

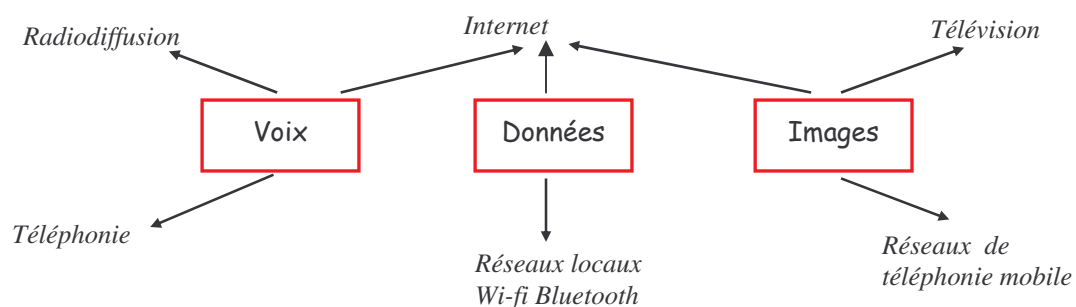
Introduction aux télécommunications

Un peu d'Histoire

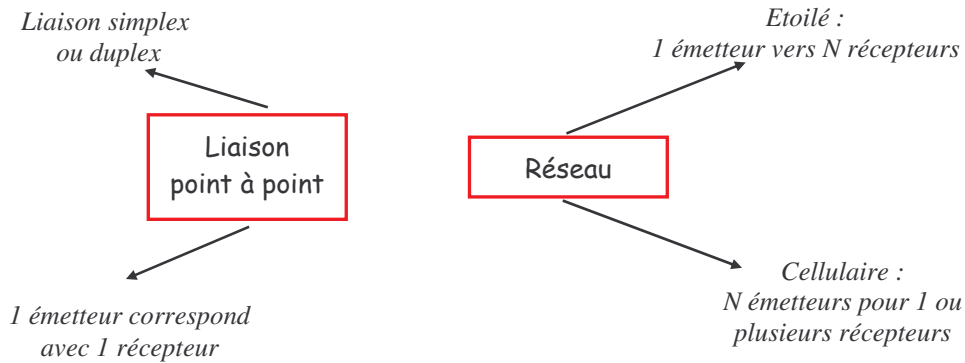
Les télécommunications par ondes hertziennes datent d'un peu plus d'un siècle :

- **1831** : Découverte de l'induction par Michael Faraday (1791 – 1867) : Production d'effets électriques à distance sans liaison galvanique.
- **1887** : Mise en évidence par Heinrich Hertz (1857 – 1894) de la propagation des ondes électromagnétiques.
- **1901** : Première liaison transatlantique par Guglielmo Marconi (1874 – 1937) et début de la télégraphie.
- **1906** : Invention de la triode : On peut produire et amplifier des ondes électromagnétiques.
- **1915** : Première liaison transpacifique avec un relais à Honolulu.
- **1920** : Découverte de l'ionosphère entre 80 et 300km d'altitude. Les ondes électromagnétiques de fréquences supérieures à 30MHz s'y réfléchissent, ce qui rend possibles des liaisons par réflexions ionosphériques.
- **Années 30** : Invention de la télévision.
- **Années 40** : Invention du radar.
- **1948** : Invention du transistor.
- **Années 50** : Liaisons troposphériques : Les ondes sont réfléchies par la turbulence des basses couches de l'atmosphère terrestre.
- **Années 60** : Premiers satellites défilants et géostationnaires.
- **Années 90** : Développement de la téléphonie cellulaire.
- **Années 2000** : Avènement de l'Internet haut-débit, de la TV par satellite, du GPS ...

