
La propagation des ondes radio



Le canal radioélectrique

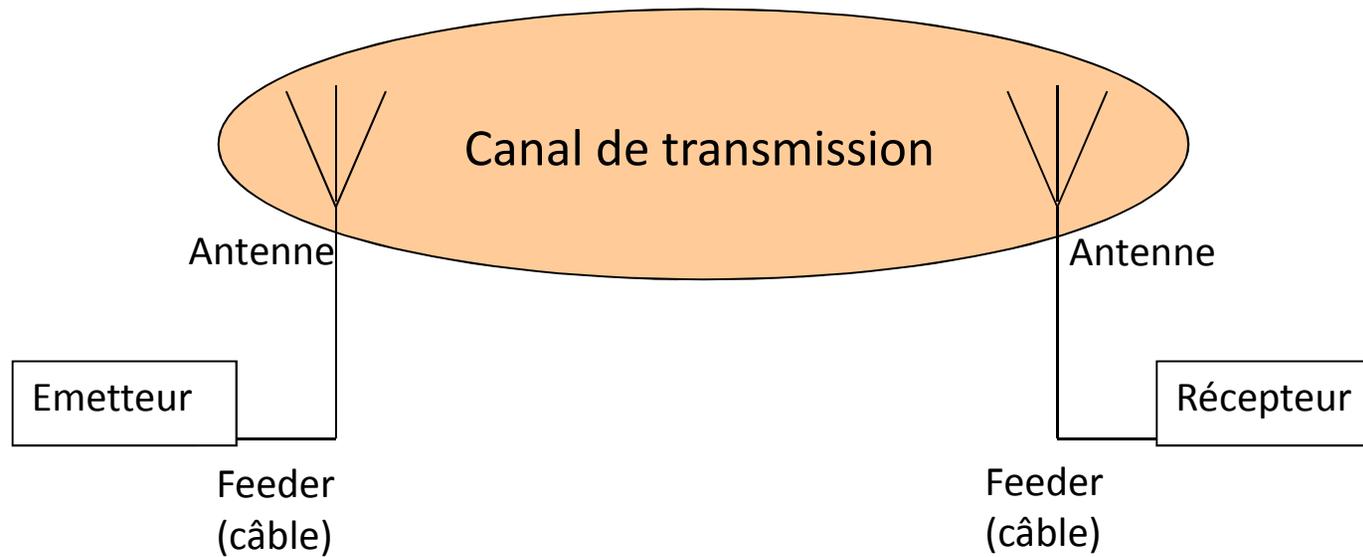
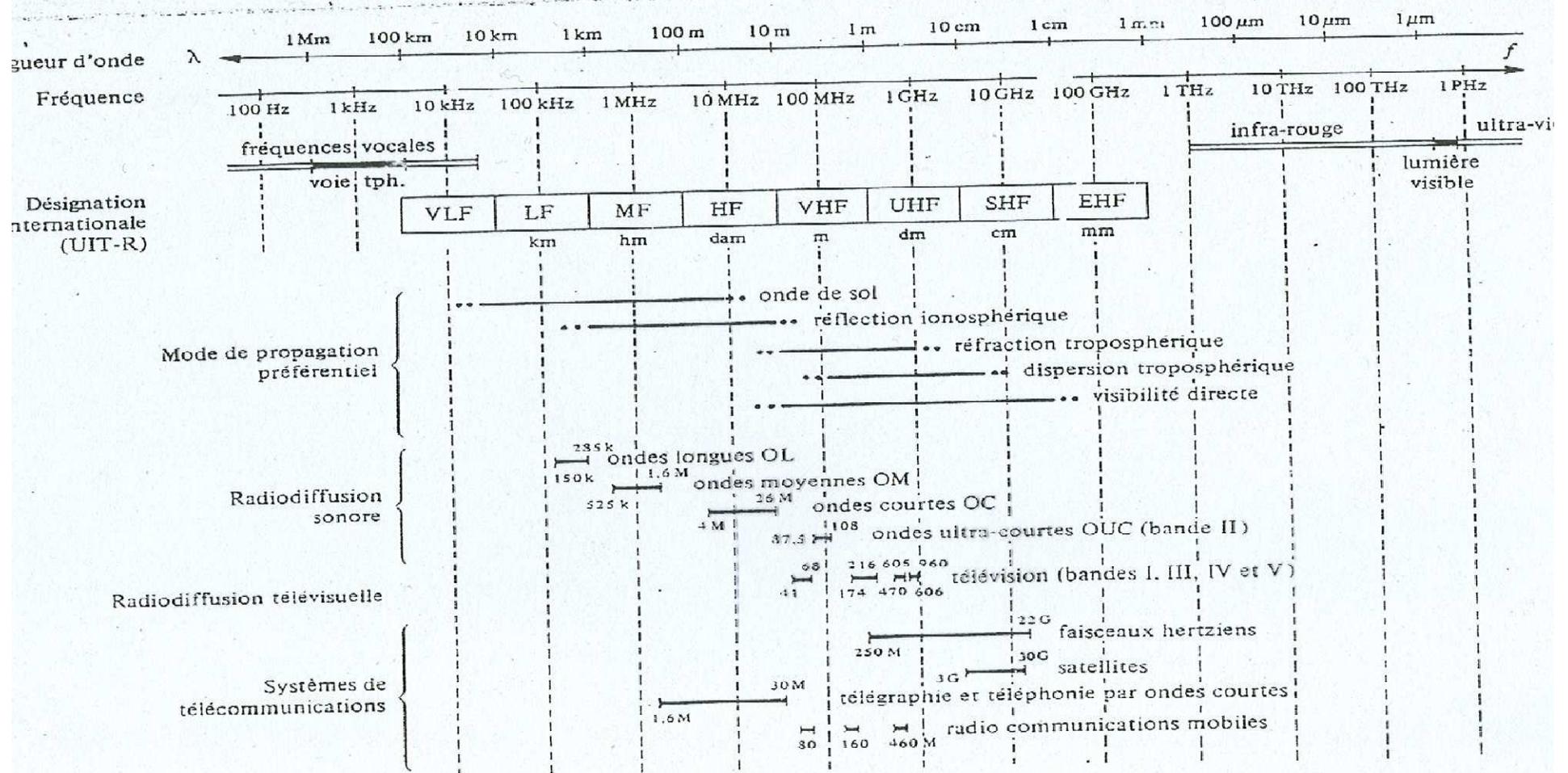


