

# MODULE #3

243-562-RK (3-2-3)

*PROPAGATION DES ONDES ET LIGNES DE  
TRANSMISSION*

Enseignant : Sébastien Richard

# MODULE #3

## *LA PROPAGATION DES ONDES*

Enseignant : Sébastien Richard

# Module #3 - PROPAGATION DES ONDES

La propagation des ondes n'est pas aussi simple qu'elle peut sembler à première vue.

D'une façon intuitive, toutes les ondes se propagent d'une façon similaire à la lumière, donc les notions de base de l'optique peuvent être utilisées pour tout le spectre des ondes électromagnétiques.

Cependant, pour les différents milieux où elles se propagent, nous verrons que le comportement sera différent selon les différentes longueurs d'ondes.

# Module #3 - PROPAGATION DES ONDES

Afin de propager l'onde dans l'air, **l'antenne** agit comme un transducteur, c'est-à-dire, qu'elle transforme l'énergie électrique en énergie électromagnétique. On peut faire l'analogie entre une antenne et une ampoule électrique pour nous aider à bien saisir le concept. L'ampoule transforme l'énergie électrique en lumière et celle-ci se propage dans l'air.

De son côté, l'antenne réceptrice intercepte l'onde transmise et la reconvertit en signal électrique tout comme le fait la cellule photovoltaïque avec la lumière.

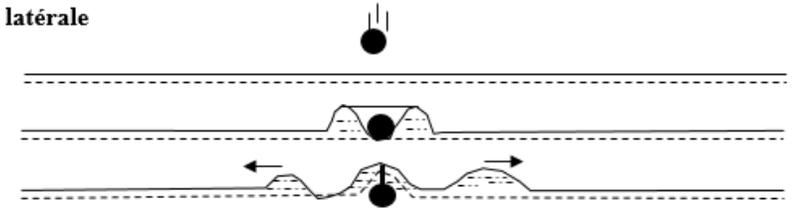
# Module #3 - SOURCE ISOTROPIQUE

La première analyse de propagation des ondes électromagnétiques se fera pour son émission.

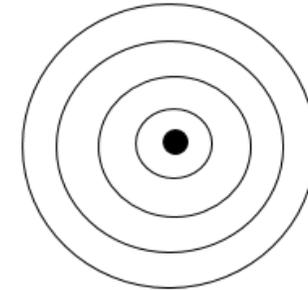
Le concept théorique de source isotropique est couramment utilisé pour sa forme mathématique simplifiée.

Le concept de source isotropique assume que l'émission des ondes électromagnétiques se fait à partir d'un seul point et que la projection des ondes se propagent de façon concentrique à partir de ce point.

Vue latérale



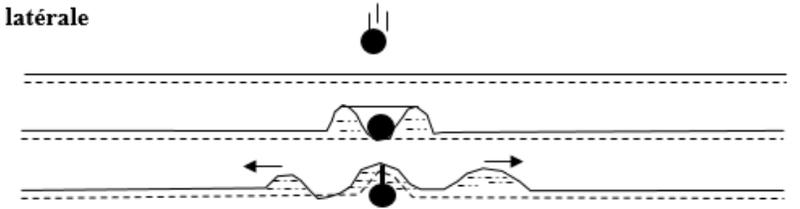
Vue du dessus



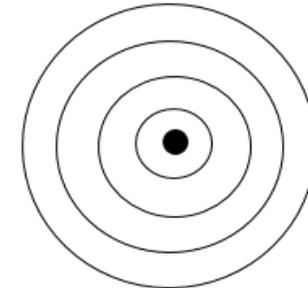
# Module #3 - SOURCE ISOTROPIQUE

Pour ce modèle, la propagation des ondes peut facilement se comparer à une bille venant frapper la surface non perturbée d'un bassin rempli d'eau. Lorsque la bille heurte l'eau, l'on voit apparaître la forme concentrique des vagues qui se propagent du point d'impact vers la périphérie.

Vue latérale



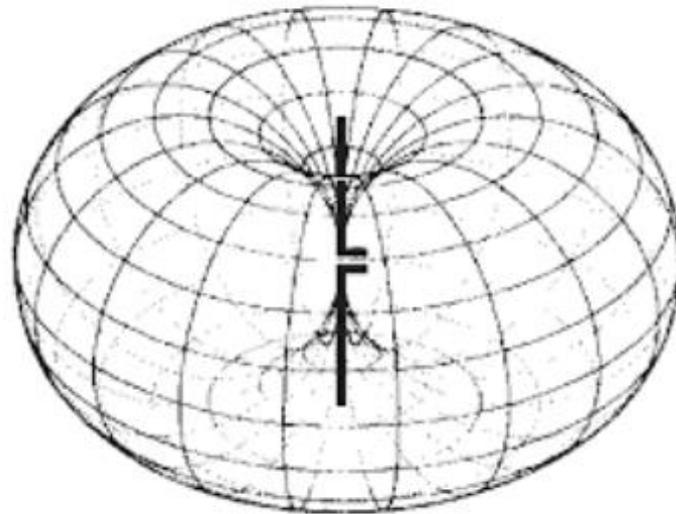
Vue du dessus



# Module #3 - SOURCE ISOTROPIQUE

Si une onde électromagnétique est **irradiée dans l'air libre** également dans toutes les directions à partir de la source, il y aura création d'un **front d'onde sphérique** avec l'antenne en son centre.

Donc pour le modèle de source isotropique nous dirons que l'émetteur est une minuscule sphère duquel la propagation se fera sous la forme d'une sphère concentrique dont le centre sera toujours cette minuscule sphère.



# Module #3 - SOURCE ISOTROPIQUE

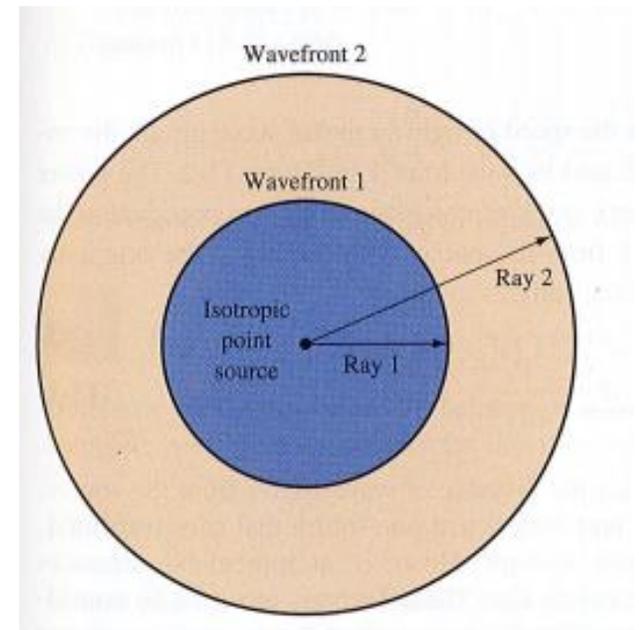
Ce front d'onde se propagera à la vitesse de la lumière et atteindra le front d'onde 1 indiqué *Ray 1* sur le schéma ci-contre.

On peut calculer la **densité de puissance**  $\mathcal{P}$  ( $\frac{W}{m^2}$ ) de ce front d'onde à l'aide de cette équation:

$$\mathcal{P} = \frac{P_t}{4\pi r^2}$$

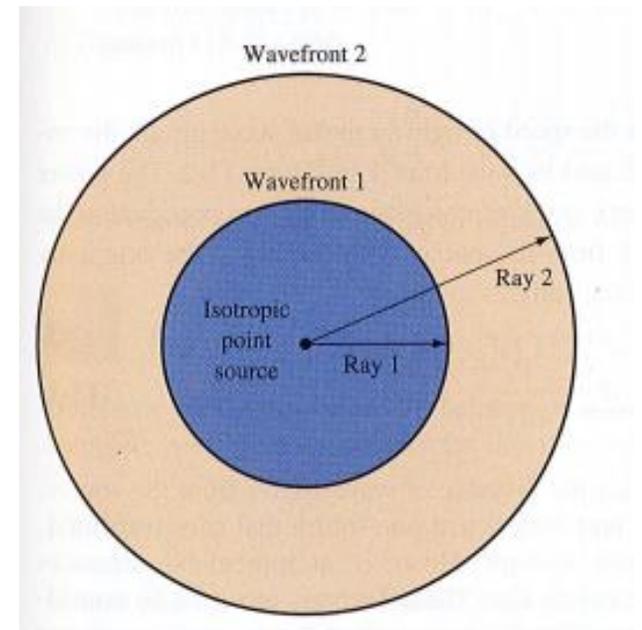
On remarque donc que le densité de puissance est inversement proportionnelle à la distance **de la source au carré en fonction de la puissance transmise  $P_t$** .

Si le front d'onde 2 (*Ray 2*) est deux fois plus loin que le front d'onde 1, sa densité de puissance ne sera plus que le quart de la densité du front d'onde 1.



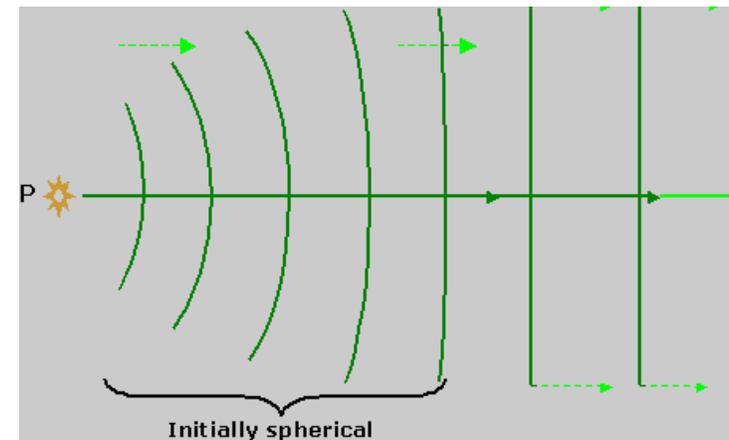
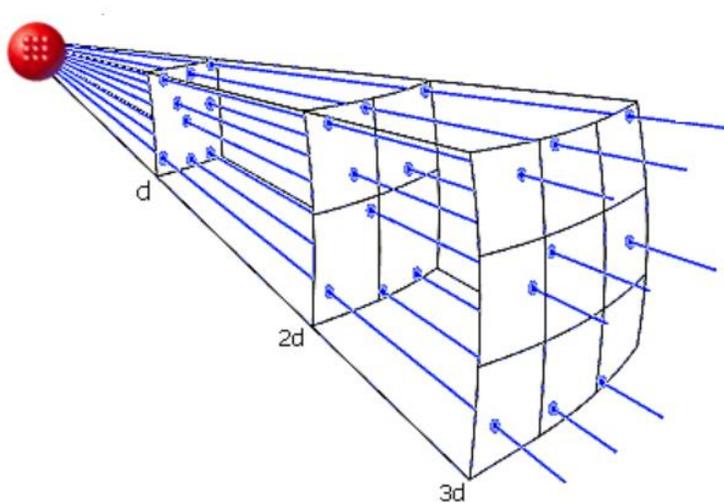
# Module #3 - SOURCE ISOTROPIQUE

**Exemple :** Calculer la densité de puissance à 5 et 10 km de distance d'une antenne isotropique dont la puissance de transmission est de 25 000 W.



# Module #3 - SOURCE ISOTROPIQUE

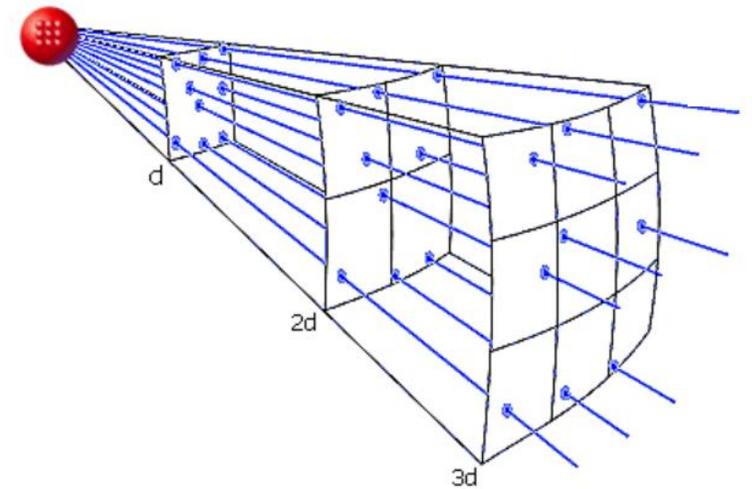
On peut remarquer que chaque section du front d'onde est courbée pour épouser la forme de la sphère. Cependant, lorsque l'onde a atteint une distance appréciable de la source, on peut facilement considérer qu'une petite section du front d'onde est plat. Cette section sera considérée comme un front d'onde plane.