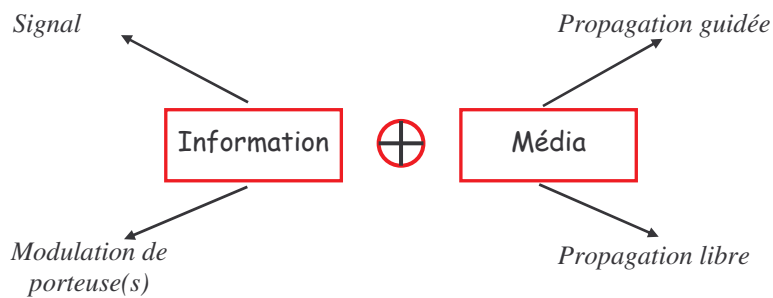
Grandeurs échangées



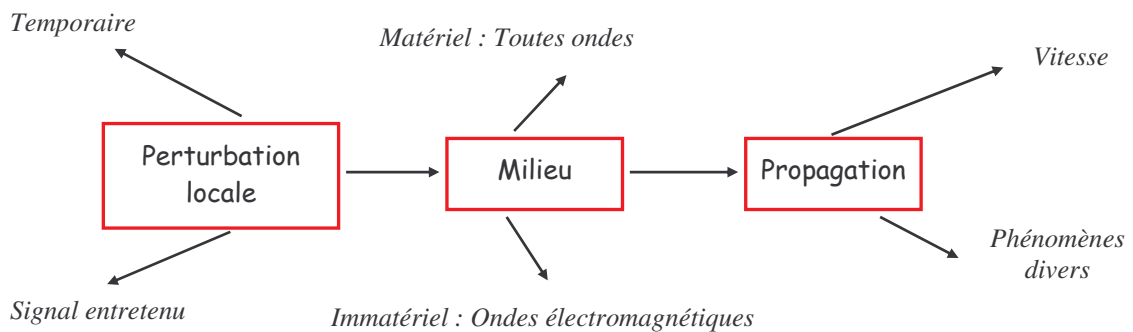
Structure d'un échange



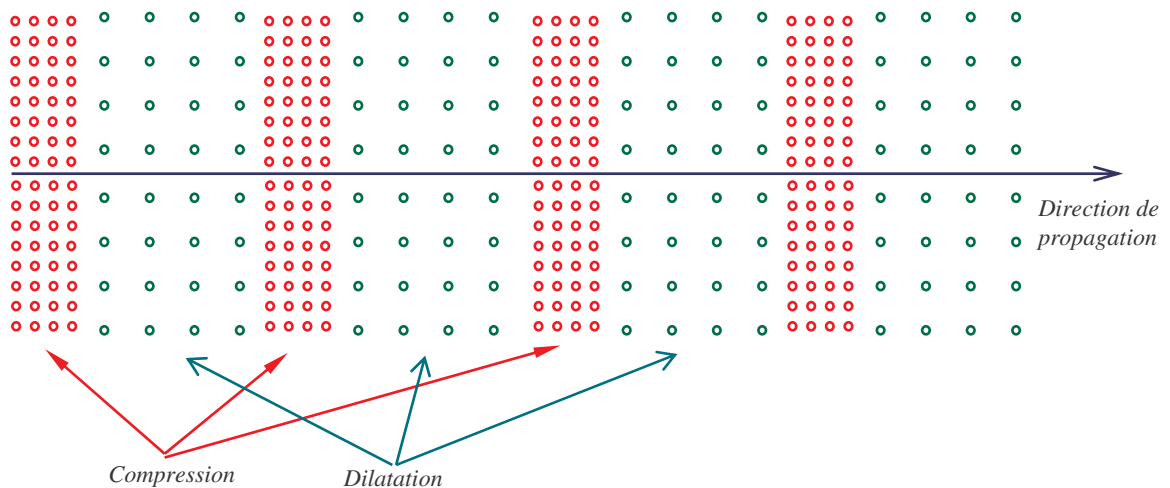
Modalité d'échange.



Ondes.



Structure d'une onde sonore (Onde longitudinale)

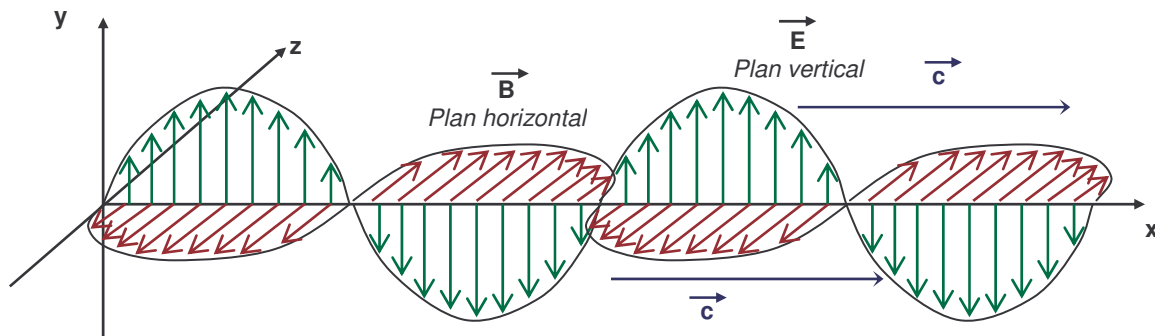


C'est seulement la variation de pression qui se propage : Il n'y a pas transport de matière !