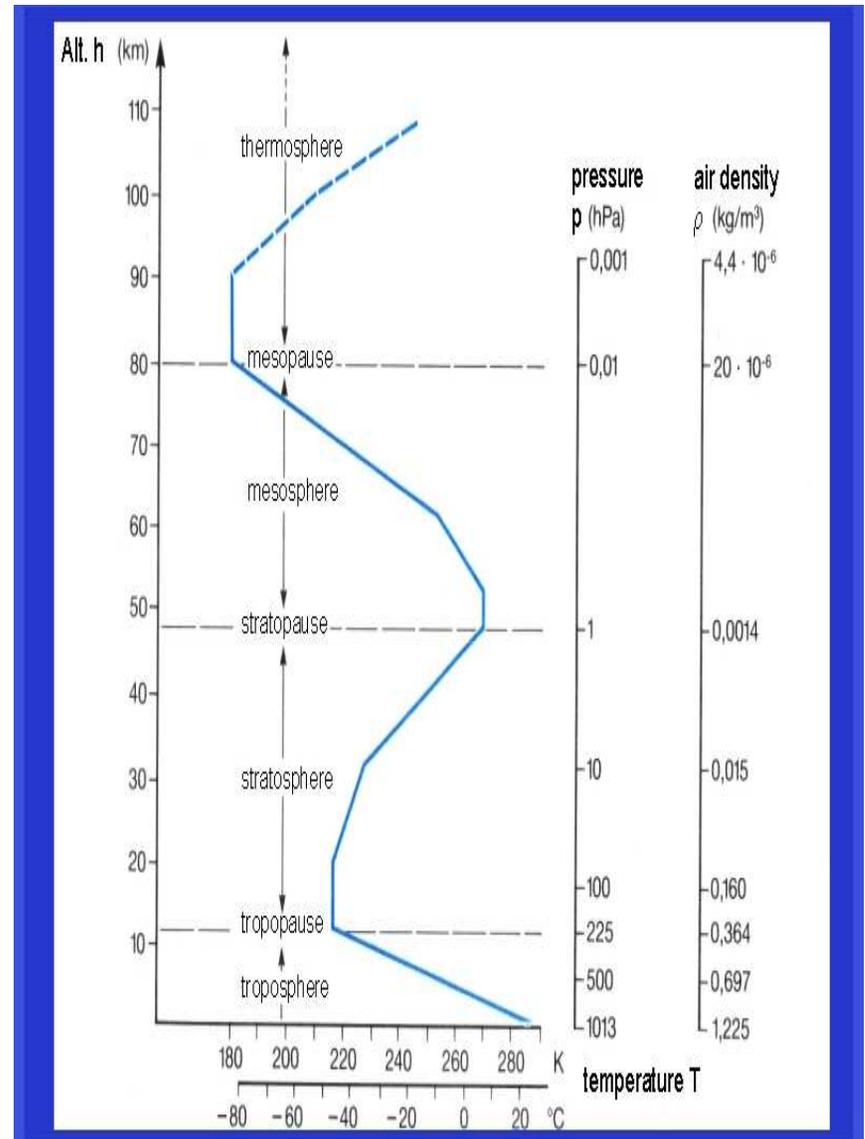
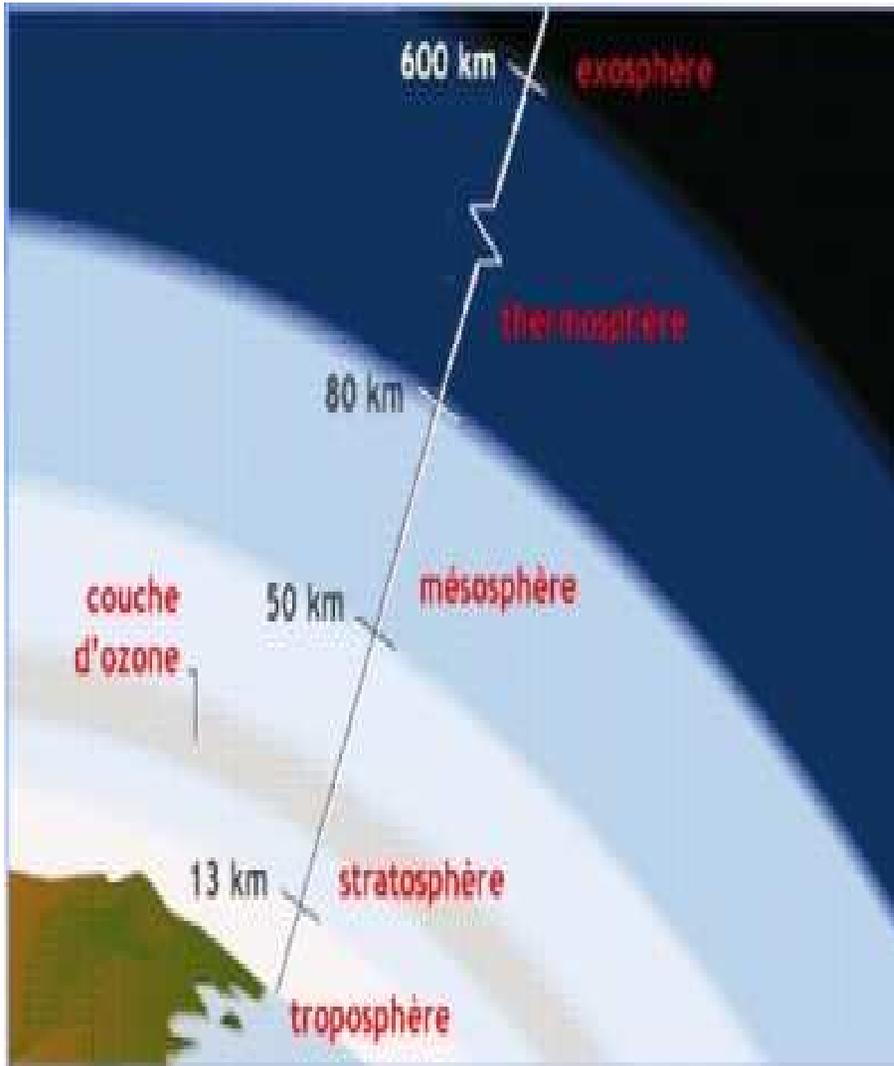
Schéma simplifié d'une liaison radioélectrique

Les modes de propagation

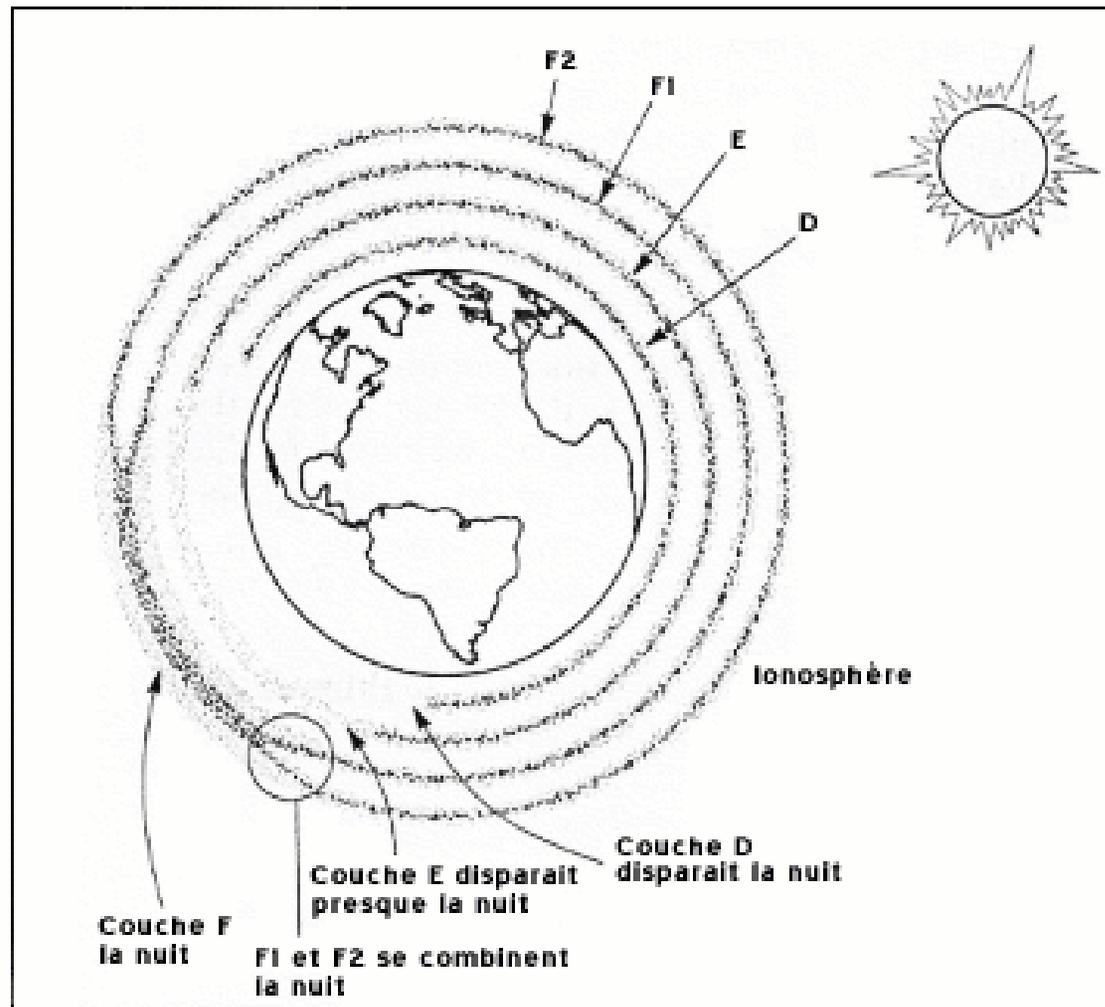


Gammes d'ondes. Les gammes attribuées aux différents services sont en fait discontinues à l'intérieur des domaines indiqués.