# Module #3 - SOURCE ISOTROPIQUE

Si nous avons à la distance  $d$  de la source une densité de puissance mesurée sur la surface  $A$ , nous devons alors pour une distance  $2d$  utiliser une surface  $4 \times A$  afin d'obtenir la même puissance.

Donc pour une même surface, à deux fois la distance  $d$  nous aurons une densité de puissance quatre fois moindre.

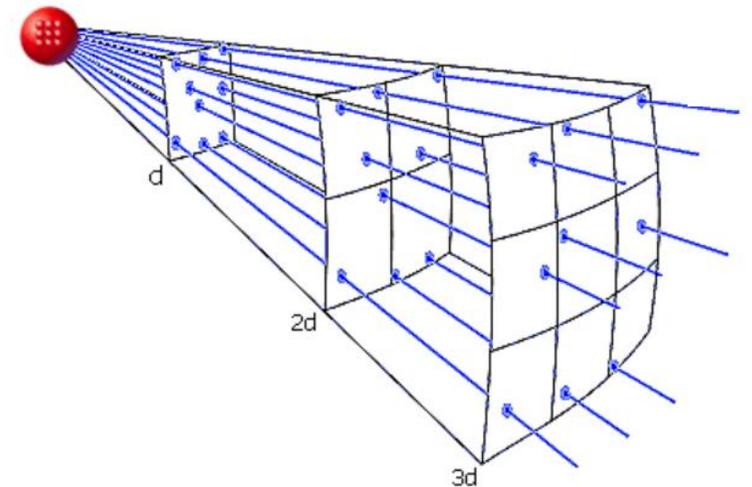


# Module #3 - SOURCE ISOTROPIQUE

Aussi, plus la puissance est grande, plus la portée sera importante. Pour doubler la portée, on quadruple la puissance de l'émetteur. Un émetteur de 100 mW porte deux fois plus loin qu'un émetteur de 25 mW.

**Exemple :** Valider le tout à l'aide de la formule

$$\mathcal{P} = \frac{P_t}{4\pi r^2}$$



# Module #3 - SOURCE ISOTROPIQUE

Ce qu'il y a d'intéressant avec ce modèle, c'est la facilité de pouvoir évaluer l'intensité de la puissance émise par ce type de source. La puissance pour tout système électrique peut être établie à la tension par l'équation suivante :

$$P = \frac{E^2}{R}$$

# Module #3 - SOURCE ISOTROPIQUE

Pour les ondes électromagnétiques, nous modifierons cette équation de façon à utiliser **l'impédance  $\mathcal{Z}$**  (qui sera **l'impédance caractéristique en ohm** de notre medium, le vide) plutôt que la résistance  $R$ , et nous utiliserons **la force du champ électrique  $\mathcal{E}$  (volt/m)** plutôt que la tension  $E$  afin de pouvoir déterminer la **densité de puissance  $\mathcal{P}$  (watt/m<sup>2</sup>)**

$$\mathcal{P} = \frac{\mathcal{E}^2}{\mathcal{Z}}$$

De plus, grâce à Maxwell, nous pouvons aussi établir l'équation suivante:

$$\mathcal{E} = \frac{\sqrt{30Pt}}{r}$$

# Module #3 - SOURCE ISOTROPIQUE

On peut aussi déduire l'impédance caractéristique du vide qui est notre conducteur à l'aide de l'équation suivante:

$$\mathcal{P} = \frac{\mathcal{E}^2}{\mathcal{Z}} \text{ alors } \mathcal{Z} = \frac{\mathcal{E}^2}{\mathcal{P}}$$

## Exercice #1

Sachant aussi que  $\mathcal{P} = \frac{P_t}{4\pi r^2}$  et que  $\mathcal{E} = \frac{\sqrt{30Pt}}{r}$ , trouvez  $Z_0$  de l'air

## Exercice #2

Sachant maintenant que l'impédance caractéristique de l'espace (vide) est de  $377 \Omega$  et que l'intensité d'un champ électrique est de  $0,10 \text{ V/m}$ , déterminer la densité de puissance  $\mathcal{P}$  associée à cette mesure ainsi que la distance du front d'onde de la source si l'antenne isotropique émet à  $10\,000 \text{ W}$ .

# Module #3 - SOURCE ISOTROPIQUE

## Exercice #3

L'article 15.249(a) du FCC (*Federal Communications Commission*) stipule que dans **les bandes ISM\***, le champ électrique maximum toléré dans la bande 902 – 928 MHz est de **50 mV/m**. Comme le champ électrique est normalement mesuré à 3 m, calculez la puissance de la source en watt et en dBm si celle-ci est isotropique. Calculez aussi la densité de puissance.

## Exercice #4

Dans l'exemple précédent, quel sera le champ électrique et la densité de puissance au double de la distance mesurée.

*\*Bandes ISM : (industriel, scientifique et médical) sont des bandes de fréquences qui peuvent être utilisées dans un espace réduit pour des applications industrielles, scientifiques, médicales, domestiques ou similaires, à l'exception des applications de radiocommunication)*

# Module #3 – PERTE DE PARCOURS

Il est aussi possible de connaître les pertes sur un lien en utilisant l'expression suivante:

$$L_p = k + 20 \log(F_{\text{MHz}}) + 20 \log(d_{\text{km}})$$

**Avec :**

- $k = 32,4$  si  $d$  en km
- $k = 36.58$  si  $d$  en miles
- $k = 37,8$  si  $d$  en miles nautiques
- $k = -37,87$  si  $d$  en pieds
- $k = -27,5$  si  $d$  en mètres

# Module #3 – PERTE DE PARCOURS

*Exemple perte de parcours.*

Je transmets un signal de 2,437 GHz sur 1 km, alors l'atténuation de parcours :

$$L_p = 32,45 + 20 \text{ Log } (2437) + 20 \text{ Log } (1) \quad L_p = 100,18 \text{ dB}$$

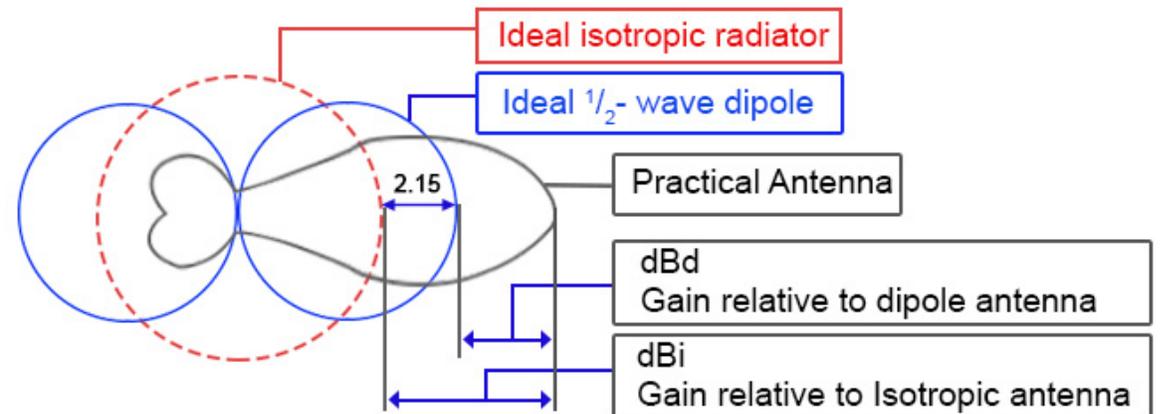
Par la suite il nous est possible de compléter le bilan de liaison :

$$P_{RX} = P_{TX} - L_P + G_{TX} + G_{RX} - L_{TX} - L_{RX}$$

# Module #3 – BILAN DE LIAISON

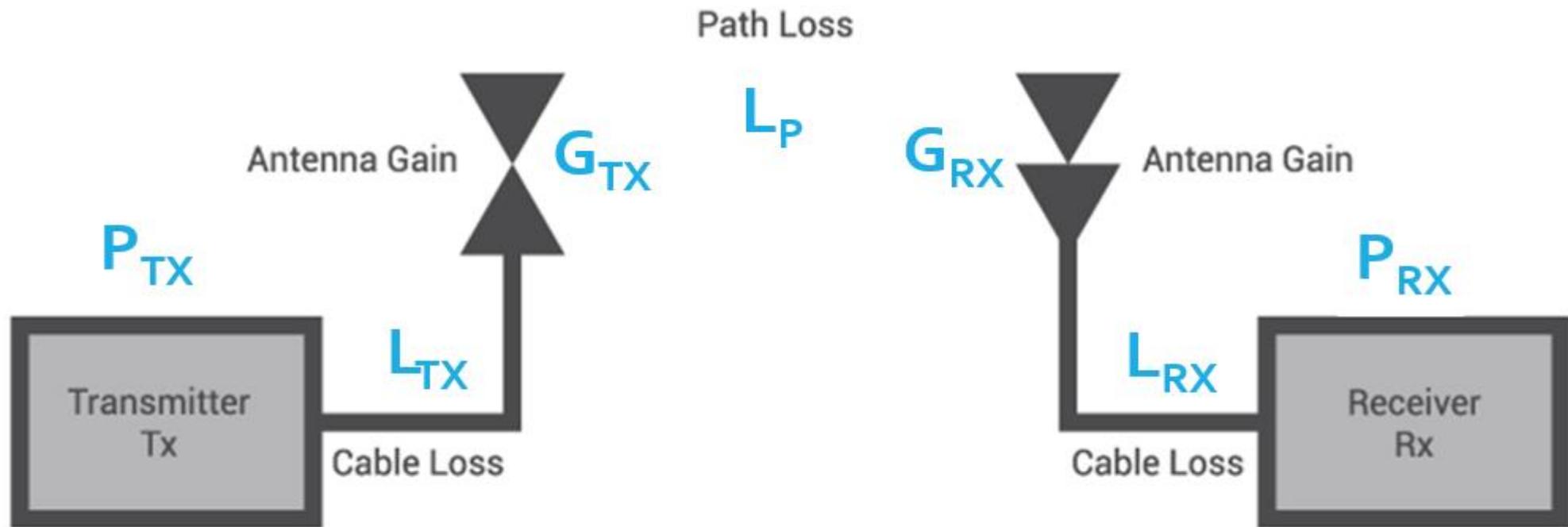
$$P_{RX} = P_{TX} - L_P + G_{TX} + G_{RX} - L_{TX} - L_{RX}$$

- $P_{RX}$  - Puissance reçue (dBm/dBW)
- $P_{TX}$  - Puissance transmise (dBm/dBW)
- $L_P$  - Atténuation de parcours entre les antennes isotropiques en dB
- $G_{TX}$  - Gain de l'antenne d'émission en dBi
- $G_{RX}$  - Gain de l'antenne de réception en dBi
- $L_{TX}$  - Perte dans la ligne (Tx vers antenne) (en dB)
- $L_{RX}$  - Perte dans la ligne (antenne vers Rx) (en dB)



# Module #3 – BILAN DE LIAISON

$$P_{RX} = P_{TX} - L_P + G_{TX} + G_{RX} - L_{TX} - L_{RX}$$



# Module #3 – BILAN DE LIAISON

## Exemple

Pour un puissance de 33 mW, et avec antennes sans gain (0 dB) à une distance de 1 km :

- $P_{TX} = 33 \text{ mW} \rightarrow 15.2 \text{ dBm}$
- $G_{TX} = G_{RX} = 0 \text{ dB} \rightarrow 2.14 \text{ dBi}$
- $d = 1 \text{ Km} \rightarrow \text{Atténuation} : 100.18 \text{ dB}$

$$P_{RX} = 15.2 - 100.18 + 2.14 + 2.14 - 1 - 1$$

$$P_{RX} = -82.7 \text{ dBm}$$

# Module #3 – BILAN DE LIAISON

## Exercice #5

Pour un récepteur ayant une sensibilité de  $-50$  dBm et avec des antennes à une distance de  $4$  km, calculez la puissance (dBm, dBW et Watt) de transmission au transmetteur afin que ce signal à  $30$  MHz soit capté par le récepteur. Considérez une perte de  $1$ dB dans la ligne de transmission du Tx et la même chose dans le Rx. Les antennes possèdent un gain de  $3$  dBd

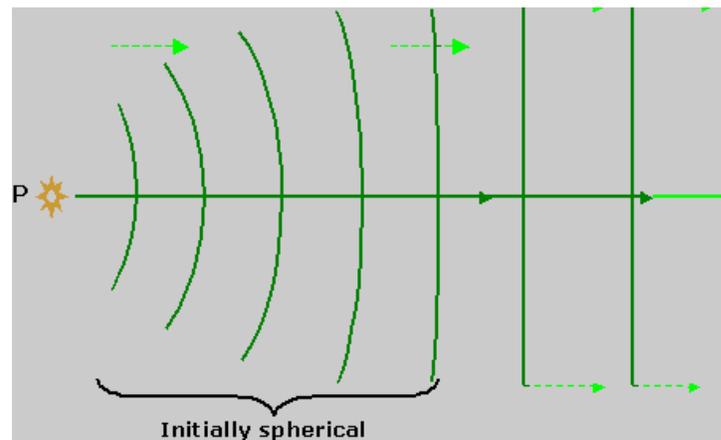
## Exercice #6

Pour un récepteur ayant une sensibilité de  $-80$ dBm et avec des antennes à gain de  $3$ dB<sub>i</sub> chacune. Calculez la distance que l'on peut parcourir si la puissance de transmission de ce signal de  $300$  MHz est de  $100$  mW et que la perte de ligne est de  $2,5$  dB en Tx et en Rx.