Structure d'une onde électromagnétique (Onde transversale)

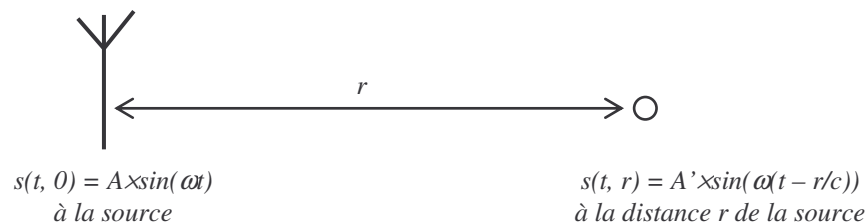
Une onde électromagnétique correspond à la propagation simultanée d'un champ électrique $\vec{E}$, mesuré en volts/m et d'un champ magnétique $\vec{B}$, mesuré en teslas.

Cette onde, immatérielle, peut se propager à la vitesse de la lumière dans divers milieux, dont le vide intersidéral.



Modèle de l'onde sinusoïdale.

Soit une source S, émettant une onde sinusoïdale $s(t) = A \sin \omega t$; cette onde se propage à partir de S avec la célérité c dans le milieu environnant. Supposons l'existence d'un détecteur à une distance r de la source.



L'onde met une durée $\Delta t = r/c$ pour progresser de la source au détecteur ; ce retard temporel correspond à un retard de phase $\Delta \phi = \omega \cdot r/c$. Le milieu étant inévitablement absorbant, l'amplitude de l'onde au niveau du détecteur est $A' \leq A$.

On définit la longueur d'onde λ : La longueur d'onde correspond à la distance parcourue par l'onde pendant une période de « vibration » de sa source.

$$\lambda = c \cdot T = c / f$$

Remarque : Lorsque le déphasage $\Delta \phi$ entre la source et le détecteur atteint 2π , nous avons $2\pi = \omega \cdot r/c$, soit $r = 2\pi \cdot c / \omega$, ou encore $r = \lambda$.

Tous les λ mètres, on retrouve des points de l'espace évoluant en phase ; tous les $\lambda/2$ mètres, on rencontre des points vibrant en opposition de phase.

Ceci illustre bien la double périodicité d'une onde :

- Temporelle, liée à la fréquence fondamentale de la source.
- Spatiale, liée à la longueur d'onde λ .

Les 2 périodes sont reliées par la célérité de l'onde : $\lambda = c \cdot T$

Exemple 1 : **Ondes sonores** ; $c \approx 330 \text{ m/s}$

$f = 30 \text{ Hz}$ (très grave) $\rightarrow \lambda = 11 \text{ m}$

$f = 500 \text{ Hz}$ (médium) $\rightarrow \lambda = 0,66 \text{ m}$

$f = 11 \text{ kHz}$ (très aigu) $\rightarrow \lambda = 30 \text{ mm}$

Exemple 2 : **Classification des Ondes Electromagnétiques** : $c \approx 300000\text{km/s}$ dans le vide ou l'air

Voici la classification admise pour les ondes radioélectriques ainsi que quelques domaines d'application.