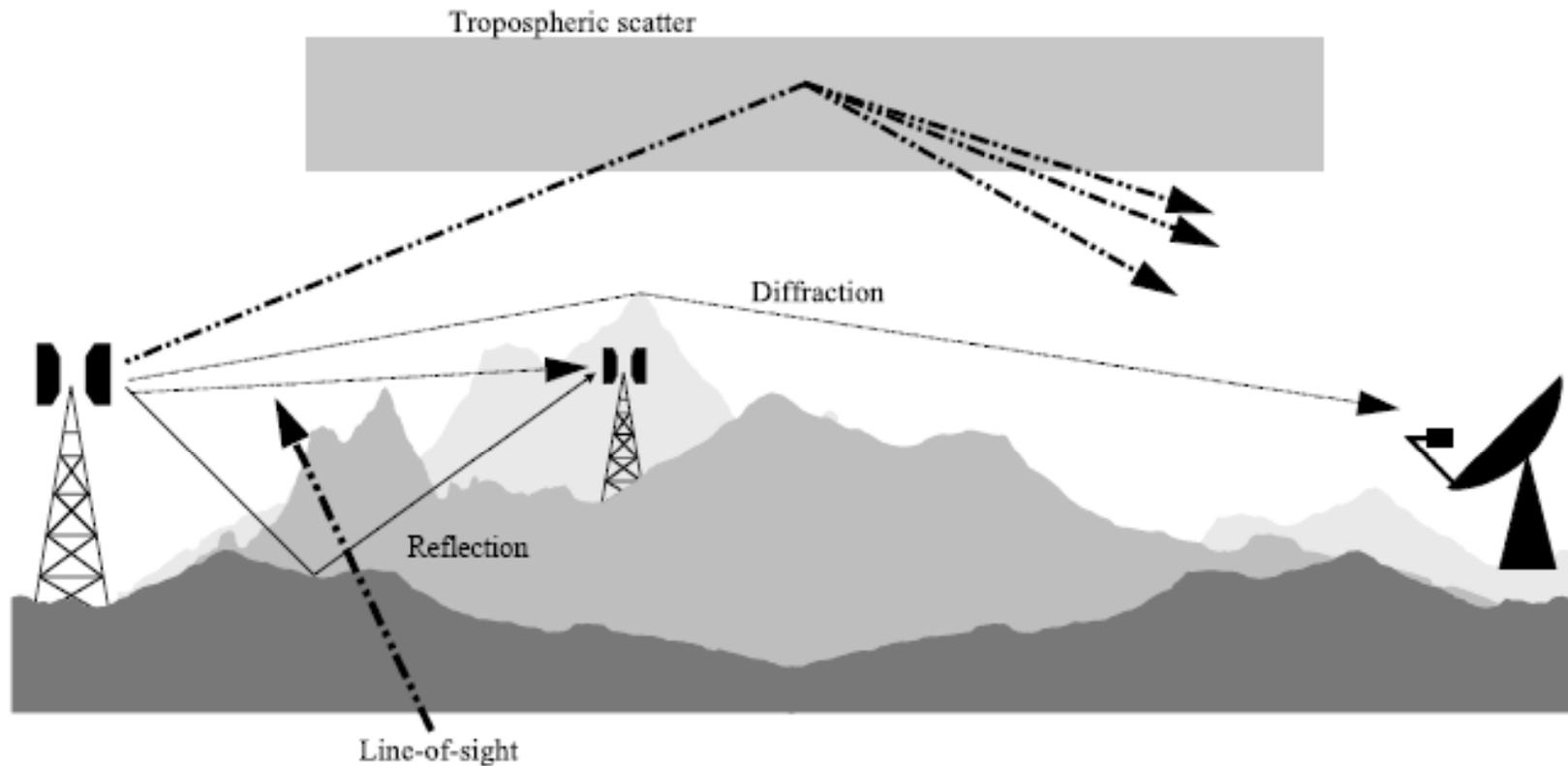
Description de l'atmosphère



Description de l'ionosphère



Les modes de propagation



- La propagation troposphérique est surtout utilisée pour le trafic local ou via relais;
- Elle est gouvernée par les variations d'indice de réfraction de l'air;
- Elle dépend donc des variations de l'altitude, de l'humidité, de la température.

La dépendance des fréquences sur les effets

- *Règles de base:*

Plus une onde est longue, plus sa distance de déplacement est élevée

Plus une onde est longue, meilleure est sa capacité de contourner ou d'éviter des objets

Plus une onde est courte, plus elle peut transporter des données

Réfraction troposphérique

- Indice de réfraction de la Troposphère : $n \sim 1$
- Indice de réfraction radio de la Troposphère : $N = (n-1) \cdot 10^6$

$$N = \frac{77,6 p}{T} + \frac{3,733 \cdot 10^5 \cdot e}{T^2}$$

T : température (K)

p : pression atmosphérique (mb)

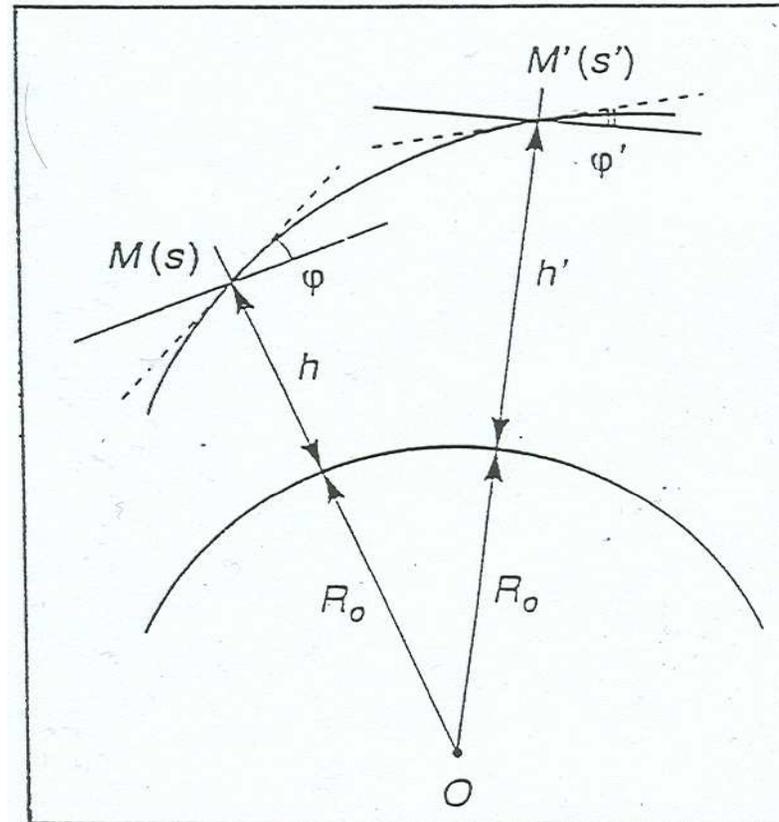
e : pression de vapeur d'eau (mb)

Valeur typique en « atmosphère standard » : $N = 301$

N décroît en fonction de l'altitude : $dN/dh = 0,039$

Réfraction troposphérique

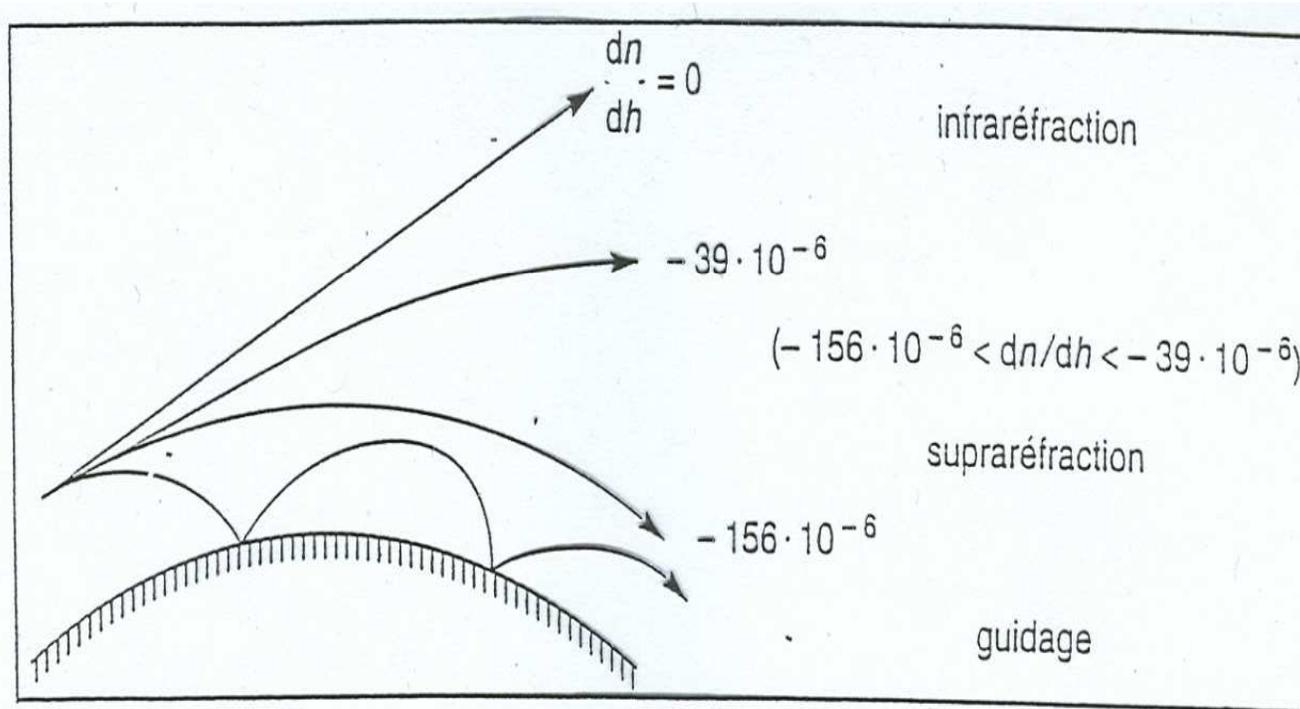
A cause de la diminution de l'indice de réfraction de l'air avec l'altitude, les ondes radio qui devraient passer au-dessus de l'horizon se rabattent vers la surface de la terre.



Réfraction d'un rayon dans l'atmosphère

Réfraction troposphérique

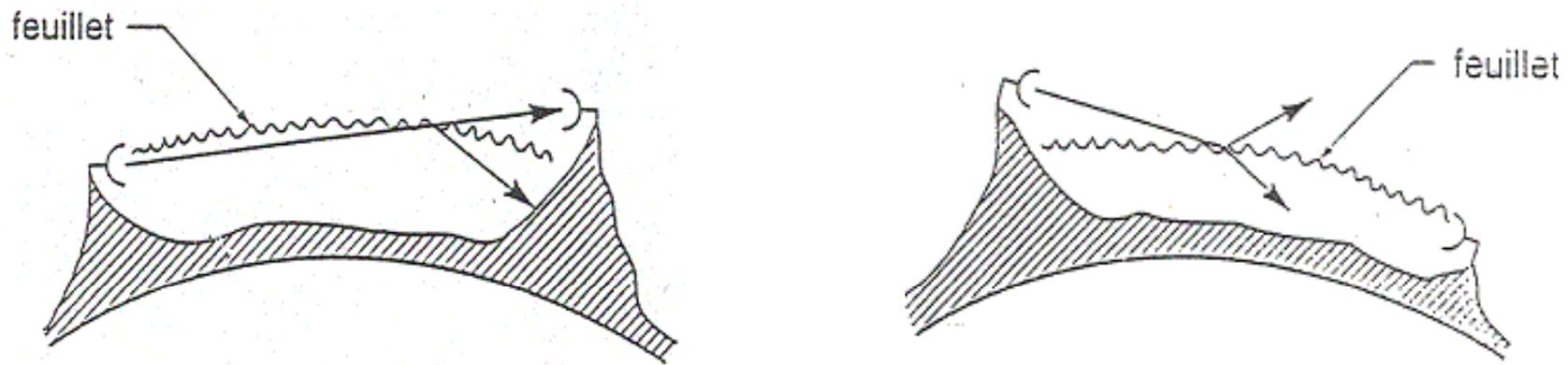
Dépendant de la valeur du gradient d'indice de réfraction, les ondes radio peuvent avoir différentes trajectoires, en fonction de leur inclinaison initiale par rapport à la surface de la terre.