# Module #3 – COMPORTEMENT DES ONDES

Jusqu'à maintenant, nous avons étudié le comportement de l'onde dans le vide, nous allons maintenant considérer l'effet de notre environnement dans le comportement de propagation de l'onde.

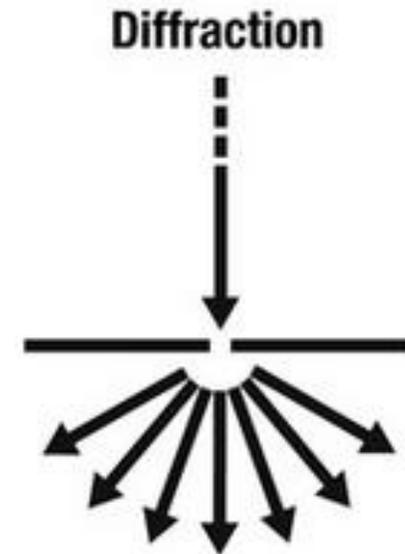
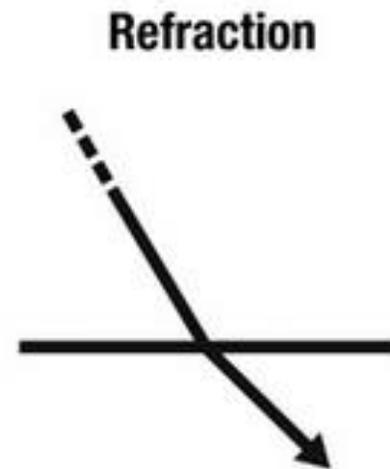
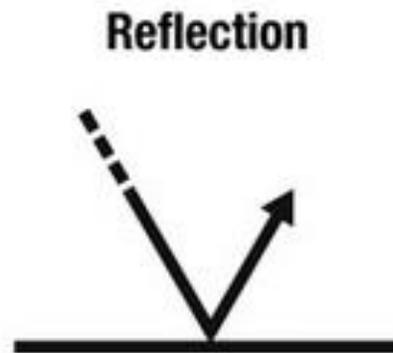
Afin de pouvoir analyser les différents comportements des ondes nous allons nous éloigner considérablement de la source isotropique pour ne retrouver qu'avec le front d'ondes parallèles.



# Module #3 – RÉFLEXION

Donc nous pouvons avec ces fronts d'onde parallèle observer les comportements suivants :

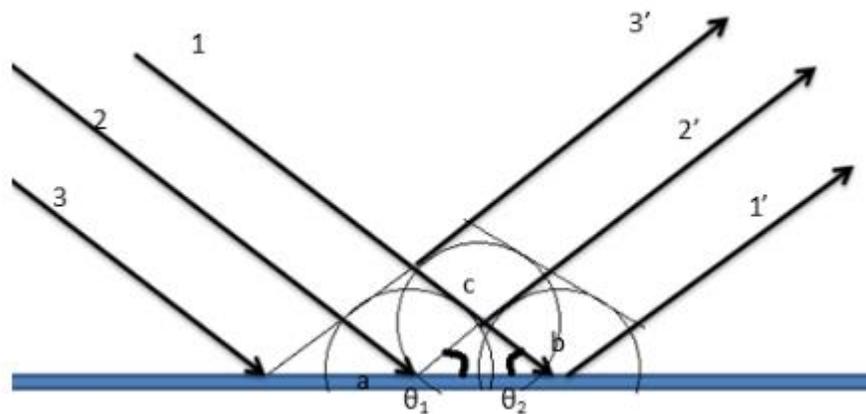
- La réflexion
- La réfraction
- La diffraction



# Module #3 – RÉFLEXION

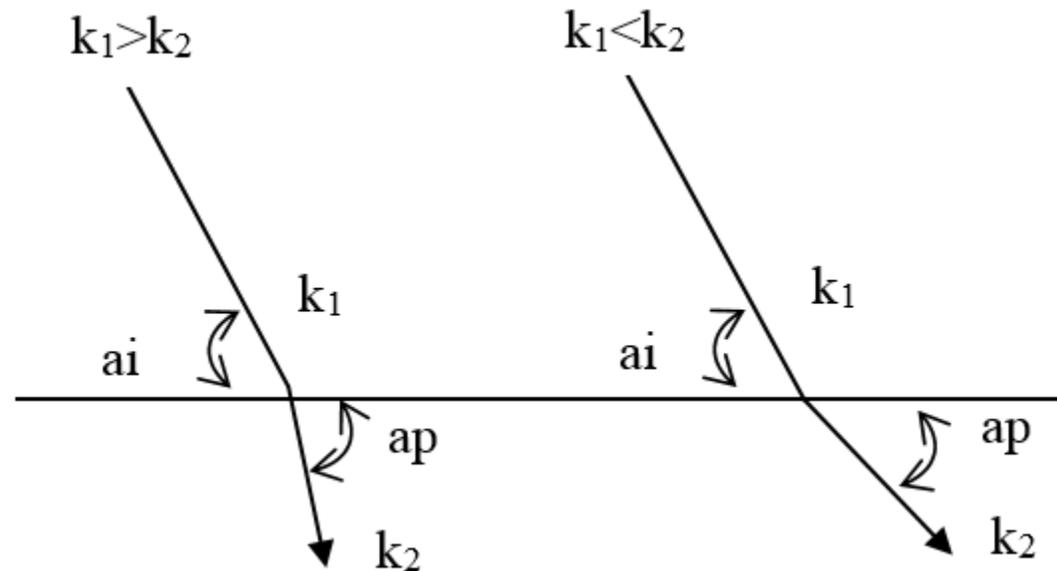
Tout comme la lumière est réfléchiée dans le miroir, les ondes radio sont réfléchiées par tout objet sur sa trajectoire de propagation. Dans ce cas, l'angle incident du front d'onde est égal à l'angle de réflexion, comme illustré ci-dessous.

La réflexion se produit lorsque l'onde frappe un milieu beaucoup élevé en terme de constante diélectrique. Il faut noter un changement de phase de  $180^\circ$  entre l'onde incidente et l'onde réfléchiée.



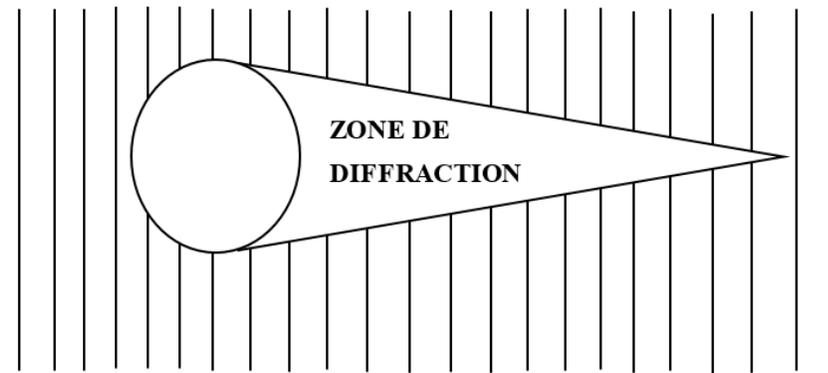
# Module #3 – RÉFRACTION

La réfraction survient lorsque l'onde pénètre dans un milieu de constantes diélectriques différentes. Ce qu'il est important de retenir dans le cas de la réfraction c'est que non seulement la direction de l'onde est ainsi modifiée, mais que la **vélocité** de cette onde change aussi. Le facteur à considérer est bien entendu la constante diélectrique.



# Module #3 – DIFFRACTION

La diffraction se produit lorsqu'un front d'onde rencontre un obstacle et se trouve alors partiellement dévié par celui-ci. Sous le côté opposé de la source des ondes se crée alors une zone « d'ombre » appelée « zone de diffraction » ou encore *shadow zone*.

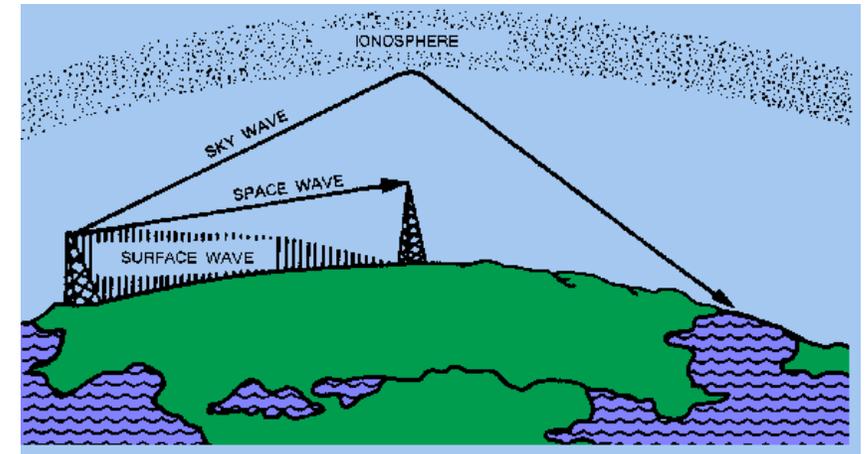


Le principe de HUYGENS stipule que n'importe quel point d'un front d'onde sphérique peut devenir une nouvelle source produisant son propre front d'onde lui aussi sphérique.

# Module #3 – PROPAGATION DES ONDES

Il y a quatre modes de parcours des ondes dans l'atmosphère terrestre d'une antenne émettrice à l'antenne réceptrice.

1. Les ondes de surface (*Ground waves*)
2. Les ondes aériennes (*Space waves*)
3. Les ondes ionosphériques (*Sky waves*)
4. Les communications satellites (*Satellites*)

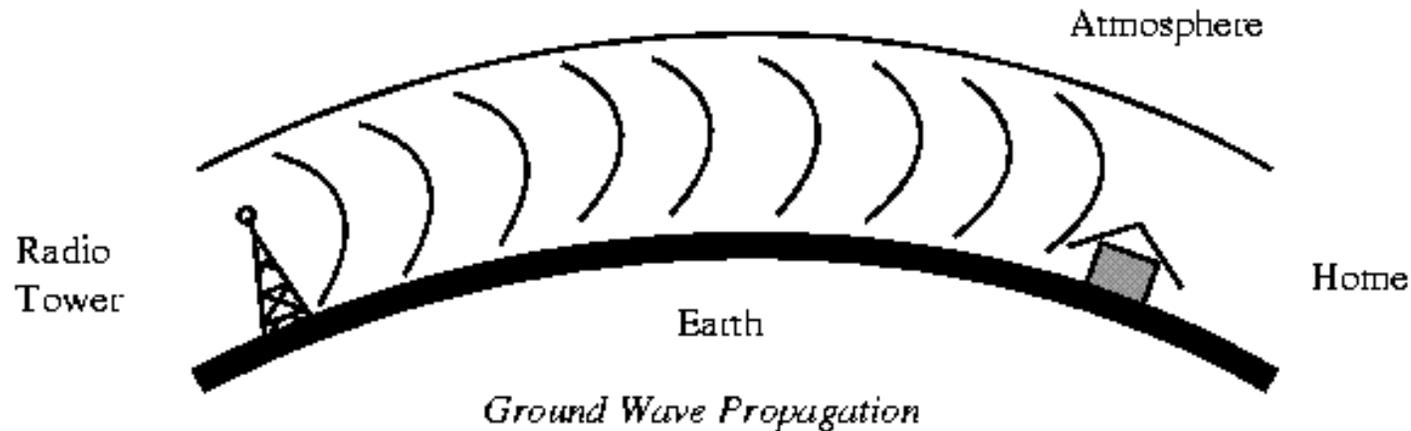


Il est à noter que la fréquence de l'onde radio utilisée pour l'un ou l'autre des quatre modes de transmission est un facteur primordial concernant les performances de cette propagation

# Module #3 – ONDES DE SURFACE - *GROUND WAVES*

Les ondes de surface se propagent le long de la courbure de surface de la terre, suivant le principe de diffraction.