VF Voice frequencies	$300\text{ Hz} \leq f \leq 3\text{ kHz}$ $1000\text{ km} \geq \lambda \geq 100\text{ km}$	Pas utilisées pour l'émission : (Téléphone analogique)
VLF Very low frequencies	$3\text{ kHz} \leq f \leq 30\text{ kHz}$ $100\text{ km} \geq \lambda \geq 10\text{ km}$	Communications port – bateaux
LF Low frequencies	$30\text{ kHz} \leq f \leq 300\text{ kHz}$ $10\text{ km} \geq \lambda \geq 1\text{ km}$	Radio-diffusion ondes longues de 150 à 285 kHz Signaux horaires (Francfort ~ 77 kHz)
MF Medium frequencies	$300\text{ kHz} \leq f \leq 3\text{ MHz}$ $1\text{ km} \geq \lambda \geq 100\text{ m}$	Radio-diffusion ondes moyennes de 520 à 1605 kHz Fréquence de détresse (500 kHz) Signaux météo
HF High frequencies	$3\text{ MHz} \leq f \leq 30\text{ MHz}$ $100\text{ m} \geq \lambda \geq 10\text{ m}$	Radio-diffusion ondes courtes Radios amateurs Aviation
VHF Very high frequencies	$30\text{ MHz} \leq f \leq 300\text{ MHz}$ $10\text{ m} \geq \lambda \geq 1\text{ m}$	TV – bande I de 47 à 68 MHz (canaux 2, 3 et 4) Radio-diffusion FM de 88 à 108 MHz TV – bande III de 174 à 230 MHz (canaux 5-12) Trafic aérien ILS (instrument landing system)
UHF Ultra high frequencies	$300\text{ MHz} \leq f \leq 3\text{ GHz}$ $1\text{ m} \geq \lambda \geq 10\text{ cm}$	TV – bande IV de 470 à 606 MHz (canaux 21-37) TV – bande V de 606 à 862 MHz (canaux 38-69) Radios amateurs Alarmes GSM, Bluetooth, Wifi, GPRS, EDGE, UMTS GPS Fours micro-ondes Communications par satellite Faisceaux hertziens
SHF Super high frequencies	$3\text{ GHz} \leq f \leq 30\text{ GHz}$ $10\text{ cm} \geq \lambda \geq 1\text{ cm}$	Faisceaux hertziens Radars Satellites, dont TV satellite
EHF Extremely high frequencies	$30\text{ GHz} \leq f \leq 300\text{ GHz}$ $1\text{ cm} \geq \lambda \geq 1\text{ mm}$	Radars Satellites

Lorsque la fréquence s'élève encore, on quitte le domaine radioélectrique . On rencontre alors :

- Rayonnement infrarouge	$100\mu\text{m} \geq \lambda \geq 0,75\mu\text{m}$	$3 \times 10^{12}\text{ Hz} \leq f \leq 4 \times 10^{14}\text{ Hz}$
- Lumière visible	$0,75\mu\text{m} \geq \lambda \geq 0,40\mu\text{m}$	$4 \times 10^{14}\text{ Hz} \leq f \leq 7,5 \times 10^{14}\text{ Hz}$
- Rayonnement ultraviolet	$0,40\mu\text{m} \geq \lambda \geq 0,02\mu\text{m}$	$7,5 \times 10^{14}\text{ Hz} \leq f \leq 1,5 \times 10^{16}\text{ Hz}$
- Rayonnement X	$0,02\mu\text{m} \geq \lambda \geq 10^{-6}\mu\text{m}$	$1,5 \times 10^{16}\text{ Hz} \leq f \leq 3 \times 10^{20}\text{ Hz}$
- Rayonnement γ	$10^{-6}\mu\text{m} \geq \lambda \geq 10^{-8}\mu\text{m}$	$3 \times 10^{20}\text{ Hz} \leq f \leq 3 \times 10^{22}\text{ Hz}$
- Rayonnement cosmique	$\lambda \leq 10^{-8}\mu\text{m}$	$f \geq 3 \times 10^{22}\text{ Hz}$

Le principal émetteur de l'ensemble de ces radiations est le soleil ; l'atmosphère terrestre ainsi que l'ionosphère filtrent efficacement ce rayonnement ; seul le domaine du visible (et des proches IR et UV) parviennent au sol.

Phénomènes rencontrés lors de la propagation d'une onde

Atténuation et absorption.

Mis à part le vide intersidéral, tout milieu matériel atténue plus ou moins une onde, et d'autant plus que la distance parcourue est grande. L'atténuation se chiffre en dB / km, voire en dB / m pour des milieux fortement atténuateurs. A la limite, l'onde peut être totalement absorbée par un milieu (son énergie est dispersée en agitation des constituants de ce milieu)

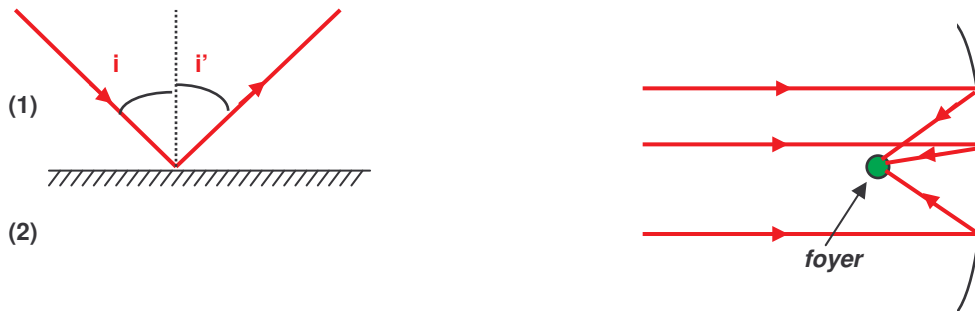
Du moment qu'une onde peut traverser un milieu, celui-ci est qualifié de transparent pour cette onde.

