

Ondes

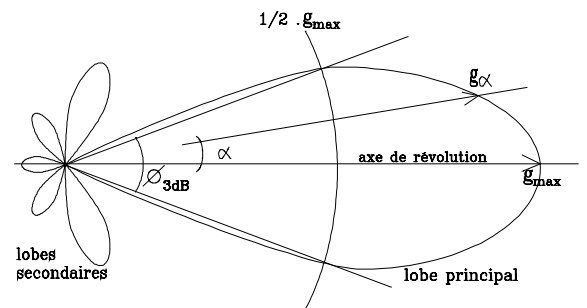
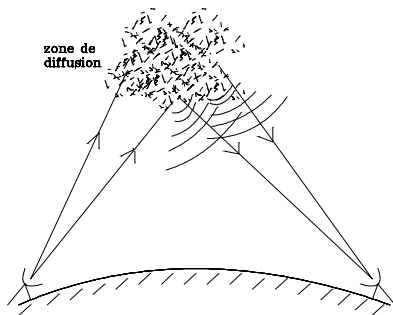
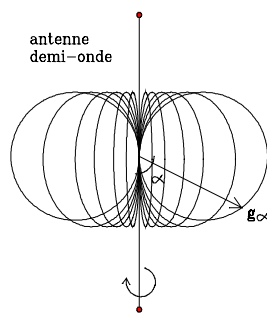
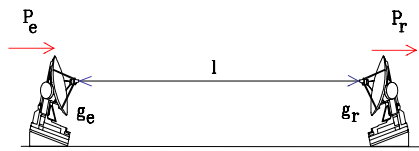


TABLE DES MATIERES

Titre	page
1 INTRODUCTION	2
2 PROPAGATION DES ONDES	3
2.1 Atmosphère terrestre	5
2.2 Zone de silence	7
2.3 Liaison transhorizon	8
2.4 Réception en diversité	9
3 CLASSIFICATION DES ONDES.....	10
3.1 Radiodiffusion.....	10
3.2 Radiocommunications.....	11
4 THEORIE DE LA TRANSMISSION PAR ONDES	13
5 ANTENNES	16
5.1 Emission.....	17
5.2 Réception	19
6 QUEL MILIEU DE TRANSMISSION CHOISIR ?	23
7 TABLE DES FIGURES.....	26
8 TABLE DES FORMULES	26

1 INTRODUCTION

Les transmissions par ondes sont un moyen de transmission privilégié pour diverses raisons :

- facilité d'accès au milieu, moyennant le respect de règles strictes d'utilisation
- possibilité d'émission omnidirectionnelle
- transmission à longues, voir très longues distances

Le présent chapitre a pour but de décrire les éléments jouant un rôle dans le cadre des transmission par ondes dans l'atmosphère.

Dans un premier temps, à l'époque de la TSF (Télégraphie sans fil, 1896-1907), les ondes servirent de support à des signaux de type '*tout ou rien*'. Puis l'on pensa rapidement à l'utilisation de ce support pour la transmission des sons (vers 1915).

Les années 1920 donnèrent lieu aux premiers essais de transmission d'images par ondes. Alors que pendant la seconde guerre mondiale on développa considérablement le 'Radar'.

Actuellement, les télécommunications utilisent considérablement ce support aussi bien pour le transport du son, de l'image ou des données. Les transmissions par satellites ou par faisceaux hertziens sont réalisées, quant à elles, au moyen des hyperfréquences.

Les transmissions par ondes (principalement radio) ont suscité un véritable engouement populaire. Communiquer à grande distance constitue une passion pour un certain nombre d'amateurs, mais les équipements nécessaires à ce type de liaison sont relativement onéreux, car techniquement sophistiqués.

L'ouverture au domaine privé de certaines gammes d'ondes accessibles au moyen d'équipements bons marché a renouvelé l'intérêt du grand public pour les télécommunications radio.

2 PROPAGATION DES ONDES

Le contexte de travail que nous utiliserons se caractérise par deux éléments émetteur-récepteurs, les antennes, et un milieu de transmission, l'air.

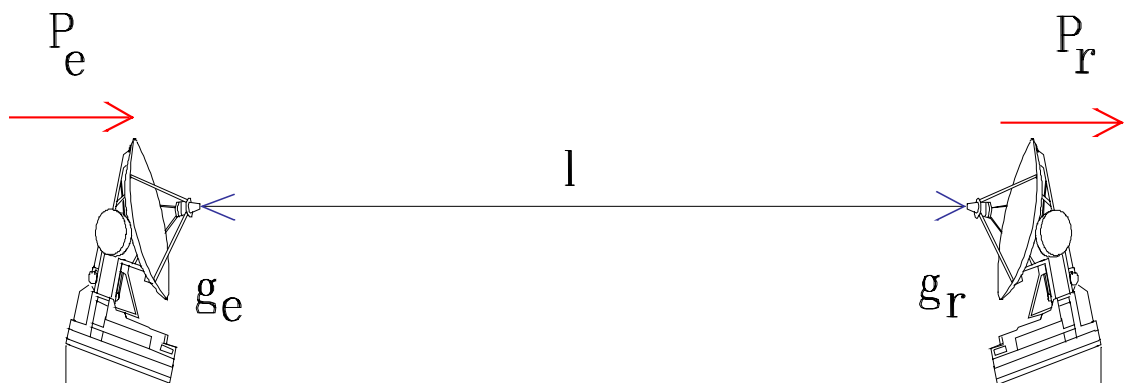


Figure 1 : Système de transmission par ondes

Nous pouvons ressortir de la Figure 1 plusieurs éléments physiques caractéristiques de la liaison par ondes, soit :

- P_r** : puissance reçue par l'antenne réceptrice
- P_e** : puissance fournie à l'antenne émettrice
- g_r** : gain de l'antenne réceptrice
- g_e** : gain de l'antenne émettrice

Le bilan de liaison, qui est la relation qui lie ces éléments, dépend encore de l'affaiblissement de l'onde dans l'espace libre entre les deux antennes.

