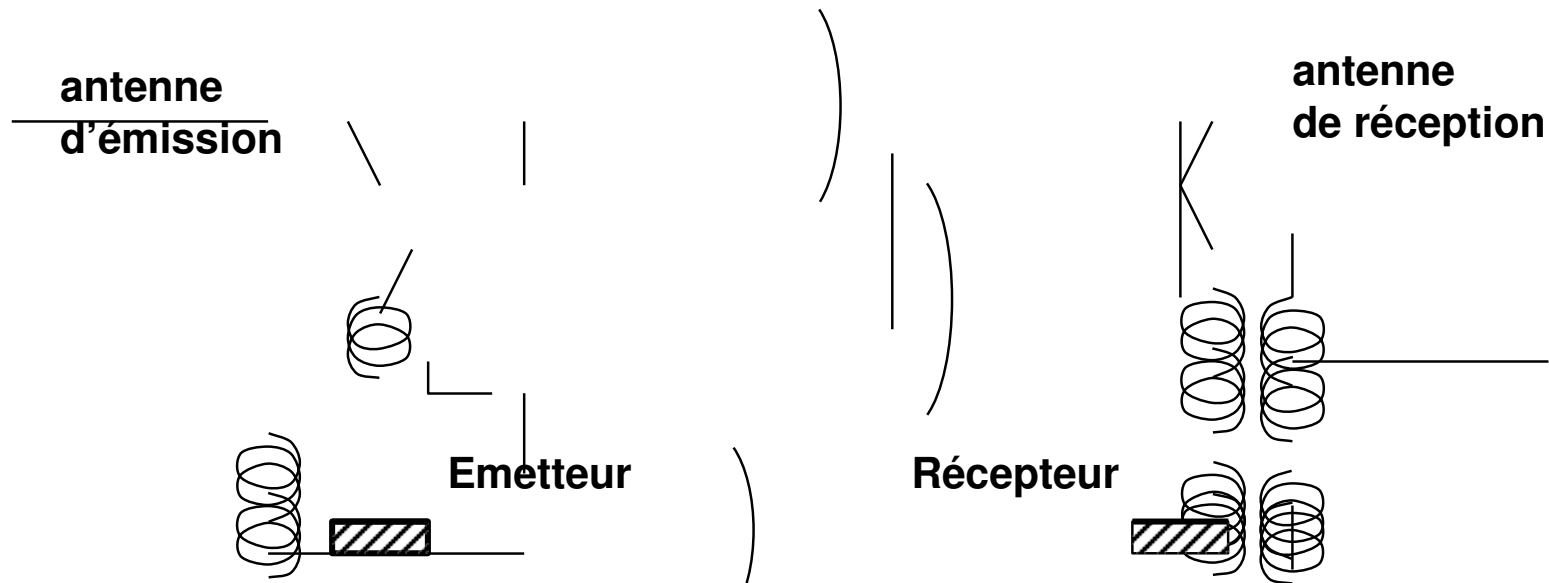


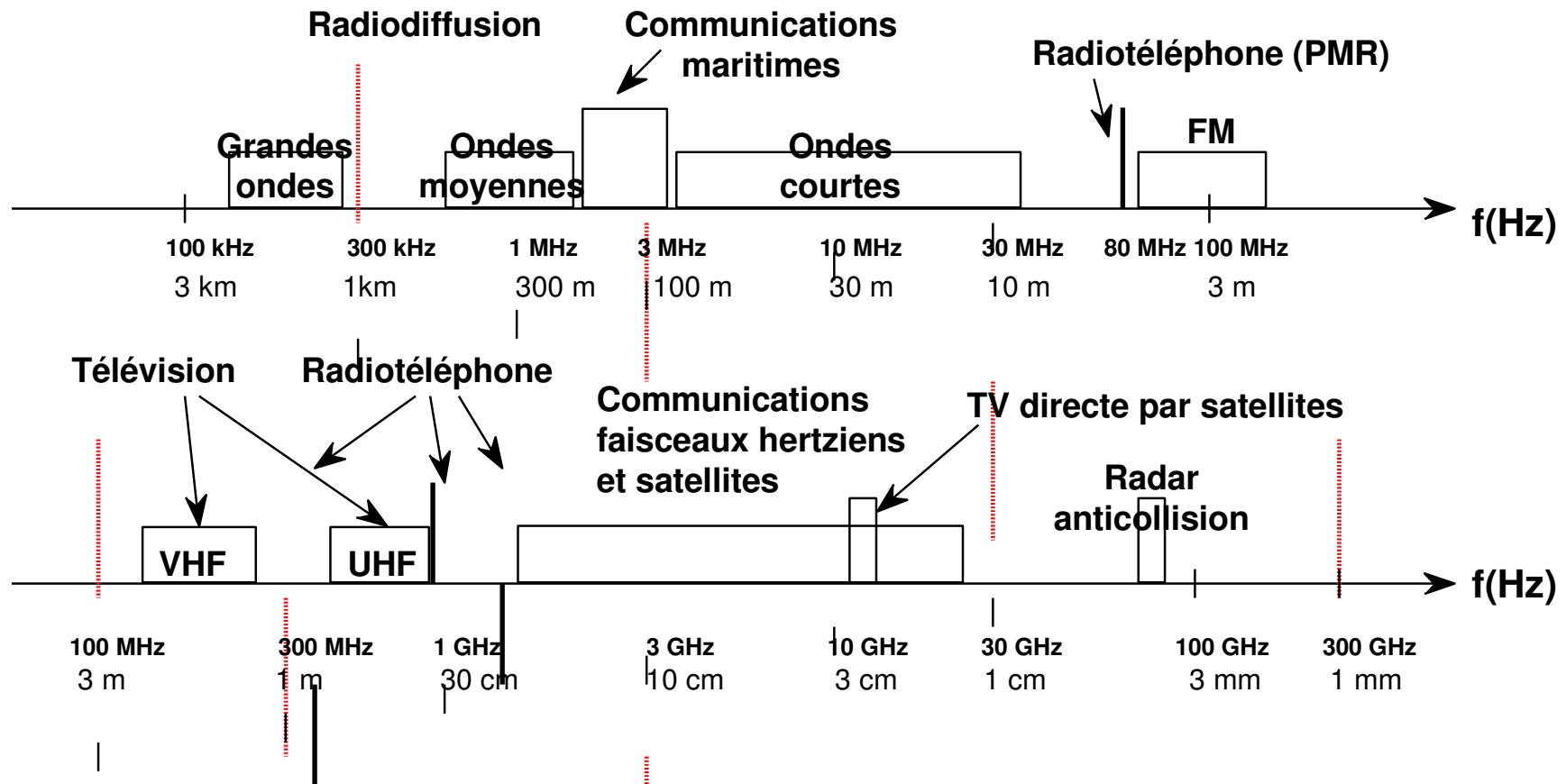
Généralités



Un conducteur (antenne) alimenté en courant haute fréquence rayonne une énergie qui peut être recueillie par un autre conducteur.

La liaison entre les 2 entités s'effectue sans support physique (propagation dans le vide à la vitesse de la lumière).

Spectre radioélectrique



Les faisceaux hertziens

- **Fréquences comprises entre 400 MHz et 100 GHz**
- **Modulation analogique ou numérique.**
- **Débits pouvant atteindre 140 Mbits/s**
- **Utilisés**
 - en réseaux d'infrastructure**
 - téléphonie, diffusion d'émission de télévision**
 - et en réseaux de desserte**
 - Liaisons BTS - BSC en GSM**
 - Boucle Locale Radio, LMDS, MMDS**

Les faisceaux hertziens

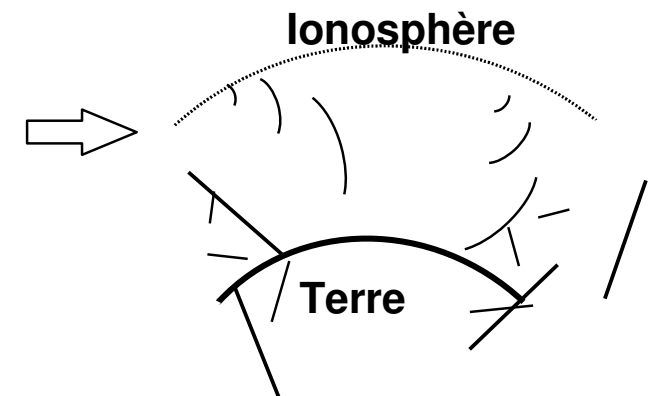
- **Grandes distances, # 50 km en liaison directe : Infrastructure téléphonique**
 - éventuelle nécessité de relais
 - passifs là où le relief est important (simples réflecteurs)
 - actifs le signal recueilli est remis en forme, amplifié, puis retransmis
- **Courtes distances (liaisons "à vue") : Infrastructure GSM
LS**

Type de liaisons radioélectriques

Liaison : communication bi-directionnelle entre 2 points en vue, chacun équipé d'un émetteur et d'un récepteur, généralement en visibilité.

