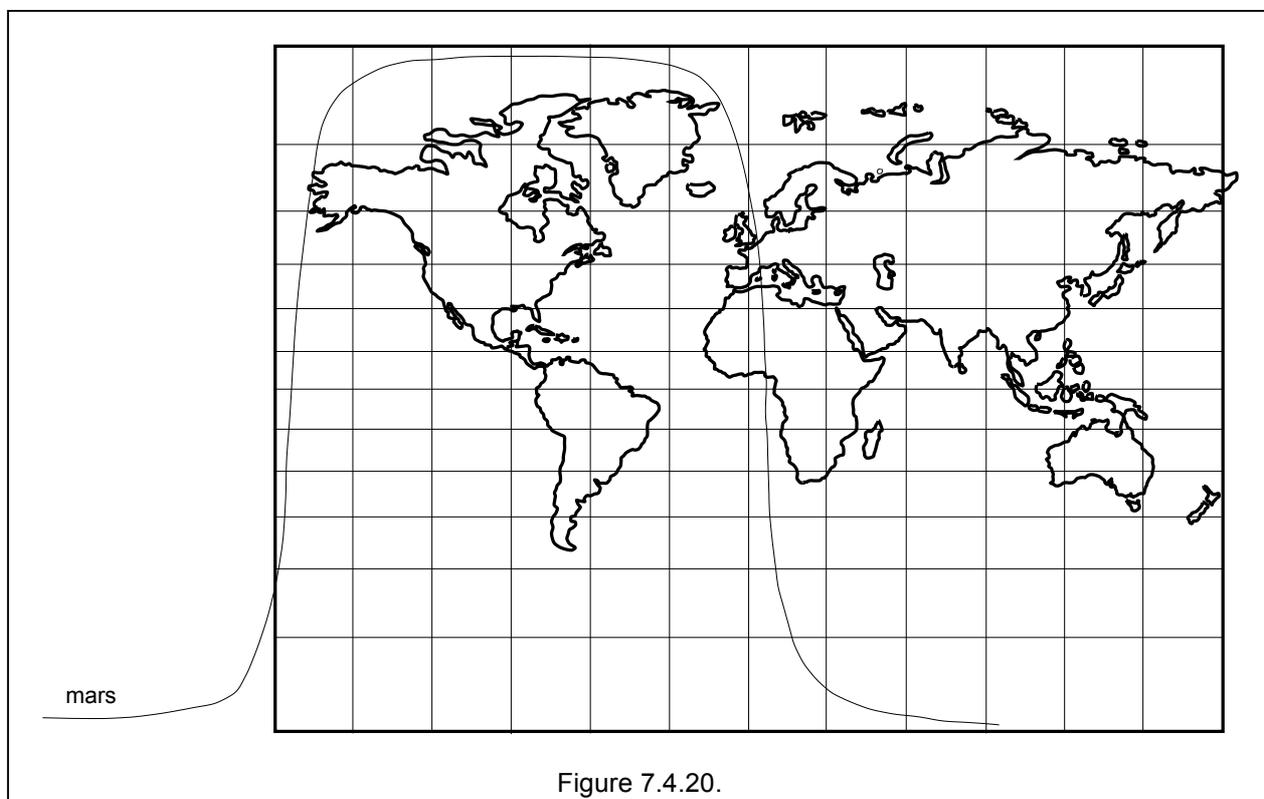
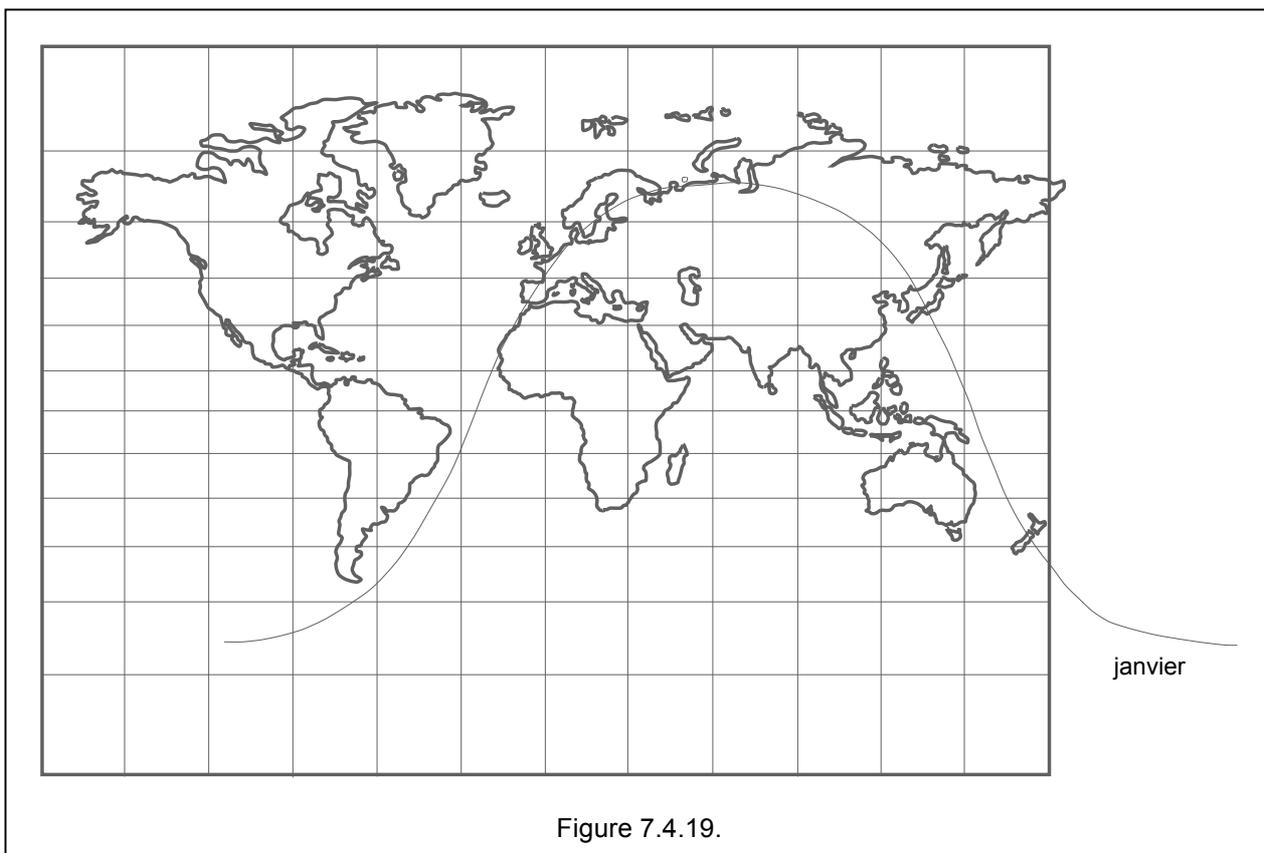
Figure 7.4.18.

Pour déterminer l'heure où la propagation le long de cette ligne est possible, on peut utiliser un genre de "règle à calcul" avec la carte du monde et des transparents (1 par mois) avec les courbes de ligne grise. Le site

#### Exemples:

1. Pour le mois de janvier, au lever du soleil, la propagation le long de la ligne grise permettrait des contacts avec le sud de la Suède (SM), la Finlande (OH), l'Espagne ((EA), le Maroc (CN), le Sahara Espagnol (S0), la Mauritanie (5T), la Nord de la Russie, la Russie asiatique(UA8, UA9, UA0), la Mongolie, le Japon (JA), la Nouvelle Zélande (ZL)etc ...
2. Pour le mois de mars, au coucher du soleil, la propagation le long de la ligne grise permettrait des contacts avec le centre de la France (F), la Lybie (5A), le Tchad (TT), le Cameroun (TJ), et peut être l'Alaska (KL7)...

<sup>11</sup> Encore appelée ligne grise, "grey line" ou "gray line" (dans la littérature américaine) ou encore "Terminator".



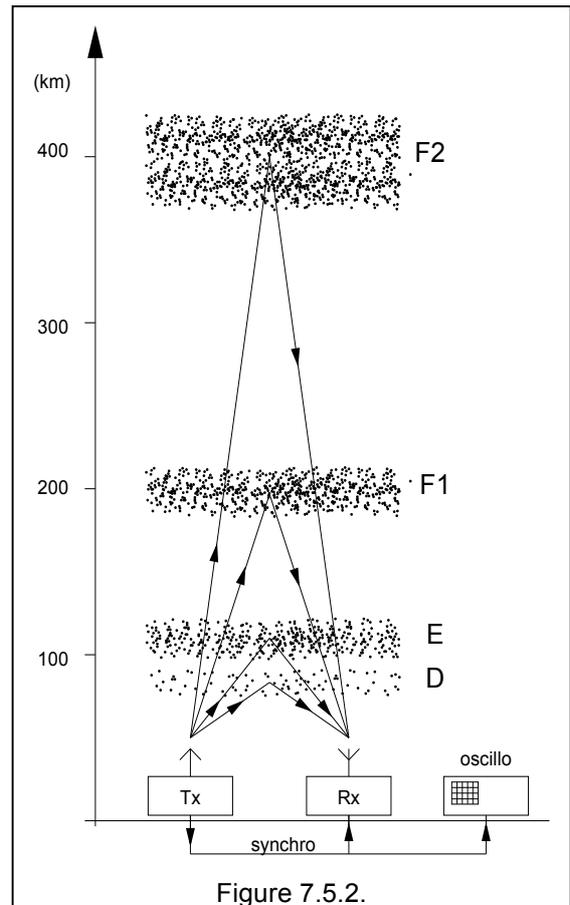
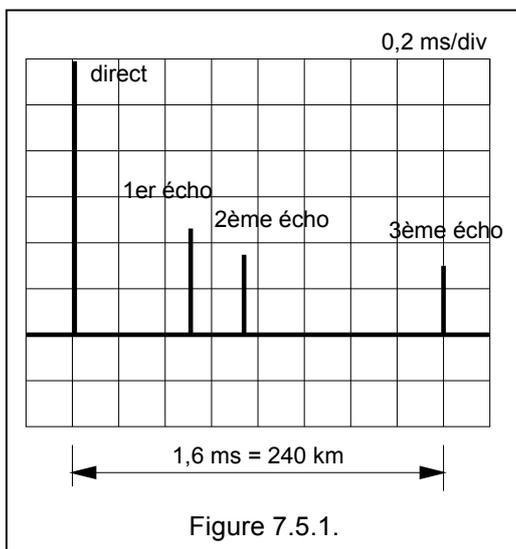
## 7.5. Prédiction de propagation en HF<sup>12</sup>

Un DXeur habile doit savoir prédire la propagation sur les bandes HF...

### 7.5.1. Sondage ionosphérique hauteur de couches

La position exacte des couches ionosphériques est mesurée par une série de stations appelées **ionosondes**. La plus célèbre est celle de Lowell dans le Massachusetts (USA) (<http://ulcar.uml.edu>), et en Belgique nous avons une station de sondage de l'ionosphère à Dourbes ([http://www.meteo.be/CPG/page43\\_1.html](http://www.meteo.be/CPG/page43_1.html)) qui donne des résultats toutes les deux minutes (<http://digisonde.oma.be/cgi-bin/latest.exe>).

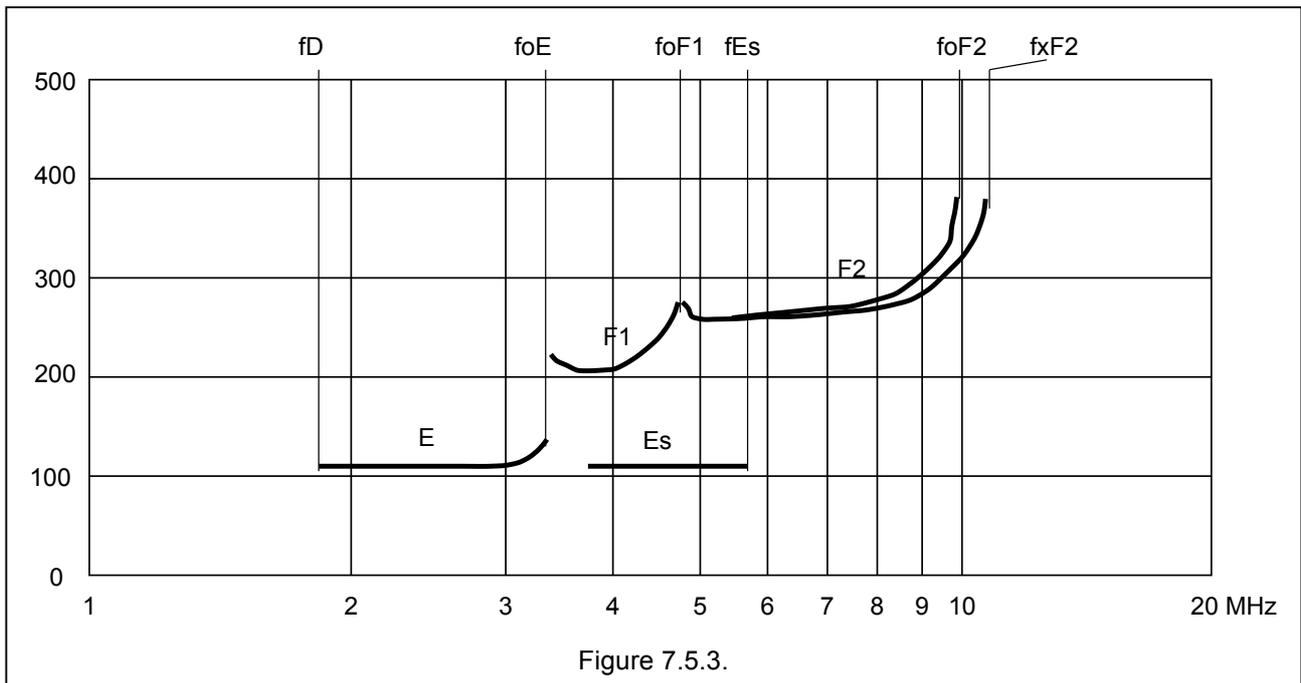
Le principe est le suivant : un émetteur alimente une antenne dont le rayonnement principal est vers le ciel. Cet émetteur envoie quelques impulsions (généralement entre 20 et 150  $\mu$ s). Un récepteur est installé dans la même station : il reçoit le signal direct (dont l'amplitude est très importante puisqu'on est près de l'émetteur) et le signal réfléchi par l'ionosphère. Sur l'oscilloscope déclenché par le signal de l'émetteur on trouve donc la trace correspondant au signal direct et un ou plusieurs échos.