Cet affaiblissement est proportionnel au carré de la fréquence de l'onde électromagnétique, ainsi qu'au carré de la distance séparant les deux antennes.

Il vient que la puissance reçue par l'antenne réceptrice est donnée par :

$$P_r [\text{W}] = P_e \cdot g_e \cdot g_r \cdot \left[\frac{\lambda^2}{(4 \cdot \pi \cdot l)^2} \right]$$

Formule 1 : Puissance reçue dans un système de transmission par ondes (pertes atmosphériques négligées)

L'air possède des propriétés électromagnétiques très semblables à celles du vide, soit une permittivité et perméabilité relatives proches de l'unité (μ_r , ϵ_r). Cependant les variations de pression, d'humidité et de température provoquent des variations de son indice de réfraction n (ou ϵ_r).

Les ondes électromagnétiques possèdent différents modes de propagation privilégiés dans l'air selon leur fréquence. Celle-ci favorise l'un ou l'autre de ces modes, qui sont les suivants :

type			
onde de sol	10 kHz	à	10 MHz
réflexion ionosphérique	100 kHz	à	100 MHz
réfraction troposphérique	50 MHz	à	5 GHz
dispersion troposphérique	100 MHz	à	10 GHz
visibilité directe	50 MHz	à	50 GHz

Tableau 1 : Modes de propagation préférentiels

2.1 Atmosphère terrestre

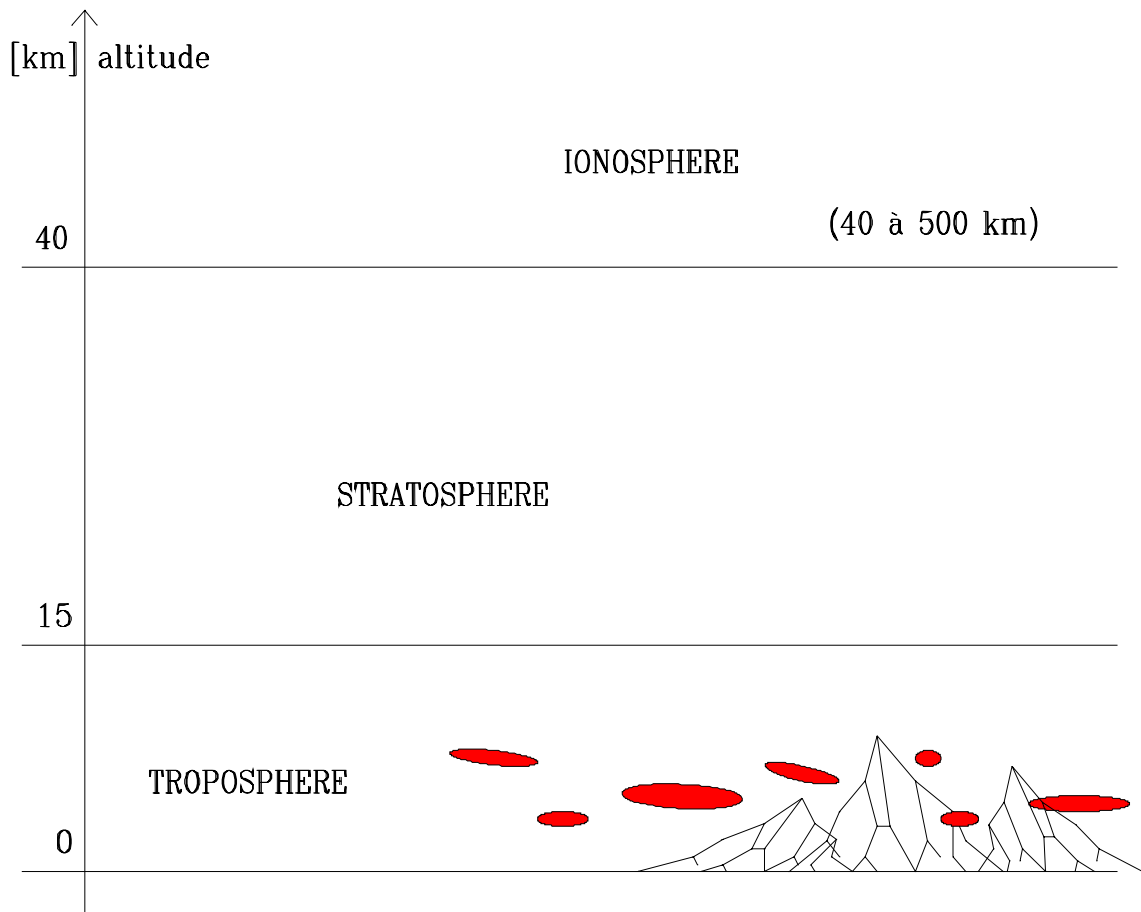


Figure 2 : Principales couches de l'atmosphère terrestre du point de vue des transmissions d'ondes électromagnétiques

La troposphère se caractérise par un gradient de l'indice de réfraction, qui a pour effet de courber la trajectoire des ondes électromagnétiques en direction du sol. Généralement, l'indice de réfraction n diminue avec l'altitude.

La stratosphère ne joue pas de rôle caractéristique dans la transmission d'ondes électromagnétiques.

La présence de particules ionisées en couches sphériques autour de la terre donne lieu à des phénomènes de réfraction, réflexion et d'absorption importants.

L'ensemble de ces diverses couches est appelé ionosphère. L'ionisation de ces différentes couches est soumise à de grandes variations qui sont fonction de la saison, l'heure, l'activité du soleil, les fluctuations du champ magnétique terrestre, etc.