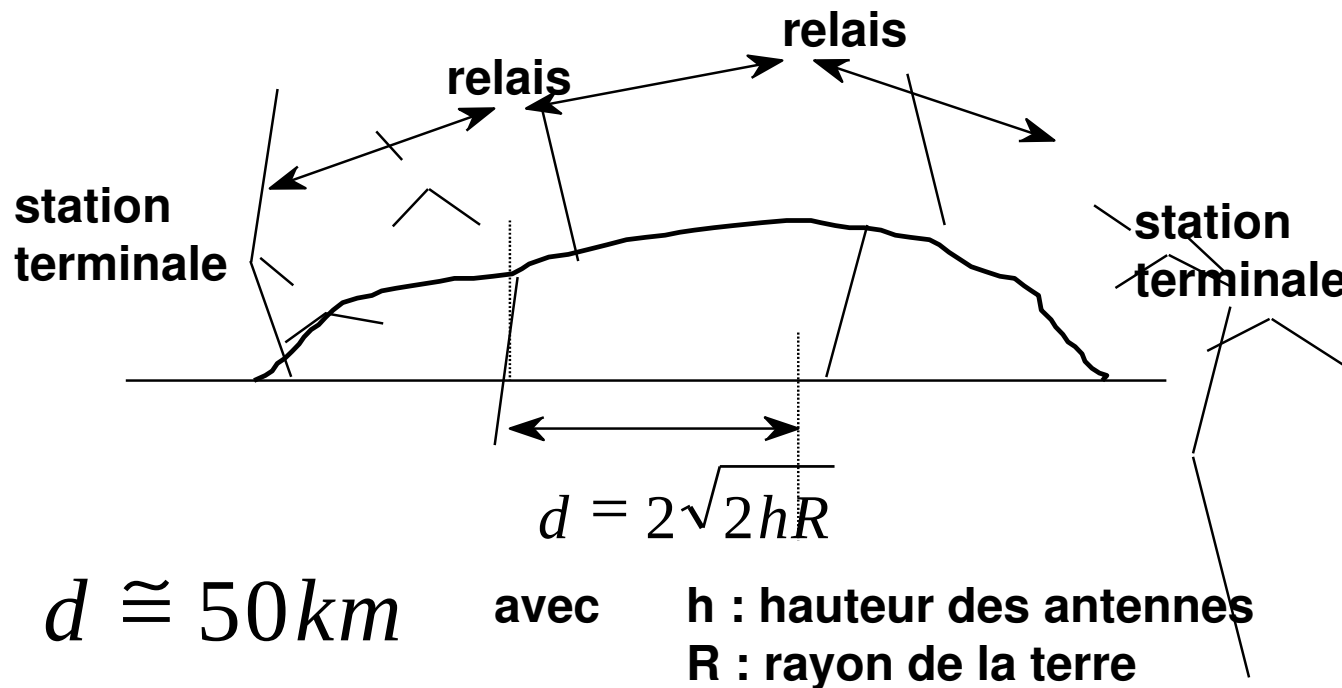
Exceptionnellement, une liaison peut s'établir en :

- utilisant la réflexion et la diffusion par l'ionosphère (haute atmosphère, 70 à 1000 km d'altitude) dans la bande des ondes courtes (3 à 25 MHz)
On obtient une liaison transhorizon de très longue portée, mais de faible capacité



Type de liaisons radioélectriques

Une liaison peut s'établir en visibilité directe entre plusieurs stations placées sur des points hauts.



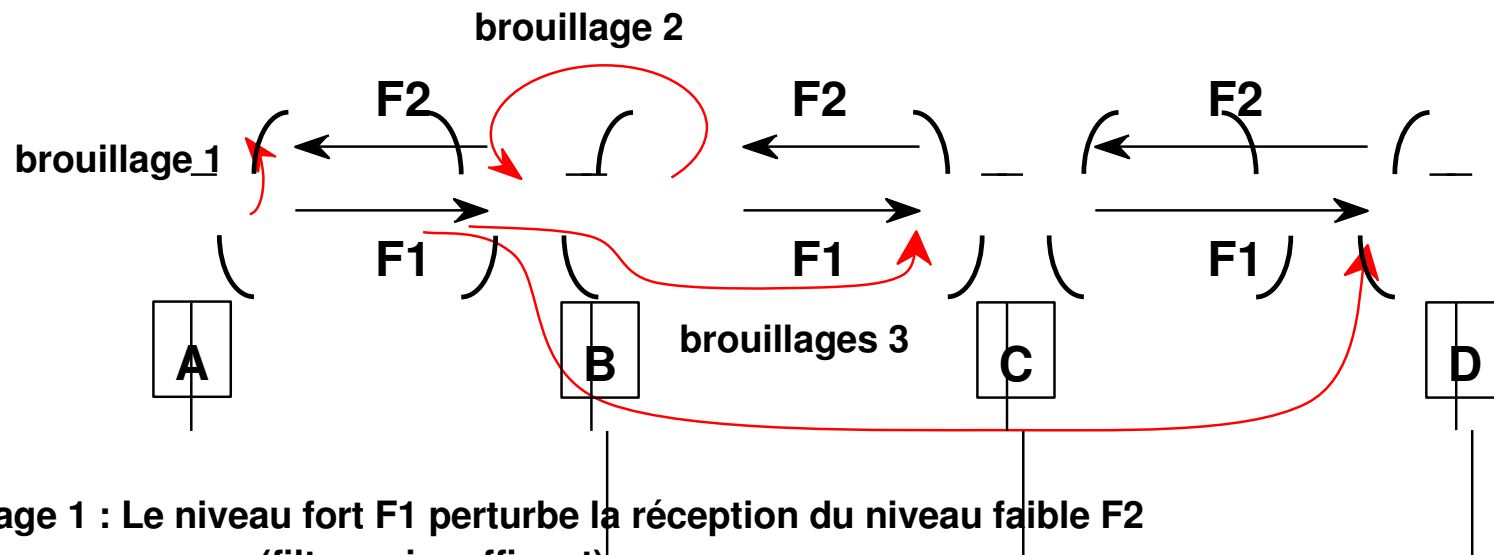
Affectation des fréquences dans les faisceaux hertziens

Un grand nombre d'utilisateurs (ou de liaisons) pour une ressource rare : il est nécessaire de planifier l'utilisation des fréquences.

Il est possible de jouer sur le plan de fréquence proprement dit, mais aussi sur l'utilisation des polarisations V ou H en utilisant les découplages d'antenne pour augmenter la capacité des liaisons.