S'il y a par exemple un écho à 1,6 msec cela signifie que la couche se trouve à  $2d = 300.000 \text{ km/s} \times 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ sec} = 480 \text{ km}$ . La couche se trouve donc à 240 km. Une première transformation consiste à basculer l'oscillo de 90° de façon à avoir les hauteurs dans le sens vertical. On peut ensuite faire varier la fréquence et reporter le tout sur un diagramme appelé **ionogramme**.

<sup>12</sup> Ce paragraphe ne fait partie du cours HAREC. Nous l'avons volontairement séparé du chapitre qu'il faut connaître pour présenter l'examen de radioamateur.

La figure ci-dessous montre un ionogramme type<sup>13</sup>



En fait un ionogramme est composé d'un ensemble de points, chaque point représente une mesure. L'ensemble de ses points forment une trace que nous avons simplifié ici en une ligne.

On constate alors qu'il y a un "accident" et que la courbe remonte légèrement avant de disparaître. Ces points déterminent les fréquences critiques c.-à-d. les fréquences au delà de laquelle aucune énergie est réfléchiée vers la terre. Explications :

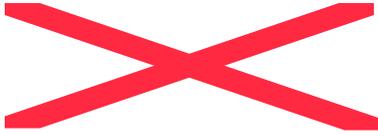
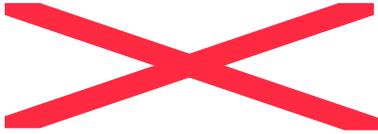
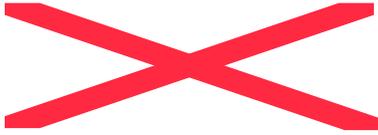
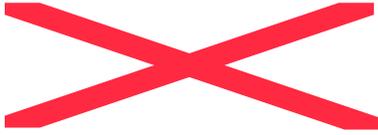
désignation	valeur	
f D	1,8 MHz	est la fréquence à partir de laquelle il y a des réflexions sur la couche E. En dessous de cette valeur les ondes sont absorbées par la couche D
f Es	5,6 MHz	est la fréquence la plus élevée qui pourra être réfléchiée lors de sporadique E
f <sub>0</sub> E	3,4 MHz	est la fréquence la plus élevée qui pourra être réfléchiée sur la couche E
f <sub>0</sub> F <sub>1</sub>	4,8 MHz	est la fréquence la plus élevée qui pourra être réfléchiée sur la couche F1 par le rayon ordinaire <sup>14</sup>
f <sub>x</sub> F <sub>1</sub>	-	est la fréquence la plus élevée qui pourra être réfléchiée sur la couche F1 par le rayon extraordinaire <sup>15</sup>
f <sub>0</sub> F <sub>2</sub>	10,1 MHz	est la fréquence la plus élevée qui pourra être réfléchiée sur la couche F2 par le rayon ordinaire
f <sub>x</sub> F <sub>2</sub>	10,9 MHz	est la fréquence la plus élevée qui pourra être réfléchiée sur la couche F2 par le rayon extraordinaire

Suivant le moment de l'année et le moment de la journée la forme générale du diagramme varie. On peut ainsi différencier les ionogrammes typiques suivants:

<sup>13</sup> Référence : H. Schütz , Sonne Erde ionosphäre und Kurzwellen- Ausbreitung

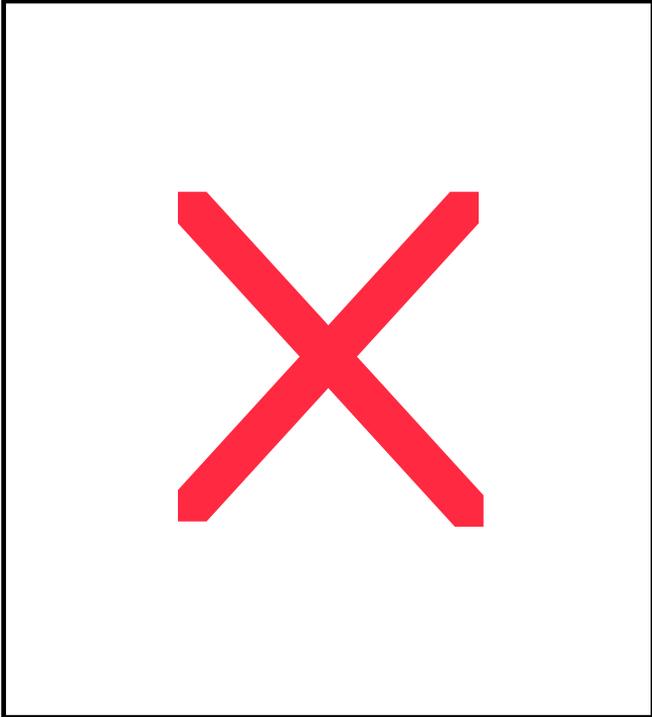
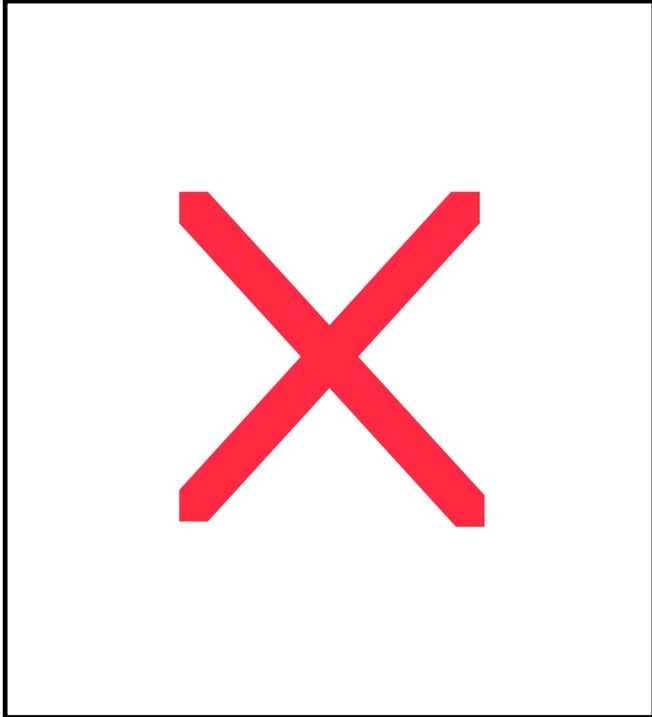
<sup>14</sup> Pour les couches F1 et F2 on voit apparaître une double réflexion et les rayons réfléchis sont appelés "ordinaire" et "extraordinaire".

<sup>15</sup> Dans l'exemple illustré ici, il n'y a pas de rayon extraordinaire pour la couche F1. Mais nous allons en voir dans les exemples qui vont suivre.

<p>1. <b>en hiver et la nuit</b> : Seule la couche F est présente. La fréquence critique est peu élevée.</p>	
<p>2. <b>en hiver et le jour</b> : Les couches E, F1 et F2 sont présentes. Les fréquences critiques des couches E et F1 sont peu élevées La fréquence critique de F2 est élevée.</p>	
<p>3. <b>en été et la nuit</b> : Outre la couche F, il y a une faible couche E appelée "sporadique E".</p>	
<p>4. <b>en été et le jour</b> : Les couches E, F1 et F2 sont présentes, de même que la couche Es. les fréquences critiques des couches E et F sont élevées, la fréquence critique de la couche F2 est comparable à celle en hiver et de jour.</p>	

Bien sûr le temps des photographies d'oscillo est un peu révolu. L'ionosonde de Dourbes fait une mesure complète chaque heure. La mesure part de 500 kHz et se termine à 30 MHz par pas de 50 kHz. Les mesures sont assistées par ordinateur. Pour chaque fréquence, on fait plusieurs points de mesures et on prend la moyenne des résultats.

Mais on peut reporter ces résultats sur des graphiques qui représentent soit, la hauteur de la couche en fonction de l'heure dans la journée. Comme ces paramètres varient d'un jour à l'autre, il est plus pratique de dessiner des courbes médianes. Mais par-dessus tout, ce n'est pas tant la hauteur de la couche qui nous intéresse, mais plutôt la fréquence critique.

Exemple pour un mois d'été	... et pour un mois d'hiver:
	
Figure 7.5.8.	Figure 7.5.9.

### 7.5.2. Détermination de l'activité solaire

Parmi les sources d'informations :

<a href="http://sidc.oma.be">http://sidc.oma.be</a>	l'Observatoire Royal de Belgique
<a href="http://www.spaceweather.com">http://www.spaceweather.com</a>	
<a href="http://hfradio.org/propagation.html">http://hfradio.org/propagation.html</a>	

D'autre part les DX-Clusters fournissent des informations sur l'activité solaire. La commande SH/WWV/15 donne les 15 derniers rapports sur l'activité solaire, par exemple:

Date	Hour	SFI	A	K	Forecast	
21-Jun-1997	21	70	4	0	VERY LOW/QUIET	<DL7AFV>
21-Jun-1997	18	70	4	0	Solar acty Very low, GMF quiet.	<G1HWY>
21-Jun-1997	15	70	4	0	SA=very-low, GF=quiet,	<DJ2LB>
20-Jun-1997	12	70	8	1	v1/q	<OZ8ABE>
20-Jun-1997	09	70	8	2	v1/q	<OZ8ABE>
19-Jun-1997	21	70	8	0	v1/q	<OZ8ABE>
19-Jun-1997	06	72	2	2	SA=VERY LOW/GMF=QUIET	<I4ACP>
18-Jun-1997	21	71	2	0	v1/q	<OZ8ABE>
18-Jun-1997	00	72	4	1	SA=VERY LOW/GMF=QUIET	<I4ACP>
17-Jun-1997	18	72	4	1	sa=vy low,gf=quiet	<OK1HH>
16-Jun-1997	18	71	0	2	SA=very-low, GF=quiet,	<DJ2LB>
15-Jun-1997	18	71	0	2	sa=vy low,gf=quiet	<OK1HH>
15-Jun-1997	06	71	2	1	vLOW/QUIET;vLOW/QUIET	<DL8AAM>
14-Jun-1997	21	70	2	1	VERY LOW/QUIET	<DL7AFV>

On y trouve les éléments suivants :

SFI , A et K : voir plus haut

SA = Solar Activity

l = low : pas d'éruptions solaires

m = moderate : quelques éruptions solaires

h = high : beaucoup éruptions solaires

vh = very high : plus de 5 éruptions solaires et activité très importante

GF = Geomagnetic Field

Q = quiet

U = unsettled : instable

A = active

### 7.5.3. Détermination de la MUF

Voir <http://www.spacew.com/www/realtime.php>

#### **7.5.4. Prévision de propagation**

La plupart des associations de radioamateurs publient mensuellement des prévisions de propagations. Celles-ci sont établies à partir de projection du flux solaire. Ces prévisions donnent 3 courbes

- la **HPF** (Highest Possible Frequency) donne la fréquence maximum pour le circuit pendant 10% du temps
- la **MUF** (Maximum Usable Frequency) donne la fréquence maximum qui est valable pendant 50% du temps
- la **FOT** (Fréquence Optimum de Travail) donne la fréquence qui est valable pendant 90% du temps

Les prévisions sont données pour un certain nombre de circuits, c-à-d de trajets déterminés par deux villes. On se limite en général à une douzaine de circuits.

#### **7.5.5. En résumé**

<b>flux solaire &gt; 150 et k &lt; 2</b>	<b>= bonnes conditions de propagation</b>
--	---

## 7.6. Propagation en VHF-UHF

Dans le passé, tous les radioamateurs débutaient par l'écoute du décimétrique. Cette tradition s'estompa en 1975 avec l'apparition des premières licences ON1, et se marqua encore plus fort avec l'apparition des ON2. Avec l'apparition des transceivers portables, le phénomène se marqua encore plus fort...

Ainsi et maintenant, tous les débutants commencent par la découverte des VHF et plus spécifiquement par l'emploi des stations répétitrices. Les stations relais sont sans conteste d'une très grande utilité pour les stations portables et mobiles, **mais la bande 144-146 MHz est bien plus riche que cela** et permet, si on exploite les modes de propagation, d'établir des communications à très grande distance. Il en est de même pour les bandes 6 m, 70 cm et 23 cm.

Nous voulons montrer ici comment utiliser **la bande 2 m pour faire du vrai DX et du beau DX**, comment exploiter ces modes de propagations, et ne pas se cantonner au seul trafic local en FM. Avec les informations qui suivront vous pourrez contacter régulièrement des stations à 200 km, et lorsque vous aurez acquis un peu d'expérience vous pourrez vous mettre en chasse de stations encore beaucoup plus éloignées. Bien sûr, au passage, nous mentionnerons les informations spécifiques aux bandes 6 m, 70 cm et 23 cm.

La connaissance des phénomènes de propagation est vitale pour faire du DX, c'est précisément ce sujet qui sera abordé dans le présent paragraphe.

Remarquons que si en HF il y a presque tout le temps des conditions de propagation permettant de faire du DX, les conditions en VHF-UHF sont beaucoup plus rares. D'où l'importance de bien comprendre les mécanismes afin de les mettre à profit.

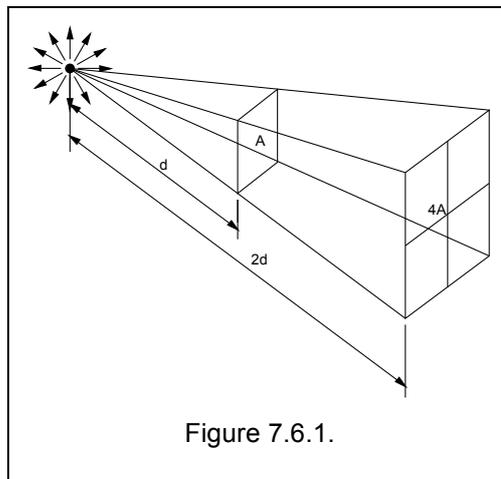
### 7.6.1. La propagation dans l'espace libre

La première approche est purement théorique, en effet on considère une antenne qui émet une onde dans le vide (ou dans l'air à condition que la composition de cet air soit homogène ...).

On peut calculer la puissance reçue, celle-ci vaut  $P_r = P_e G A_e / 4 \pi d^2$  mais comme pour les antennes isotropes on a

- $G =$  gain de l'antenne = 1, et,
- $A_e =$  surface équivalente de l'antenne de réception =  $\lambda^2 / 4 \pi$

on en déduit que  $P_r / P_e = (\lambda / 4 \pi d)^2$  avec  $d =$  distance et  $\lambda =$  longueur d'onde. Il est important de remarquer que la puissance diminue en fonction inverse du carré de la distance. Si la distance  $d$  double, alors la puissance est divisée par 4 !