Il est important de noter que ce type d'ondes doit être polarisée verticalement soit perpendiculaire à la surface de la terre. Si la polarisation est horizontale, les ondes TE parallèles à la surface seront court-circuitées.



# Module #3 – ONDES DE SURFACE - *GROUND WAVES*

L'atténuation pour ce type d'onde est le même que pour les ondes en général, mais en plus elles sont affectées par des pertes supplémentaires produites par les éléments du sol que l'on appelle pertes par effet de sol.

Les pertes par effet de sol sont des pertes résistives résultant de conduction induite dans la terre. Plus la surface apporte une bonne conductivité, moins il y a d'atténuation.

<b>SURFACE</b>	<b>RELATIVE CONDUCTIVITY</b>
Sea water	Good
Flat, loamy soil	Fair
Large bodies of fresh water	Fair
Rocky terrain	Poor
Desert	Poor
Jungle	Unusable

# Module #3 – ONDES DE SURFACE - *GROUND WAVES*

La fréquence et/ou la longueur d'onde sont un autre groupe de facteurs qui vont affecter la propagation des ondes de surface. En effet, l'atténuation produite par le sol augmente rapidement avec la fréquence utilisée.

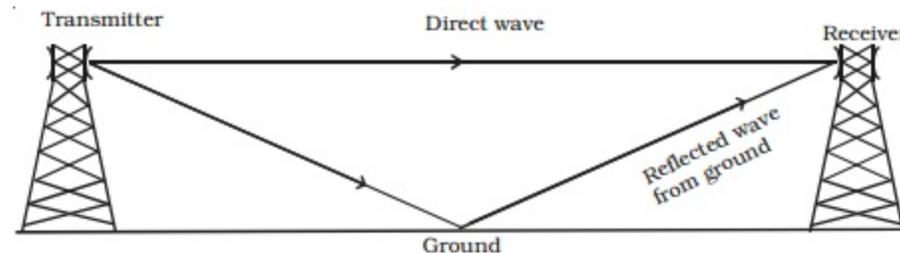
- Pour les très basses fréquences **LF (< 300 kHz)**, les pertes de sol sont faibles pour les ondes TE polarisées verticalement. Des distances moyennes de quelques centaines de kilomètres sont possibles.
- Pour les fréquences moyennes **MF (300kHz-3 MHz)**, les pertes par effet de sol sont un peu plus importantes, mais les distances sont tout de même possibles .
- Pour les hautes fréquences **HF (3 MHz -30 MHz)** l'atténuation due aux pertes par effet de sol est considérable. On observe alors une atténuation complète du signal à une vingtaine de kilomètres seulement.

# Module #3 – ONDES AÉRIENNES- *SPACE WAVES*

Les ondes de surface et les ondes aériennes sont en fait les mêmes ondes, mais divisées selon la fréquence.

Pour les fréquences inférieures à 3 000 KHz, il est possible de laisser voyager les ondes sur la surface de la terre.

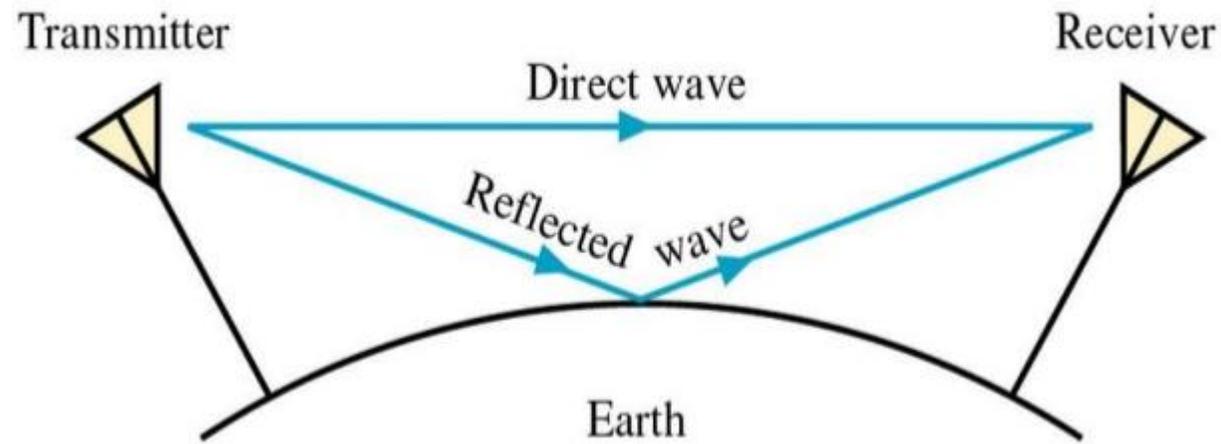
Pour les fréquences supérieures à 30 MHz, cela est impossible, il faut alors exploiter la propagation dite aérienne des ondes (*space waves*). Les ondes **VHF, UHF et micro-ondes** sont des ondes aériennes.



# Module #3 – ONDES AÉRIENNES- *SPACE WAVES*

Les ondes aériennes voyagent dans une zone de l'atmosphère terrestre que l'on appelle la troposphère. Elle se propage en fonction de deux principaux comportements des ondes auxquels nous sommes déjà familiers.

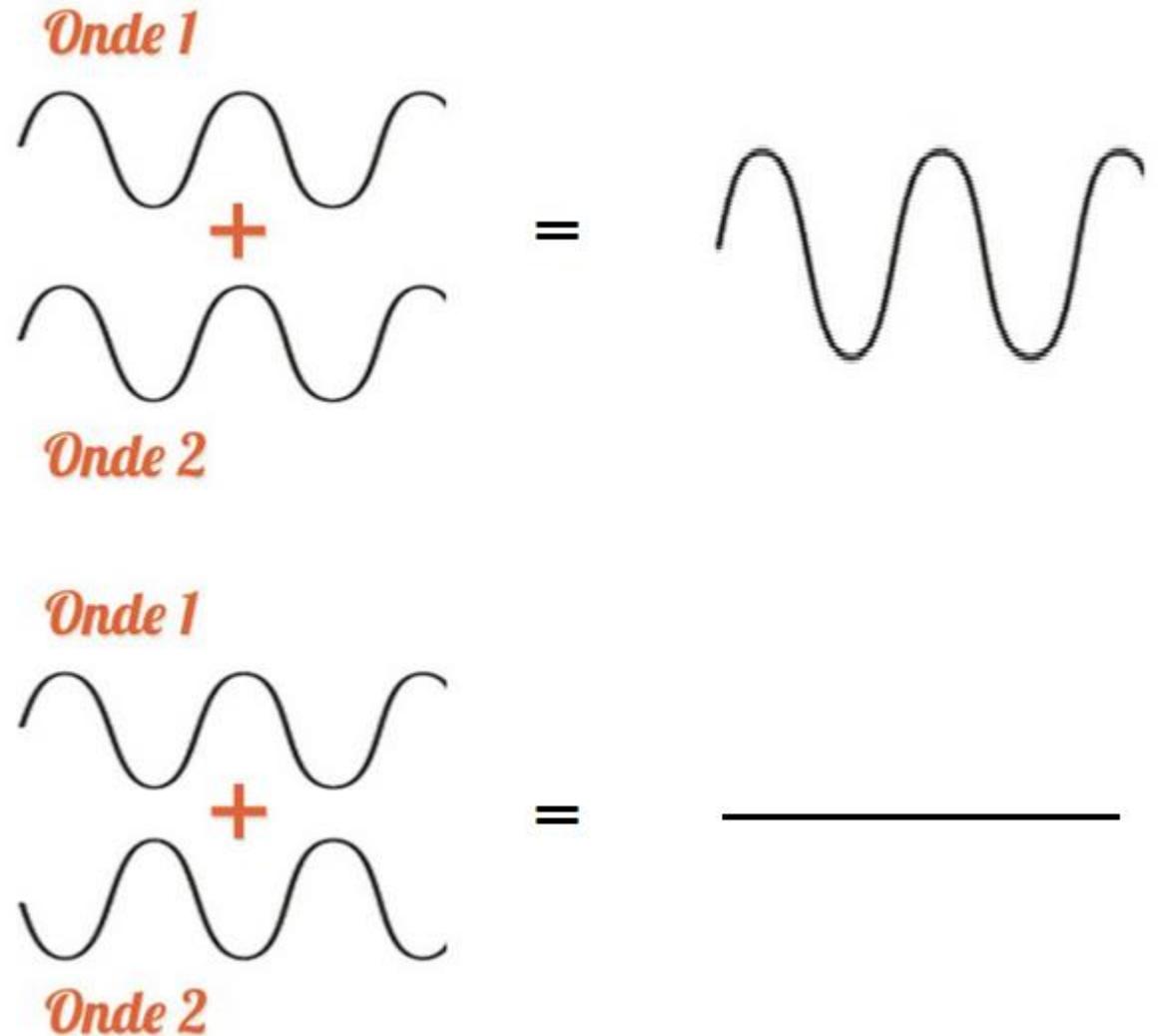
- Ondes directes
- Ondes réfléchies



# Module #3 – ONDES AÉRIENNES- *SPACE WAVES*

Pour pouvoir profiter de la propagation aérienne de ces ondes, nous devons les placer au sommet d'une tour afin de les éloigner du sol (VHF, UHF et micro-ondes).

Ce qu'il faut considérer en premier lieu dans le cas des ondes aériennes c'est qu'à la réception de celles-ci, nous aurons la somme algébrique des différentes ondes provenant des différents parcours.



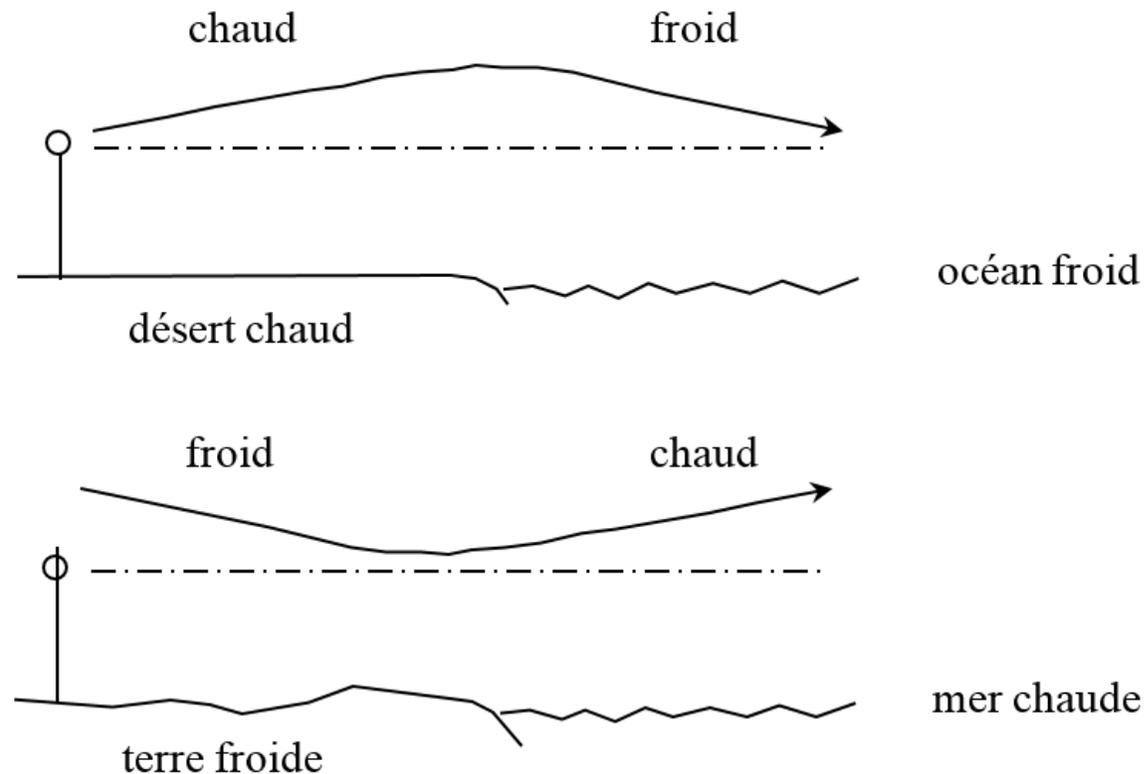
# Module #3 – ONDES AÉRIENNES- *SPACE WAVES*