Affectation des fréquences dans les faisceaux hertziens

Utilisation d'un seul couple de fréquences



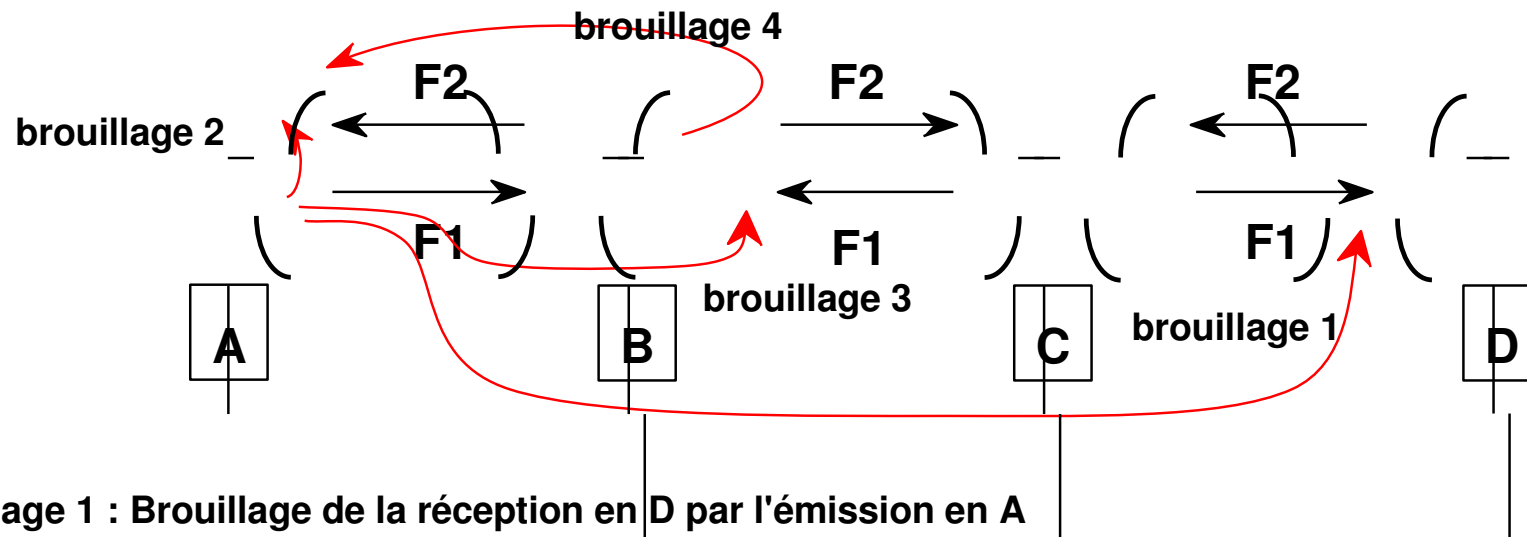
Brouillage 1 : Le niveau fort F1 perturbe la réception du niveau faible F2
(filtrage insuffisant)

Brouillage 2 : Le niveau fort F1 perturbe la réception du niveau faible F1
(lobe arrière de l'antenne)

Brouillage 3 : Le niveau faible F1 perturbe la réception du niveau faible F1
(résistance aux brouilleurs co-canal)

Affectation des fréquences dans les faisceaux hertziens

Canal émission commun aux deux sens dans une station



Brouillage 1 : Brouillage de la réception en D par l'émission en A

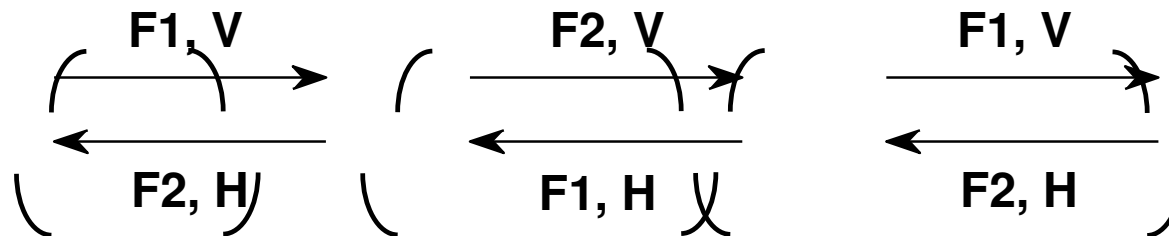
Brouillage 2 : Le niveau fort F1 perturbe la réception du niveau faible F2

Brouillage 3 : Le niveau faible F1 perturbe la réception de l'autre niveau faible F1(lobe arrière de l'antenne)

Brouillage 4 : Brouillage émis en B par le lobe arrière de l'antenne

Affectation des fréquences dans les faisceaux hertziens

Réduction des brouillages : Alternance des fréquences émission et réception d'un relais à l'autre, croisement des polarisations.

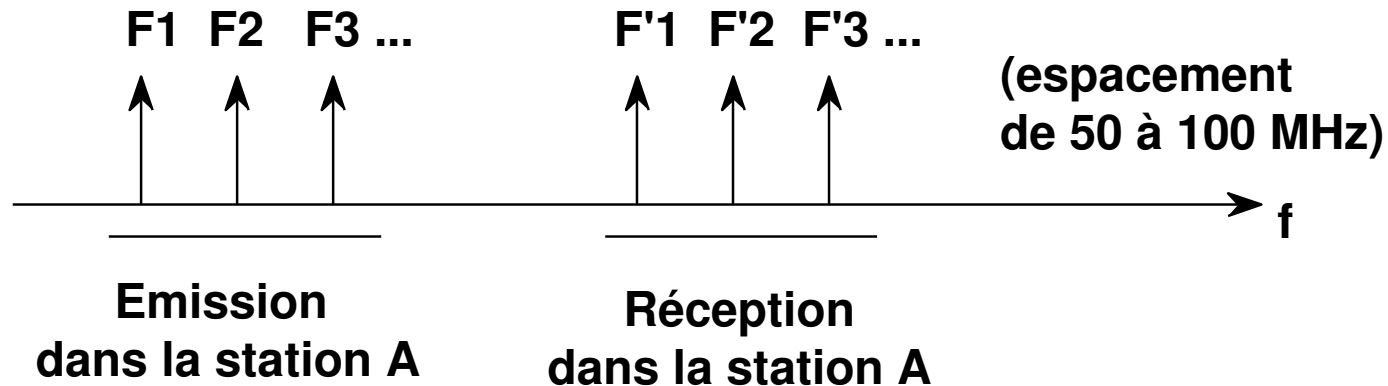


Emploi d'antennes très directives et ayant des lobes latéraux suffisamment bas

⇒ Utilisation de 2 canaux différents pour la transmission bilatérale d'un signal

Affectation des fréquences dans les faisceaux hertziens

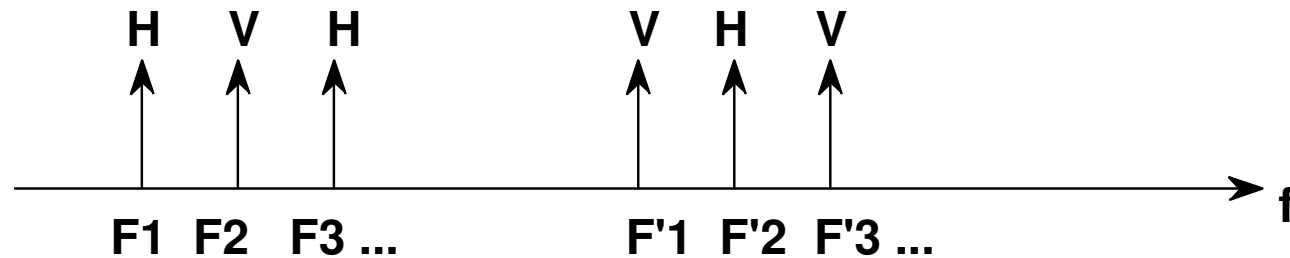
Séparation des demi-bandes émission/réception : pour une antenne unique, 2 guides d'onde et un duplexeur



- Grouper dans chaque station, d'une part tous les canaux servant à l'émission et d'autre part ceux servant à la réception.
- Eloigner ces 2 groupes pour qu'ils puissent être séparés par filtrage.
- Il faut une antenne et deux guides d'ondes par station.

Affectation des fréquences dans les faisceaux hertziens

- Alternance des polarisations verticale et horizontale



Chaque guide d'onde n'achemine qu'un seul sens de transmission
Il faut 2 antennes et 4 guides d'onde par station et par direction.