Cette relation permet de calculer l'atténuation de l'onde en espace libre c-à-d,  $a_f = 10 \log ( 16 \pi^2 d^2 ) / ( \lambda^2 )$  qui retravaillé donne

$$a_f = 32,5 + 20 \log d_{(km)} + 20 \log f_{(MHz)}$$

où  $a_f$  est l'atténuation en espace libre (le "f" de "free space") exprimé en dB,  $d$  la distance en km et  $f$  la fréquence en MHz<sup>16</sup>. Attention : Il existe une formule similaire avec des miles et une autre avec des GHz, dans ces cas la constante (32,5) est différente.

Cette formule est très importante pour le calcul des liaisons par faisceau hertzien.

<sup>16</sup> Il existe une formule similaire avec des miles :  $a_f = 36,6 + 20 \log d_{(miles)} + 20 \log f_{(MHz)}$

### 7.6.2. La propagation en visibilité directe

Une première approche en VHF-UHF est de se limiter à la **portée géométrique** ou à la portée radio encore appelé "line of sight" en anglais. La portée géométrique vaut

$$D = \sqrt{2R} (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})$$

(ceci est la solution d'un triangle rectangle voir ci-contre) ou encore

$$D_{(km)} = 3,56 (\sqrt{h_{1(m)}} + \sqrt{h_{2(m)}})$$

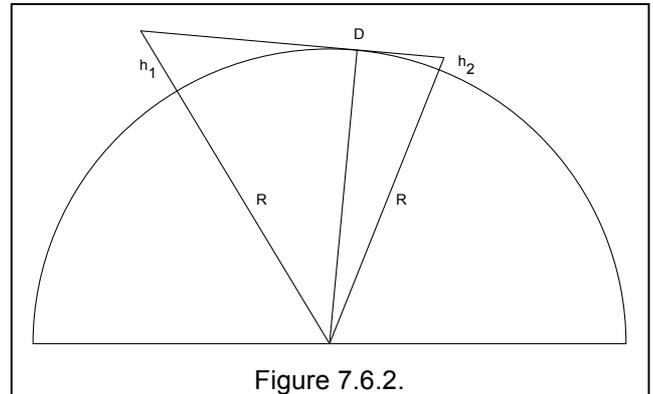


Figure 7.6.2.

Mais, l'atmosphère réfracte légèrement les ondes et celles-ci vont donc légèrement plus loin que la portée géométrique, c'est ce que l'on appelle l' **horizon radioélectrique**.

En temps normal, et pour nos contrées, avec la réfraction normale de l'atmosphère, les ondes vont environ 20% plus loin que la portée géométrique. Tout se passe comme si le rayon de la terre valait 4/3 du rayon réel<sup>17</sup>. La relation ci-dessus devient alors :

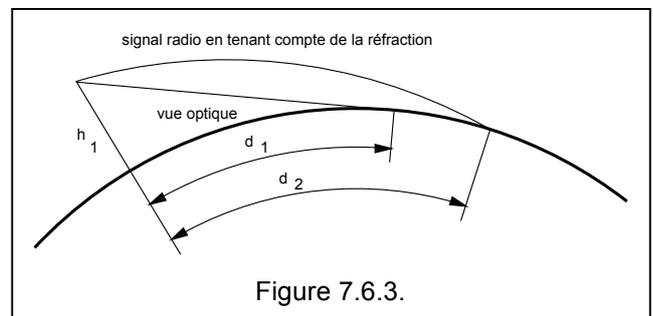


Figure 7.6.3.

$$D_{(km)} = 4,2 (\sqrt{h_{1(m)}} + \sqrt{h_{2(m)}})$$

**Un petit exemple:** Vous avez un mât de 24 m, et votre correspondant est en voiture (soit une hauteur d'antenne de 2m), la portée géométrique sera de  $D = 3,56 (\sqrt{24} + \sqrt{2}) = 3,56 \times (4,89 + 1,41) = 3,56 \times 6,30 = 22,42$  km tandis que la portée radio serait de  $4,2 \times 6,3 = 26,46$  km. Bien sûr il faut encore tenir compte des obstacles, des bâtiments, des bois et des forêts, du relief, ... Mais quoi qu'il en soit cette portée est prise comme point de départ pour l'implantation des stations VHF-UHF professionnelles : imaginez que vous deviez installer une antenne pour un service de police et que la couverture doit être de 15 km, vous pouvez, avec les formules ci-dessus, calculer la hauteur théorique de l'antenne d'émission pour pouvoir contacter toutes les voitures dans ce rayon de 15 km.

Pour compléter notre exemple, nous pourrions calculer quelle est l'atténuation sur une distance de 25 km à 145 MHz ? On reprend la formule  $a_t = 32,5 + 20 \log d + 20 \log f = 32,5 + 20 \log 25 + 20 \log 145 = 32,5 + 27,95 + 43,22 = 103,67$  dB. Si l'émetteur est de 10 Watts par exemple, on peut calculer le niveau reçu : 10 Watts = 10.000 mW = +40 dBm auxquels il faut soustraire les pertes dans les câbles (à l'émission et à la réception) et ajouter les gains des antennes (à l'émission et à la réception), et retrancher l'atténuation de trajet. Supposons que les pertes dans les câbles soient compensées par les gains des antennes, on arrive donc à un niveau de réception de  $+40 \text{ dBm} - 103,67 \text{ dB} = -63,67 \text{ dB}$  sachant que S9 correspond à -93 dBm, le signal est donc encore très fort ( S9 + 30 dB !). Ce qui veut dire que tant que l'on est dans la zone de portée radio, on n'a pas besoin de beaucoup de puissance, s'il n'y a pas d'obstacle bien sûr !

De cette formule d'atténuation on peut aussi déduire que si on utilise les UHF au lieu de la VHF, donc le 435 MHz au lieu du 145 MHz, il y aura une atténuation supplémentaire de 9,5 dB ( $20 \log 435/145 = 20 \log 3 = 9,5 \text{ dB}$ !). Et si on monte encore plus haut en fréquence c.-à-d. que l'on utilise une fréquence de 1296 MHz, l'atténuation supplémentaire par rapport au 145 MHz sera de 19 dB ( $20 \log 1296/145 = 20 \log 9 = 19 \text{ dB}$ !).

Retenons donc que, grosso modo, si on passe de 145 MHz à 435 MHz on a une atténuation de trajet de 10 dB en plus et lorsqu'on passe de 145 MHz à 1295 MHz, on a une atténuation de trajet de 20 dB en plus.

<sup>17</sup> Comme le rayon de la terre est égal à 6371 km, les 4/3 correspondent à 8495 km.

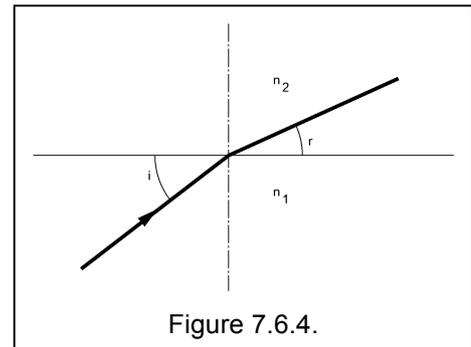
Donc tant qu'on est dans le domaine de la portée radio, on peut se permettre d'utiliser les bandes de fréquences supérieures, le signal reçu sera moins fort mais toujours "confortable".

### 7.6.3. Réflexion et réfraction au voisinage du sol

Quand une onde traverse la surface séparant deux milieux de densités différentes, les lois de la réflexion et de la réfraction (encore connues en optique sous le nom de lois de Descartes) s'appliquent :

- une partie du rayon (c.-à-d. de l'énergie) est réfléchi et l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion,  $i = i'$
- et une autre partie du rayon est réfractée dans le second milieu.

$$\sin i / \sin r = n_1 / n_2$$

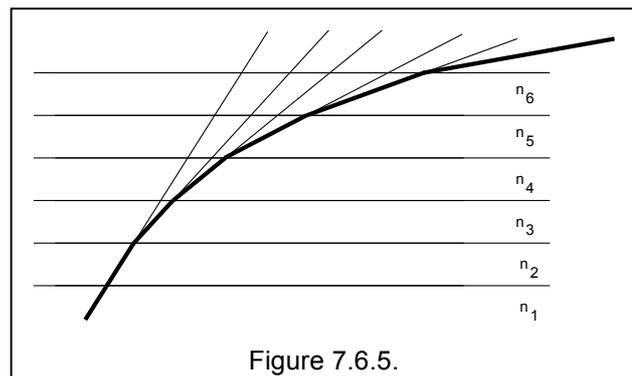


avec  $n_i$  et  $n_r$  sont les indices de réfraction des deux milieux. L'indice de réfraction est égal au rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide (299.792,458 km/s) à la vitesse de la lumière dans le matériau. Pour le verre l'indice de réfraction varie de 1,5 à 1,6 , pour la glace il est de 1,309 , pour l'eau 1,333, pour le diamant 2,419 ,etc ...

Mais l'indice de réfraction varie aussi avec la longueur d'onde, ce qui explique la décomposition de la lumière à l'aide d'un prisme ou le phénomène de l'arc en ciel.

Dans le cas d'une séparation franche d'un milieu vers un autre (par exemple une séparation air/eau), le rayon (ou l'onde) est vraiment "brisé".

Il en va autrement si l'onde passe dans l'air où l'indice de réfraction varie d'une façon progressive, dans ce cas l'onde va être incurvée d'une façon progressive, la réfraction se fait donc "en douceur"... (voir figure ci-contre).



La densité de l'atmosphère dépend de sa température, de sa pression et de son contenu en vapeur d'eau. Dans des conditions normales, toutes les trois diminuent avec la hauteur au dessus du sol. Dans les couches inférieures (jusqu'à 500 m d'altitude environ) :

- la température diminue de 0,65°C par 100 m,
- la pression de 15 mb, et
- la pression en vapeur d'eau de 0,35 mb.

Comme nous l'avons vu, l'indice de réfraction  $n$  est le rapport des sinus des angles (voir figure 2). Pour le vide il vaut 1 et pour l'air  $n$  est voisin de 1. Comme il est difficile de manipuler des nombres tels que 1,000030 , 1,000027, ... et 1,000035, on utilise le **coindice**  $N$  qui vaut  $N = (n-1)10^6$ . Le coincide peut être calculé par la formule empirique suivante :

$$N = 77,6 / T (P + 4810 P_0/T)$$

où  $T$  est la température absolue (en °K),  $P$  la pression atmosphérique en mbar et  $P_0$  la pression partielle de vapeur d'eau. Au voisinage du sol  $n$  vaut 1,000300, et par conséquent  $N$  vaut environ 300 et normalement la fluctuation de cet indice est de  $\pm 20$  , il varie donc "normalement" entre 280 et 320 ....

Mais les choses ne sont pas si simples et en particulier on peut avoir des mélanges d'une masse de vapeur d'eau mélangée à l'air sec, dans ce cas

$$N = P (77,6 / T + 600 s/T^2)$$

où  $s$  est le rapport de la masse de vapeur d'eau mélangée à l'air à la masse de l'air sec correspondant.

Le CCIR a défini une atmosphère de référence pour la réfraction par la relation  $N = 315 \exp(-0,136 h)$  où  $h$  est la hauteur en km au-dessus du niveau de la mer.

Ainsi l'onde rayonnée se propage au-delà de l'horizon géométrique. L'extension de l'horizon radioélectrique peut-être représenté comme une propagation rectiligne sur une terre ayant un rayon de courbure virtuelle plus grand que le rayon réel, la terre apparaît donc comme étant plus plate. Le rayon réel étant de 6350 km, on adopte souvent un rayon virtuel de 8450 km ( $4/3$  de 6350 km) et cette condition est réalisée pendant plus de 99 % du temps.

Figure 7.6.6.

Mais dans certains cas, l'allure de l'indice de réfraction peut s'inverser c.-à-d. que l'indice augmente avec la hauteur, on parle alors de sous réfraction (ou "subrefraction" en anglais) ou de réfraction inverse. La portée diminue alors et est inférieure à la portée géométrique. Ce phénomène a lieu par exemple lorsque la température est élevée, suivie d'une forte précipitation avec des nuages très bas et aussi au coucher du soleil. Mais heureusement ce phénomène est extrêmement rare dans nos contrées.

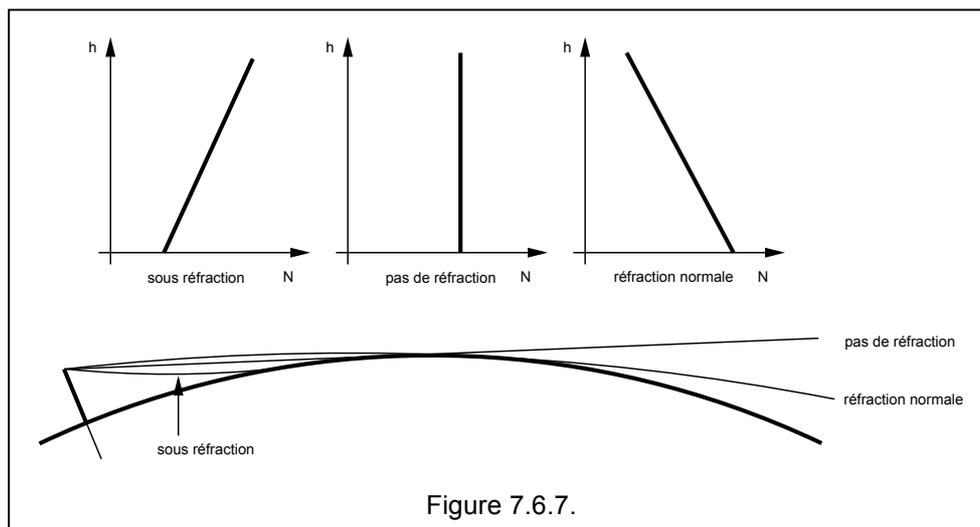


Figure 7.6.7.

La figure ci-dessus résume les trois types de propagation:

- la portée géométrique (un cas purement théorique où  $N$  serait indépendant de  $h$ ...),
- la sous réfraction (extrêmement rare dans nos contrées), et,
- la réfraction normale.

### 7.6.4. Diffraction

Quand les ondes radioélectriques touchent un obstacle, une ombre se produit, son contour n'est pas clairement défini et son étendue (derrière l'obstacle) est fonction de la longueur d'onde.