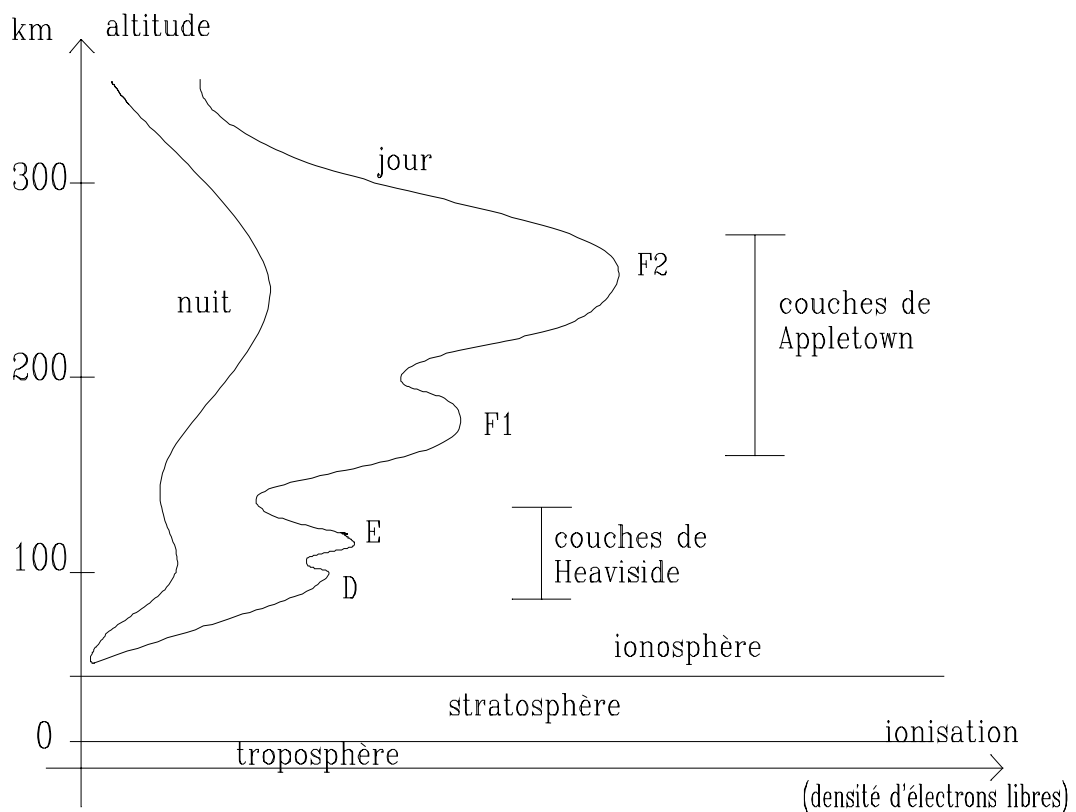


Figure 3 : Couches ionisées de l'atmosphère terrestre

2.2 Zone de silence

Dans le cadre des transmissions par ondes courtes, il existe une zone autour de l'émetteur, appelée zone de silence, qui n'a pas la possibilité de recevoir les ondes émises.

Ce phénomène est dû au gradient de l'indice de réfraction n dans l'ionosphère. Il en découle accroissement de cette zone en fonction de la fréquence de l'onde émise.