Courbure de la trajectoire d'un rayon en fonction du gradient d'indice de l'atmosphère

Réfractions anormales

Il se peut aussi qu'une brusque variation d'indice se produise dans l'atmosphère à une hauteur h_0 . Il s'établit alors un feuillet horizontal qui provoquera une réflexion partielle et une réfraction anormale des ondes arrivant sous une incidence rasante



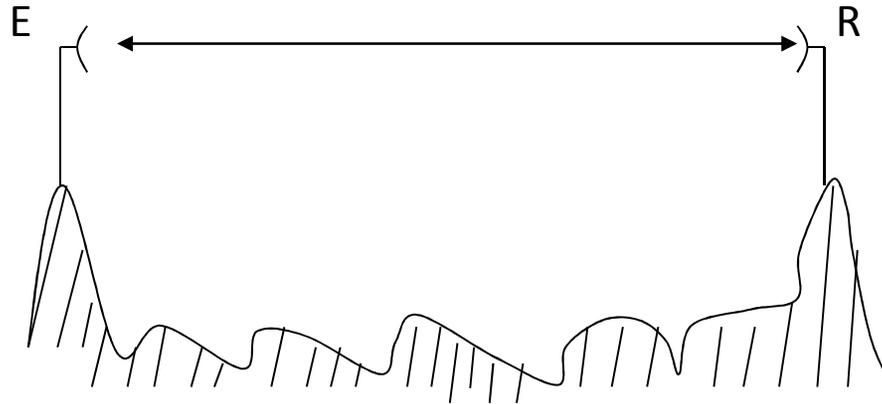
Quelques exemples de réfractions anormales en présence de feuillets

Réception en diversité

- La propagation anormale fait que les trajets de propagation soient autres que ceux prédis au préalable, ce qui provoque des situations de réception instables (évanouissements, interférences). On augmente la probabilité d'une qualité suffisante du signal en doublant la liaison et en commutant automatiquement sur le récepteur donnant le meilleur rapport signal/bruit. Ce procédé s'appelle réception en diversité :
 - Diversité d'espace : Elle consiste à utiliser deux antennes de réception, l'une à l'emplacement optimum pour une propagation normale et l'autre à un niveau inférieur d'au moins une centaine de longueurs d'onde.
 - Diversité de fréquence : qui consiste à établir la liaison sur deux fréquences séparées d'au moins 1%, sachant que les fluctuations atmosphériques n'affecteront pas les deux fréquences de la même manière.
- L'emploi simultané de ces deux méthodes permet d'avoir le choix entre 4 signaux, ce qui, en général, est suffisant pour garantir une sûreté totale de la liaison.

Ondes directes (Line of Sight)

Se propagent en ligne droite et sont donc utilisées à condition qu'il y ait portée optique entre les antennes d'émission et de réception (visibilité directe)



La surface de la terre n'étant pas plane, la portée de telles ondes est donc limitée ; un calcul géométrique simple (voir TD) montre que la portée géométrique (d) d'une onde émise par une antenne se trouvant à une hauteur h_e et captée par une antenne de hauteur h_r est donnée par :

$$d = \sqrt{2R_0} \left(\sqrt{h_e} + \sqrt{h_r} \right)$$

$R_0 = 6400$ km étant le rayon de la terre.

Ce type d'ondes est utilisé à partir des très hautes fréquences (VHF, UHF, SHF).

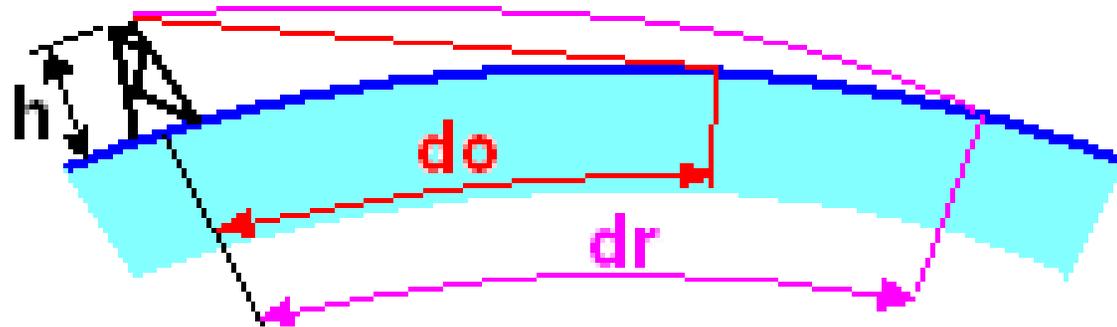
Horizon radio vs Horizon optique

$$d_r = 4,12 \sqrt{h}$$

Horizon Radio

$$d_0 = 3,57 \sqrt{h}$$

Horizon Optique



d_r d_0 : en km
 h : en mètres

- l'Horizon Radio est plus éloigné que l'Horizon Optique ~+15% à cause du phénomène de réfraction des ondes par diminution de l'indice de l'air avec l'altitude.
- Les ondes radio s'incurvent et rejoignent le sol un peu plus loin que l'horizon optique.

Horizon radio vs Horizon optique

Montrer la relation donnant
l'horizon optique:

$$d_0 = 3,57 \sqrt{h}$$

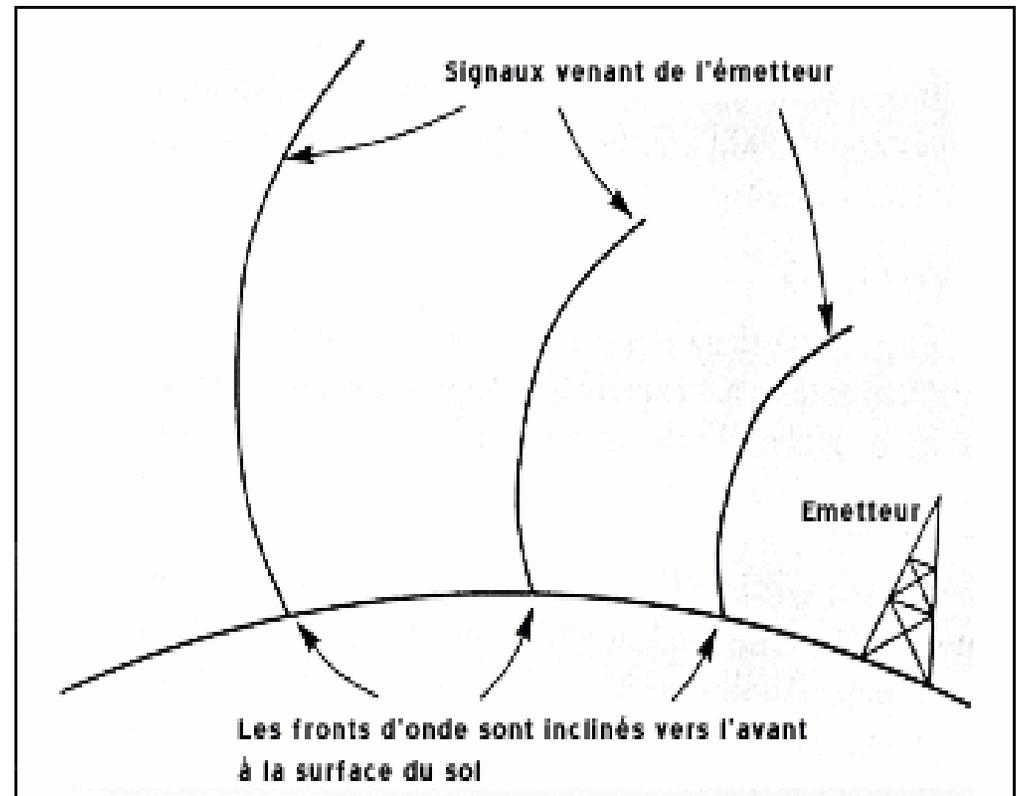
Ondes de sol

Ce sont des ondes se propageant le long du sol sans être gênées par les obstacles.

Plus la fréquence est basse (longueur d'onde élevée), plus l'onde de sol contourne facilement les obstacles naturels ou urbains.

Ce type d'ondes peut atteindre :

- plusieurs milliers de kilomètres en VLF,
- plusieurs centaines de kilomètres MF;
- seulement quelques dizaines de kilomètres en HF.