Attention, un milieu peut très bien être transparent pour certaines fréquences et opaque pour d'autres : Vous pouvez parfois entendre au travers du mur ce qui se passe chez le voisin ; il est cependant impossible de voir ce qui s'y passe !!

Réflexion.

Lorsqu'une onde arrive à l'interface entre un milieu (1) transparent et (2) opaque, elle peut s'y réfléchir, à la manière de la lumière sur un miroir ou comme une onde TV satellite sur le réflecteur parabolique de l'antenne.

L'onde repart vers le milieu transparent, avec égalité entre les angles d'incidence (i) et de réflexion (i').



Réfraction.

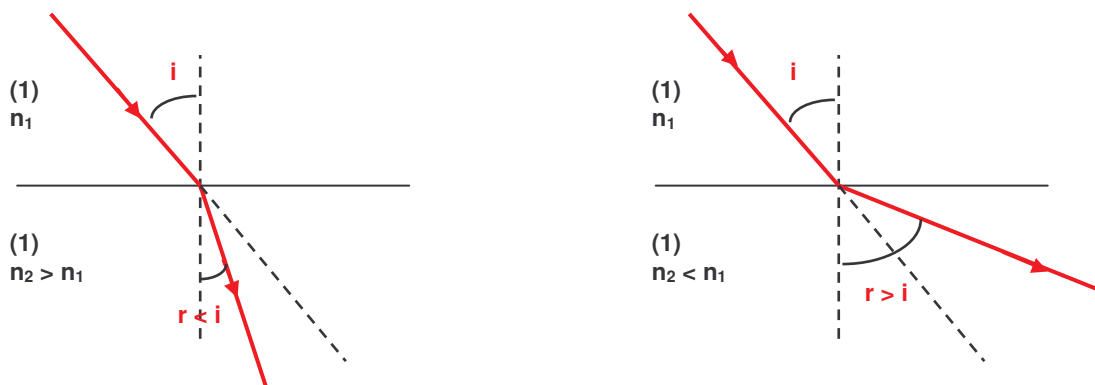
Lorsqu'une onde arrive à l'interface entre 2 milieux transparents différents (1) et (2), sa transmission d'un milieu vers l'autre s'accompagne d'un brusque changement de direction : C'est la réfraction.

Chacun de ces milieux est caractérisé par son *indice de réfraction* n : L'indice de réfraction est lié à la constante diélectrique ϵ du milieu ; il correspond au changement de vitesse de propagation de l'onde, par rapport à un milieu de référence.

Pour les ondes électromagnétiques, nous avons $c_0 \approx 300000\text{km/s}$ dans le vide ou l'air. Dans l'eau, nous aurons $c \approx 225000\text{km/s}$ soit $c = \frac{c_0}{n}$, où $n \approx 1,33$ est l'indice de réfraction de l'eau.

Dans les verres, $1,5 \leq n \leq 1,7$, ce qui donnera $200000 \geq c \geq 175000\text{km/s}$ pour la vitesse d'une telle onde dans le verre.

Deux cas peuvent se produire selon la valeur respective des indices de réfraction n_1 et n_2 des 2 milieux :



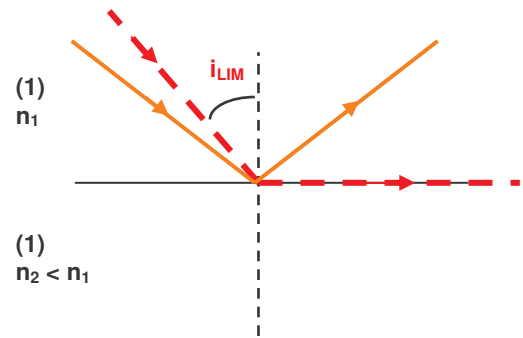
Les angles d'incidence (i) et de réfraction (r) sont liés par la relation : $n_1 \cdot \sin i = n_2 \cdot \sin r$

Dans le cas où n_2 est inférieur à n_1 , l'onde réfractée s'écarte de la normale à l'interface entre les 2 milieux ; au delà d'un angle d'incidence limite i_{LIM} , l'onde ne pénètre plus dans le milieu (2) mais est réfléchiée vers le milieu (1) ; c'est un phénomène de réflexion totale.