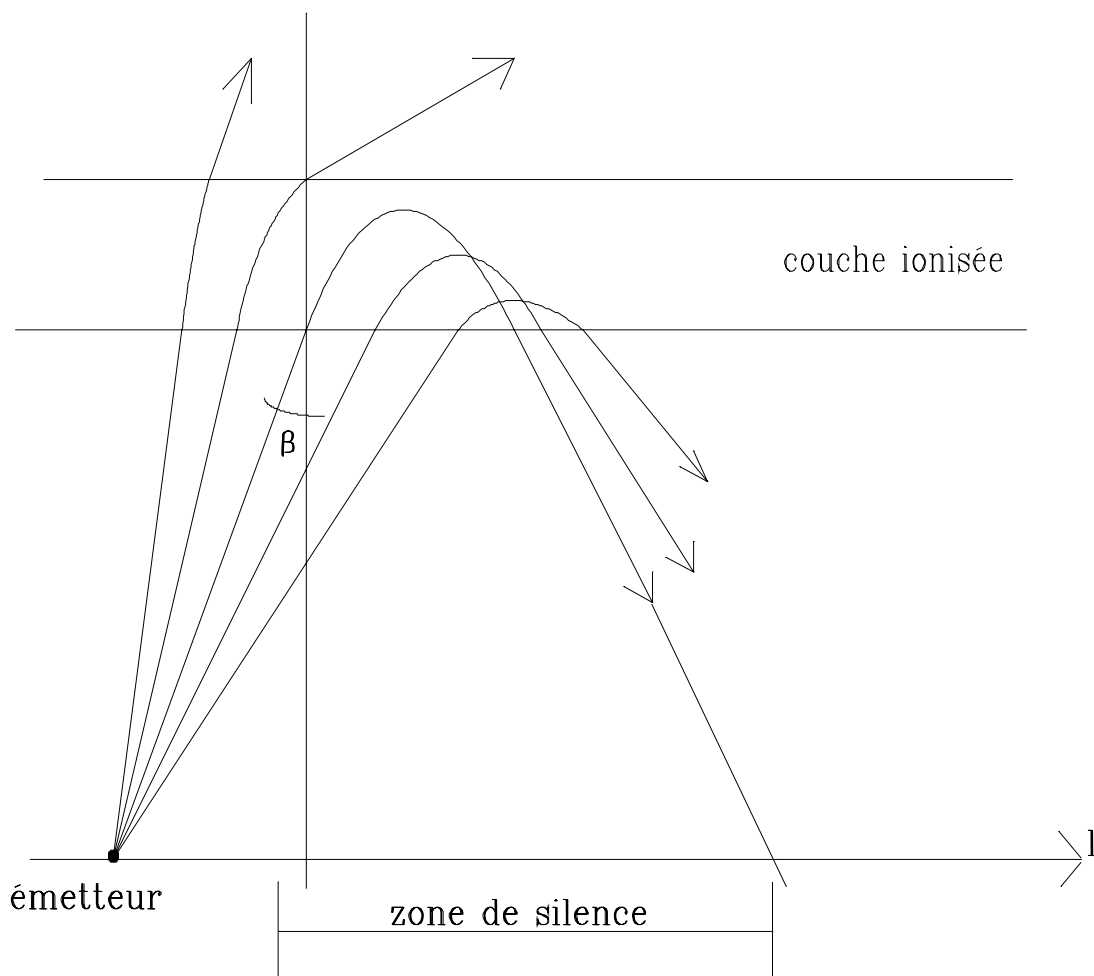


Figure 4 : Zone de silence autour de l'émetteur

L'étendue de cette zone de silence sera donc dépendante de l'angle minimum d'émission possible, et par-là de la fréquence de l'onde électromagnétique.

Fréquence	longueur
15 [MHz]	2'000 [km]
25 [MHz]	5'000 [km]
> 30 [MHz]	plus de réflexion

Tableau 2 : Zone de silence

2.3 Liaison transhorizon

Lorsque dans le cadre de transmission par faisceaux hertziens, nous nous éloignons de l'émetteur, nous constatons une décroissance du signal reçu très rapide après la perte de la visibilité directe entre les stations.

Cependant, à partir d'une certaine distance, le signal s'atténue beaucoup plus lentement.

Ce phénomène est lié à la diffusion des ondes dans certaines régions de la haute troposphère, situées en visibilité directe des deux stations.

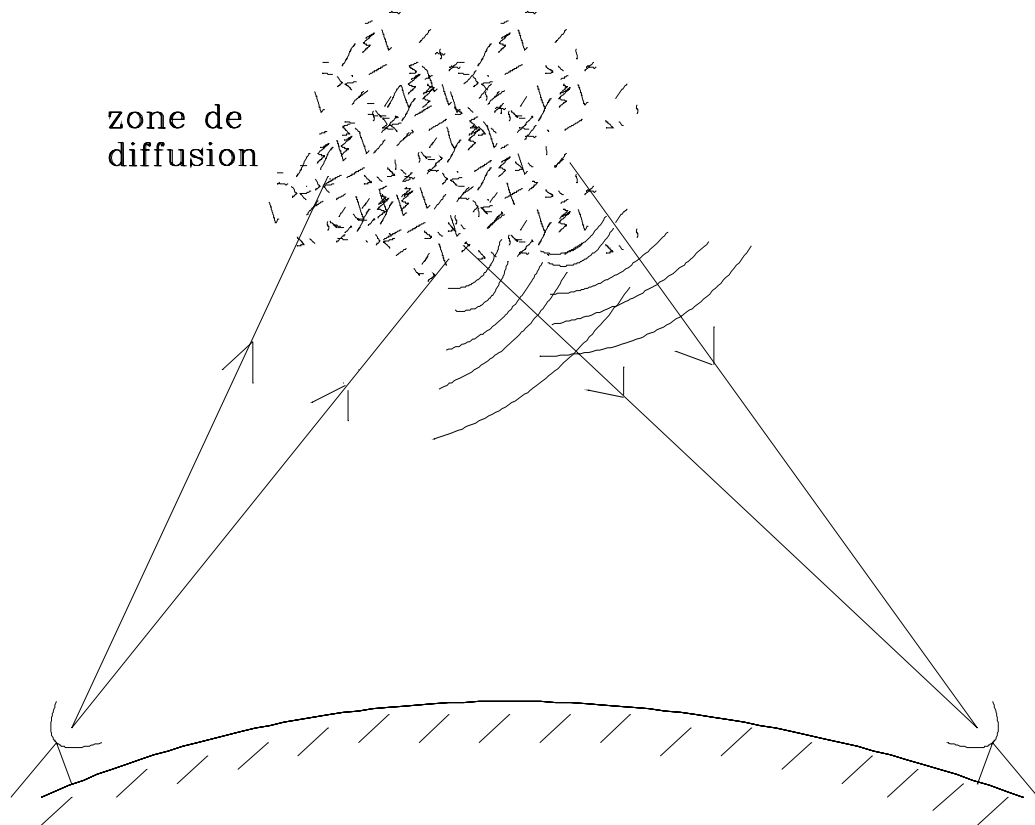


Figure 5 : Liaison transhorizon

L'efficacité de cette liaison est faible, car seule une très faible partie de l'onde émise revient vers le récepteur. Cependant, elle est tout à fait utilisable si nous avons à disposition des stations puissantes et à grand gain.

2.4 Réception en diversité

Lors de mauvaises conditions de propagation, il existe la possibilité de doubler la liaison et ainsi garantir une meilleure qualité de transmission. Ce mode de transmission peut prendre deux formes de **diversité** :

- dans l'espace (2 récepteurs éloignés d'environ $150.\lambda$)
- en fréquence (2 fréquences avec un écart relatif d'environ 1%)

3 CLASSIFICATION DES ONDES

L'attribution des bandes de fréquences du spectre électromagnétique doit être réalisée sous forme de consensus international. Elle est le fait d'instances ayant leur siège à Genève, le CCIR et le IFRB (International Frequency Registration Board).