Propagation en visibilité directe

Les ondes électromagnétiques subissent en se propagent :

- réflexion**
- réfraction**
- diffraction**
- absorption**

Visibilité directe : liaison sur laquelle la diffraction peut être négligée

- dégagement minimum sur le bond**
- la puissance sur le récepteur est la même qu'en espace libre**
- règle : dégagement du 1^{er} ellipsoïde de Fresnel**

La diffraction

Les lois de l'électromagnétisme sont les mêmes à toutes les fréquences, mais la diffraction a des conséquences très différentes suivant l'ordre de grandeur de la longueur d'onde λ avec

$$= \frac{c}{f}$$

- Jusqu'à quelques dizaines de MHz (λ de quelques mètres), les obstacles naturels sont plus petits que λ \Rightarrow la diffraction domine.
- Bandes VHF (30 - 300 MHz) et UHF (300 MHz - 3 GHz), comportement intermédiaire \Rightarrow la diffraction est faible
- Les hyperfréquences (λ centimétrique et millimétrique), comportement proche des ondes lumineuses
Faisceaux Hertziens \Rightarrow rôle mineur de la diffraction
Emetteur et récepteur en visibilité directe.

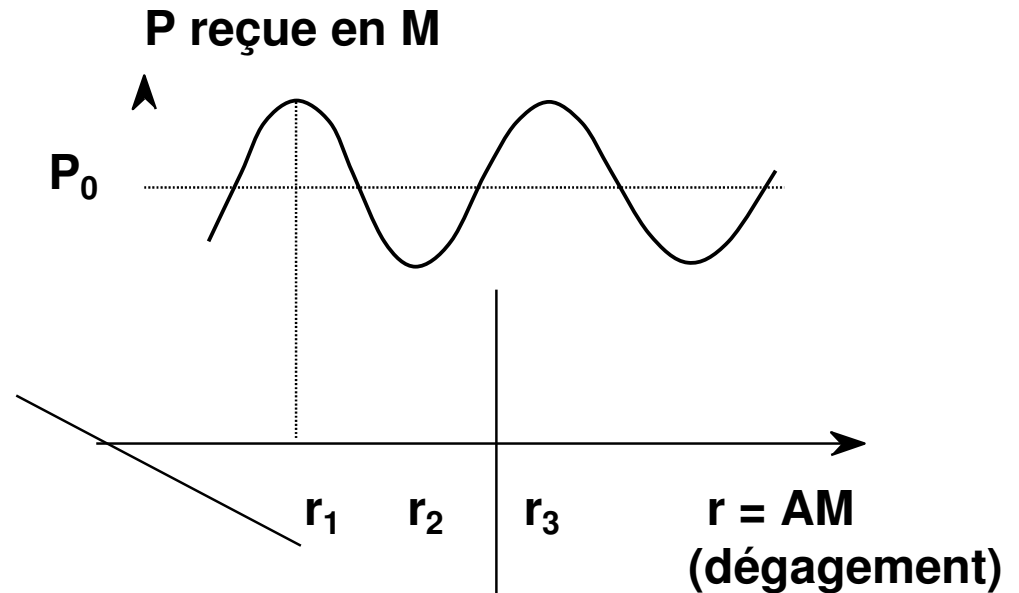
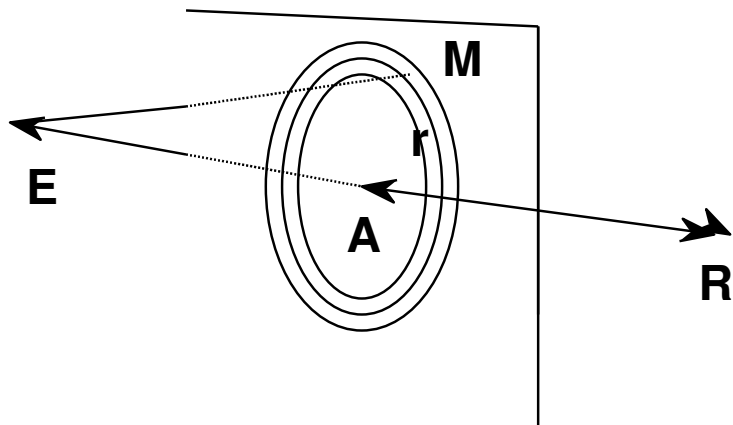
Propagation en visibilité directe

La présence de la terre et de l'atmosphère introduit divers phénomènes physiques qui peuvent énormément modifier le champ que l'on calculerait en espace libre, même si les 2 extrémités de la liaison sont en visibilité directe.

Visibilité : mot emprunté à l'optique, ne peut être transféré sans précaution dans le domaine radioélectrique, en raison de l'ordre de grandeur très différent des longueurs d'onde.

Propagation en visibilité directe

Ellipsoïdes de Fresnel



cercle : sources secondaires qui apportent la même contribution au champ en R car toutes en phase

r_1, r_2, \dots tels que :

$$EMR - EAR = \frac{\lambda}{2}, n = 1, 2, \dots$$

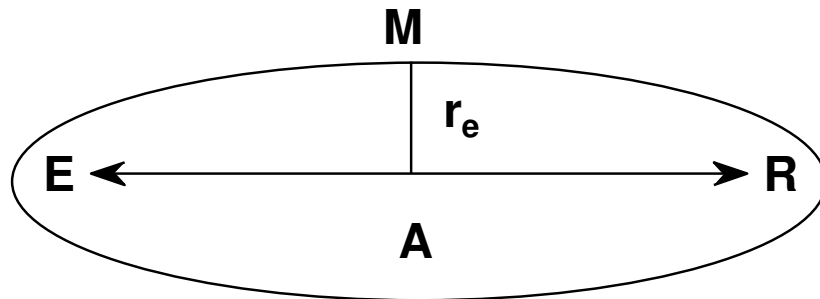
Propagation en visibilité directe

Ellipsoïdes de Fresnel

$$EMR - EAR = \frac{n\lambda}{2}, n = 1, 2, \dots$$

Le lieu de M est un ellipsoïde de foyers E et R appelé ellipsoïde de Fresnel.

$n=1$: 1^{er} ellipsoïde qui délimite l'espace où la plus grande partie de l'énergie se propage entre E et R et doit donc être dégagé de tout obstacle (sinon diffraction)