Lorsque les ondes interfèrent les unes par rapport aux autres, nous devons donc à la réception utiliser un mécanisme quelconque de rejet de signal interférent, soit :

- capture du signal le plus fort seulement
- capture à partir d'une phase spécifique
- utilisation de différentes fréquences

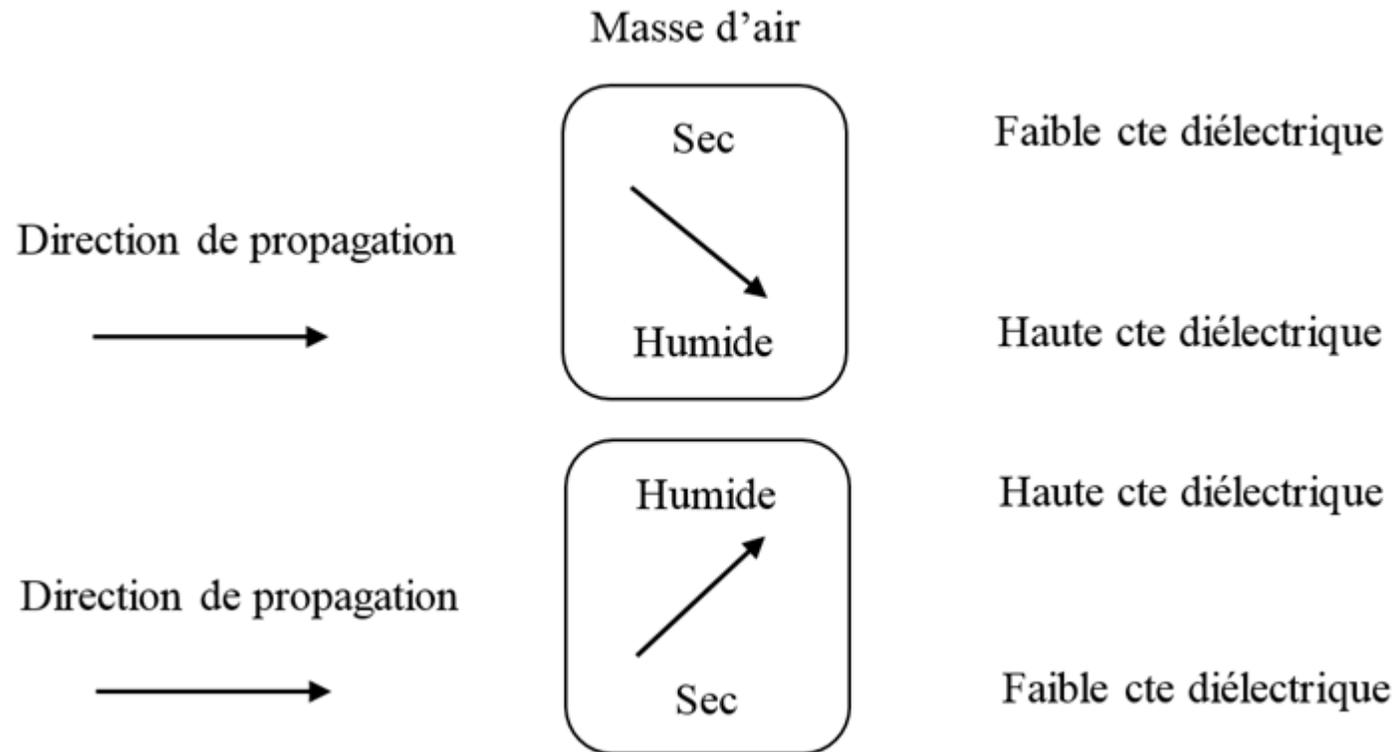
# Module #3 – ONDES AÉRIENNES- *SPACE WAVES*

Il y a également de nombreux facteurs atmosphériques auxquels il faut tenir compte, comme les différences de température:



# Module #3 – ONDES AÉRIENNES- *SPACE WAVES*

Et le taux d'humidité,



# Module #3 – ONDES AÉRIENNES- *SPACE WAVES*

## HORIZON RADIO

Les ondes aériennes sont limitées par ce que l'on appelle l'horizon radio ou **ligne de vue radio**. Théoriquement la distance limite de la communication est la même que l'horizon optique, mais dans le cas du VHF et UHF, cette limite est de portée à environ 15 % de plus que l'horizon optique. Ce phénomène est produit par la réfraction dans l'atmosphère qui courbe en quelque sorte l'onde électromagnétique.

Un facteur K sert à exprimer le degré de courbure pour n'importe quel parcours d'onde. Dans le cas d'un parcours proche de la surface de la terre, soit une communication dite terre-terre, ce facteur est normalisé à la valeur  $K=4/3 = 1,33$  dans les conditions idéales. Il diminuera dans les temps orageux et affectera la distance de propagation.

Altitude	Limite de vision
1,70 m	4,7 km
3,00 m	6,2 km
10 m	11,3 km
50 m	25,4 km
75 m	31,1 km
100 m	36,0 km
250 m	56,9 km
500 m	80,4 km
750 m	98,5 km
1 km	113 km
1,5 km	139 km
2 km	160 km
3 km	197 km
4 km	227 km

# Module #3 – ONDES AÉRIENNES- *SPACE WAVES*

## HORIZON RADIO

Il nous est donc possible de déterminer la distance de parcours de l'onde ou son horizon radio à partir des éléments suivants :

$h$  = hauteur de l'antenne ou de la tour de transmission.

$r$  = le rayon de courbure de la terre

Distance en miles :

$$d_{miles} = 1,41\sqrt{h_{pi}}$$

Distance en km :

$$d_{km} = 4,12\sqrt{h_m}$$

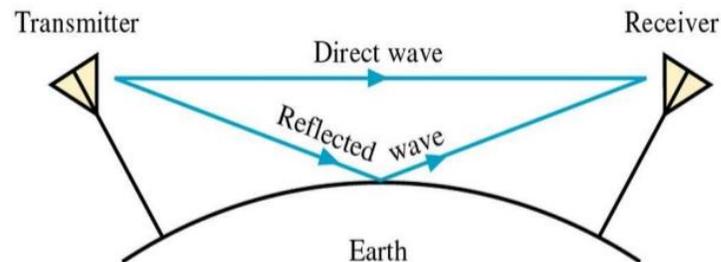
# Module #3 – ONDES AÉRIENNES- *SPACE WAVES*

## Exercice #7

Une antenne est attaché à une tour de télécommunication d'une hauteur de 250 pieds, calculer la distance de parcours de l'onde VHF en mètre.

## Exercice #8

Qu'est-ce que peut amener comme problème l'onde réfléchié dans une transmission aérienne ?

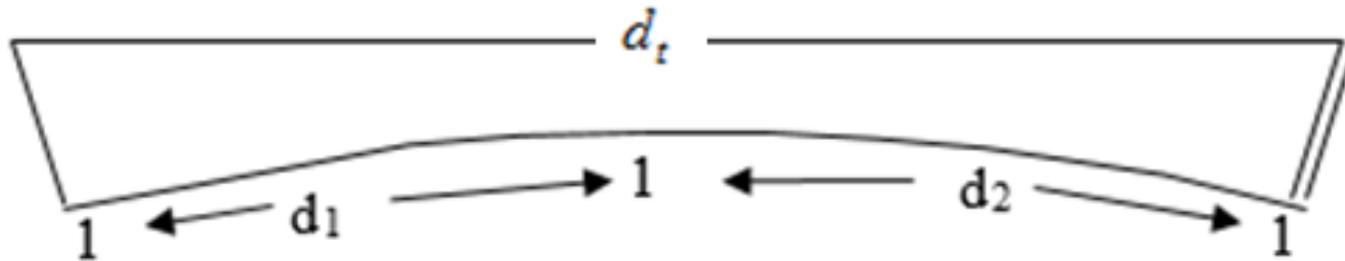


# Module #3 – ONDES AÉRIENNES- *SPACE WAVES*

## Exercice #9

Calculer la distance de l'horizon radio pour une antenne d'émission UHF de 150 pieds reliée à une autre antenne de même hauteur.

$$d_t = d_1 + d_2$$



# Module #3 – ONDES AÉRIENNES- *SPACE WAVES*

## *ZONES DE FRESNEL*

Il est illusoire de penser que nous ne rencontrerons aucun obstacle sur le parcours de l'horizon radio. Nous savons en effet que n'importe quel objet pourra soit faire une réflexion ou une diffraction des fronts d'onde radio.

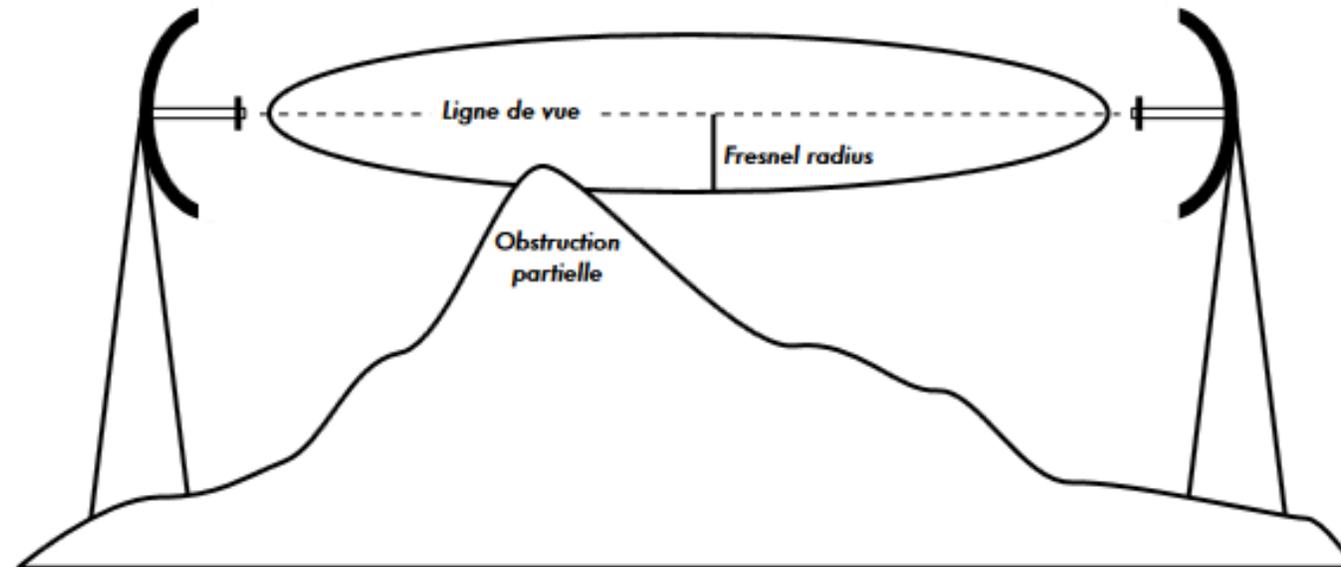
Il y a un facteur supplémentaire auquel nous devons tenir compte pour assurer le parcours adéquat de notre onde radio. Ce facteur est celui des **lentilles de Fresnel** appelées également Zone de Fresnel.

Les zones de Fresnel sont formées de l'ensemble des ondes directes et diffractées. Pour éviter une atténuation du signal résultant de l'ensemble des ondes diffractées par un objet quelconque il nous faut donc nous assurer d'un certain dégagement sur le parcours des ondes directes.

# Module #3 – ONDES AÉRIENNES- *SPACE WAVES*

## *ZONES DE FRESNEL*

Ce dégagement se définit par le nombre minimal de zones de Fresnel qu'il nous faut conserver. L'atmosphère crée donc une forme de **lentille** dont chacune des zones de Fresnel produit des fronts d'ondes constructives.



# Module #3 – ONDES AÉRIENNES- *SPACE WAVES*

Le rayon de courbure de chaque lentille peut être déterminé de la façon suivante :

$$F_N = M \sqrt{\frac{N}{F_{GHZ}} \left( \frac{D_1 \cdot D_2}{D_1 + D_2} \right)}$$

Où,

$F_N$  : rayon pour Nième zone de Fresnel

$F_{GHZ}$  : fréquence de l'onde (GHz)

$D_1$  : distance de la source au plan  $F_n$  de la lentille (km)

$D_2$  : distance du plan  $F_n$  de la lentille à la destination (km)

$N$  : Valeur entière de zone de Fresnel 1, 2, 3...