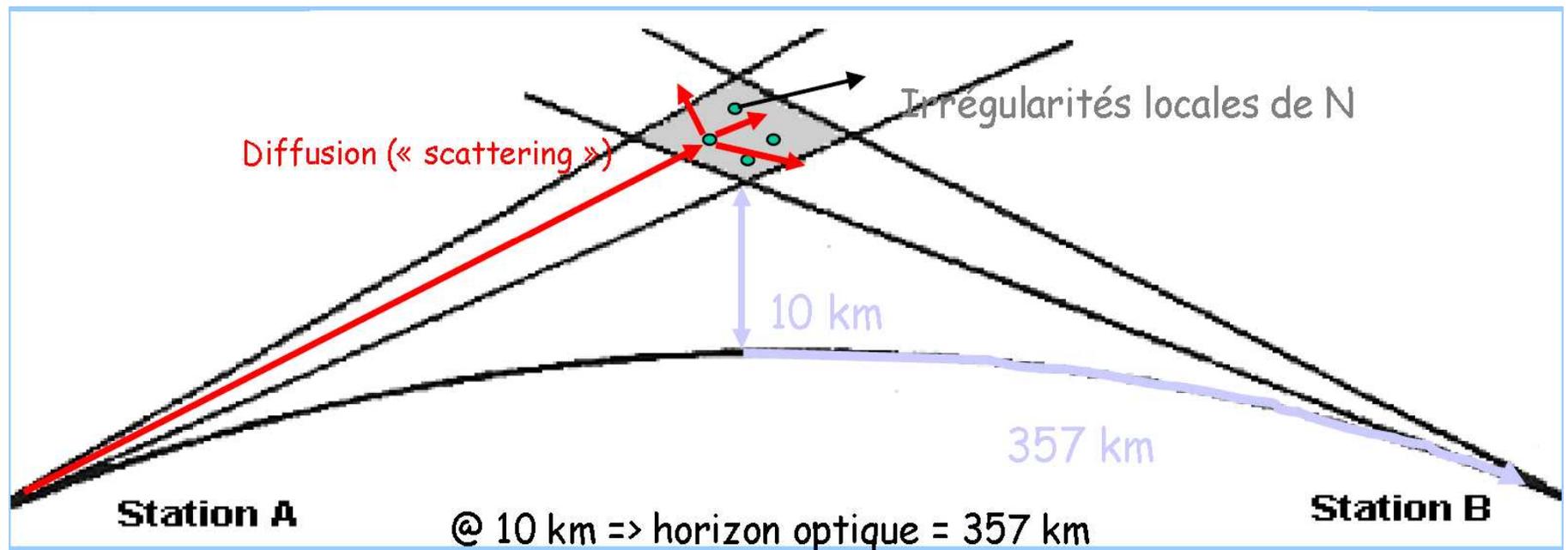
Ondes de sol

Voici une liste des radios pouvant être reçues en Grandes Ondes (Ondes Longues); elles se trouvent toutes dans la gamme: 150kHz - 285kHz.

- France inter - 162 kHz
- **Medi 1 - 171 kHz**
- Europe 1 - 183 kHz
- BBC 4 - 198 kHz
- RMC INFO - 216 kHz
- RTL - 234 kHz
- RTE 1 - 252 kHz (Nord de la France)
- Radio Alger - 252 kHz (Sud de la France)

Dispersion troposphérique

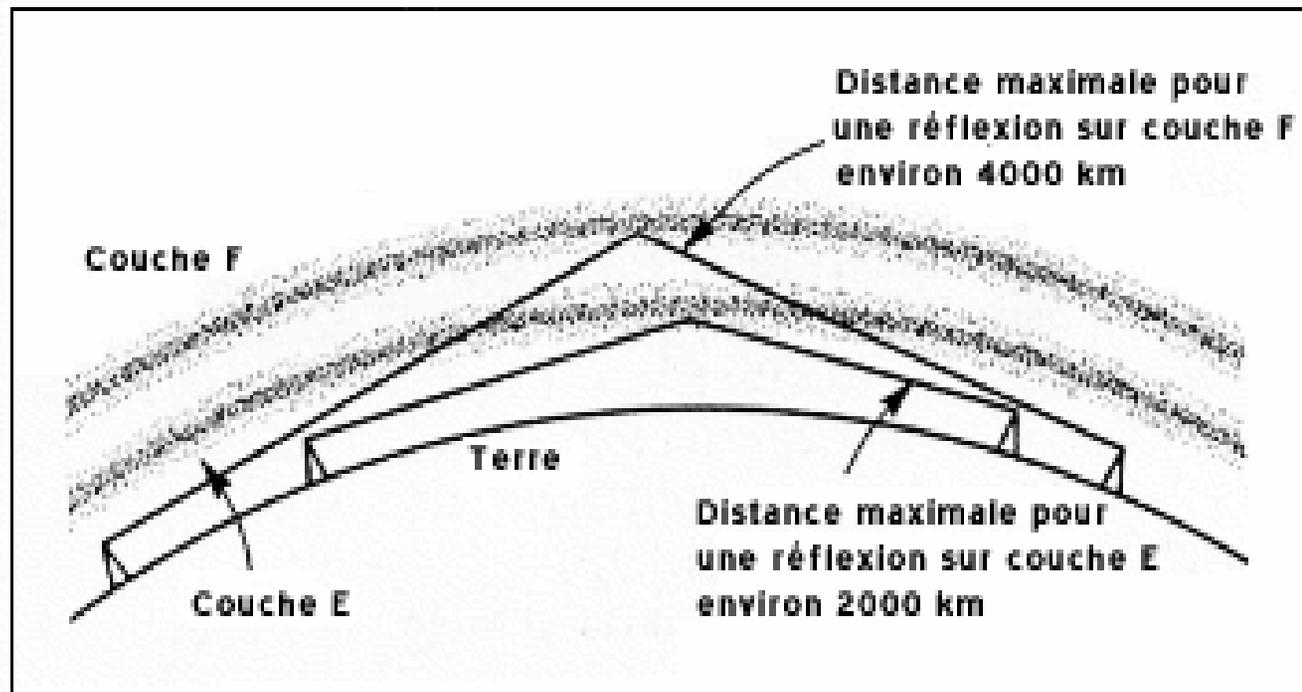
Du fait de changements abrupts d'indice de réfraction dans la troposphère, dus à la présence de masses d'air à des températures et des degrés d'humidité différents, les ondes incidentes sont dispersées dans toutes les directions en particulier vers le sol.



- La distance du bond dépend de l'altitude du volume diffusant commun aux 2 stations.
- Forte atténuation qui augmente avec la fréquence, nécessite de fortes puissances d'émission.

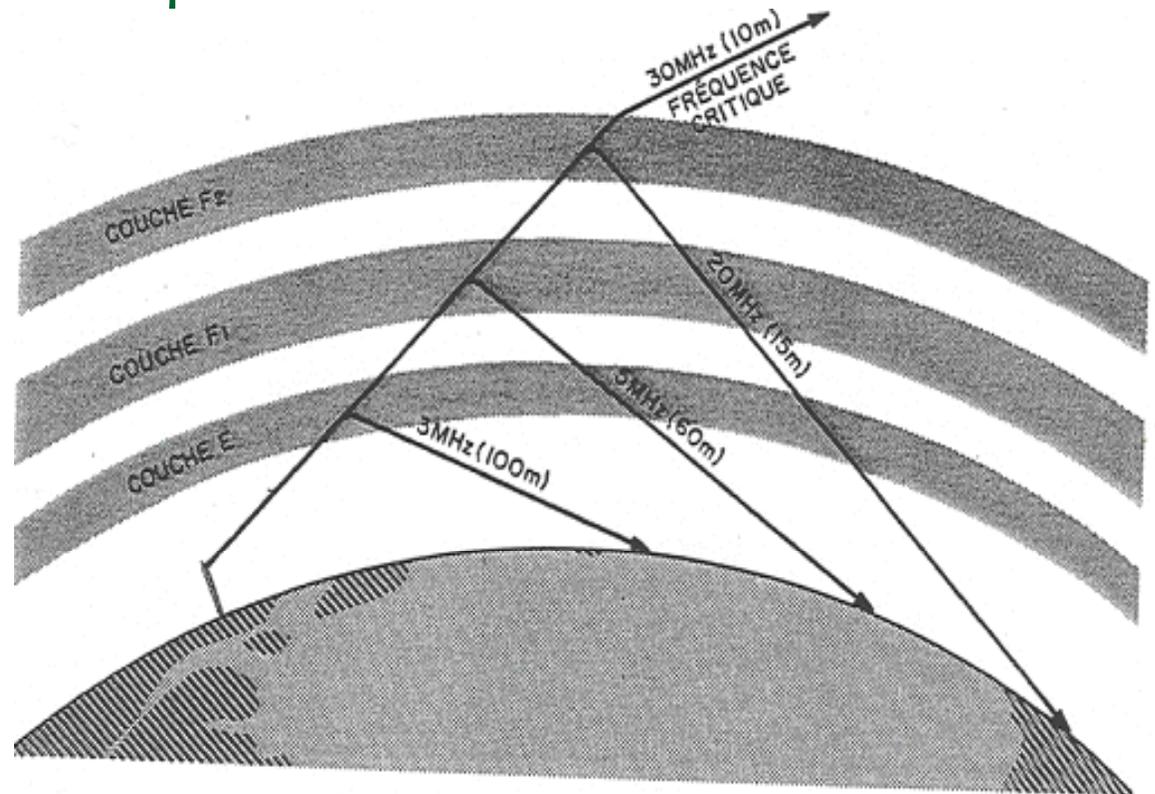
Réflexion ionosphérique

Elle est possible du fait que la couche ionosphérique réfléchit les ondes de hautes fréquences (MF, HF) qui l'atteignent. La portée est très importante et l'on peut atteindre les antipodes en réalisant plusieurs bonds si les conditions atmosphériques sont favorables.