En optique lorsqu'on éclaire une palissade, derrière la palissade il ne fait pas tout à fait noir. Le principe d'Huygens donne une explication de ce phénomène : lorsque l'onde part de l'antenne A, il y a une série de fronts d'ondes qui progressent (ce qui a été représenté par les cercles autour de l'antenne A).

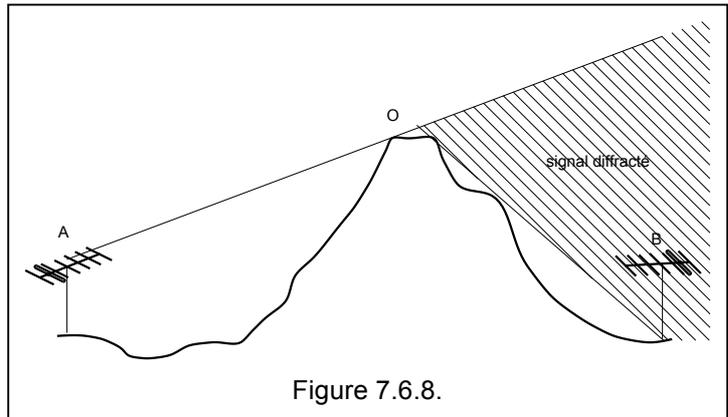


Figure 7.6.8.

Lorsque l'onde atteint l'obstacle O (la montagne sur la figure), on peut considérer qu'il se forme là un élément rayonnant isotrope émettant une nouvelle onde et cette nouvelle onde éclaire aussi derrière l'obstacle (ce qui a été représenté par les cercles autour du sommet de la montagne). Cette onde diffractée peut donc atteindre une antenne B située derrière l'obstacle

L'atténuation supplémentaire due à la diffraction produite par la terre peut se calculer à l'aide de la formule

$$a_d = 20 \text{ dB} + (0,72 \times D_{(km)} / \sqrt[3]{\lambda_{(m)}})$$

Il s'agit bien sûr d'une formule empirique.

Un exemple : On a deux pylônes, l'un de 25 m, l'autre de 36 m, ils sont espacés de 56 km, on travaille en 145 MHz, calculez l'atténuation totale?

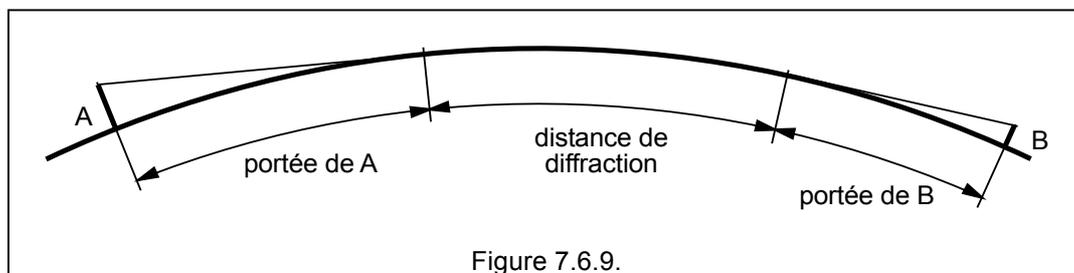


Figure 7.6.9.

La portée optique est de  $4,2 (\sqrt{25} + \sqrt{36}) = 46,2 \text{ km}$

La distance entre les deux antennes est donc supérieure à la portée optique. On divise alors la distance en trois trajets:

- la portée géométrique du premier pylône est  $d = 3,56 \sqrt{25} = 17,8 \text{ km}$ ,
- la portée du second pylône est  $d = 3,56 \sqrt{36} = 21,4 \text{ km}$
- par conséquent la distance de diffraction est donc égale à  $56 - 17,8 - 21,4 = 17,2 \text{ km}$ , et l'atténuation de diffraction sur cette distance vaut  $A_d = 20 \text{ dB} + (0,72 \times 17,2 / \sqrt[3]{2}) = 20 + (12,4 / 1,25) = 29,9 \text{ dB}$ .

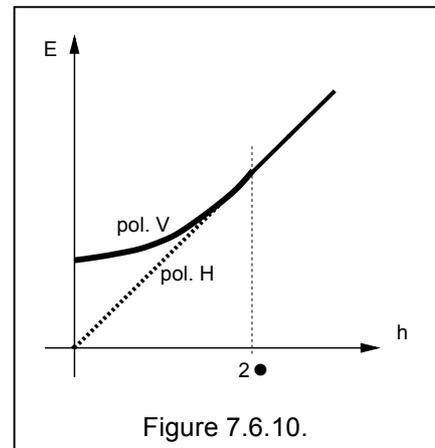
L'atténuation en espace libre vaut sur le trajet total vaut  $A_f = 32,5 + 20 \log 145 + 20 \log 56 = 32,5 + 43,2 + 34,9 = 110,7 \text{ dB}$  auquel il faut ajouter le 29,9 dB, soit un total de 140,6 dB. Reprenant l'exemple de l'émetteur de 10 W, le niveau reçu est maintenant de  $+40 \text{ dBm} - 140,6 \text{ dB}$  soit  $-100,6 \text{ dBm}$  soit 7,6 dB en dessous de S9 ( $S9 = -93 \text{ dBm}$ ) soit entre S7 et S8. La diffraction apporte donc une atténuation importante ! Ceci explique aussi pourquoi, sur une autoroute par exemple, lorsqu'on passe dans une vallée importante, le signal tombe très rapidement de S9 à S1 ...

### 7.6.5. Polarisation verticale et horizontale

Près du sol les ondes polarisées verticalement et horizontalement se comportent un peu différemment.

Pour une onde polarisée horizontalement, l'intensité du champ près du sol est pratiquement nulle, puis elle croît pratiquement linéairement.

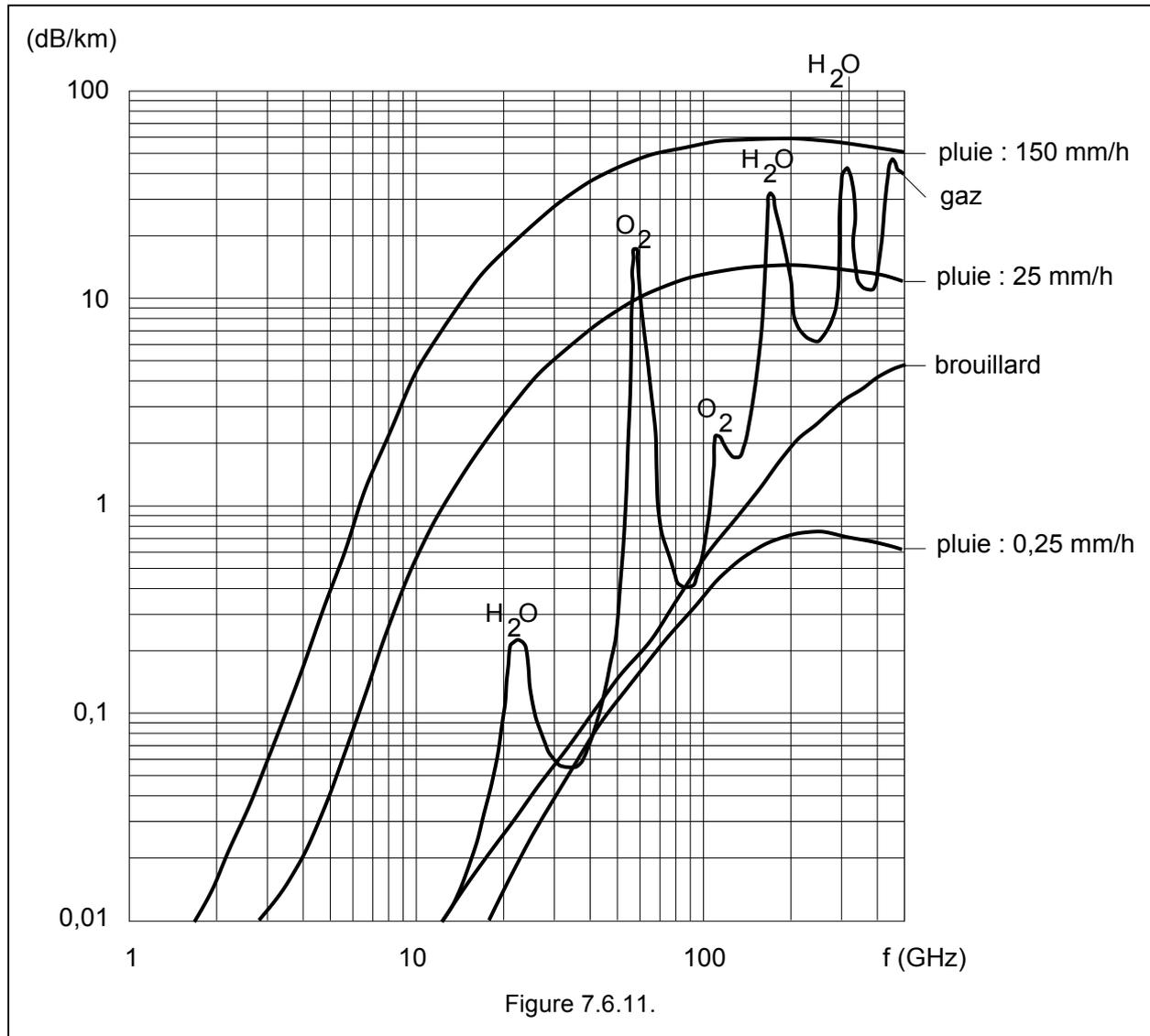
Par contre une onde polarisée verticalement possède un champ plus élevé, puis rejoint pratiquement l'évolution du champ d'une onde polarisée horizontalement pour une hauteur voisine de  $2 \lambda$ .



7.6.6. Atténuation par les gaz<sup>18</sup>

Pour les fréquences élevées et plus particulièrement au-delà de 3 GHz, l'absorption moléculaire peut jouer un rôle non négligeable car il existe des pointes de résonances donnant lieu à des absorptions énormes.

Ainsi, l'oxygène présente une absorption importante aux environs de 60 GHz et à 118,75 GHz, la vapeur d'eau donne lieu à une absorption importante sur 22,2 GHz, sur 183 GHz et sur 325 GHz.



Sur le même diagramme on peut reporter l'atténuation due à la pluie, au brouillard, aux nuages ou à la grêle, ce sont ce qu'on appelle les **hydrométéores**. Ici, il n'y a pas de phénomène de résonance particulière, la courbe est monotone, mais l'atténuation dépend de la densité de la pluie. En dessous de 2 GHz on peut dire que l'influence est négligeable. Deux courbes extrêmes sont données, il faut noter que les précipitations maximales que l'on rencontre en Allemagne du Nord sont de l'ordre de 55 mm/h, et le maximum en Belgique est probablement du même ordre de grandeur.

<sup>18</sup> Pour plus de détails, voir Recommandation ITU-R P.676.

### 7.6.7. Absorption par les arbres<sup>19</sup>

L'atténuation introduite par la végétation est très difficile à évaluer. Toutefois la figure ci-contre donne l'atténuation pour une zone boisée avec une densité moyenne. Il faut remarquer que cette atténuation peut fortement varier suivant la nature de la végétation, suivant les conditions d'humidité, suivant la saison (il y a plus de sève en été qu'en hiver), selon les précipitations qui viennent se déposer sur la végétation, etc

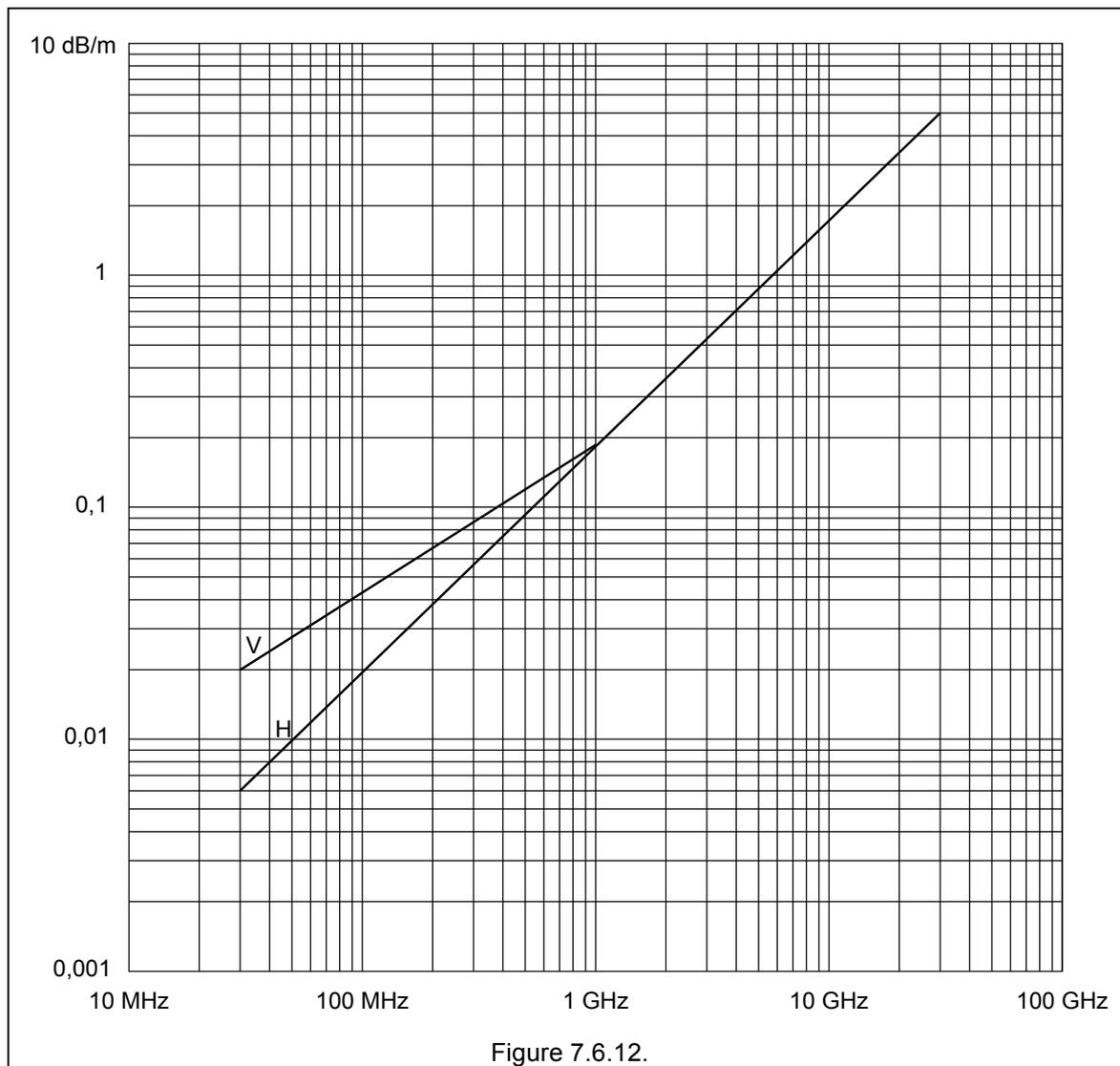


Figure 7.6.12.