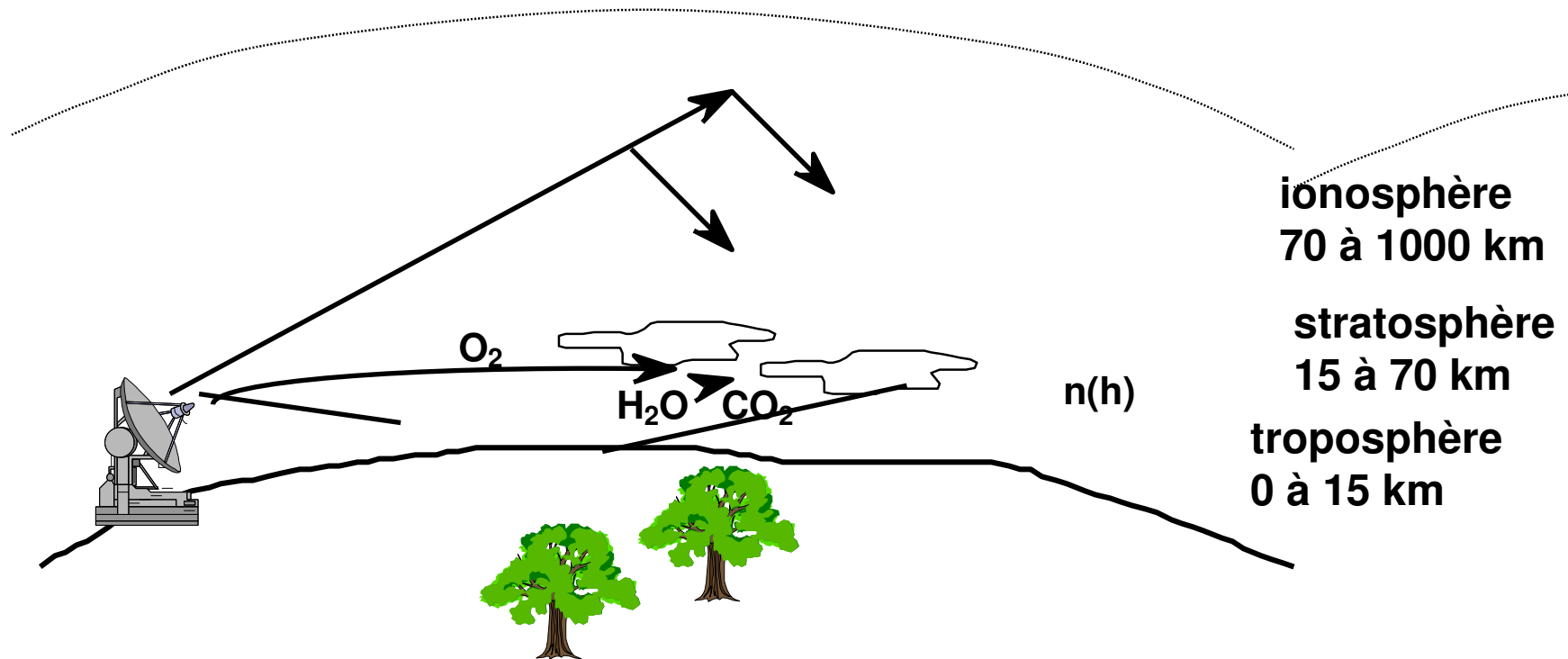


$ER = d = 56 \text{ km}$

$$r_e = \frac{1}{2} \sqrt{\lambda d}$$

λ	r_e
5 cm	25 m
5 m	250 m
500 m	2500 m

**Propagation en espace libre :
phénomènes liés à l'atmosphère terrestre**



Conditions liées à l'atmosphère

Atténuation troposphérique : gaz et hydrométéores

- absorption moléculaire par les gaz atmosphériques (O_2 , CO_2) et vapeur d'eau

- absorption et diffusion par les particules liquides et solides (hydrométéores : pluie, brouillard, nuages, neige, grêle)

! pluie : statistiques des intensités de pluie (en mm/h) sur un intervalle de temps de l'ordre de 1 mn

! loi d'affaiblissement en fonction de l'intensité des précipitations R (en mm/h). Par exemple : $A=KR^a$ en dB/km, K et a dépendent de f .

Conditions liées à l'atmosphère

Atténuation troposphérique : O₂ et H₂O et pluie

Norme UIT-R : la probabilité de dépasser un taux d'erreur de 10^{-5} doit être inférieure à $2 \cdot 10^{-4}$ de l'année pour une liaison de 2500 km.

Il faut donc prendre en compte le temps pendant lequel on peut avoir des perturbations de liaisons voire une rupture (en France : une liaison hertzienne est interrompue quelques heures par an).

Conditions liées à l'atmosphère

Réfraction : courbure des rayons

l'indice de réfraction n de l'atmosphère varie avec l'altitude h

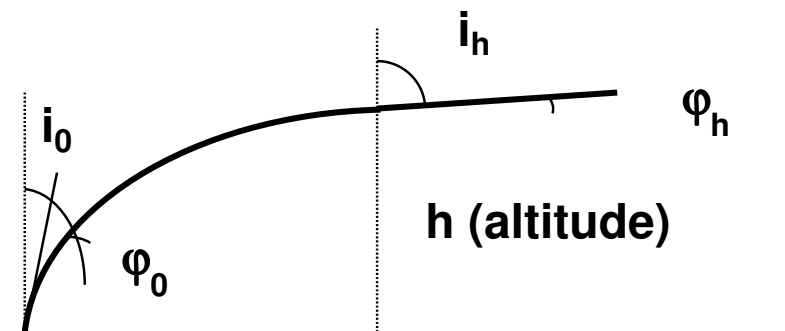
$$N = (n - 1)10^6 = \frac{77,6}{T} \left(P + 4810 \frac{P_0}{T} \right)$$

P : pression atmosphérique (mbar)

P_0 : pression partielle de vapeur d'eau (mbar)

T : température absolue (K)

P, P_0, T : décroissent régulièrement quand l'altitude h augmente



$$n_h \cos \varphi_h = n_0 \cos \varphi_0$$

$$\sigma_r \cong \frac{dn}{dh} \quad \text{courbure du rayon}$$

$$\sigma_r = \frac{1}{R_0} + \frac{dn}{dh} \quad \text{courbure relative du rayon par rapport à la terre}$$

Conditions liées à l'atmosphère

Réfraction : courbure des rayons

$$\sigma = \frac{1}{R_0} + \frac{dn}{dh} \quad \begin{array}{l} \frac{dn}{dh} = 0 \quad \text{courbure = celle de la terre} \\ \frac{dn}{dh} < 0 \quad \text{rayons moins incurvés} \\ \frac{dn}{dh} > 0 \quad \text{rayons plus incurvés} \end{array}$$

(le plus fréquent sous nos latitudes)

Rayon fictif de la terre : on considère une propagation rectiligne avec une courbure de la terre différente

Terre fictive de rayon R_0' placée dans une atmosphère d'indice n' constant

$$\Rightarrow \frac{1}{R_0'} = \frac{1}{R_0} + \frac{dn}{dh}$$

Conditions liées à l'atmosphère

Atmosphère standard (80% du temps, climat tempéré)

- loi de décroissance linéaire de n (vrai pour F.H.) :

$$\frac{dn}{dh} = -0.039 \times 10^{-6} \cong \frac{-0.25}{R_0}$$

- rayons moins incurvés ($dn/dh < 0$)

⇒ **propagation rectiligne pour une terre fictive de rayon R_0' et d'indice $n'=1$ telle que :**

$$\frac{1}{R_0'} + \frac{dn'}{dh} = \frac{1}{R_0} + \frac{dn}{dh} = \frac{3}{4R_0} \quad \Rightarrow \quad \boxed{R_0' = \frac{4}{3} R_0} \quad -$$

Conditions liées à l'atmosphère

Atmosphère sous-standard (infra-réfraction)

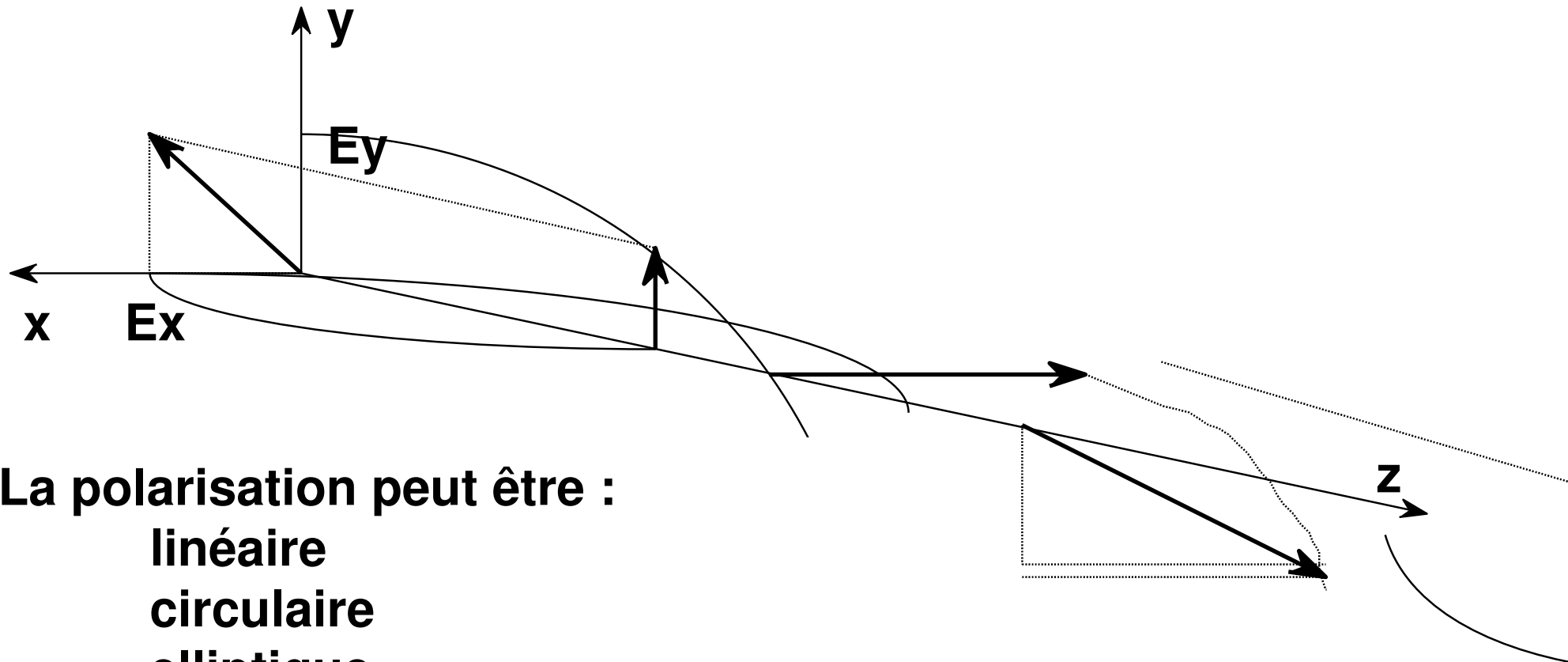
$$\frac{dn}{dh} > -0.039 \times 10^{-6} \quad \text{n varie moins vite avec h}$$