Pour $i = i_{LIM}$, $r = 90^\circ$

La relation $n_1 \sin i = n_2 \sin r$ amène : $\sin i_{LIM} = \frac{n_2}{n_1}$

Ce phénomène est à la base du principe du guidage optique dans les fibres du même nom.



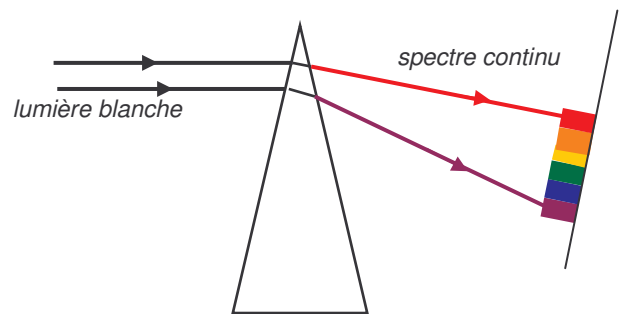
Dispersion.

Pour la plupart des milieux transparents réels, l'indice de réfraction peut varier avec la longueur d'onde : On appelle ce phénomène dispersion ; il intervient avec tous les rayonnements : Son, ondes radio, lumière.

En général, l'indice n augmente quand la longueur d'onde diminue, (càd quand la fréquence augmente).

Un exemple classique en optique est la dispersion de la lumière blanche par un prisme.

Un faisceau de lumière blanche renferme toutes les composantes spectrales du rouge au violet. Ces composantes sont réfractées différemment par le prisme et sont ainsi séparées ; on peut observer le spectre de la lumière incidente sur un écran. (le rouge est le moins réfracté, le violet l'est le plus)

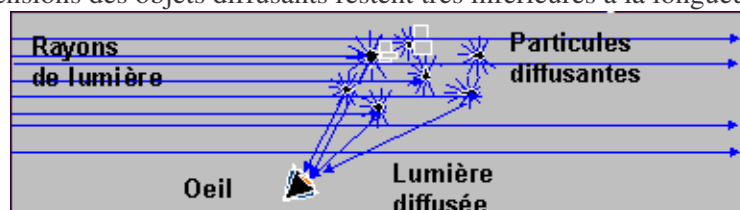


Ce dispositif constitue un analyseur de spectre optique.

La dispersion est aussi à la base de la réalisation de l'arc en ciel.

Diffusion.

Le phénomène de diffusion concerne essentiellement la lumière. Il consiste en un changement progressif de direction de propagation en traversant un milieu. Pour simplifier, on peut interpréter ce phénomène en termes d'interactions entre l'onde et les particules constitutives du milieu traversé (les molécules dans un milieu gazeux) Son intensité augmente avec la fréquence des radiations (en f^4), du moins tant que les dimensions des objets diffusants restent très inférieures à la longueur d'onde.

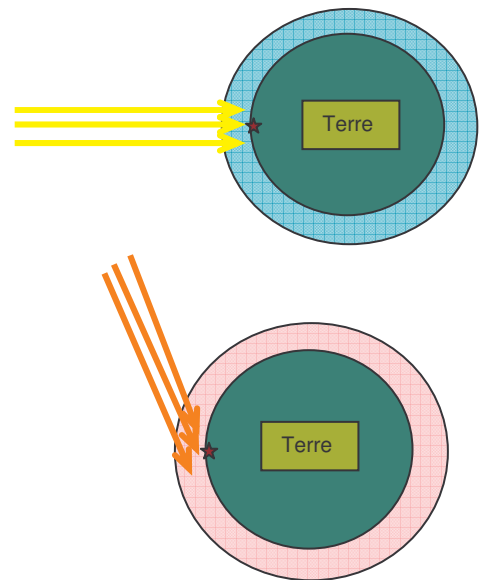


Exemples : - Diffuseur pour luminaire

- Couleur bleue du ciel : Si la terre était dépourvue d'atmosphère, le ciel apparaîtrait noir, de jour comme de nuit. En réalité, la lumière solaire (blanche) est diffusée dans toutes les directions par les molécules d'air ; c'est le bleu (plus faible longueur d'onde) qui est le plus diffusé, d'où la couleur du ciel.