L'atténuation est donnée par "mètre" d'épaisseur de la végétation. Ainsi, pour 145 MHz, en polarisation verticale, on trouve 0,055 dB/m et donc pour une bois de 100 m, l'atténuation sera de 5,5 dB.

En dessous de 1 GHz les atténuations en polarisation H et V sont différentes.

<sup>19</sup> Pour plus de détails, voir Recommandation ITU-R P.833.

### **7.6.8. Courbe normalisées de propagation entre 100 MHz et 2 GHz**

Afin de pouvoir calculer le champ d'un émetteur (pour la radiodiffusion, pour les services mobiles, etc ..), il existe des courbes normalisées<sup>20</sup> pour différentes fréquences et pour différents types de terrain (terre, mer chaude, mer froide) et pour différents types de climat (pour l'Europe, pour l'Afrique, pour le désert, pour les zones tropicales, ...). Ces courbes donnent soit

- le champ constant garantis pour plus de 50% du temps et plus de 50 % des emplacements, et,
- le champ troposphérique atteint pour 1 % du temps et pour des conditions de propagation troposphérique non exceptionnelle. Ce dernier paramètre sert entre autre à calculer le brouillage

---

<sup>20</sup> Pour plus de détails, voir Recommandation ITU-R P.1546.

## 7.7. Propagations spéciales en VHF-UHF

### 7.7.1. Le milieu de propagation

Les ondes radio sont propagées au travers de l'atmosphère, c'est-à-dire une zone qui va depuis le sol jusqu'à quelques 600 km au-dessus de la surface terrestre. L'atmosphère n'est pas un élément indispensable à la propagation des ondes, en effet, les ondes électromagnétiques se propagent aussi dans le vide.

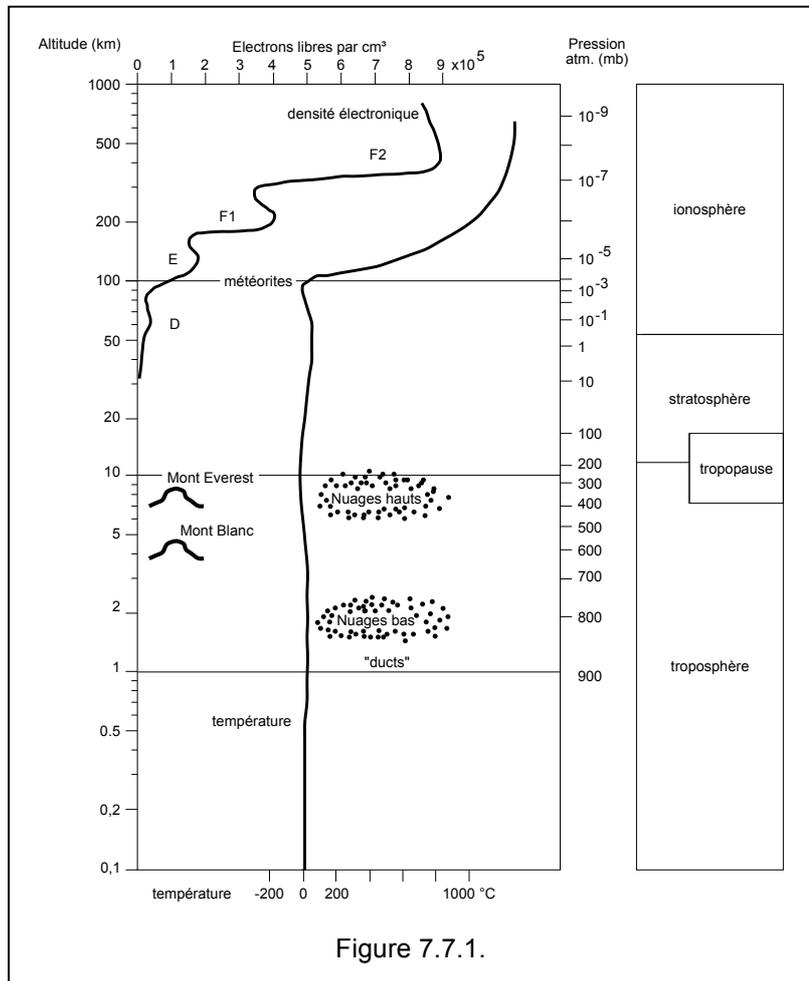
L'atmosphère peut influencer une onde qui la traverse. L'atmosphère est composée essentiellement d'oxygène, d'hydrogène et d'azote, mais nous y trouvons aussi des traces d'autres gaz, ainsi qu'une série de matériaux tels que des poussières, du pollen, de l'eau, des bactéries, et de fragments de matière venant du cosmos.

La composition de l'atmosphère est assez constante depuis le niveau de la mer jusqu'à la fin. Toutefois la densité décroît lorsque l'altitude croît.

Cette mince couverture autour de la terre la protège contre le rayonnement solaire et nous procure le support pour nos communications à très longue distance, car les couches ionisées ont le pouvoir de réfléchir les ondes. L'atmosphère peut être divisée en couches appelées

- la **troposphère** qui s'étend de 0 à 10 km. La partie de l'atmosphère qui va du niveau de la mer à une altitude de 10 km environ s'appelle la troposphère ou "zone météo". C'est le lieu où se produisent les vents, les tempêtes et les pluies qui érodent en permanence l'écorce terrestre. Les changements météorologiques dans la troposphère sont responsables de plusieurs phénomènes de propagation très intéressants. Si on examine les variations de températures par rapport à l'altitude on constate une diminution plus ou moins régulière de la température, partant de + 20°C au sol par exemple jusqu'à -50°C à 10 km. Il suffit de se rappeler les températures annoncées lors d'un vol en avion ...
- la **stratosphère** qui s'étend de 10 à 50 km. Dans la stratosphère la température reste constante malgré l'augmentation d'altitude.
- la **mésosphère** qui s'étend de 50 à 80 km
- l' **ionosphère** qui débute à 80 km et qui est bien connue par les radioamateurs qui font du décimétrique.

La figure donne un aperçu des différentes couches et des phénomènes qui s'y produisent. Nous nous limiterons simplement aux deux phénomènes les plus courants : la propagation troposphérique et les sporadiques E.



### 7.7.2. La propagation troposphérique

#### 7.7.2.1. Aspects physiques de la propagation troposphérique

La propagation troposphérique est la forme la plus commune de transmission VHF au-delà de la ligne d'horizon, elle est le résultat de variations dans une région d'air entourant la terre. C'est aussi cette forme de propagation que les radioamateurs débutants rencontrent rapidement et qui les déroutent un peu : comment à un certain moment de l'année peut-on entendre un relais NBFM à une distance de 200 km? Comment un radioamateur à plus de 300 km peut-il soudainement "entrer" dans le relais local ? Tout cela est relativement simple à expliquer : c'est le résultat de la propagation troposphérique ...

Les radioamateurs qui s'intéressent aux VHF-UHF découvriront ainsi leur premier mode de propagation dans les conditions exceptionnelles et mettront un certain nombre de DX et de carrés WW-locators à leur palmarès.

Ainsi, lors de propagation troposphérique, en CW ou/et en SSB, on peut réaliser des contacts de 1500 km et plus sur 144 ou 432 MHz. Ces conditions de propagation exceptionnelles se produisent presque exclusivement dans des situations de haute pression. Un baromètre est donc un appareil indispensable dans un shack VHF-UHF.

Pour les services de radiodiffusion et pour les services professionnels (polices, gendarmerie, taxi, transports, ...) la propagation troposphérique est un ennemi, en effet durant ces phénomènes ils sont "perturbés" par des stations similaires à plusieurs dizaines de km de distance, stations qu'ils ne désirent pas entendre bien sûr !

Mais pour nous radioamateurs, la propagation troposphérique est un phénomène que nous exploiterons pour le DX .

La propagation troposphérique apparaît lorsque 2 conditions sont réalisées : une **inversion de températures** et une **masse d'air sec et chaud superposée à une masse d'air froid et humide**.

Dans les conditions normales, l'évolution de la température de l'air en fonction de l'altitude est représentée ci-contre.

Toutefois, c'est l'évolution entre 0 et 2000 m (voire 3000 m) qui nous intéresse le plus, car en cas d'inversion de température, l'indice de réfraction va aussi être modifié et les ondes vont être réfractées.

La figure ci-dessous montre un évolution théorique (a), une faible inversion à une altitude de 1100 m (b) et une forte inversion à une altitude de 2000 m (c).

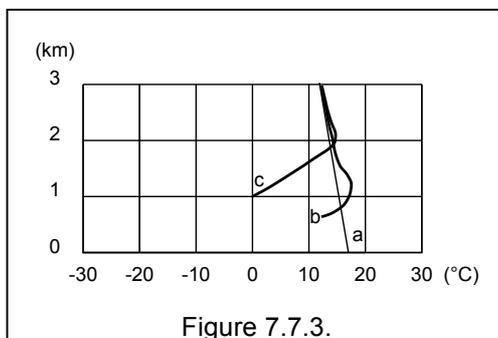


Figure 7.7.3.

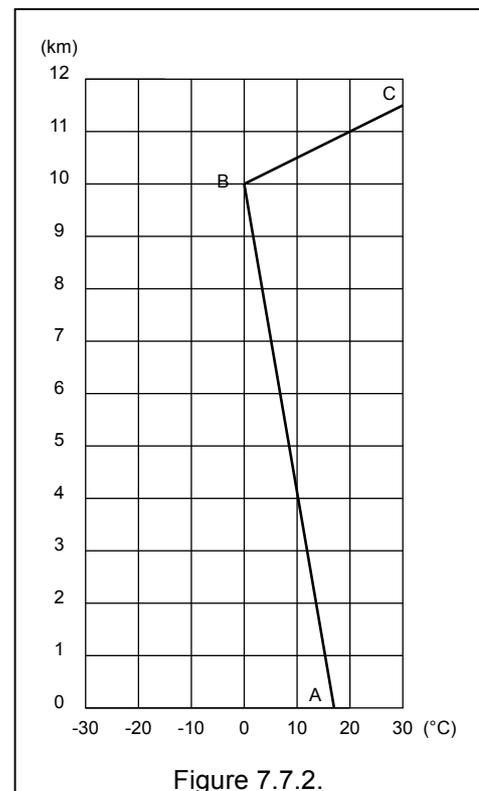
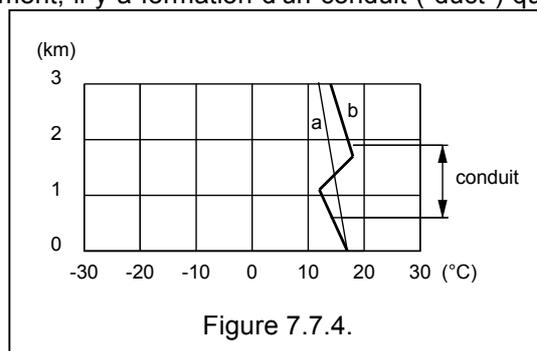


Figure 7.7.2.

La couche d'inversion peut avoir une épaisseur de 100 à 500 m.

Mais lorsqu'il y a deux inversions de température consécutivement, il y a formation d'un conduit ("duct") qui canalise les ondes.

L'analyse de la carte météo permettra de reconnaître les critères essentiels qui peuvent conduire à des conditions de propagation exceptionnelles. Les cartes publiées dans les journaux donnent une première idée de la situation, mais les Instituts Météorologiques peuvent fournir des cartes bien plus détaillées. Ces instituts fournissent aussi des analyses des températures et de l'humidité des couches d'air.



Chaque situation de haute pression n'est pas nécessairement le moment de conditions de propagation exceptionnelles. En effet les cellules de hautes pressions, mais de faibles dimensions ne conduisent pas à des conditions de propagation exceptionnelles à très grande distance, il faut donc que la zone de haute pression soit fort étendue, ceci se produit en automne et en hiver.

### 7.7.3. Liaisons par sporadiques E

#### 7.7.3.1. Aspects physiques

Le second phénomène qui conduit à des liaisons lointaines est le sporadique E. Nous avons déjà parlé de la couche E et de la couche sporadique E pour les liaisons en HF, en fait il s'agit du même phénomène qui se manifeste jusqu'à des fréquences de 145 MHz. La propagation par sporadique E ne se rencontre pas au-delà de 220 MHz<sup>21</sup>. Les sporadiques E sont plus rares que les occasions de propagation troposphérique.

Comme son nom l'indique, il s'agit de condition "sporadique" (= "qui existe çà et là, isolément") et elles ont lieu sur la couche "E" de l'ionosphère qui se situe à une altitude de 40 à 100 km environ. L'épaisseur de la couche E varie d'une centaine de mètres à mille mètres environ.

Plus la hauteur de la couche est grande plus le "skip" peut être grand, en effet si nous examinons la figure 26, nous voyons que  $D = 2 R \arccos(R / R+h)$ . Supposons que la couche E se trouve grosso modo à 100 km et R étant de 6350 km, la distance de saut est ainsi de 2240 km. Dans cette formule on utilise bien sûr des radians ! Ceci est un cas théorique où l'antenne pointe à l'horizon et où la réflexion se fait en un point précis... toutefois ceci est suffisant comme première approche.

Il semble que les Es se produisent toujours à des époques calmes du champ magnétique terrestre ( $A_k$ ). L'apparition des Es ne semble pas être lié au cycle solaire. L'étendue de la couche peut atteindre 100 km. La couche Es n'est pas stationnaire, elle se déplace suite à la rotation de la terre, en direction de l'ouest.

Cette couche varie aussi bien dans son étendue que dans sa capacité de réflexion. Il en résulte que les signaux sont soumis à de fortes fluctuations.

La fréquence des événements Es n'est pas la même partout, elle est très forte en Italie du Sud, avec un taux de 10%, en Suisse et en Allemagne du Sud le taux est d'environ 4%, en Allemagne du Centre et du Nord, au Nord de la France et dans le Benelux elle serait plutôt de 3%.