3.1 Radiodiffusion

Les gammes d'ondes attribuées à la radiodiffusion sont classées d'après leurs longueur d'onde comme suit :

Type d'ondes	gamme d'ondes	mode de propagation
Longues [OL]	150 à 285 kHz	sol
Moyennes [OM]	525 à 1'605 kHz	sol, réflexion
Courtes [OC]	4 à 26,1 MHz	sol, réflexions multiples
Ultra-courtes [OUC]	41 à 960 MHz	visibilité directe

Tableau 3 : Gammes d'ondes attribuées à la radiodiffusion

Remarque : Les ondes longues, moyennes et courtes sont utilisées par la radiodiffusion nationale et internationale en modulation d'amplitude.

La bande réservée à la radiodiffusion sonore dans les ondes ultra-courtes est en modulation de fréquence.

3.2 Radiocommunications

Le domaine d'application des radiocommunications comprend les cas de liaison suivants :

- point à point à longue distance
- endroits difficiles d'accès
- liaisons mobiles terrestres, maritimes ou aériennes

Leur utilisation est des plus variées, sans compter la diffusion de programmes sonore et visuels. Nous pouvons distinguer principalement les cas de suivants :

- liaisons téléphoniques
- liaisons télégraphiques
- faisceaux hertziens
- télésignalisation

Le domaine de la télésignalisation est très varié. Il comprend, entre autres, la recherche de personnes, l'appel auto, la sécurité aérienne, etc.

a) ONDES COURTES

Encore très utilisées en radiotélégraphie intercontinentale.

b) BANDES DE 80, 160 ET 460 MHz

Réservées aux radiocommunications mobiles à courte distance.

C) FAISCEAUX HERTZIENS

Ils occupent des fréquences comprises entre 250 MHz et 22 GHz, et demandent une visibilité directe entre les stations d'émission et de réception. Leur utilisation à des fréquences plus basse se heurterait à la nécessité d'une trop grande antenne. Quant aux fréquences plus élevées, elles sont trop sujettes aux pertes par absorption dans la troposphère (vapeur d'eau).

D) LIAISONS PAR SATELLITE

Il s'agit là aussi de liaisons par faisceaux hertziens. Les bandes de fréquences qui leur sont attribuées recouvrent partiellement celles des faisceaux hertziens terrestres, ce qui peut créer des interférences très gênantes.

Leur sont attribuées des paires de fréquences telles que :

4	et.....	6	GHz
11	et.....	14	GHz
20	et.....	30	GHz

4 THEORIE DE LA TRANSMISSION PAR ONDES

Situons la liaison typique de la figure 1 dans le cadre suivant : visibilité directe entre les stations placées dans un milieu isotrope sans pertes.

Nous pouvons d'une manière classique définir l'affaiblissement de liaison de la manière suivante :

$$A[\text{dB}] = 10.\log\left[\frac{P_e}{P_r}\right]$$

Formule 2 : Affaiblissement

Dans le cas où les deux antennes sont remplacées par des sources isotropes, l'affaiblissement en espace libre A_{ISO} est proportionnel au carré de la fréquence de l'onde électromagnétique, ainsi qu'au carré de la distance séparant les deux stations.

$$A_{\text{iso}}[\text{dB}] = 20.\log\left[\frac{4.\pi.l}{\lambda}\right]$$

Formule 3 : Affaiblissement en espace libre

Remplaçons les deux antennes isotropes par des antennes dont le diagramme de rayonnement, ainsi que leur orientation réciproque sont connues.

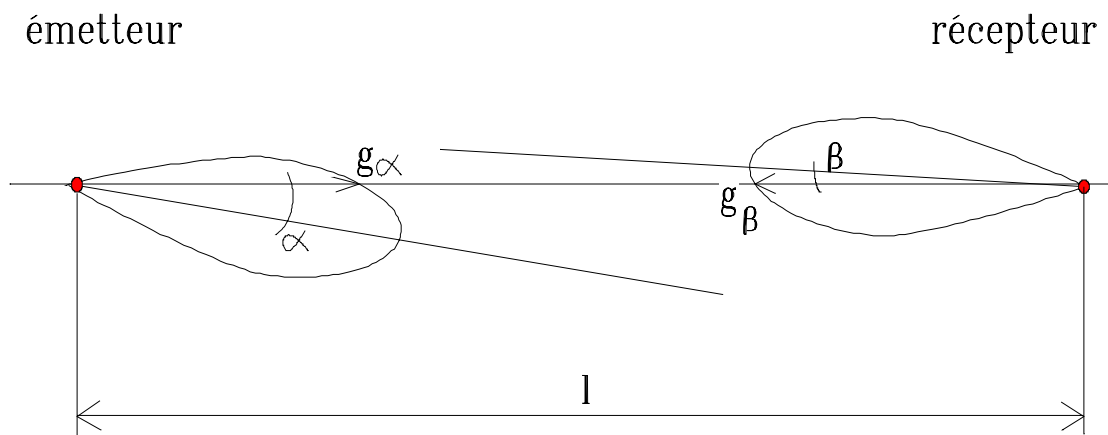


Figure 6 : Liaison entre deux antennes d'orientation quelconque

L'affaiblissement sera fonction des gains respectifs des antennes dans la direction correspondant à la station vis-à-vis.

$$A[\text{dB}] = A_{\text{iso}} - G_{e\alpha} - G_{r\beta}$$

Formule 4 : Orientation quelconque des antennes

En explicitant les termes on retrouve la formule équivalente (sans unité) :

$$Pr [W] = Pe.g_{e\alpha}.g_{r\beta}.\left[\frac{\lambda^2}{(4.\pi.l)^2}\right]$$

Formule 5 : Orientation quelconque des antennes (version détaillée)

Remarque : Dans le cas de faisceaux hertziens, on peut prendre l'hypothèse d'un pointage exact entre les deux antennes, car les axes de rayonnement coïncident. L'affaiblissement de liaison devient :

$$A [dB] = A_{iso} - G_{e\max} - G_{r\max}$$

*Formule 6 : Affaiblissement
Cas de stations parfaitement orientées*

5 ANTENNES

L'antenne est un élément, qui alimenté en énergie haute-fréquence, rayonne dans l'espace cette énergie (au rendement près), sous forme d'ondes électromagnétiques.