Réflexion ionosphérique

En augmentant sa fréquence, l'onde pourra pénétrer davantage les couches de l'ionosphère et ne sera réfléchi que par les couches supérieures, sa portée se trouve de ce fait augmentée. Cependant, il existe une fréquence limite (autour de 30 MHz le jour) appelée **fréquence critique** à partir de laquelle l'onde ne sera plus renvoyée vers le sol.



Portée d'une liaison radio en fonction de l'inclinaison et de la fréquence de l'onde

si f_c est la fréquence critique pour une incidence verticale, la fréquence maximale réfléchi sous incidence (α) est donnée par la relation

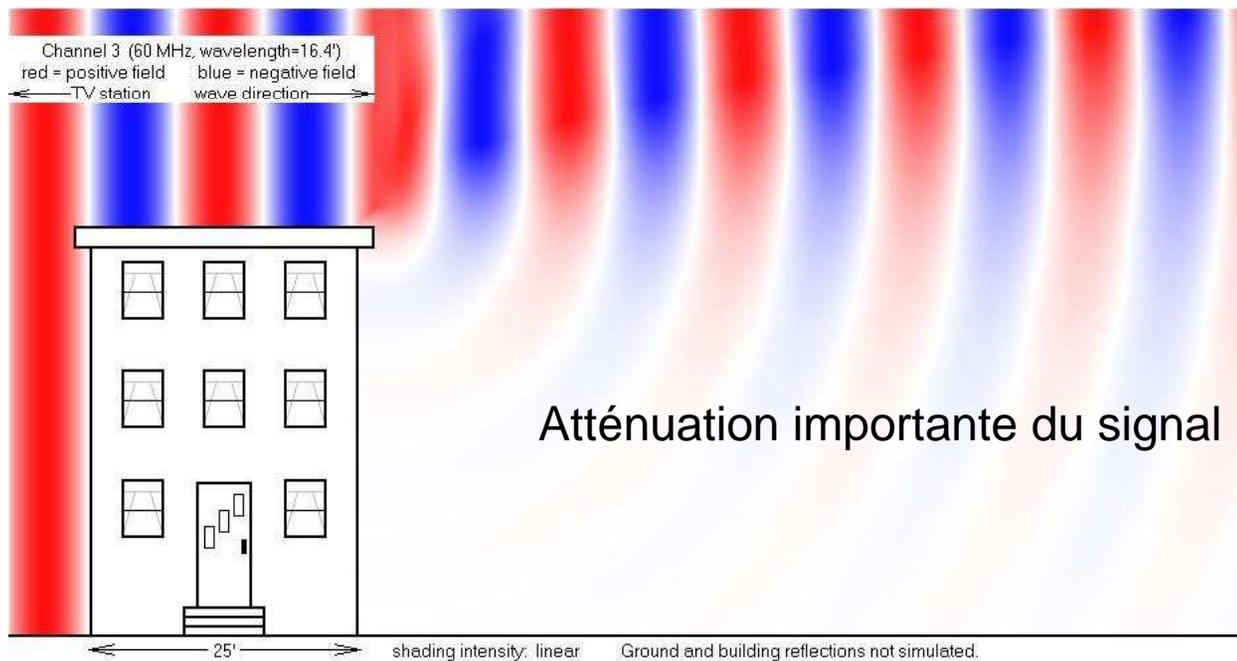
$$f_{\max} = \frac{f_c}{\cos \alpha}$$

Application

- Un radioamateur cherche à établir une liaison radio en HF à 8MHz avec un collègue situé à 600 km, en utilisant la couche F.
Quelle inclinaison α faudra - il donner à la ligne de visée de l'antenne d'émission ? On prendra une hauteur moyenne de la couche réfléchissante $h = 240$ km.

Diffraction

- La diffraction correspond a une déviation autour d'objets solides a bords aigus.
- La partie de l'onde qui passe a proximité de l'arête est freinée; d'où déviation vers la face arrière de l'arête.



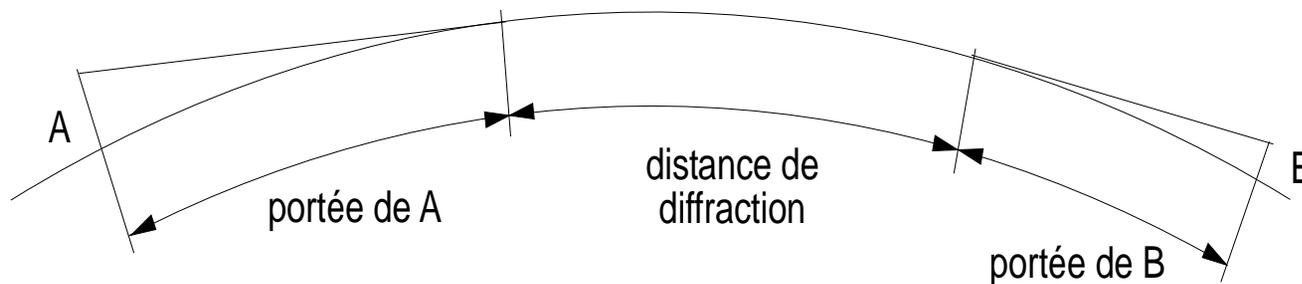
Application

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

$$a_d = 20 + \left(\frac{0.72 D_{(km)}}{\sqrt[3]{\lambda_{(m)}}} \right) (dB)$$

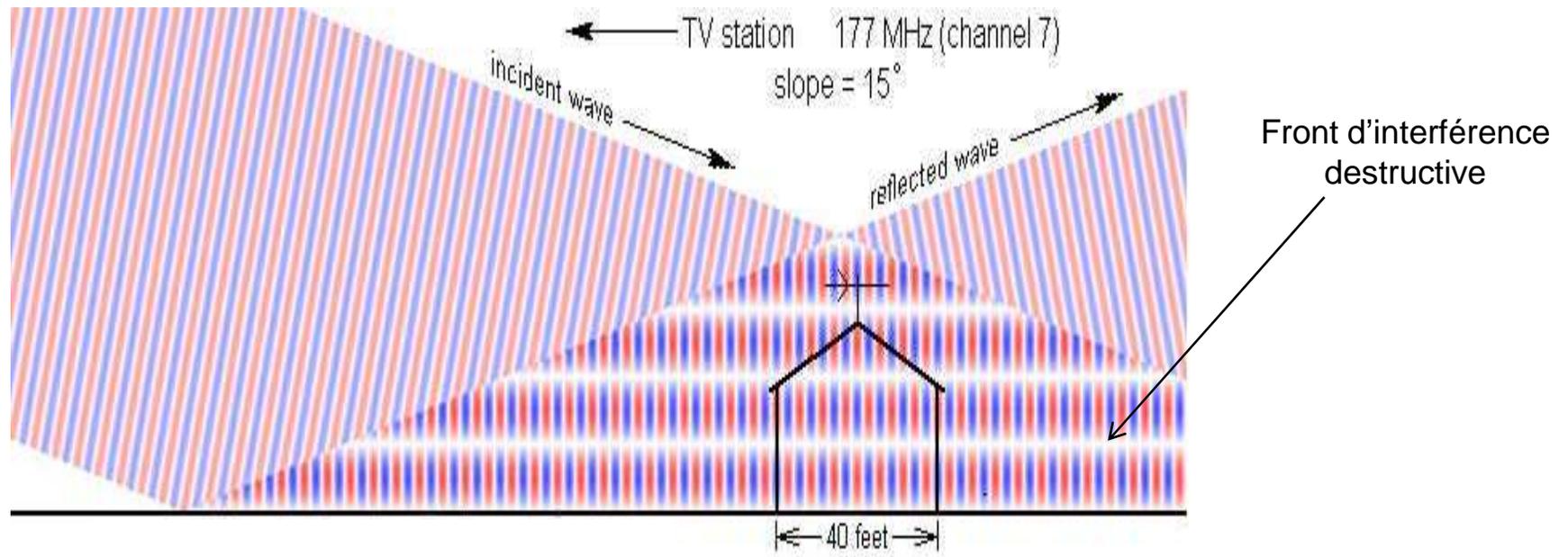
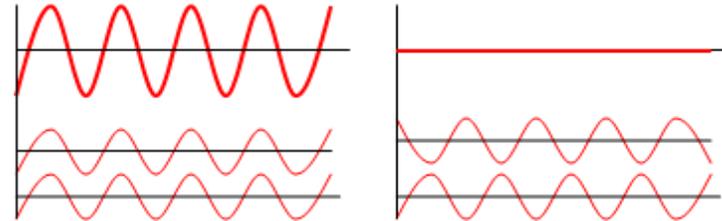
Où $D_{(km)}$ est la distance de propagation par diffraction exprimée en kilomètres et λ la longueur d'onde de la porteuse exprimée en mètres.