#### 7.7.3.2. Les ouvertures Es

La plupart des ouvertures Es ont lieu de la mi-mai à la mi-août, avec une activité plus marquée durant les mois de juin et juillet. A l'examen des liaisons faites en Es se produisent entre 08:00 et 20:00 UTC, avec une pointe marquée entre 16:00 et 18:00 UTC. La durée des ouvertures Es varie de quelques minutes à plusieurs heures

<sup>21</sup> Les radioamateurs américains et canadiens possèdent la bande de fréquence de 222 à 225 MHz et ils ont réalisé des liaisons en Es sur ces fréquences.

### 7.7.3.3. Indications des possibilités d'ouvertures

La surveillance de la bande 28 MHz offre les indications les plus déterminantes. La formation des Es fait également apparaître des conditions short-skip (c.-à-d. entre 1000 et 1300 km) en 28 MHz.

Dans le cas d' Es on peut aussi recevoir des canaux TV bande I (47 à 68 MHz) ou des émissions FM de pays très éloignés. Et tout comme pour les conditions de propagation troposphérique, le réseau sur 14,345 MHz ou le DX-Cluster sont d'autres sources d'indications.

### 7.7.3.4. Distances couvertes

Comme nous l'avons vu plus haut, la distance dépend de la hauteur de la couche et il existe une distance minimale qui est de l'ordre de 1000 km, en effet les sporadiques E sont synonymes de haute fréquence critique. Si l'angle de départ est important, il n'y aura qu'une traversée de la couche E. par conséquent l'angle de départ doit être très faible. La première chose à faire est donc de tracer un cercle de rayon 1000 km à partir de votre QTH sur la carte WW-locator et il est fort peu probable que vous contactiez une station en Es à l'intérieur du cercle !

La distance maximale dépend aussi de cet angle de départ et de la hauteur de la couche E. La distance maximale atteint 2200 km, ou parfois jusqu'à 3500 km

### 7.7.4. Propagation par aurore boréale

Les aurores boréales ne se produisent que pour des latitudes supérieures à 30°. Ce mode de propagation est accompagné d'une distorsion caractéristique qui fait que seule la CW est pratiquement utilisée.

### 7.7.5. Les modes "scatter" ou dispersion

### 7.7.6. EME

Le concept est assez simple, il consiste à utiliser la surface de la lune comme réflecteur. Les deux stations doivent évidemment être en vue de la lune. Comme la distance moyenne terre-lune est de l'ordre de 383.000 kilomètres (plus précisément de 356.375 à 406.705 km), l'atténuation du signal est énorme comparativement à l'atténuation d'une liaison terrestre. Par exemple sur

144 MHz l'atténuation est de 251,5 à 253,5 dB  
432 MHz l'atténuation est de 261 à 263 dB  
1296 MHz l'atténuation est de 270,5 à 272,5 dB

Une distance de 2 x 383.000 km, signifie aussi un temps de propagation de 2,5 secondes !

La lune n'est pas un réflecteur parfait, seulement 0,065 de la puissance arrivant sur la lune est réfléchi, ce qui représente une perte de 12 dB.

Le trafic EME nécessite donc la mise en oeuvre d'une puissance très importante, des conditions de réception optimisées et une procédure de trafic tout à fait particulière.

Pour le trafic EME, l' IARU Région 1 a désigné des plages de 25kHz à savoir:

144,000 à 144,025 MHz,  
432,000 à 432,025 MHz, et,  
1296,000 à 1296,025 MHz,

Les modes utilisés sont la CW et la phonie SSB, mais la plupart des contacts se font en CW.

Il existe un réseau EME destiné à prendre des contacts au préalable sur 14,345 MHz.

L'orbite de la lune étant elliptique, l'atténuation de trajet varie de 2 dB (voir les valeurs ci-dessus) entre le périhélie (distance minimum) et l'apogée. On peut donc profiter de ces 2 dB en prévoyant les jours favorables... Si le soleil est trop près de la lune (nouvelle lune) le bruit augmente sensiblement et ces jours doivent être évités.

libration fading fluttery, rapid irregular fading

Equipement requis : un récepteur à faible facteur de bruit (0,5 dB), câble entre antenne et Rx à faible perte

Etablissons le bilan d'une liaison EME : si une station dispose de 500 Watts (+57 dBm) sur 144 MHz, et que le correspondant dispose d'un récepteur dont le NF est de 0,5 dB, dont la perte dans le câble est de 1 dB et si la bande passante du récepteur est de 50 Hz, donc le niveau minimum reçu doit être supérieur à -174 dBm/Hz + 17 dB + 1,5 dB = -155,5 dBm.

puissance d'émission 500 W	+57	dBm
atténuation de trajet	-251.5	dB
seuil de réception	+174	dBm
filtre BP 50 Hz	-17	dB
NF du récepteur	-0.5	dB
perte dans le câble côté récepteur	-1	dB

Il faudra donc que le gain total des antennes soit de +57 dBm - 251,5 dB + 155,5 dBm - 12 dB = -51 dB .  
Donc il faudra que chacun des correspondant dispose d'une antenne dont le gain soit de 26 dBi au moins!

L'angle sous lequel on voit la lune est donné par  $\Phi = \tan^{-1} (\text{diamètre de la lune} / \text{distance terre-lune}) = \tan^{-1} (3472 / 353680) = 0,56^\circ$  diamètre de la lune. Si l'antenne a un plus grand angle d'ouverture, elle va éclairer une plus grande zone et par conséquent une partie de la puissance sera perdue. Si l'antenne a un plus petit angle d'ouverture le pointage sera difficile.

### **7.7.7. Propagation via les traînées météoriques**

Les météorites sont des particules métalliques ou minérales qui gravitent sur des orbites elliptiques autour du soleil. La plupart de ces particules sont microscopiques. Chaque jour des centaines de millions de ces météorites pénètrent dans l'atmosphère terrestre avec des vitesses de 30.000 à 300.000 km/h. A ces vitesses, lorsque le météorite pénètre dans l'atmosphère il brûle et s'évapore, ce qui produit de la chaleur, de la lumière et produit une traînée météorique d'électrons et d'ions positifs. Un météorite classique de la grandeur d'un grain de sable produit une traînée d'un mètre de diamètre et de 20 à 60 km de long.

Les ondes radio peuvent être réfractées si elles rencontrent un météorite. Les traînées météoriques ont lieu à des altitudes voisines de la couche E (environ 100 km) et la propagation se fait sur des distances similaires à celles des sporadiques E (2000 km). Les fréquences de 24 à 60 MHz sont le plus affectées, mais le phénomène est courant pour le 144 MHz et relativement rare pour 432 MHz.

La durée du phénomène est relativement courte et dépend essentiellement de la grandeur du météorite et de la fréquence. Un météorite de la grandeur d'un demi cm (la grandeur d'un petit pois), ne produit pas de réfraction pour le 432 MHz, une propagation qui dure quelques 20 sec en 144 MHz et plusieurs minutes en 28 MHz.

Le nombre de météores dépend aussi de la distance terre soleil donc de la saison et ce nombre est relativement élevé de juin à septembre.

A certains moments de l'année la terre rencontre un plus grand nombre de météorites. Le tableau ci-après donne les principales chutes de météores:

---

3-5 janvier	Quadrantides	#
19-23 avril	Lyrides	
5-6 mai	Eta-Aquarides	
19-21 mai	Cetides	*
4-6 juin	Perseids	* #
8 juin	Arietides	*
9 juin	Zeta-Perséides	
30 juin - 2 juillet	Taurides	*
26-31 juillet	Aquarides	
27 juillet - 14 août	Perseides	
18-23 octobre	Orionides	
26 octobre - 16 novembre	Taurides	
14-18 novembre	Léonides	
10-14 décembre	Géminides	#
22 décembre	Ursides	

# indique les 3 pluies météorites les plus importantes.

\* indique les phénomènes diurnes, les autres étant plus favorables entre minuit et l'aube.

### **7.7.8. Transéquatorial**

La propagation transéquatoriale (TE) est une forme de propagation due à la couche F, qui fut découverte dans les années 1940. Elle fonctionne essentiellement sur 50 MHz, sur 144 MHz et parfois sur 432 MHz. Cette propagation est caractérisée par des chemins nord-sud perpendiculaire à l'équateur magnétique, elle a lieu sur des latitudes de + et - 15 degrés par rapport à l'équateur magnétique, le plus souvent l'après-midi et le soir, et par conséquent nous ne sommes pas concernés !

### **7.7.9. Propagation via les irrégularités alignées sur le champ magnétique terrestre (FAI)**

## 7.8. Propagation en micro-ondes

### 7.8.1. Bilan de liaison hertzienne

Le bilan d'une liaison hertzienne est un calcul qui permet de déterminer le niveau théorique à la réception.

Le bilan est une somme de

- la puissance d'émission, exprimée en dBm
- des pertes dans le feeder à l'émission, exprimées en dB
- du gain de l'antenne d'émission, exprimée en dBi
- de l'atténuation d'espace, exprimée en dB
- du gain de l'antenne de réception, exprimée en dBi
- des pertes dans le feeder à la réception, exprimées en dB

Les pertes dans les feeders sont calculées en fonction de leur atténuation spécifique et de leur longueur. On peut bien sûr inclure les pertes dans les connecteurs et, s'il y en a, toutes les autres pertes telles que pertes dans filtres, pertes dans les circulateurs, etc.

Les gains d'antennes se retrouvent dans les spécifications des fournisseurs (catalogues).

On peut également tenir compte des pertes additionnelles pour les climats tempérés et humides et ajouter les pertes occasionnées par les chutes de pluies. Ces valeurs deviennent significatives au-delà de 6-8 GHz.

On peut également tenir compte de pertes supplémentaires lorsque le profil n'est pas complètement dégagé.

Cette somme donnera le niveau reçu par le récepteur en dBm et indiquera la marge entre ce niveau et le niveau minimum du squelch ou le niveau minimum pour obtenir un certain TEB (cas des liaisons numériques).

### 7.8.2. Atténuation de trajet en espace libre

Voir plus haut, et pour rappel :

$$a_f = 32,5 + 20 \log d_{(km)} + 20 \log f_{(MHz)}$$

Toutefois l'espace libre n'est qu'une hypothèse, il faudra également tenir compte de l'atmosphère et des obstacles.

7.8.3. Le profil d'une liaison

Pour déterminer l'atténuation entre l'émetteur et le récepteur, on se base sur un diagramme appelé "profil" qui représente en quelque sorte la coupe de terrain entre les 2 antennes. A partir du profil, on peut déterminer plusieurs cas, et pour chaque cas il existe des abaques ou des formules empiriques à appliquer afin de trouver l'atténuation supplémentaire.

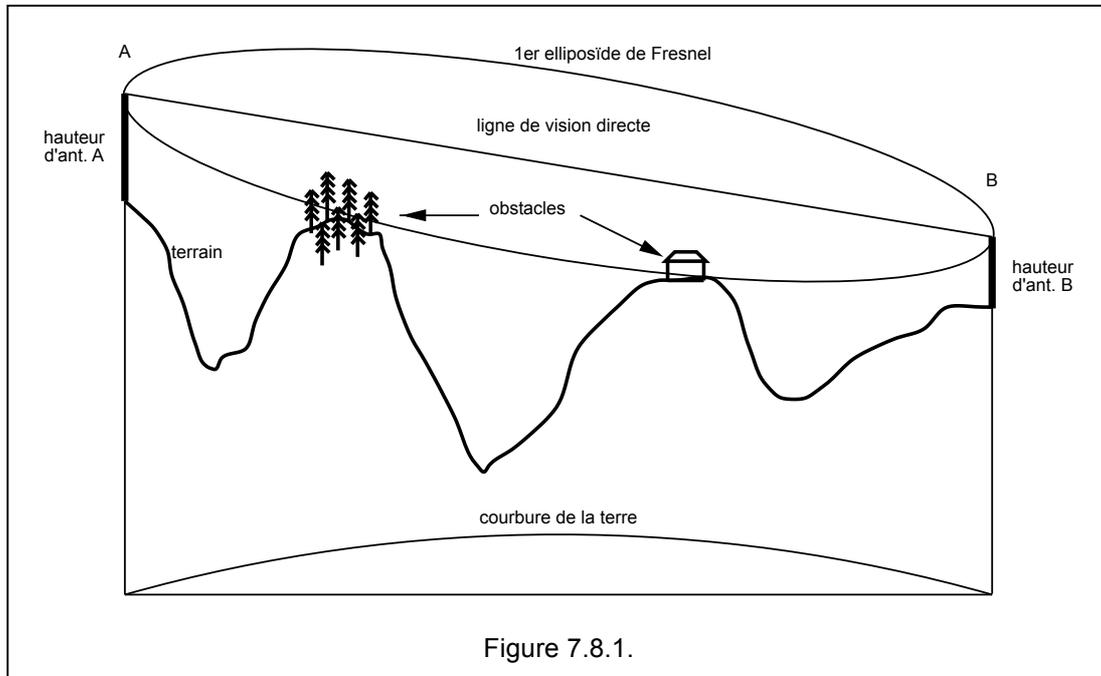


Figure 7.8.1.

Le profil comporte plusieurs éléments, c-à-d plusieurs des "lignes":

- à gauche et à droite, il y a deux lignes verticales sur lesquelles on reporte la hauteur de chacun des sites, plus la hauteur des antennes à chaque site. Les points A et B représentent les antennes.
- entre les antennes A et B, il y a la **ligne de vision directe**.
- dans le bas de l'épure une ligne représente l'**élévation due à la courbure du sol**, cette ligne représente le niveau de la mer (0 m) en tout point du profil. L'élévation due à la courbure de la terre peut se calculer par la formule

$$h = (d_1 d_2) / 2 R$$

Si nous voulons tenir compte de la réfraction normale nous avons vu qu'on adopte un rayon égal à 4/3 R soit 8500 km .Et il existe malheureusement quelques jours par an où il y a subréfraction auquel cas on devrait utiliser un rayon équivalent à 2/3 R.