De même, à la réception, l'antenne recevant un train d'ondes électromagnétiques, fourni de l'énergie haute-fréquence au dispositif récepteur auquel elle est reliée.

L'organe reliant l'antenne au dispositif électronique émetteur ou récepteur est appelé 'feeder'.

En créant un régime d'ondes stationnaires dans un conducteur, il s'ensuit une variation du courant en chaque point du conducteur (sauf aux nœuds des ondes stationnaires). La variation du courant (en fonction du temps) dans le conducteur, provoque l'émission d'ondes électromagnétiques.

Le courant actif sera maximum lorsque l'impédance du conducteur sera assimilable à une résistance pure, c'est à dire lorsque qu'il y aura résonance sur une fréquence dans le conducteur. Le plus petit conducteur pouvant entrer en résonance à une fréquence déterminée est celui dont la longueur sera équivalente à la demi-longueur d'onde du courant.

$$l[m] = n \cdot \frac{\lambda}{2} = n \cdot \frac{300.000 \left[\frac{km}{s} \right]}{2 \cdot f[Hz]}$$

Formule 7 : Longueur du conducteur pour garantir la résonance

La longueur de l'antenne (ou dipôle rayonnant) sera donc un multiple entier (n) de la demi-longueur d'onde.

5.1 Emission

Si l'on fournit à une antenne une puissance P_e , cette puissance est émise dans l'espace environnant selon une répartition dépendant du gain de l'antenne dans une direction donnée.

Afin de donner un élément de référence permettant de calculer le gain d'une antenne dans une direction précise, nous imaginons une source radioélectrique rayonnant uniformément dans toutes les directions, dite source 'isotrope'.

La puissance par unité de surface p_{iso} rayonnée par une source isotrope à une distance l , nous donne ainsi un élément de référence pour le calcul ultérieur du gain d'une antenne quelconque.

$$p_{iso} \text{ [W/m}^2\text{]} = \frac{P_e}{4.\pi.l^2}$$

Formule 8 : Puissance surfacique de la source isotrope

Cette source isotrope n'est pas réalisable pratiquement. D'autre part, il faut remarquer que nous supposons que le milieu de transmission est sans pertes.

Le gain d'une antenne réelle est donc défini dans une direction α par g_α , qui compare la puissance surfacique fournie dans cette direction à celle qui serait fournie par une source isotrope.

$$g_\alpha = \frac{p}{p_{iso}} \quad \text{ou} \quad G_\alpha \text{ [dB]} = 10.\log \frac{p}{p_{iso}}$$

Formule 9 : Gain directionnel d'une antenne

La puissance surfacique p_α est donnée à une distance l de la source. On l'obtient en mesurant à l'aide d'une antenne réceptrice, la puissance rayonnée en chaque point d'une sphère ayant pour centre la source émettrice.

Il nous est ensuite possible de tracer le gain g_α pour toutes les directions de rayonnement possible, ce qui nous donne le 'diagramme de rayonnement' de l'antenne.

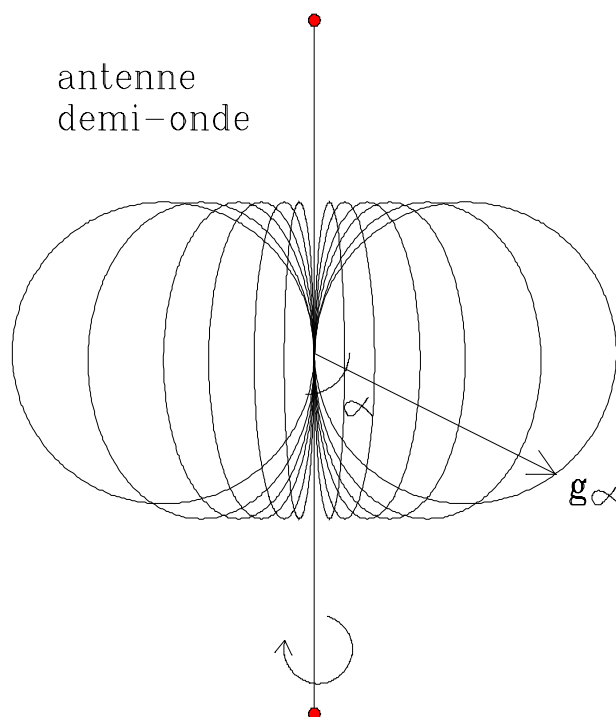


Figure 7 : Diagramme de rayonnement d'une antenne demi-onde horizontale

Augmenter le gain d'une antenne revient à le concentrer dans une ou plusieurs directions. Il s'ensuit qu'une antenne à fort gain est directive et réciproquement.

5.2 Réception

Les propriétés d'une antenne réceptrice sont exactement les mêmes que dans le cas de l'antenne émettrice.

L'onde électromagnétique de puissance surfacique p_α atteignant l'antenne produit une tension à ses bornes. La puissance disponible au récepteur $P_{R\beta}$ est celle qu'absorberait une charge adaptée soumise à la tension précitée.