Calculez l'atténuation totale d'une liaison entre deux pylônes, l'un de 25 m, l'autre de 36 m, espacés de 56 km. On travaille en 145 MHz ?



Ondes radio: interférence

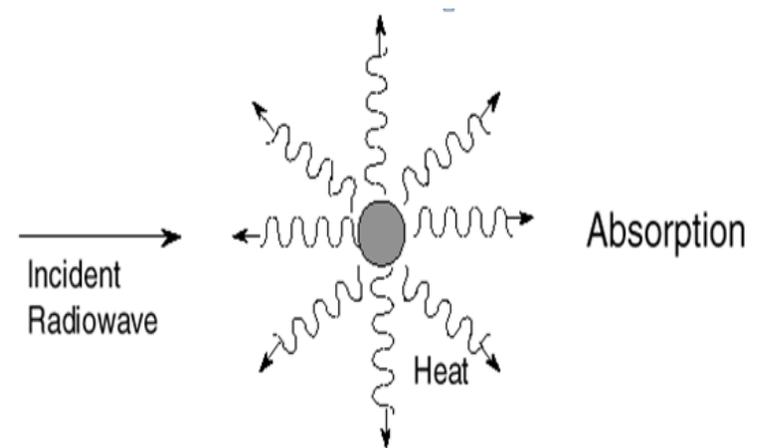
- Les ondes peuvent s'annuler,
- comme quoi $1 + 1 = 0$.



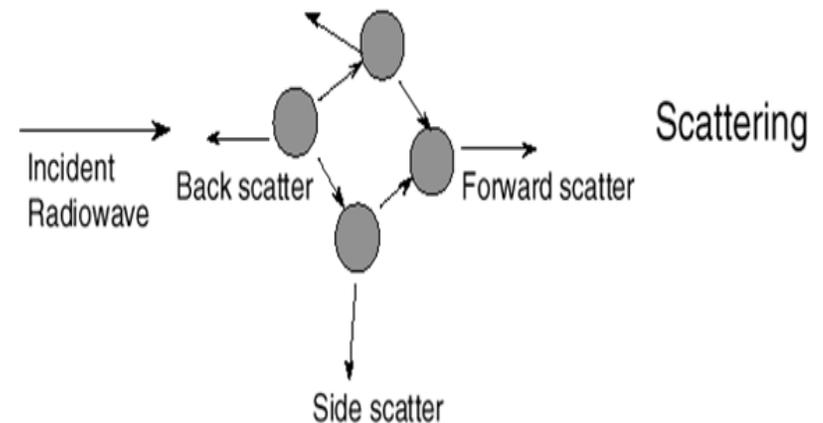
Par rapport aux technologies sans fil, le terme *interférence* est utilisé dans un sens plus large, notamment pour décrire des perturbations d'autres sources radio (ex : canaux avoisinants).

Atténuation par les hydrométéores

Absorption : la molécule d'eau est polaire et interagit donc avec le champ électrique de l'onde ; il en résulte un courant local de polarisation et donc de l'échauffement par effet Joule.



Diffusion (scattering) : une partie de l'énergie incidente étant rayonnée dans toutes les directions. Ce phénomène dépend de la longueur d'onde et de la dimension des gouttes d'eau.

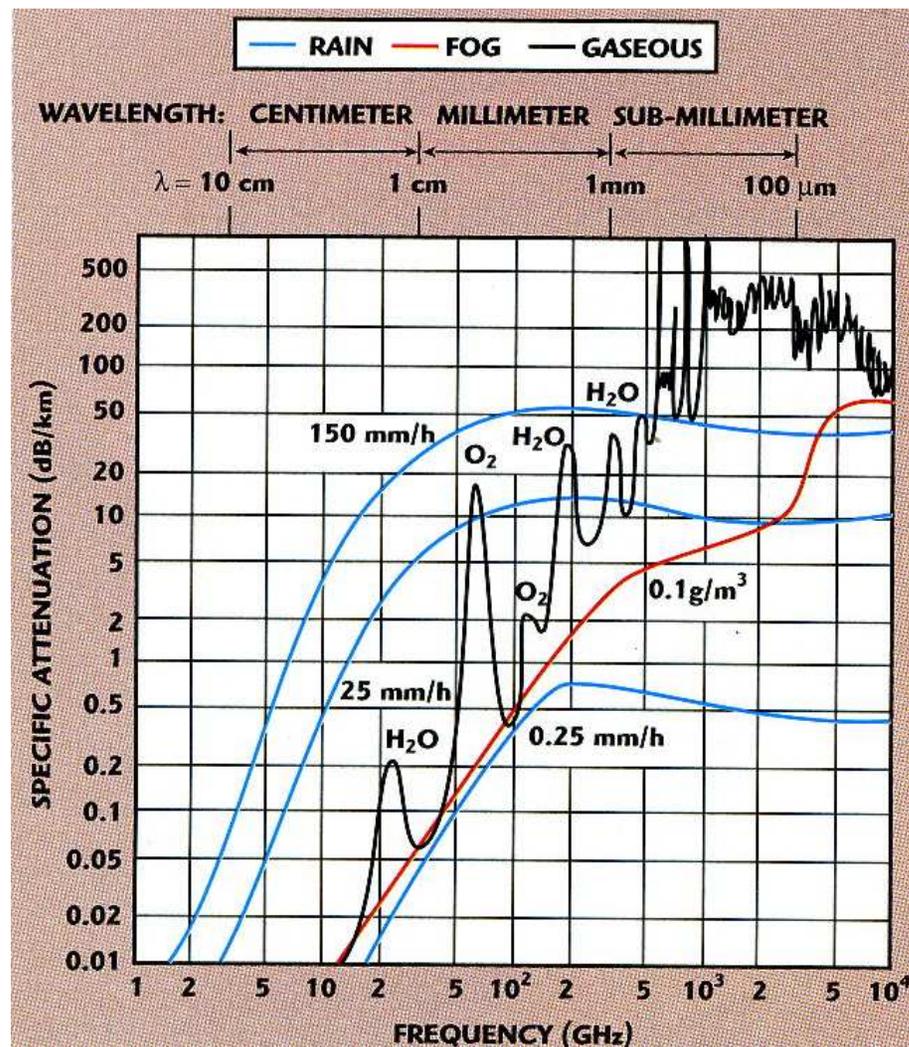


Atténuation par les hydrométéores

La figure donne les affaiblissements en dB/km des principaux facteurs d'atténuation atmosphérique dans la gamme des micro-ondes. L'absorption par la pluie, les nuages et le brouillard, ne devient gênante qu'à partir de 3GHz ; elle affecte donc principalement les ondes centimétriques et millimétriques (SHF et EHF) et à moindre degré les ondes décimétriques (UHF).

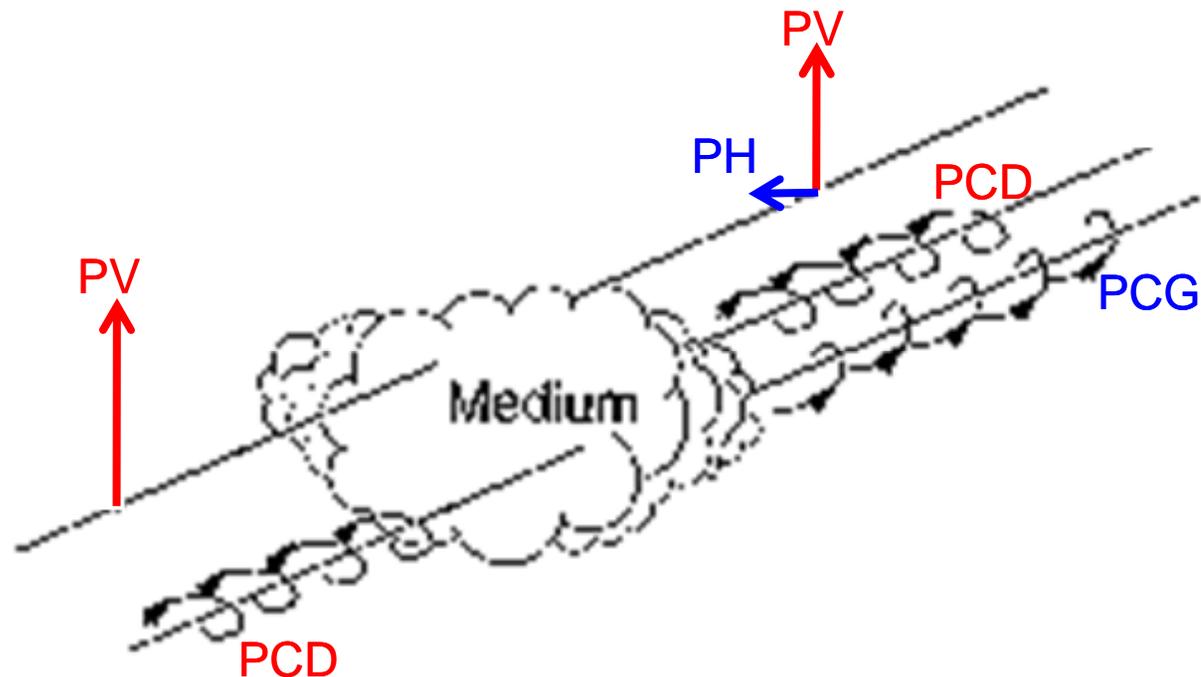
Contrairement à l'eau, la glace atténue très peu. Il en résulte que l'atténuation d'une chute de neige, dépend de sa teneur en eau sous forme liquide.