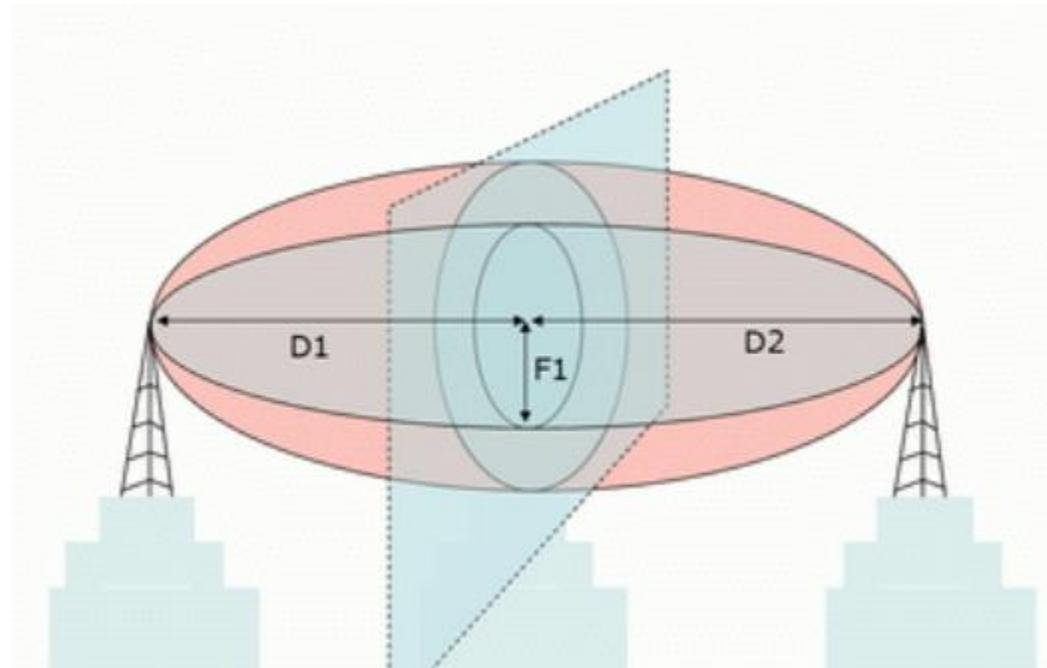
$M$  : constante de proportionnalité :  $M = 17,3$  si  $F_N$  en mètres  $D_1, D_2$  en km et

$M = 72,1$  si  $F_N$  en pieds  $D_1, D_2$  en miles

# Module #3 – ONDES AÉRIENNES- *SPACE WAVES*

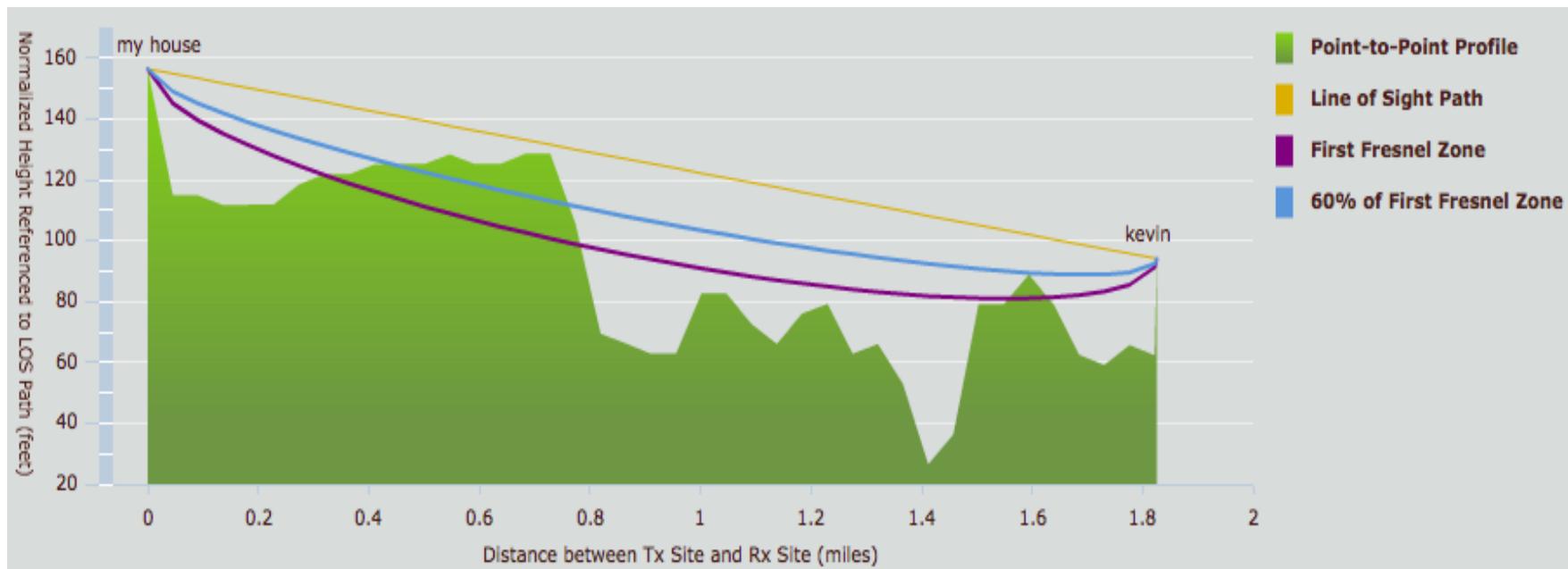
Le rayon de courbure de chaque lentille peut être déterminé de la façon suivante :

$$F_N = M \sqrt{\frac{N}{F_{GHZ}} \left( \frac{D_1 \cdot D_2}{D_1 + D_2} \right)}$$



# Module #3 – ONDES AÉRIENNES- *SPACE WAVES*

Lors de la conception d'un lien RF, une bonne pratique est de maintenir au moins 60% du premier rayon de la zone de Fresnel libre de tout obstacle pour éviter l'affaiblissement du signal reçu. Il est aussi important de noter que les zones de Fresnel paires ( $F_2, F_4,$  etc...) sont déphasées de  $180^\circ$  par rapport à  $F_1$  et les zones impaires ( $F_3, F_5,$  etc...) sont en phases avec celle-ci.



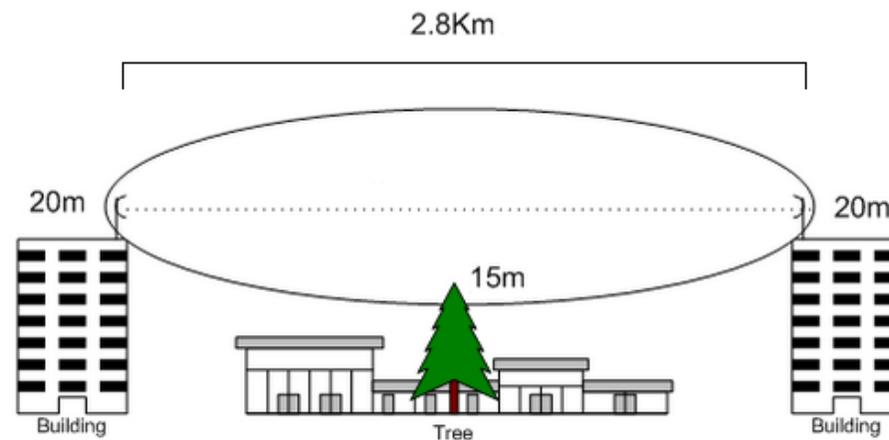
# Module #3 – ONDES AÉRIENNES- *SPACE WAVES*

## Exercice #10

Calculer le rayon de la première zone de Fresnel pour une fréquence de 2,5 GHz et pour un obstacle à 12 km de la source et à 18 km de la destination. Calculez aussi la deuxième et la troisième zone.

## Exercice #11

Est-ce que l'arbre dans la figure ci-dessous qui est au **centre** des deux buildings affectera la première zone de Fresnel à 2,5 GHz ? Est-ce que l'on peut garder cette conception ? Sinon, de combien devrions-nous élever les antennes pour obtenir le minimum requis.



# Module #3 – ONDES AÉRIENNES- *SPACE WAVES*

Il ne faut pas oublier que la propagation d'une ondes aériennes perd de sa puissance lorsqu'il se propage dans l'atmosphère.

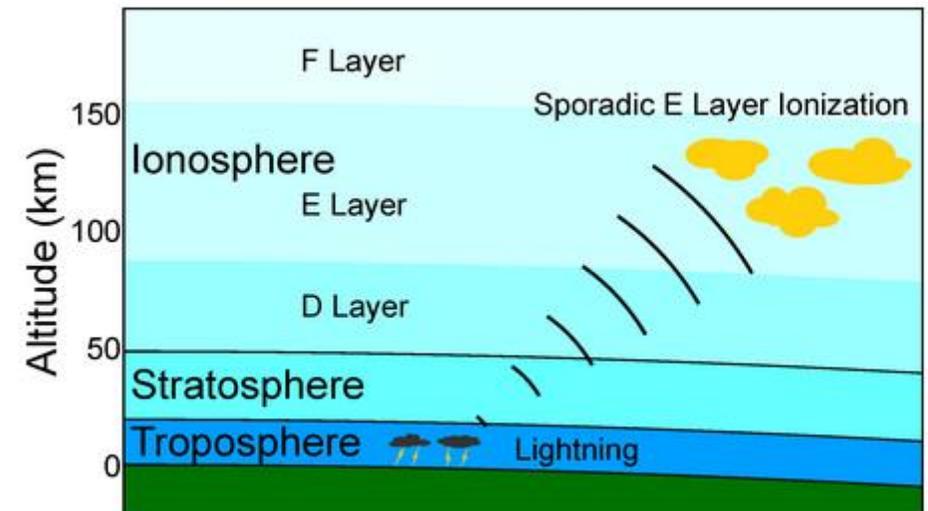
D'une façon générale, l'importance de l'affaiblissement par absorption ou diffusion est en fonction de la dimension des gouttelettes d'eau, l'humidité relative, la température ainsi que de la fréquence utilisées. On peut établir que plus la fréquence est élevée, plus on aura d'atténuations causées par les conditions atmosphériques.

# Module #3 – ONDES IONOSPHERIQUE (SKY WAVES)

Les ondes de surface sont limitées en distance et en fréquence, les ondes aériennes sont limitées en distance à ligne de vue.

La méthode la plus utilisée pour les communications à grande distance pour les fréquences non spatiales et satellites sont les ondes ionosphériques.

Nous allons donc commencer par étudier l'atmosphère terrestre. Nous vivons dans un espace très restreint de l'atmosphère appelé la troposphère. Les ondes aériennes voyagent dans cet espace atmosphérique.

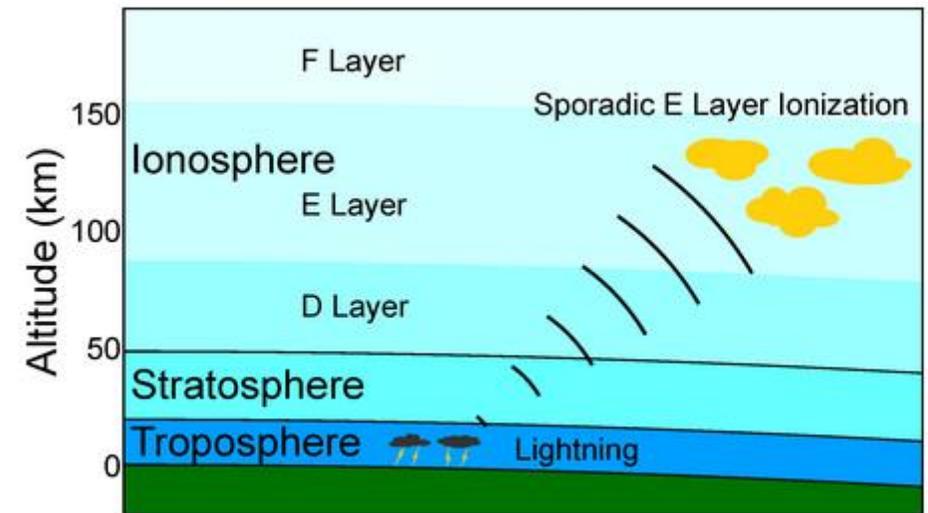


# Module #3 – ONDES IONOSPHERIQUE (SKY WAVES)

Nous retrouvons ensuite la stratosphère, couche comprise entre la troposphère et l'ionosphère. Elle couvre l'espace aérien entre 6 km et 50 km. Cet espace aérien n'est pas utilisé pour les ondes radio.