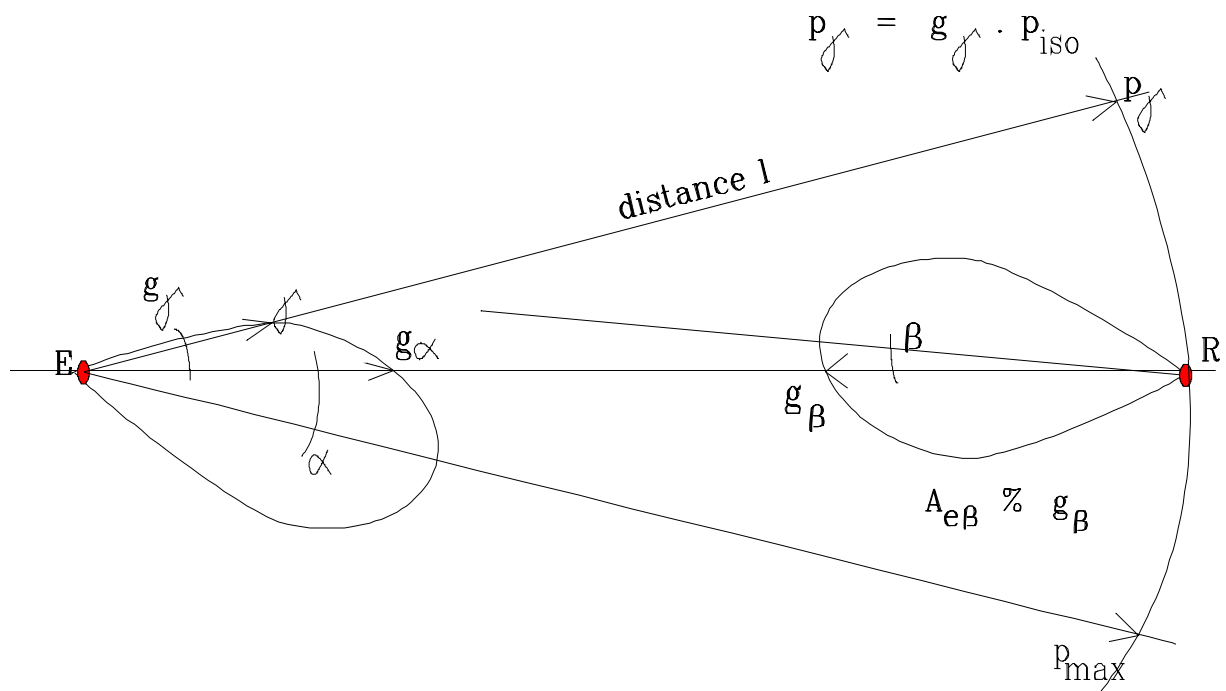


Figure 8 : Surface de captation d'une antenne directive

Le rapport $A_{e\beta}$ entre la puissance $P_{r\beta}$ et la puissance surfacique p_{α} est appelé '**surface de captation**' ou '**surface effective**' de l'antenne.

$$A_{e\beta} [\text{m}^2] = \frac{P_{r\beta}}{P_{\alpha}}$$

Formule 10 : Surface de captation d'une antenne

La réciprocité existante entre les qualités d'émission et de réception d'une même antenne, nous conduit à chercher le rapport entre le gain g_{β} et la surface de captation $A_{e\beta}$.

$$\frac{g_{\beta}}{A_{e\beta}} = \frac{4 \cdot \pi}{\lambda^2} = \text{constante}$$

Formule 11 : Rapport entre gain et surface de captation

Nous pouvons facilement définir la surface de captation théorique d'une source isotrope. Le gain d'une telle source est de 1 par définition.

$$A_{eiso} [\text{m}^2] = \frac{\lambda^2}{4 \cdot \pi}$$

Formule 12 : Surface de captation d'une source isotrope

ANTENNES A GRANDE SURFACE

Dans le cas où l'antenne possède une surface géométrique très grande par rapport à λ^2 , on observe que celle-ci correspond à la surface de captation à un facteur r près.

$$A_{\text{max}} [\text{m}^2] = r \cdot A$$

Formule 13 : Surface de captation d'une antenne à grande surface

Le coefficient r est le facteur de rendement de l'antenne, qui dépend des pertes dans l'antenne, de la régularité de sa surface, etc.

Remarque : Les antennes de réception TV paraboliques font partie de cette catégorie.

Prenons l'exemple d'une antenne à réflecteurs paraboliques avec une ouverture circulaire de diamètre d .