Quant aux gaz H₂O et O₂ principalement, ils absorbent à des fréquences particulières : autour de 22.3 GHz, à 183.3 GHz et 323.8 GHz pour H₂O et autour de 60 GHz et à 118.74 GHz pour l'oxygène.



Dépolarisation des ondes

En plus de l'atténuation, la pluie produit une dépolarisation des ondes à cause de la forme non sphérique des gouttes d'eau.



La possibilité de brouillages entre liaisons différentes.

Influence de la végétation

L'existence de forêts sur la longueur du trajet induit un affaiblissement important du signal à mesure que la fréquence de ce dernier augmente

f (GHz)	A (dB/m)
0.2	0.05
0.5	0.1
1	0.2
2	0.3
3	0.4

Variation de l'atténuation due à la végétation en fonction de la fréquence de l'onde

L'atténuation est plus faible en polarisation horizontale aux basses fréquences, mais cette différence disparaît au – delà de 1GHz.

Bilan de liaison radio

Pour une liaison en espace libre entre deux antennes distantes de d , la puissance reçue est donnée par l'équation suivante :

$$P_r(\text{dBW}) = P_e(\text{dBW}) + G_e(\text{dB}) + G_r(\text{dB}) + 10 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 - \alpha_c(\text{dB})$$

P_e : Puissance émise par la carte

P_r : puissance reçue au bout de la liaison

G_e : Gain de l'antenne émettrice

G_r : Gain de l'antenne réceptrice

α_c : atténuation des câbles des deux côtés de la liaison

λ : longueur d'onde

$$\alpha_p = 10 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad \text{est l'affaiblissement de propagation}$$

Gain d'une antenne

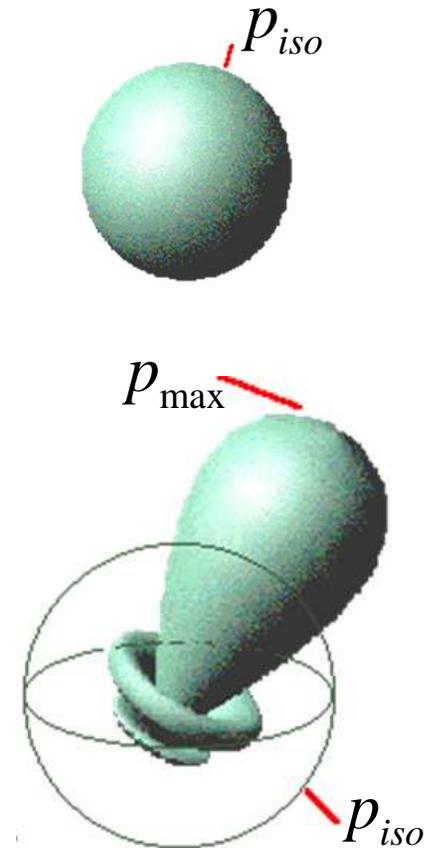
Si P_E est la puissance émise, la densité de puissance rayonnée par une antenne isotrope à une distance d est donnée par :

$$P_{iso} = \frac{P_E}{4\pi d^2}$$

Si p_{max} est la densité de puissance rayonnée par une antenne dans la direction de rayonnement maximal :

Le gain de l'antenne en décibels est donné par:

$$G(dB) = 10 \log \left(\frac{P_{max}}{P_{iso}} \right)$$



Gain d'une antenne

Les antennes *ne permettent pas d'avoir plus de signal (il faut un amplificateur qui ajoute de l'énergie, or une antenne n'est pas alimentée)*.

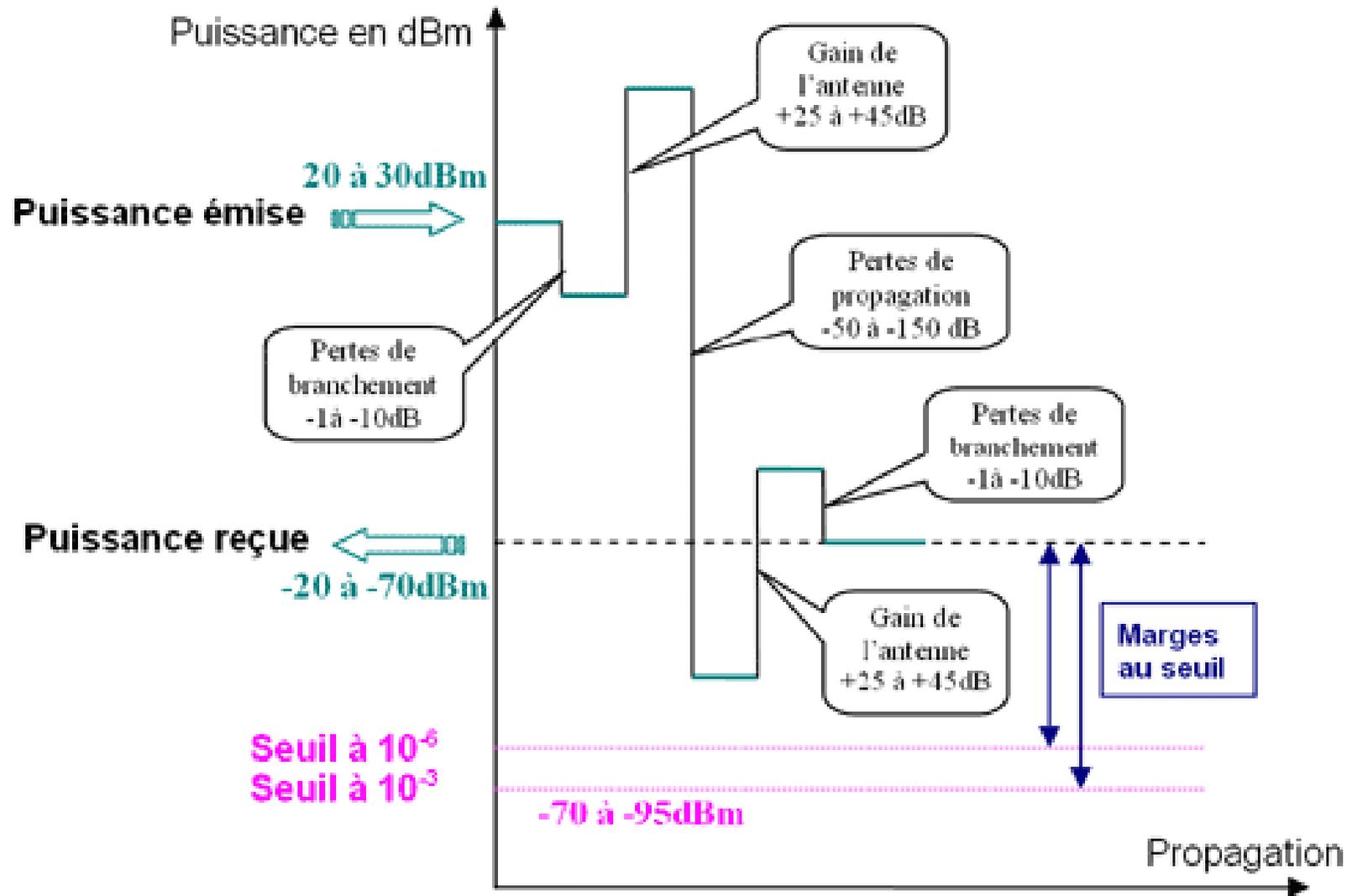
Une antenne *focalise le signal disponible dans une direction particulière, un peu comme le font les fars des voitures qui dirigent toute la lumière vers le devant.*

Plus une antenne concentre l'énergie du signal dans une direction particulière, *plus son gain est élevé, plus la portée s'améliore (dans la direction selon laquelle l'antenne rayonne le mieux)*

L'efficacité de la concentration du signal radio par les antennes est mesurée par *le gain dont l'unité est le **dBi** (parfois on écrit dB tout court pour simplifier)*. Plus une antenne concentre l'énergie, plus son gain en dBi sera élevé.

Lorsqu'une antenne a un bon gain, le signal radio reste "propre" et compréhensible jusqu'à une distance plus importante que pour une antenne avec un gain moins bon

Bilan de liaison radio



Puissance de transmission

- La puissance de sortie d'une carte radio

Voici un exemple d'une fiche de données d'une carte 802.11 a/b :

802.11b: 18 dBm (65 mW) puissance maximale

802.11a: 20 dBm (100 mW) puissance maximale

La sensibilité de réception

La sensibilité est le niveau de puissance nécessaire pour s'assurer que la carte radio fonctionne correctement.

Voici un exemple d'une fiche de données d'une carte 802.11b :

Sensibilité de réception:

- 1 Mbps: -95 dBm
- 2 Mbps: -93 dBm
- 5.5 Mbps: -91 dBm
- 11 Mbps: -89 dBm