R = 2/3	4250 km	$h_{(m)} = (d_1 (km) d_2 (km)) / 8,5$
R = 1	<b>6370 km</b>	$h_{(m)} = (d_1 (km) d_2 (km)) / 12,74$
R = 4/3	8500 km	$h_{(m)} = (d_1 (km) d_2 (km)) / 17$

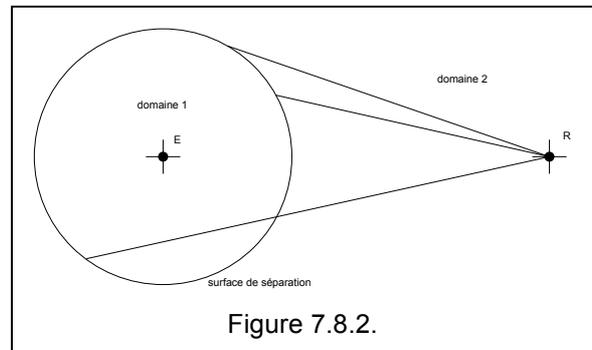
- au dessus de la courbure de la terre on reporte l'élévation due à l'altitude. Les données d'altitudes sont disponibles auprès des instituts de cartographies (IGN par exemple) mais elles sont aussi disponibles sur Internet.
- on doit aussi reporter tous les **obstacles naturels ou artificiels**, noter où il y a des forêts, estimer la hauteur des arbres (visite sur place), noter les endroits où il y a des maisons et des villes et noter les hauteurs des bâtiments (visite sur place). En pratique on ne fera ce travail que pour les points critiques. Les points critiques seront déterminés par l'étude du profil. Tous ces éléments seront ensuite reportés sur le profil.

- une dernière ligne très importante est le tracé du **1er ellipsoïde de Fresnel** (Fresnel est le savant qui étudia l'optique ondulatoire) (voir plus loin).

Une fois le profil tracé, il faudra l'analyser et calculer l'atténuation supplémentaire, et c'est là que les romains s'empoignèrent, puisqu'on a recourt à des formules empiriques et à des abaques, et que le calcul exige un certain "feeling" et une certaine expérience.

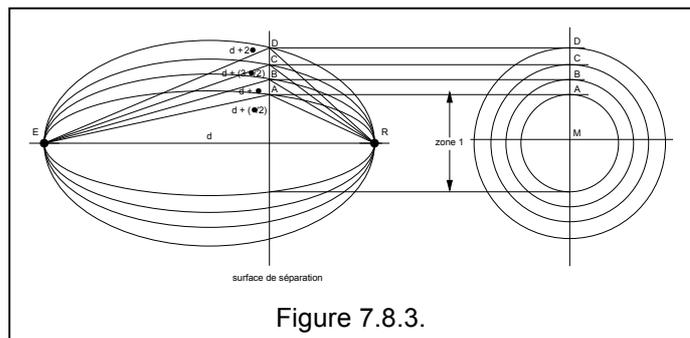
### 7.8.4. Principe de Kirchoff-Huygens

On considère une surface qui divise deux domaines de sorte que le domaine 2 ne comporte aucune source électromagnétique. On suppose que la valeur du champ en tous point de cette surface est connue. Dans ce cas le champ en un point quelconque R sera égal à la somme des champs élémentaires en chaque point de la surface.



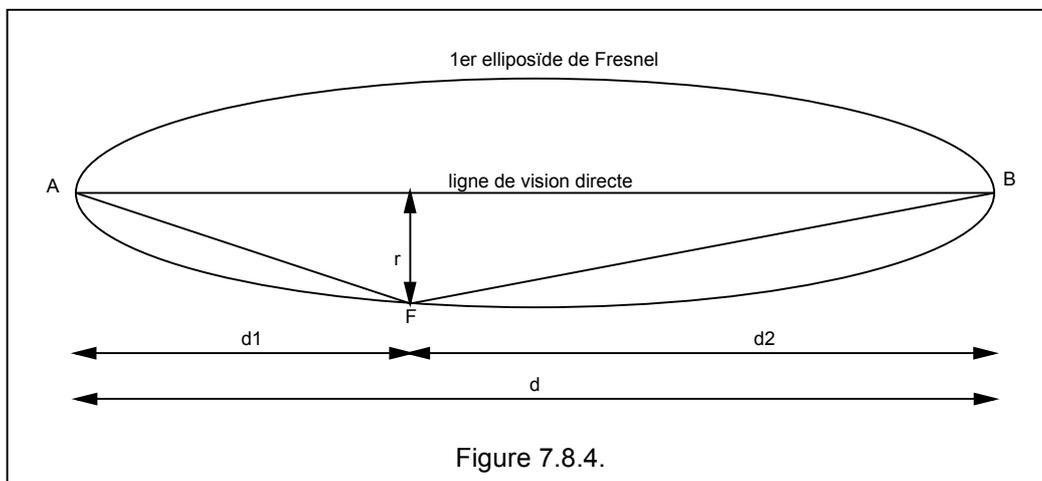
### 7.8.5. Théorie de Fresnel

D'après la théorie de Fresnel, on divise la surface de séparation en différentes zones et on répartit ces zones en deux groupes selon que les champs secondaires sont en phases ou non.



Considérons une surface de séparation perpendiculaire à la droite ER.

- Au fait on peut imaginer qu'une onde part du point A (une antenne) et arrive au point B (l'autre antenne), il y a entre A et B un certain nombre de longueurs d'ondes. Mais supposons qu'une onde part dans une autre direction, qu'elle soit réfléchiée par un obstacle quelconque et arrive en B avec un déphasage de  $180^\circ$  ( $\lambda/2$ ), les deux ondes seront en opposition de phase et s'annuleront. Il est important de connaître l'ensemble de tous les points où une réflexion pourrait donner une onde déphasée de  $180^\circ$ . Cet ensemble de points (en géométrie, on parle de *lieu géométrique*) est une surface ellipsoïdale (imaginez la toile d'un ballon Zeppelin...). Mais en pratique, sur les profils, on ne dessine qu'une seule ligne c'est le demi ellipsoïde inférieur. En d'autres termes, c'est l'ellipsoïde de Fresnel qui représente un ensemble de points où la distance (A-F-B) - (A-B) est égale à  $\lambda/2$ . C'est aussi le **1er ellipsoïde car il concerne un déphasage de  $\lambda/2$** .



Le rayon du 1er ellipsoïde se calcule de la façon suivante :

$$r_{(m)} = 31,6 \sqrt{\lambda_{(m)} d_1 (km) d_2 (km) / d (km)}$$

Le premier ellipsoïde est un lieu qui apporte un effet "négatif", car s'il y a une réflexion, il y a une diminution (ou même une annulation) du signal en B. Le pire qui puisse arriver est d'avoir un lac, un marais, un site industriel "plein de tôles", ... tangent quelque part le long du 1er ellipsoïde. Le 2ème ellipsoïde concerne un déphasage de  $\lambda$ , mais il nous concerne beaucoup moins car les ondes arriveraient en phase, donc il n'y aurait pas d'atténuation. Le 3ème ellipsoïde concernera un déphasage de  $3\lambda/2$ , donc encore un effet négatif ! La dimension de l'ellipsoïde dépend de la longueur d'onde, pour les fréquences basses (144 MHz, 432 MHz, 1296 MHz,...) les dimensions sont très grandes, pour les fréquences élevées (10 GHz et plus), l'ellipsoïde est fort aplati.

### 7.8.6. Cas d'un obstacle effilé

On dit que l'obstacle est **effilé** (en anglais "knife obstruction") lorsque son "épaisseur" est faible par rapport à la distance.

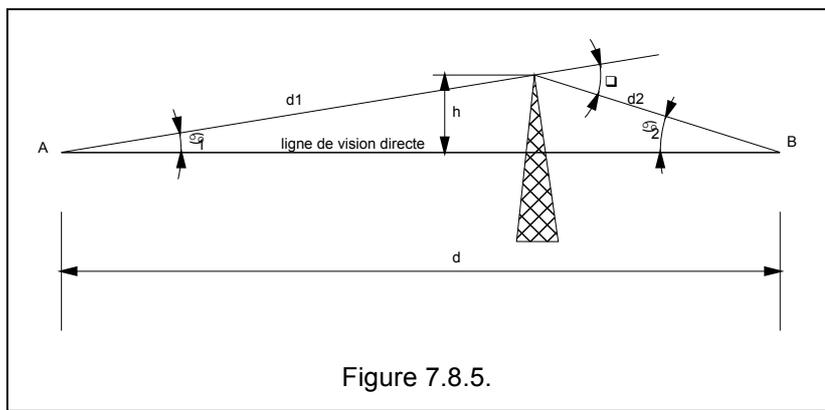
Soit la figure ci-contre, dans ce cas, il faut d'abord calculer un facteur

$$k = \sqrt{2} h \theta / \lambda$$

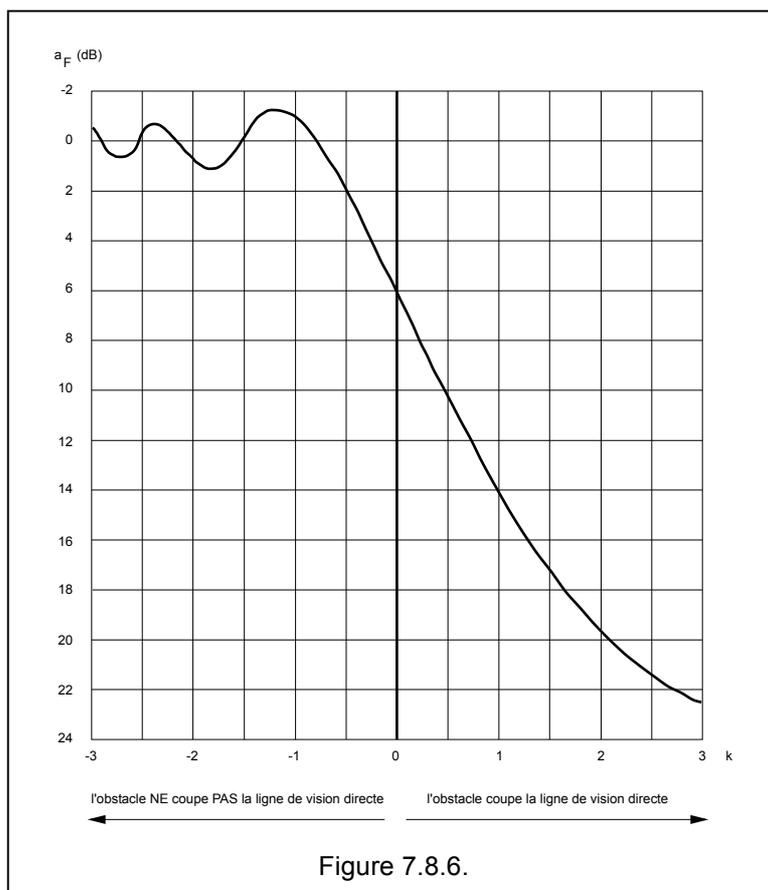
pour trouver la valeur de atténuation supplémentaire due à l'obstacle<sup>22</sup>.

Remarquons que h et  $\theta$  ont le même signe et que k prend le même signe que h.

L'atténuation totale sera égale à  $a = a_f + a_F$  avec  $a_f$  = atténuation en espace libre et  $a_F$  atténuation supplémentaire due à l'obstacle (c'est le "F" majuscule de Fresnel!).



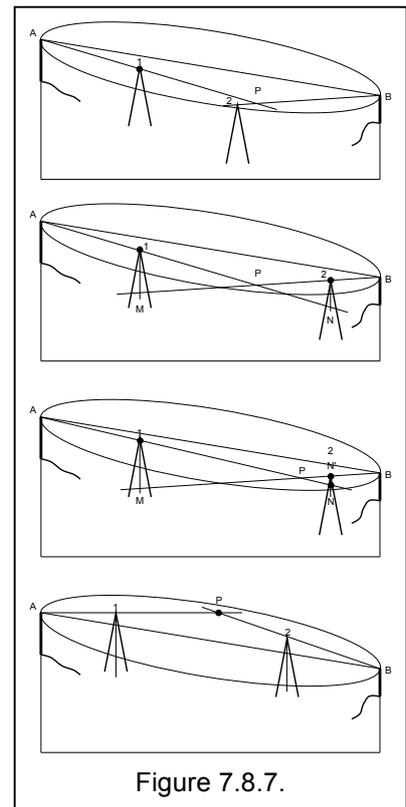
<sup>22</sup> Recommandation ITU-R P.526-8



### 7.8.7. Cas de deux obstacles effilés

Lorsqu'il y a deux obstacles effilés, une série de règles (résultant d'expériences) permettent de calculer l'atténuation supplémentaire :

- si le point d'intersection P en dehors des deux obstacles 1 et 2, et en dessous de la ligne de vision directe, alors on peut négliger le plus petit obstacle :  $a_F = a_{F1}$
- si le point d'intersection P est entre les deux obstacles 1 et 2, et en dessous de la ligne de vision directe, et si les points M et N se trouvent en dehors du premier ellipsoïde de Fresnel, alors l'atténuation totale supplémentaire est égale à la somme des atténuations des obstacles 1 et 2 donc  $a_F = a_{F1} + a_{F2}$
- si le point d'intersection P est entre les deux obstacles 1 et 2, et en dessous de la ligne de vision directe, et si le M et N se trouvent dans le premier ellipsoïde de Fresnel, alors l'atténuation totale supplémentaire est égale à  $a_F = a_{F1} + a_{FN'} - a_{FN}$
- si le point d'intersection P est entre les deux obstacles, mais au dessus de la ligne de visibilité directe on remplace les deux obstacles par un obstacle virtuel P.