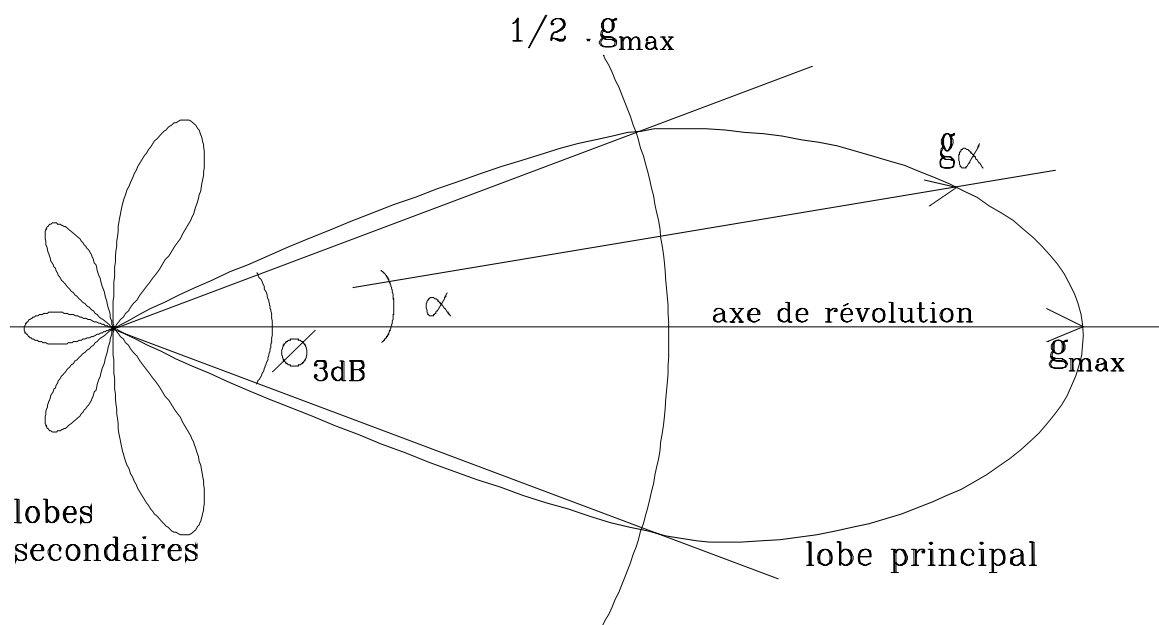


Figure 9 : Diagramme de rayonnement d'une antenne parabolique

Le gain maximum s'exprimera de la façon suivante :

$$A_{\text{emax}} [\text{m}^2] = r \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad \text{et} \quad g_{\text{max}} = A_{\text{emax}} \cdot \frac{4 \cdot \pi}{\lambda^2}$$

On aura enfin :

$$g_{\text{max}} = 0,5 \cdot \frac{(\pi \cdot d)^2}{\lambda^2}$$

6 QUEL MILIEU DE TRANSMISSION CHOISIR ?

Nous pouvons différencier essentiellement deux milieux de transmission ayant non seulement des caractéristiques physiques différentes, mais aussi des particularités pratiques les destinant à des applications très variées. Il s'agit des lignes et des ondes.

Examinons tout d'abord leurs caractéristiques physiques à l'aide du tableau 4.

A = affaiblissement	Lignes	Ondes
$\frac{P_e}{P_r}$	$10^{\frac{\alpha \cdot l}{10}}$	$\frac{(4 \cdot \pi)^2 \cdot l^2}{\lambda^2 \cdot g_e \cdot g_r}$
Selon la longueur l	$A = \alpha \cdot l$	$\frac{P_e}{P_r} \cong l^2$
Selon la fréquence f	$A \cong \sqrt{f}$	$\frac{P_e}{P_r} \cong \frac{1}{f^2}$

Tableau 4 : Comparaison du comportement de l'affaiblissement

Comparons maintenant les qualités pratiques de ces deux supports de transmission :

LIAISONS POINT A POINT

A l'avantage des câbles nous trouvons :

- Milieu stable, pouvant être optimisé
- Transmissions multiples sur les différentes paires d'un câble
- Risque d'interférences moindres
- Interception et brouillage difficiles
- Durée d'exploitation élevée
- Haute fiabilité

A l'avantage des ondes :

- Liaison avec des endroits isolés ou difficiles d'accès
- Equipement transportable (liaisons temporaires)
- Liaisons mobiles

LIAISONS POINT A MULTIPPOINTS (RESEAUX DE DIFFUSION)

A l'avantage des câbles :

- Bonne immunité aux perturbations
- Conditions de réception pouvant être optimisées
- Elimination des antennes individuelles

A l'avantage des ondes :

- Diffusion omnidirectionnelle
- Nombre de récepteurs illimité
- Domaine de couverture très étendu
- Liaisons mobiles

Nous pouvons constater que les deux supports ont leurs propres domaines d'application. Le choix du type de support s'en trouve ainsi facilité.

Dans les régions à forte densité de population, l'arrivée de la fibre optique a considérablement contribué à l'augmentation des réseaux câblés de diffusion.

7 TABLE DES FIGURES

<i>Figure 1 : Système de transmission par ondes</i>	<i>3</i>
<i>Figure 2 : Principales couches de l'atmosphère terrestre du point de vue des transmissions d'ondes électromagnétiques5</i>	<i>5</i>
<i>Figure 3 : Couches ionisées de l'atmosphère terrestre.....</i>	<i>6</i>
<i>Figure 4 : Zone de silence autour de l'émetteur</i>	<i>7</i>
<i>Figure 5 : Liaison transhorizon.....</i>	<i>9</i>
<i>Figure 6 : Liaison entre deux antennes d'orientation quelconque</i>	<i>14</i>
<i>Figure 7 : Diagramme de rayonnement d'une antenne demi-onde horizontale</i>	<i>18</i>
<i>Figure 8 : Surface de captation d'une antenne directive</i>	<i>19</i>
<i>Figure 9 : Diagramme de rayonnement d'une antenne parabolique.....</i>	<i>21</i>

8 TABLE DES FORMULES

<i>Formule 1 : Puissance reçue dans un système de transmission par ondes (pertes atmosphériques négligées).....</i>	<i>4</i>
<i>Formule 2 : Affaiblissement.....</i>	<i>13</i>
<i>Formule 3 : Affaiblissement en espace libre.....</i>	<i>13</i>
<i>Formule 4 : Orientation quelconque des antennes.....</i>	<i>14</i>
<i>Formule 5 : Orientation quelconque des antennes (version détaillée).....</i>	<i>15</i>
<i>Formule 6 : Affaiblissement Cas de stations parfaitement orientées.....</i>	<i>15</i>
<i>Formule 7 : Longueur du conducteur pour garantir la résonnance.....</i>	<i>16</i>
<i>Formule 8 : Puissance surfacique de la source isotrope.....</i>	<i>17</i>
<i>Formule 9 : Gain directionnel d'une antenne</i>	<i>17</i>
<i>Formule 10 : Surface de captation d'une antenne</i>	<i>20</i>
<i>Formule 11 : Rapport entre gain et surface de captation.....</i>	<i>20</i>
<i>Formule 12 : Surface de captation d'une source isotrope</i>	<i>20</i>
<i>Formule 13 : Surface de captation d'une antenne à grande surface</i>	<i>21</i>