$$\frac{R_0'}{R_0} < \frac{4}{3} \quad \Rightarrow \quad \text{relèvement apparent des obstacles}$$

Atmosphère super-standard (super-réfraction)

$$\frac{dn}{dh} < -0.157 \times 10^{-6} \quad \Rightarrow \quad \text{courbure vers le sol + réflexion sur le sol}$$

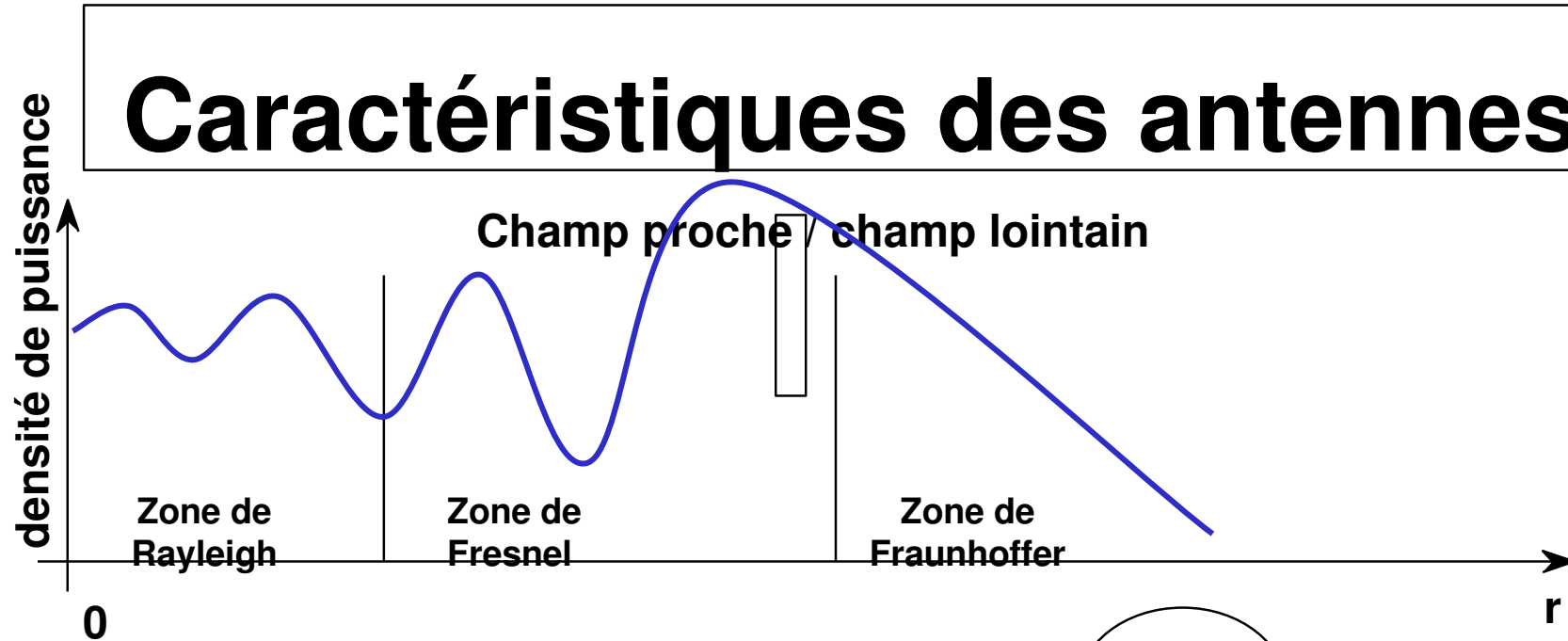
Caractéristiques des antennes



La polarisation peut être :

- linéaire
- circulaire
- elliptique

Caractéristiques des antennes



Zone de Rayleigh : Zone de champ proche, la densité de puissance est quasi-constante

$$\lambda \quad r < \frac{D^2}{2}$$

Zone de Fresnel : la densité de puissance est fluctuante

$$\lambda \quad \frac{D^2}{2} < r < \frac{2D^2}{\lambda}$$

Zone de Fraunhofer : Zone de champ lointain, les champs sont rayonnés sous la forme d'onde plane, la densité de puissance décroît en $1/r^2$

$$\lambda \quad r > \frac{2D^2}{\lambda}$$

Caractéristiques des antennes

- **Directivité D** : rapport de l'intensité de rayonnement dans une direction et de la valeur moyenne de cette intensité dans toutes les directions

$$D = \frac{\psi}{\frac{1}{4} \iint \psi d\Omega} = \frac{\psi(\theta, \varphi)}{\frac{1}{4} \iint \psi(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi}$$

- **Gain G** : rapport entre la puissance qu'il faudrait fournir à une antenne de référence et celle à fournir à l'antenne considérée pour produire la même intensité de rayonnement dans une direction donnée (gain en dBi, dBd ou en dB)

Si pas de pertes alors $G = D$

Caractéristiques des antennes

- Aire équivalente A_e :

- principe de réciprocité
$$\lambda \frac{D}{A_e} = \frac{4}{\pi}$$

- Rendement :

illumination + pertes par débordement + diffraction + effet d'ombre

$$0.5 < \eta < 0.8 \text{ tel que } A_e = \eta S$$

avec S : surface réelle de l'ouverture

$$G = \eta \frac{4\pi S}{\lambda^2}$$

- Température équivalente de bruit

Caractéristiques des antennes

Antennes pour Faisceaux Hertiens et communications par satellite

- source rayonnante + réflecteur paraboloidal
- (très) directives

G = 30 dBi faisceaux hertiens

G = 50 dBi station terrienne, 30 dBi satellite

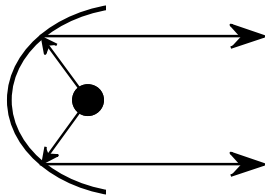
Antennes pour communications mobiles

- omni directionnelles (plan ou demi-plan)
- directives pour station de base (couverture urbaine)

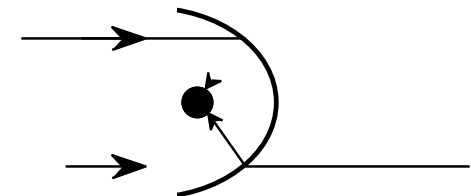
Les antennes pour les faisceaux hertziens

Pour diminuer la puissance d'émission, la technique des faisceaux hertziens utilise des antennes très directives.