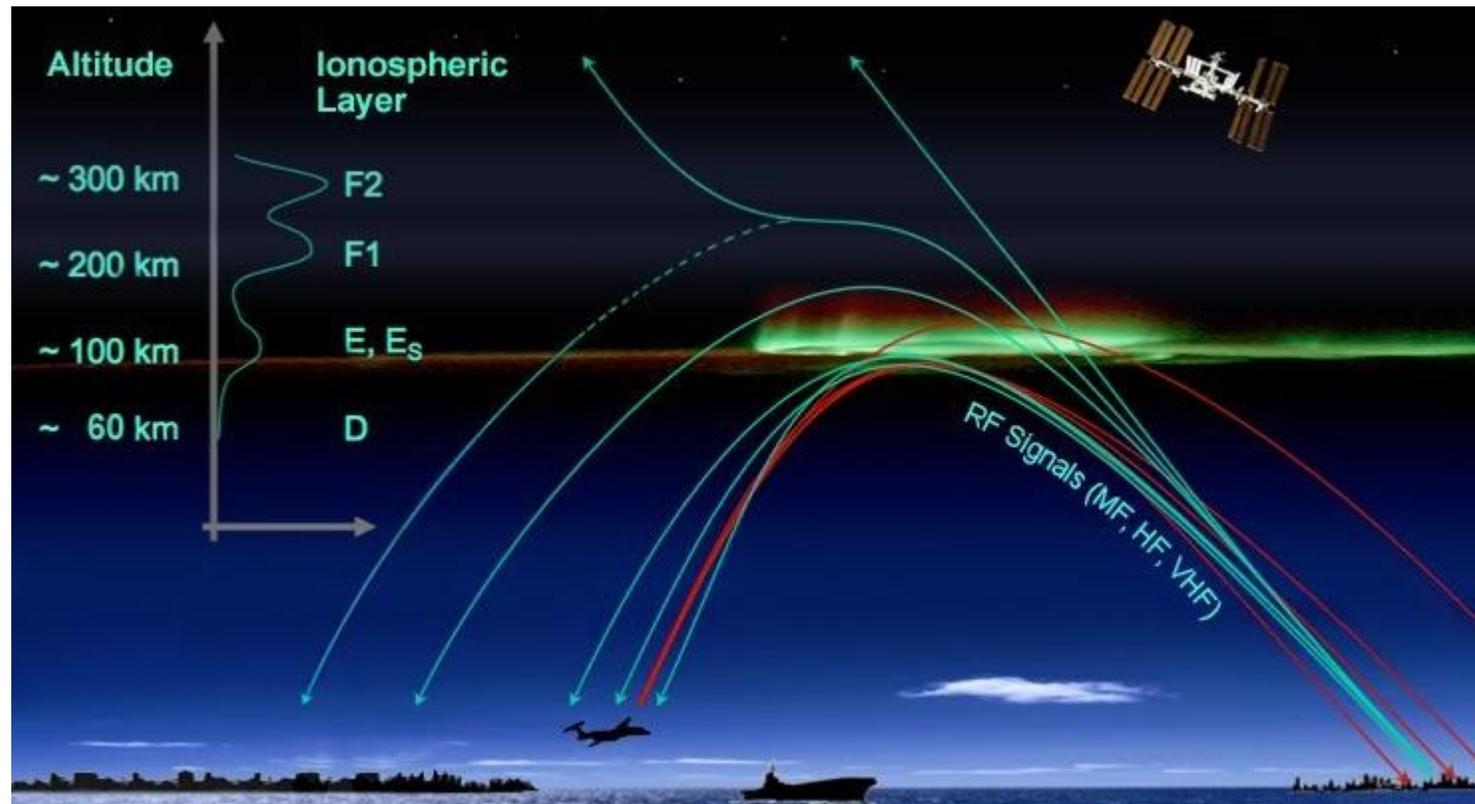
Nous avons ensuite l'ionosphère, couche de 300 km contenant très peu de molécules d'air et qui donc sera facilement ionisée par le Soleil.

**L'ionisation des molécules d'air formera alors une zone intense de diffraction** qui courbera les ondes de façon à les retourner sur la Terre.



# Module #3 – ONDES IONOSPHERIQUE (SKY WAVES)

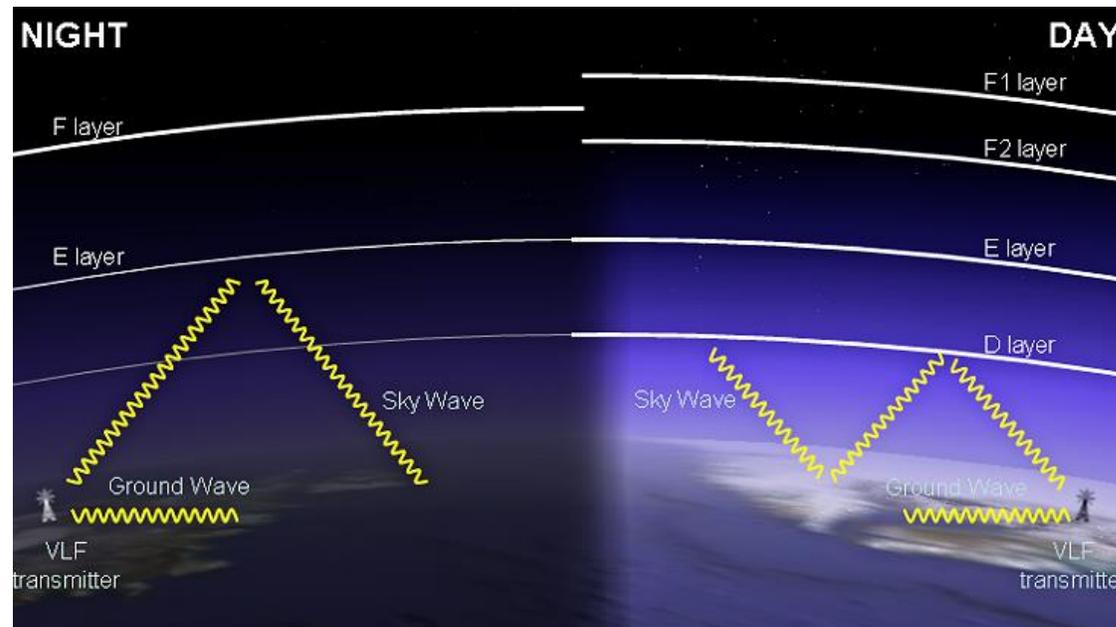
L'ionosphère se subdivise en sous-couches qui selon leur densité respective aura un effet de diffraction différent pour différentes fréquences, **selon le jour ou la nuit.**



# Module #3 – ONDES IONOSPHERIQUE (SKY WAVES)

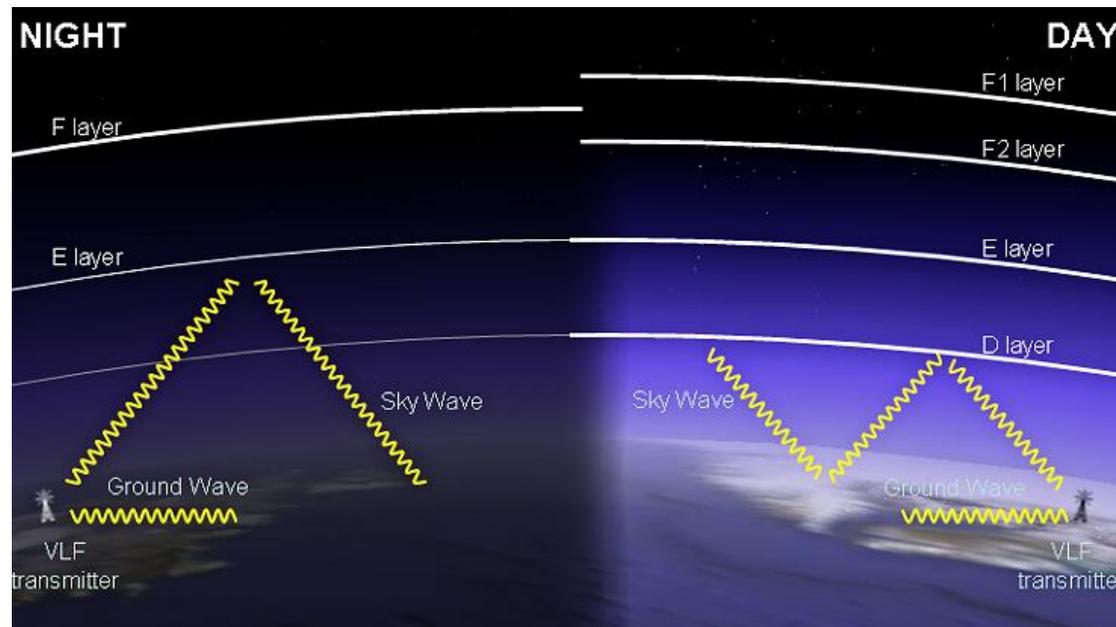
**Couche D** : La plus basse des couches ionosphériques se situe entre 50 et 80 km. Le taux d'ionisation est le plus faible dû à une recombinaison ionique plus rapide liée à une densité plus grande.

Elle est présente le jour dû au rayonnement solaire et disparaît la nuit. Elle atténue et réfléchit les signaux de basses fréquences (30 à 300KHz) et laisse passer les fréquences supérieures. La couche D est essentiellement une couche diurne.



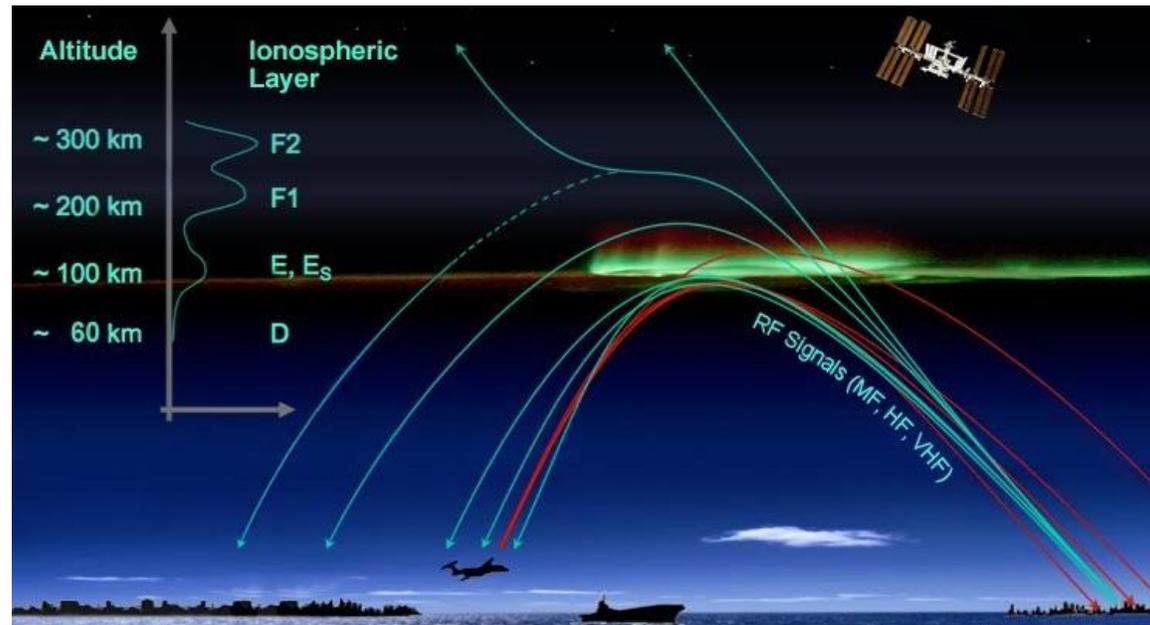
# Module #3 – ONDES IONOSPHERIQUE (SKY WAVES)

**Couche E** : Est une couche d'ionisation sporadique se trouve présente durant les mois d'été. Elle affecte les gammes de fréquences HF et du bas VHF. La couche E1 diffracte les fréquences de 500 à 1500 kHz. La couche E2 quant à elle diffracte les fréquences de 1500 kHz.