En plein jour, le ciel paraît bleu et le soleil jaune (blanc, moins le bleu diffusé) ;

A l'aube ou au crépuscule, les rayons lumineux traversent une longueur d'atmosphère beaucoup plus grande et la diffusion s'étend aux radiations vertes voire jaunes : Le ciel prend une teinte rosée et le soleil une nuance rouge-orange (blanc moins bleu, vert et jaune)



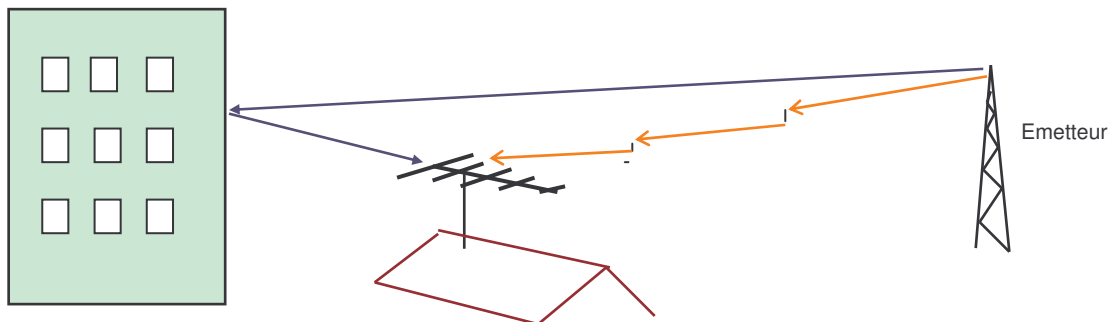
Diffraction.

La diffraction se manifeste comme un « contournement d'obstacle » par les ondes.



Interférences.

C'est le résultat de la combinaison de plusieurs ondes : Dans le cas de 2 ondes de même fréquence, celles-ci peuvent être déphasées d'un angle quelconque ; il va en résulter des maxima d'amplitude (interférences constructives) et des minima d'amplitude (interférences destructives)



Exemple en réception TV : On peut capter à l'antenne le signal issu directement de l'émetteur et un signal parasite provenant de la réflexion sur un obstacle (écho)

Propagation des ondes radioélectriques.

On transforme, à l'aide d'une antenne, un signal électrique en un signal électromagnétique (ou onde hertzienne) et réciproquement.

Cependant, la gamme des fréquences utilisées dans les informations à transmettre (30Hz à 15kHz pour la parole par exemple) pose des contraintes insurmontables pour la réalisation des antennes. La difficulté est contournée par l'utilisation d'un signal porteur, généralement de haute fréquence (par rapport aux fréquences des informations à transmettre).

L'information, dite basse fréquence, va ainsi moduler l'amplitude ou la fréquence, par exemple, de ce signal porteur.

Les avantages du système sont les suivants :

- Choix de la fréquence de porteuse en fonction de la distance de transmission et de la puissance à mettre en jeu au niveau de l'antenne.
- Transmission simultanée de plusieurs informations en utilisant plusieurs porteuses, des sous-porteuses ...
- Fonctionnement des émetteurs et récepteurs à fréquence pratiquement constante.

Les ondes radioélectriques sont influencées par les disparités de l'atmosphère terrestre.

Constitution de l'atmosphère

En première approximation, on décompose l'atmosphère terrestre en 2 zones :

- Du sol à 10km d'altitude environ :
La troposphère, dont la composition est homogène (20% d'oxygène et 80% d'azote, plus vapeur d'eau)
- De 10km à 200km environ : L'ionosphère, dont les gaz sont partiellement ionisés sous l'influence des radiations solaires de courtes longueurs d'onde.