L'antenne réelle est placée au foyer optique d'une parabole qui réfléchit les ondes en un faisceau très concentré (limitant ainsi la dispersion de l'énergie radioélectrique).



antenne d'émission

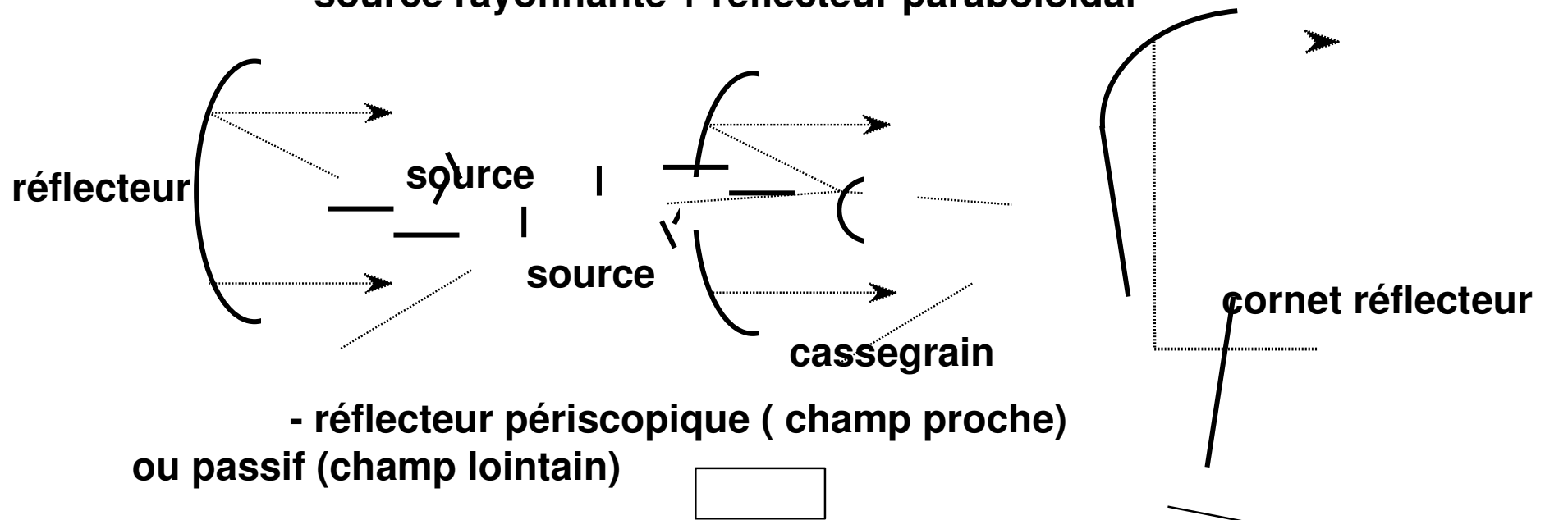


antenne de réception

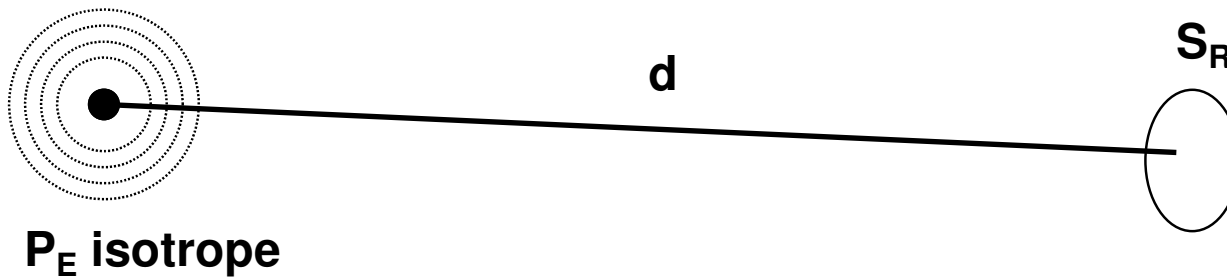
Il est possible d'utiliser (avec un gain plus faible) des cornets, généralement pour les liaisons courtes et des fréquences supérieures à 10 GHz

Caractéristiques des antennes

Antennes pour F.H. et communications par satellite
- source rayonnante + réflecteur paraboloidal



**Bilan de liaison :
affaiblissement de propagation en espace libre**



antenne de gain G_E

$$\Rightarrow P_R = G_E \frac{P_E}{4\pi d^2} S_R$$

$$\Rightarrow P_R = G_E \frac{P_E}{4\pi d^2} \frac{\lambda^2 G_R}{4\pi} = P_E G_E G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

$$\Rightarrow P_{RdBm} = P_{IREdBm} + G_{RdB} - AEL_{dB}$$

Bilan de liaison

Exercice :

Soit une onde de fréquence 6 GHz, la longueur du bond est de 50 km.

La puissance nominale de l'émetteur est de 10 mW, le gain de chacune des antennes d'émission et de réception est de 25 dBi.

La longueur du guide d'onde de l'émission est de 30 m et celle de la réception est de 70 m. La perte dans les guides d'onde est de 0.05 dB/m.

Les pertes de branchement dans l'émetteur s'élèvent à 3 dB et dans le récepteur à 2,9 dB.

- 1. - Quelle est la PIRE de l'émetteur?**
- 2. - Quelle est la puissance disponible au récepteur?**
- 3. - La sensibilité du récepteur est de -100 dBm, reçoit-on le signal?**
- 4. - Quelle est la portée possible?**

Bilan de liaison : bruit et rapport signal à bruit

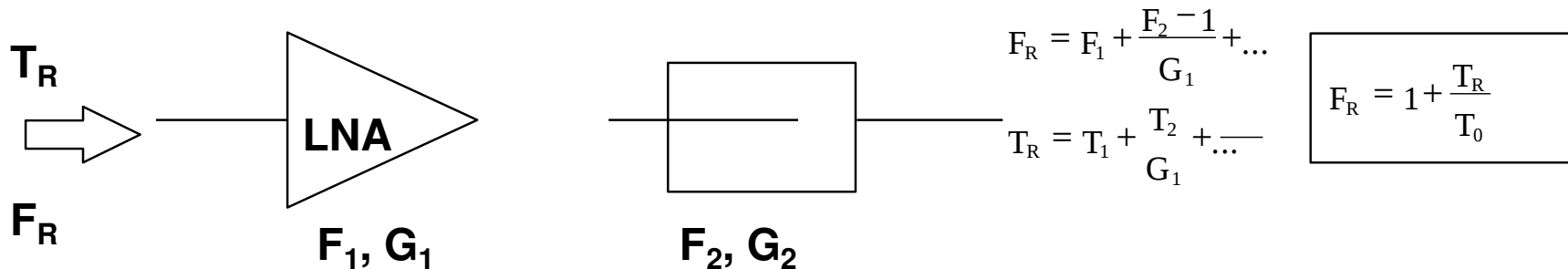
Température équivalente de bruit d'une antenne

$$T_A = \frac{1}{4\pi} \iint_{\text{espace}} D(\theta, \varphi) T(\theta, \varphi) d\Omega$$

$$\Rightarrow P_B = kT_A B$$

**Puissance de bruit disponible
après l'antenne**

Facteur de bruit du récepteur



Bilan de liaison : Bruit et rapport Porteuse à Bruit

Calcul du (C/N) en entrée du récepteur

porteuse : $P_R = P_E G_E G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$ bruit total : $P_B = k(T_A + T_R)B$

Rapport
porteuse sur bruit

$$\frac{P_R}{P_B} = \text{PIRE} \cdot \frac{G_R}{(T_A + T_R) kB} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \equiv \frac{C}{N}$$



**Facteur de mérite
de la station de réception**

Paramètres caractéristiques d'une antenne

Paramètre	Problème concerné
Polarisation de l'antenne	Réutilisation des fréquences
Surface caractéristique de rayonnement	Zone de couverture
Diagramme de rayonnement	Protection contre les brouilleurs
Directivité	
Gain	Bilan de liaison
Aire équivalente	Conception des émetteurs récepteurs
Hauteur équivalente	
Résistance de rayonnement	Puissance rayonnée (PIRE)
Bruit associé	Conception des récepteurs

Bilan de liaison

Exercice :