# Module #3 – ONDES IONOSPHERIQUES (SKY WAVES)

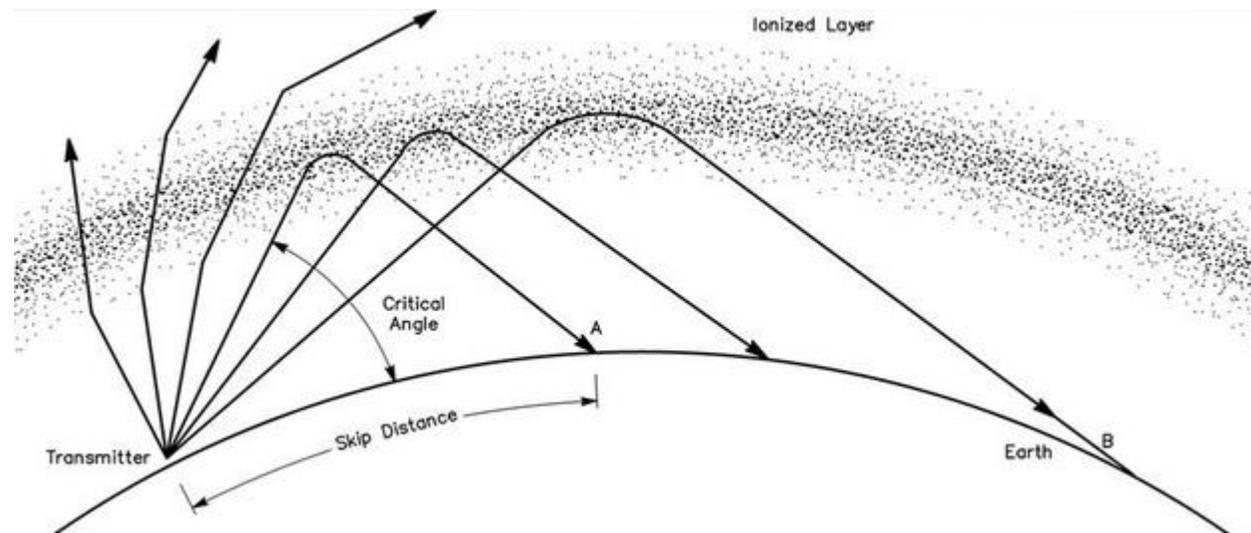
*Couche F : Cette couche située entre 160 km et 480 km autorise des sauts de 2500 km. Elle apparait donc durant le jour et sur une partie importante de la nuit. La couche F1 diffracte les fréquences de 1,5 MHz à 30 MHz.*



# Module #3 – ONDES IONOSPHERIQUE (SKY WAVES)

## *Angle critique :*

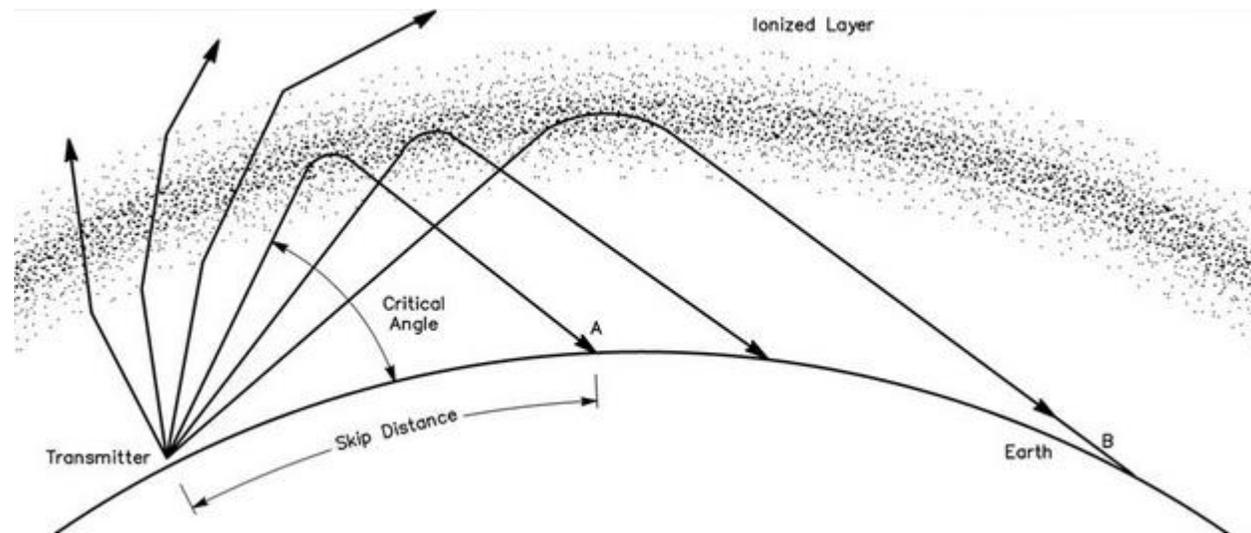
L'angle le plus grand qui permet à cette fréquence d'être réfléchiée sur une couche donnée. Si l'angle d'incidence est plus grande, la couche est traversée, si l'angle est inférieur, il y a réflexion.



# Module #3 – ONDES IONOSPHERIQUE (SKY WAVES)

## *Angle critique :*

L'angle le plus grand qui permet à cette fréquence d'être réfléchiée sur une couche donnée. Si l'angle d'incidence est plus grande, la couche est traversée, si l'angle est inférieur, il y a réflexion.

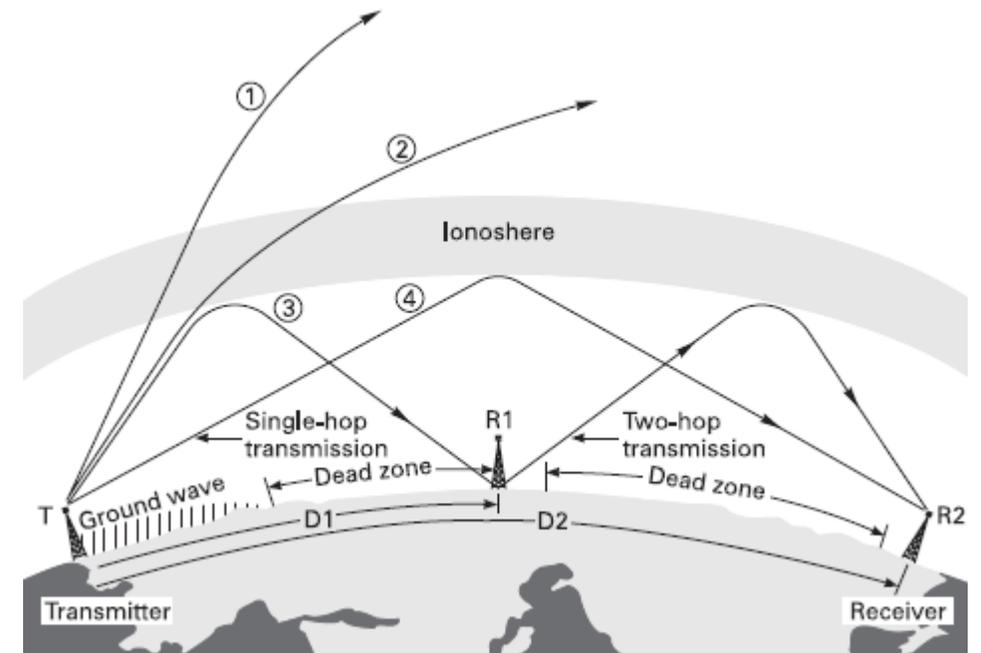


# Module #3 – ONDES IONOSPHERIQUE (SKY WAVES)

## PARCOURS ATMOSPHERIQUE

La réfraction de moyennes et hautes fréquences dans l'ionosphère autorise la radio communication HF intercontinental. Cette communication est possible durant le jour et quelques temps après le coucher du soleil, soit lors de l'ionisation de l'ionosphère.

La télécommunication HF ionosphérique se fait par saut selon un angle associé à une distance définie. L'espace de saut « skip zone » est la distance entre le site d'émission et le point de retour sur la terre.



# Module #3 – PROPAGATION

Entre 2 antennes, une onde peut donc se propager selon :

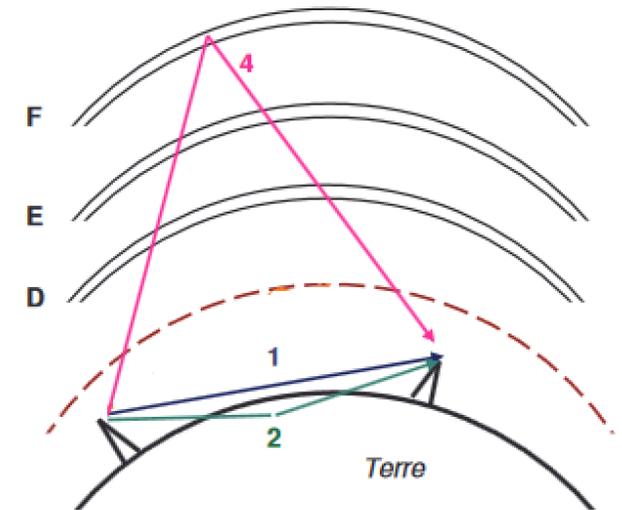
- Une onde directe (1)
- Une onde de sol (2)
- Une onde ionosphérique (4)

La propagation est influencée par la nature du sol (terre ou mer, présence de cours d'eau ...).

Les couches ionisées présentant un indice de réfraction variable, les conditions de réflexion d'une onde dépendent de sa fréquence ou de son incidence.

On pourra ainsi observer une réflexion sur la couche E, sur la couche F, voire une propagation traversant la couche F.

En conséquence, la réception d'une onde peut être stable (cas de la réception d'une onde directe) ou plus ou moins instable (réception d'une onde réfléchie, affectée de fading)



# Module #3 – PROPAGATION

**Ondes longues (150 à 285kHz) :** La portée des émetteurs est grande (leur puissance est cependant très élevée : plusieurs MW) ; la propagation n'est pas influencée par les obstacles terrestres ; la propagation ionosphérique est stable, avec réflexion sur les couches D et E.

**Ondes moyennes (520 à 1600kHz) :** L'onde au sol est rapidement affaiblie ; elle est perturbée par les obstacles terrestres ; ces ondes sont utilisées pour de la radiodiffusion locale. La propagation ionosphérique s'effectue par réflexion sur la couche E, mais il y a une forte absorption par la couche D ; la portée nocturne est ainsi 5 à 10 fois supérieure à la portée diurne par disparition la nuit de la couche D.

**Ondes courtes :** Entre 2 et 30MHz, l'onde directe permet des communications à courte distance ; on utilise la réflexion sur la couche F pour réaliser des grandes portées avec une faible puissance d'émission.

Malheureusement, ce type de propagation est très instable, passant du mieux au pire en quelques heures !

Au delà de 30MHz, la propagation directe donne une portée de 50 à 60km.

# Module #3 – COMMUNICATION SATELLITE

La dernière catégorie de propagation d'ondes est celle utilisant les satellites orbitaux. En fait, le type de propagation est la même que les ondes directes dites à ligne de vue.

Le transmetteur envoie un signal par l'intermédiaire d'une antenne directionnelle à travers l'atmosphère terrestre jusqu'à un satellite situé dans l'espace.



# Module #3 – COMMUNICATION SATELLITE

Il y a deux catégories de satellites :

1. Les satellites orbitaux géostationnaires : soit les satellites qui gravitent sur une orbite « fixe » dans l'espace du point de vue terrestre. Cette orbite se doit d'être à 22 000 miles de la surface terrestre (35 200 km). En fait le satellite se déplace dans l'espace à la même vitesse que la projection dans l'espace de la surface terrestre à cette altitude de 20 000 milles.
2. Les satellites orbitaux mobiles : soit les satellites qui gravitent sur une orbite « non-fixe » dans l'espace du point de vue terrestre.

# Module #3 – COMMUNICATION SATELLITE

La différence entre ces deux types de satellites est définie par une communication continue pour un satellite géostationnaire et discontinue pour un satellite mobile.

Il est essentiel de mentionner que pour communiquer à travers l'atmosphère terrestre, il nous faut sélectionner des gammes de fréquences qui ne seront que faiblement affectées par celui-ci.

Nous parlons alors de fenêtre atmosphérique pour les ondes électromagnétiques. La fenêtre atmosphérique est une partie du spectre électromagnétique pour laquelle l'absorption par l'atmosphère terrestre est minimale. Dans le domaine optique, outre la **fenêtre du visible**, les deux fenêtres principales se situent dans **l'infrarouge**, entre 3 et 5  $\mu\text{m}$  et 8 et 14  $\mu\text{m}$  environ.

# Module #3 – COMMUNICATION SATELLITE