**7.8.8. Cas d'un obstacle arrondi**

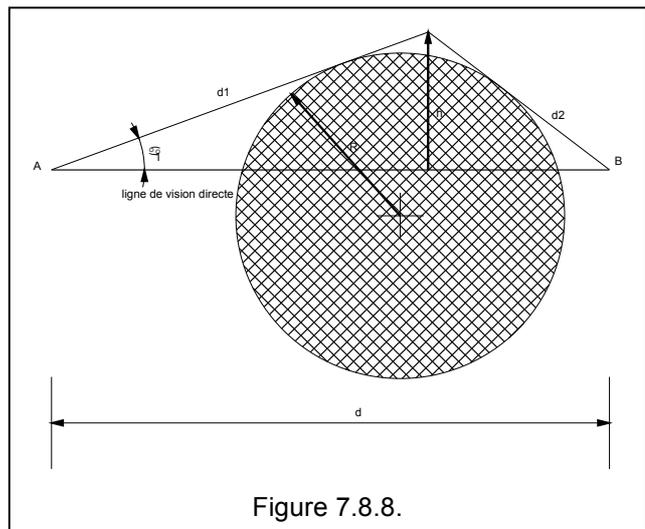
A l'opposé de l'obstacle "couteau", il y a le cas de l'obstacle arrondi. L'atténuation totale sera égale à  $a = a_f + a_F + a_R$

avec

$a_f$  = atténuation en espace libre et

$a_F$  atténuation dû à l'obstacle mince

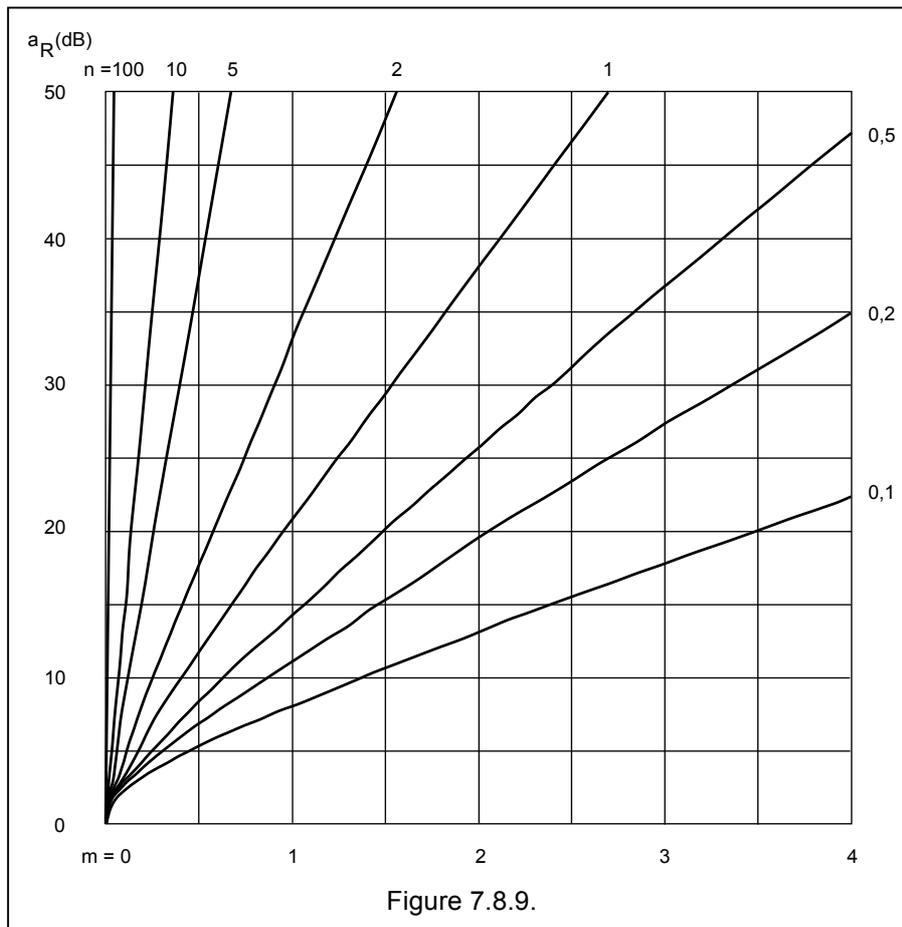
$a_R$  atténuation supplémentaire dû à l'obstacle arrondi



Pour déterminer  $a_R$  on utilise deux coefficients :

$m = R \left( \frac{d_1 + d_2}{d^2} \right) / \left( \frac{\pi R}{\lambda} \right)^{1/3}$	$n = h \left( \frac{\pi R}{\lambda} \right)^{2/3} / R$
---	--

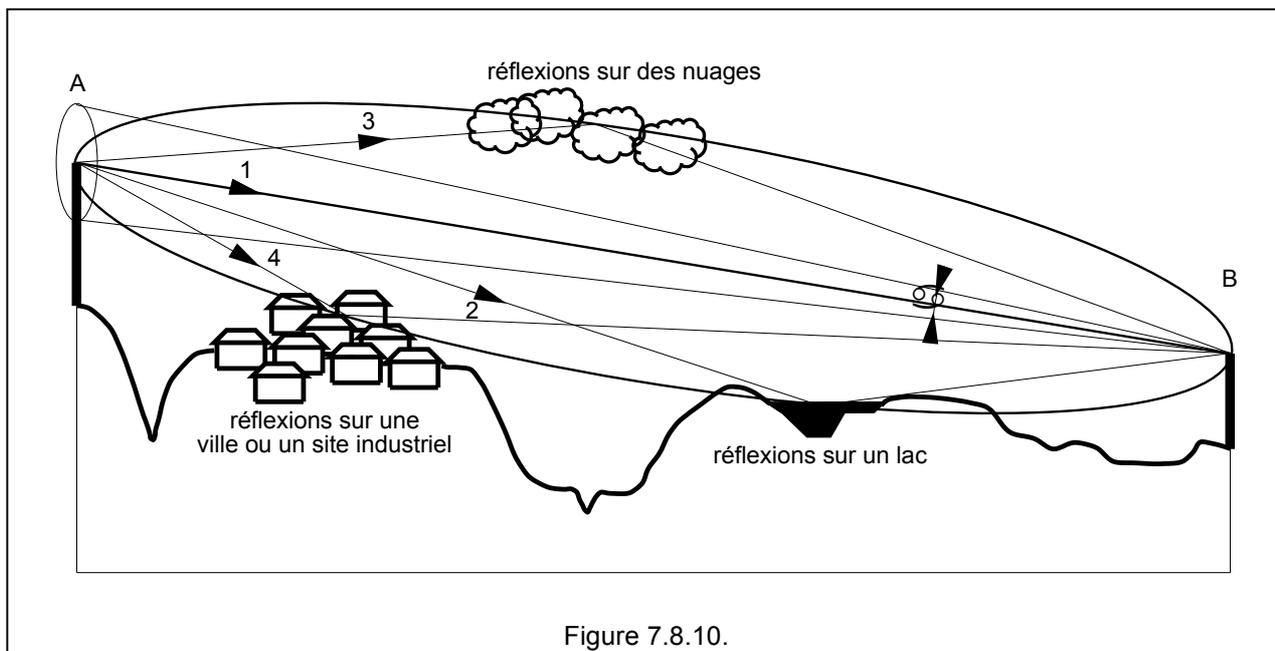
Puis on obtient  $a_R$  à partir des courbes suivantes



### 7.8.9. Liaison à trajets multiples ("multipath"):

Une des choses les plus "horribles" qui puisse arriver à une liaison faisceau hertzien est le multipath. Soit le cas de la figure ci-contre, on a

- un rayon direct 1,
- un rayon 2 provenant de la réflexion sur un lac qui constitue à certains moments une surface d'inversion
- un rayon 3 provenant d'une réflexion sur des nuages, et,
- un rayon 4 provenant de la réflexion sur une grande ville!



Tous ces signaux se mélangent dans l'antenne de réception B, avec des phases et des amplitudes différentes ...

Une des façons de combattre ce phénomène est d'utiliser des antennes avec une très grande directivité. En fait une antenne qui a un angle d'ouverture  $\alpha$ , "éclaire" un cercle de diamètre égal à  $D \sin \alpha$ , avec D la distance à l'antenne.

Ainsi une parabole de 3 m de diamètre, à 6 GHz, et qui a un angle d'ouverture de  $2^\circ$ , possède à 25 km un diamètre d'illumination 0,436 km soit 436 m ! Il faut prendre en considération tous les obstacles qui pourraient produire des réflexions dans ce cône.

De même, si à l'émission l'angle d'ouverture est tel que la parabole n'éclaire pas le lac, il ne pourra pas y avoir de réflexions sur ce lac ! Nous avons pris l'angle d'ouverture à 3 dB, en fait il faudrait aussi considérer l'angle qui nous donne une protection de 10 dB ou de 20 dB par exemple. Remarquez que dans le cas de la figure ci-dessus, l'axe vertical et l'axe horizontal ne sont pas à la même échelle, l'angle  $\alpha$  est reproduit avec une certaine distorsion !

### **7.8.10. Le cas idéal**

Le cas idéal est celui où le premier ellipsoïde de Fresnel est tangent au terrain. Les variations de la réfraction atmosphérique, qui entraînent une modification de la courbure fictive de la terre et par conséquent de la hauteur libre, ont alors peu d'influence sur l'atténuation de trajet. Il faudra donc choisir le site, prévoir les hauteurs de pylône et "s'arranger" pour que ce cas idéal soit atteint.

### **7.8.11. Portée normale en fonction de la fréquence**

Les distances "normales" pour les liaisons analogiques que numériques,

- la bande 4 GHz sera utilisée pour des trajets de l'ordre de 40 à 60 km
- la bande 6 GHz sera utilisée pour des trajets de l'ordre de 20 à 40 km
- la bande 8 GHz sera utilisée pour des trajets de l'ordre de 10 à 25 km
- la bande 22 GHz sera utilisée pour des trajets de l'ordre de 3 à 10 km
- la bande 40 GHz sera utilisée pour des trajets de l'ordre de 1 à 3 km

### **7.8.12. Atténuation par les gaz et absorption par les arbres**

Nous en avons déjà parlé plus haut !

## **7.9. Le programme HAREC**

Que faut-il connaître d'après le programme HAREC ?

CHAPITRE 7 7. PROPAGATION	Vilnius 2004 <sup>23</sup>
- Couches ionosphériques	
- Fréquence critique	
- Fréquence maximale utilisable	
- Influence du soleil sur l'ionosphère	
- Onde de sol, onde d'espace, angle de rayonnement et bond	
- Evanouissements	
- Troposphère	
- Influence de la hauteur des antennes sur la distance qui peut être couverte [horizon radioélectrique]	
- Inversion de température	
- Réflexion sporadique sur la couche E	
- Réflexion aurale	

Avouez que ce programme semble vraiment trop allégé ! Nous l'avons donc un peu étoffé !

## **7.10. Table des matières**

7.1. Eléments fondamentaux concernant les ondes électromagnétiques .....	2
7.1.1. Qu'est ce qu'une onde électromagnétique ? .....	2
7.1.2. Les expériences de Hertz .....	2
7.1.2.1. L'existence du champ électromagnétique.....	2
7.1.2.2. Certains matériaux laissent passer les ondes électromagnétiques et d'autres pas .....	3
7.1.2.3. Le phénomène de réflexion .....	4
7.1.2.4. Le phénomène d'interférence .....	4
7.1.2.5. La longueur d'onde .....	5
7.1.2.6. La vitesse de la lumière .....	5
7.1.2.7. Les ondes stationnaires .....	5
7.1.2.8. La polarisation des ondes électromagnétiques.....	5
7.1.3. Le spectre des ondes électromagnétiques .....	6
7.1.4. Polarisation des ondes .....	6
7.1.5. Relation longueur d'onde - fréquence .....	7
7.2. Les propagations en fonction des bandes de fréquences .....	9
7.3. Propagation par ondes de sol .....	10
7.4. Propagation ionosphérique en dessous de 30 MHz.....	13
7.4.1. L'atmosphère.....	13
7.4.2. L'ionosphère.....	14
7.4.3. Hauteur virtuelle et fréquence critique .....	16
7.4.4. Angle de radiation, angle critique et distance du bond .....	17
7.4.5. Zone de silence .....	18
7.4.6. Réflexions multiples .....	19
7.4.7. Fading .....	20
7.4.7.1. Trajets multiples ou "multipath" : .....	20
7.4.7.2. Fading sélectif.....	20
7.4.8. Fréquence maximale utilisable ou MUF .....	21
7.4.9. Activité solaire et propagation des ondes .....	21
7.4.10. Vent solaire et propagation des ondes.....	23
7.4.11. Activité géomagnétique de la terre et propagation des ondes .....	23
7.4.12. Sudden Ionospheric Disturbance ou perturbations solaires soudaines .....	24
7.4.13. Geomagnetic Disturbances .....	24

<sup>23</sup> Cette colonne indique la nouvelle matière ajoutée ou supprimée lors de la réunion CEPT de 2004.

---

7.4.14. Les aurores boréales .....	25
7.4.15. Long path et Short path.....	25
7.4.16. Propagation le long de la ligne de pénombre.....	26
7.5. Prév́ision de propagation en HF .....	28
7.5.1. Sondage ionosphérique hauteur de couches.....	28
7.5.2. Détermination de l'activité solaire.....	32
7.5.3. Détermination de la MUF .....	32
7.5.4. Prév́ision de propagation .....	33
7.5.5. En résuḿe.....	33
7.6. Propagation en VHF-UHF .....	34
7.6.1. La propagation dans l'espace libre.....	34
7.6.2. La propagation en visibilité directe.....	35
7.6.3. Réflexion et réfraction au voisinage du sol .....	36
7.6.4. Diffraction .....	38
7.6.5. Polarisation verticale et horizontale .....	39
7.6.6. Atténuation par les gaz .....	40
7.6.7. Absorption par les arbres .....	41
7.6.8. Courbe normalisées de propagation entre 100 MHz et 2 GHz .....	42
7.7. Propagations spéciales en VHF-UHF.....	43
7.7.1. Le milieu de propagation.....	43
7.7.2. La propagation troposphérique .....	44
7.7.2.1. Aspects physiques de la propagation troposphérique .....	44
7.7.3. Liaisons par sporadiques E.....	45
7.7.3.1. Aspects physiques .....	45
7.7.3.2. Les ouvertures Es .....	45
7.7.3.3. Indications des possibilités d'ouvertures.....	46
7.7.3.4. Distances couvertes.....	46
7.7.4. Propagation par aurore boréale .....	46
7.7.5. Les modes "scatter" ou dispersion.....	46
7.7.6. EME .....	46
7.7.7. Propagation via les traînées météoriques.....	47
7.7.8. Transéquatorial .....	48
7.7.9. Propagation via les irrégularités alignées sur le champ magnétique terrestre (FAI).....	48
7.8. Propagation en micro-ondes .....	49
7.8.1. Bilan de liaison hertzienne .....	49
7.8.2. Atténuation de trajet en espace libre.....	49
7.8.3. Le profil d'une liaison.....	50
7.8.4. Principe de Kirchoff-Huygens.....	51
7.8.5. Théorie de Fresnel .....	51
7.8.6. Cas d'un obstacle effilé .....	52
7.8.7. Cas de deux obstacles effilés .....	54
7.8.8. Cas d'un obstacle arrondi.....	55
7.8.9. Liaison à trajets multiples ("multipath"): .....	56
7.8.10. Le cas idéal .....	57
7.8.11. Portée normale en fonction de la fréquence .....	57
7.8.12. Atténuation par les gaz et absorption par les arbres.....	57
7.9. Le programme HAREC.....	58
7.10. Table des matières .....	58