On donne les caractéristiques suivantes pour une liaison par faisceau hertzien implantée en France :

La fréquence = 6 GHz,

La longueur du bond = 55 km,

Le gain des antennes $G = 43,7$ dB,

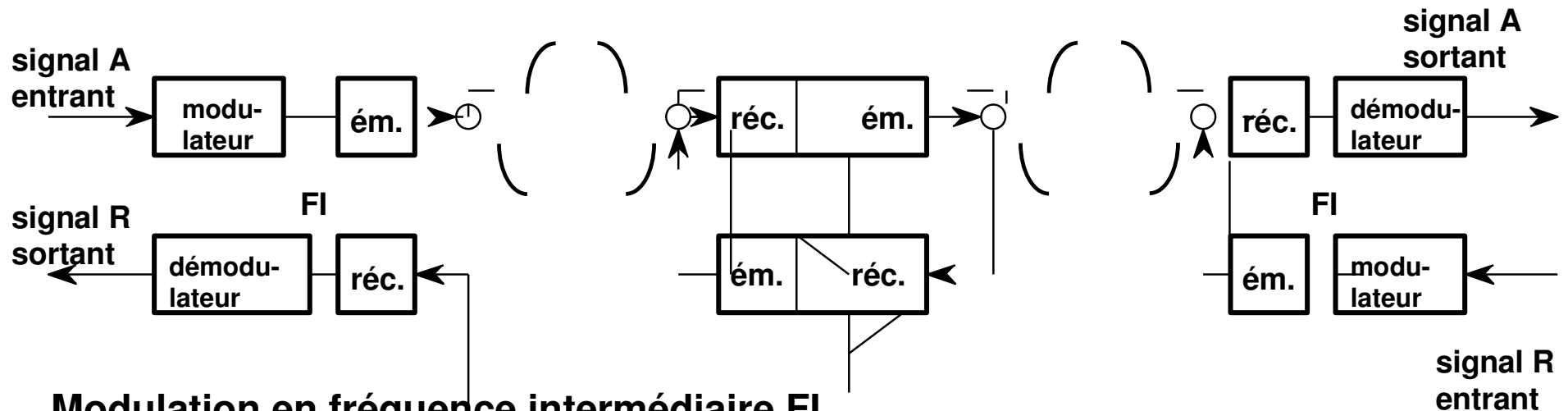
Les pertes par branchement des blocs E/R = 3 dB,

Les pertes par branchement des équipements (sur les tours en hauteur) = 2 dB,

La puissance crête à l'émission $P_E = 33$ dBm.

- 1- Quelle est la longueur d'onde du signal émis?**
- 2- Quel est l'affaiblissement de propagation ?**
- 3- Quelle est la puissance émise en mW?**
- 4- Quelle est la puissance reçue en mW et dBm?**

Structure de l'émission/réception pour les faisceaux hertziens



Modulation en fréquence intermédiaire FI

- simplification des technologies.
- permet de travailler indépendamment de la fréquence porteuse.

L'émetteur transpose le signal en hyperfréquence et l'amplifie.

Le récepteur amplifie et égalise le signal reçu et le transpose en FI.

Emetteur et récepteur reliés aux antennes par des guides d'ondes ou des câbles coaxiaux

Faisceaux hertziens numériques

Développés dès les années 70 pour des liaisons à 2 et 8 Mbit/s dans le réseau local, puis à 52 Mbit/s, ils sont remplacés ensuite par les échelons normalisés à 34 et 140 Mbit/s dans le réseau interurbain.

La faible sensibilité des transmissions numériques aux bruits et aux variations de niveau est très intéressante en radiocommunications.

Les liaisons numériques permettent de réduire les puissances d'émission et la taille des antennes. Grâce à la régénération et au faible rapport porteuse à bruit exigé en numérique, des recouvrements entre canaux voisins, émis sur 2 polarisations orthogonales, sont tolérables et les porteuses peuvent être resserrées.

Principaux systèmes numériques des faisceaux hertziens

Bande (GHz)	Débit (Mbit/s)	Modulation	Puissance	Particularités
2,1-2,3	2/8/34	MDP4	250mW	réseau local
3,8-4,2	2 x 34	MDP8	0,5-1W	anciennement analogique
5,9-7,1	140	MAQ16	0,4 W	anciennement analogique
7,4-7,7	2/8/34	MDP4	0,1-0,4 W	
8-8,5	2 x 34	MDP8	0,5-1 W	anciennement analogique
10,7-11,7	40	MDP8	10 W	réseau longue distance
12,75-13,25	34	MDP4	10 à 160 mW	vidéo
15,3	2/8	MdF	10 à 100 mW	courte distance

DVB - T (Digital Video Broadcasting - Terrestre)

Compatibilité naturelle avec les installations existantes

- ! La réception des programmes numériques se fait avec les antennes individuelles existantes.
- ! Les bandes de fréquence hertziennes sont les mêmes (VHF 170-230 MHz et UHF 470-860 MHz).
- ! Les antennes collectives accepteront les nouveaux canaux terrestres.

La ressource en débit numérique :

- ! Le débit numérique, par canal, se situe vers 25 Mbit/s soit un équivalent de 4 à 5 programmes TV.
- ! Une partie de la ressource peut être allouée à des services non audiovisuels.

DVB - T (Digital Video Broadcasting - Terrestre)

Les avantages du service

L'offre globale de programmes est augmentée et le partage de la ressource se fait entre programmes en accès libre et pay-TV.

Le numérique permet le 16/9, un son de qualité CD multicanaux et la diffusion des données multimédia, voire Internet.

L'hertzien numérique est naturellement adapté aux programmes régionaux et locaux.

Le numérique permet la mobilité du récepteur.

Boucle locale Radio

Deux techniques possibles MMDS et LMDS

- **MMDS :** **Microwave Multipoint Distribution Service (2,5 GHz)**
 traditionnellement unidirectionnel évoluant en système
 bidirectionnel
- **LMDS :** **Local Multipoint Distribution Service (28 GHz, 40 GHz)**
 Système bidirectionnel

 **Technologies point à multipoint**

Techniques MMDS/LMDS

MMDS : **marché résidentiel ou SOHO**
(Small Office Home Office)

LMDS : **marché professionnel des SME**
(Small and Medium Enterprises)

Origine de la technique MMDS

Issue d'un système de diffusion de canaux de télévision analogique utilisée aux Etats-Unis dès les années 1960.

Déploiement d'un réseau hertzien de diffusion de programmes de télévision éducative pour les lycées et collèges situés en zone rurale.

Technique MMDS

Une boucle MMDS se compose d'une station de base correspondant à une antenne omni-directionnelle et un certain nombre d'antennes directives placées sur le toit des maisons des usagers.

Bande de fréquences utilisée : 500 MHz autour de 3 GHz.

Technique MMDS

Interactivité sous MMDS : 2 types :

Interactivité de type 1 : fortement asymétrique

Interactivité de type 2 : symétrique

Evolution récentes de MMDS :

**remplacer la diffusion de canaux TV analogiques par celle
de canaux numériques**

Caractéristiques MMDS

MMDS : Microwave Multipoint Distribution Service

- **Fréquence : 2,5 - 3 GHz**
- **Puissance d'émission : typiquement 25 W**
- **Couverture : jusqu'à 50 km**
- **Architecture omnidirectionnelle ou sectorisée**
- **Voie de retour RTC ou RF**
- **Capacité système : 120 programmes TV numériques**

Caractéristiques LMDS

LMDS : Local Multipoint Distribution Service

- **Fréquence : 26 - 28 - 40 GHz**
- **Puissance d'émission : typiquement 500 mW**
- **Couverture : jusqu'à 5 km**
- **Architecture cellulaire**
- **Voie de retour RF**
- **Capacité système : 500 programmes TV**

Bibliographie

- " Les faisceaux hertziens et numériques "
E. Fernandez et M. Mathieu, Ed. Dunod

- Digital Communications ans Services,
"MMDS et LMDS : deux solutions complémentaires pour la boucle locale sans fil large bande ", par M. Gagnaire, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, numéro 6, octobre 2000.