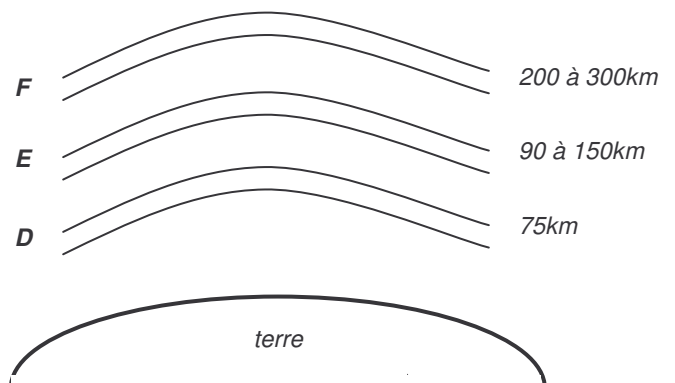
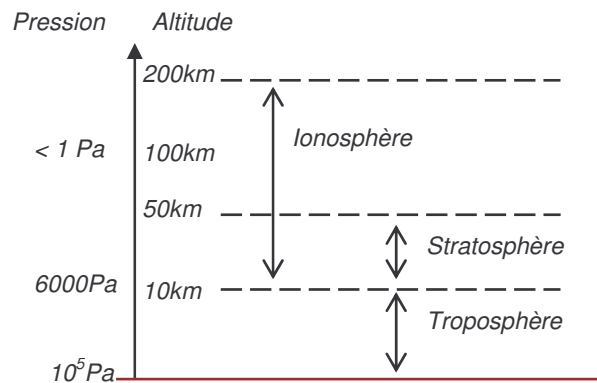
Les particules ionisées de la haute atmosphère se répartissent en couches, nommées D, E et F.

La position et la densité de ces couches dépendent de l'heure (jour ou nuit) et (ou) de la date (saison)

La couche D est essentiellement une couche diurne. Elle réfléchit les grandes ondes et absorbe les ondes moyennes.

La couche E est très faiblement ionisée ; sa densité est moindre la nuit.

La couche F est par contre fortement ionisée ; elle dépend étroitement de l'activité solaire (elle existe de jour et de nuit, mais avec de grandes variations de densité ; cette couche se dédouble en 2 couches (F1, 250km et F2, 400km) en été .



Ces couches sont caractérisées par un indice de réfraction variable, ce qui va entraîner des phénomènes de transmission ou de réflexion des ondes radioélectriques, selon leur fréquence ou leur direction.

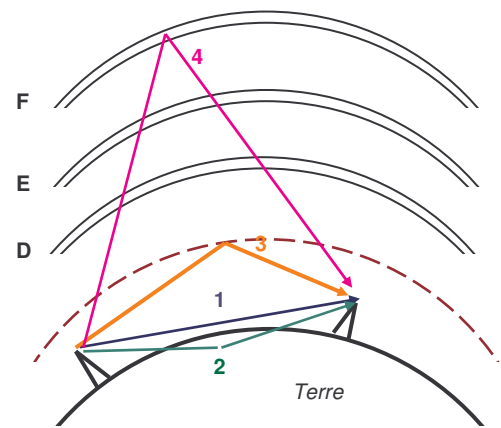
Propagation d'une onde

Entre 2 antennes, une onde peut se propager selon :

- Une onde directe (1)
- Une onde de sol (2)
- Une onde troposphérique (3)
- Une onde ionosphérique (4)

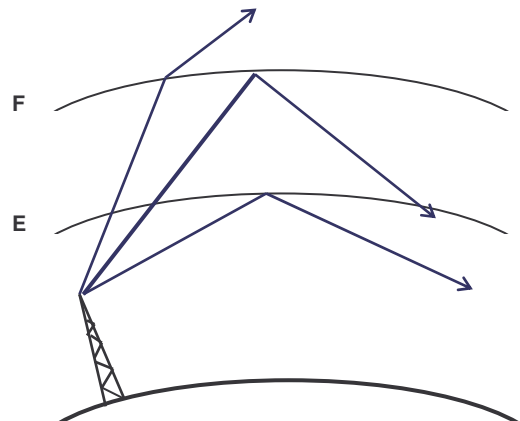
La propagation est influencée par la nature du sol (terre ou mer, présence de cours d'eau ...).

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 (voir ci-contre)

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*)



Propagation selon la fréquence.

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 ; la propagation par réflexion troposphérique permet une portée de l'ordre de 300km.

Communications spatiales et radioastronomie : L'atmosphère ne transmet les ondes électromagnétiques que dans certaines fenêtres de fréquence : L'ionosphère est opaque aux fréquences inférieures à 6MHz ($\lambda \approx 50m$), la vapeur d'eau est opaque aux IR ($1\mu m \leq \lambda \leq 100\mu m$) ; les UV, les X et les γ sont arrêtés par l'ensemble de l'atmosphère (les UV par la célèbre couche d'ozone stratosphérique, située entre 12 et 50km d'altitude)

Seuls le visible ($0,4\mu m \leq \lambda \leq 0,75\mu m$) et les ondes radio de fréquences comprises entre 6MHz et 300GHz ($50m \geq \lambda \geq 1mm$) peuvent traverser l'ensemble de l'atmosphère terrestre.