

# Les liaisons Terre-satellite

Hervé Sizun

Le présent document contient des informations qui sont la propriété de France Télécom. L'acceptation de ce document par son destinataire implique, de la part de ce dernier, la reconnaissance du caractère confidentiel de son contenu et l'engagement de n'en faire aucune reproduction, aucune transmission à des tiers, aucune divulgation et aucune utilisation commerciale sans l'accord préalable écrit de France Télécom R&D

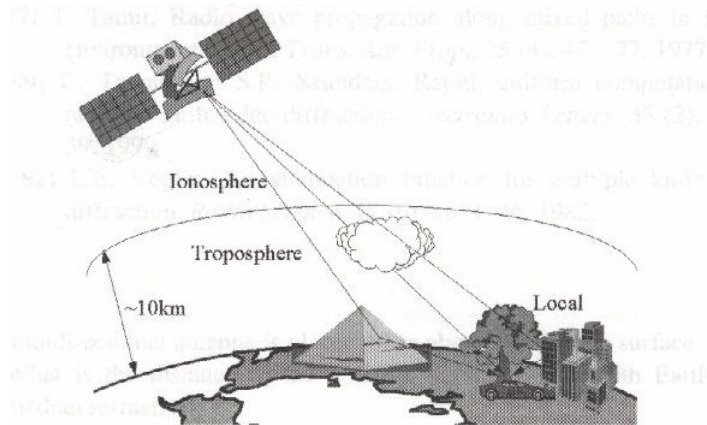
D1 - 23/04/2004

## Introduction



- ▶ **Caractérisées par une propagation oblique (simplification de la propagation/liaisons hertziennes)**
  - Influence du sol négligeable
  - Élimination des phénomènes de réflexion et de diffraction par le sol
  - Élimination d'une grande partie des trajets atmosphériques (angle d'élévation > à quelques degrés)
- ▶ **Les principaux phénomènes mis en jeu**
  - Affaiblissement en espace libre
  - Phénomènes liés aux indices de réfraction (tropo, iono)
  - Absorption par les gaz (oxygène et vapeur d'eau)
  - Affaiblissement par les hydrométéores (nuages, pluie, ...)

# Introduction



France Télécom R&D

La communication de ce document est soumise à autorisation de France Télécom R&D  
D3 - 23/04/2004

## Affaiblissement en espace libre



$$A_0 = -20 \log_{10} \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right) = 32.4 + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}(d)$$

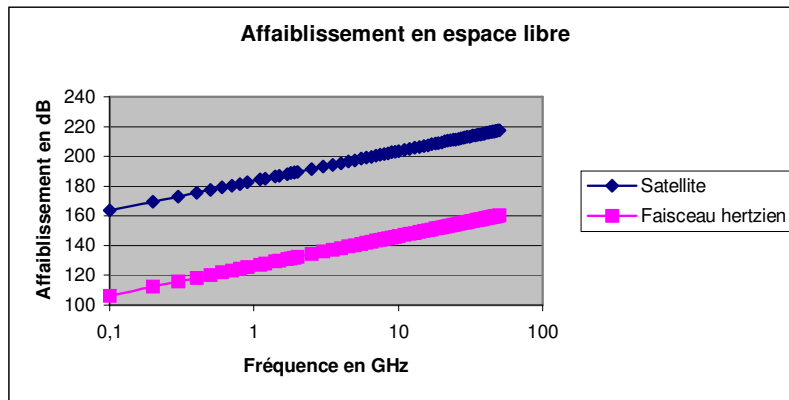
où :

- $A_0$  est l'affaiblissement en espace libre (dB)
- $\lambda$  est la longueur d'onde (km),
- $d$  est la distance entre l'émetteur et le récepteur (km),
- $f$  est la fréquence (MHz).

France Télécom R&D

La communication de ce document est soumise à autorisation de France Télécom R&D  
D4 - 23/04/2004

## Affaiblissement en espace libre



## Phénomènes liés aux indices de réfraction



- ▶ **Les indices de réfraction des milieux traversés (tropo, iono, ...) sont variables le long du parcours**
  - L'OEM est réfractée (elle se propage selon une direction curviligne)
- ▶ **Les phénomènes qui en découlent:**
  - Allongement du trajet
  - Modification de la vitesse de propagation
  - Modification de l'angle d'arrivée
  - Variations de fréquence (effet doppler)
  - Scintillations (variations rapides du champ)
- ▶ **L'étude de ces différents phénomènes nécessite de connaître les indices de réfraction**

# L'indice de réfraction



## ▶ Troposphère

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

où:

- n est l'indice de réfraction,
- T est la température (°K),
- P est la pression (hecto Pascal ou en mb),
- e est la pression partielle de la vapeur d'eau en hecto Pascal.

# L'indice de réfraction (ionosphère)



## ▶ Milieu non absorbant et non soumis à B0

$$n = \left( 1 - \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m \omega^2} \right)^{1/2} = \left( 1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \right)^{1/2} = \left( 1 - \frac{f_p^2}{f^2} \right)^{1/2}$$

où :

- e est la charge de l'électron,
- $\epsilon_0$  est la permittivité du milieu,
- m est la masse de l'électron
- N est la densité électronique (nombre d'électrons par m<sup>3</sup>),
- $\omega$  est la pulsation de l'onde,
- $\omega_0^2 = \frac{Ne^2}{m}$  est la pulsation de plasma,
- $f_p$  est la fréquence de plasma (hertz),
- f est la fréquence,
- $f_p = 9\sqrt{N}$

## L'indice de réfraction (ionosphère)



### ► Milieu absorbant non soumis à B0

$$n = \left( 1 - \frac{\omega_0^2}{\omega(\omega - j\nu)} \right)^{1/2}$$

où :

-  $\nu$  est la fréquence de collision,

## L'indice de réfraction (ionosphère)



### ► Milieu non absorbant et soumis à B0

$$n = \sqrt{1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2 - \frac{\omega^2 \omega_H \sin^2 \theta}{2(\omega^2 - \omega_0^2)} \pm \sqrt{\omega^2 \omega_0^2 \cos^2 \theta + \frac{1}{2} \left( \frac{\omega^2 \omega_H^2 \sin^2 \theta}{\omega^2 - \omega_0^2} \right)^2}}$$

où :

-  $\omega_H = \frac{eB}{m}$  est la gyrofréquence,

-  $\theta$  est l'angle de propagation (angle entre la direction de propagation et le champ magnétique).

## L'indice de réfraction (ionosphère)



### ► Milieu absorbant et soumis à B0

$$n = \sqrt{1 - \frac{\omega_0^2}{\omega(\omega - j\nu) - \frac{1}{2} \cdot \frac{\omega^2 \omega_H \sin^2 \theta}{\omega(\omega - j\nu) - \omega_0^2}} \pm \sqrt{\omega^2 \omega_0^2 \cos^2 \theta + \frac{1}{2} \left( \frac{\omega^2 \omega_H \sin^2 \theta}{(\omega - j\nu) - \omega_0^2} \right)^2}}$$

Contrairement à la troposphère l'indice de réfraction est inférieur à l'unité et dépend de la fréquence. L'indice ainsi défini est l'indice de phase  $n_\varphi$ .

L'indice de groupe, supérieur à l'unité, est donné par la relation suivante :

$$n_g = \frac{1}{n_\varphi} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left( \frac{f_p}{f} \right)^2}}$$

## Le rayon de courbure

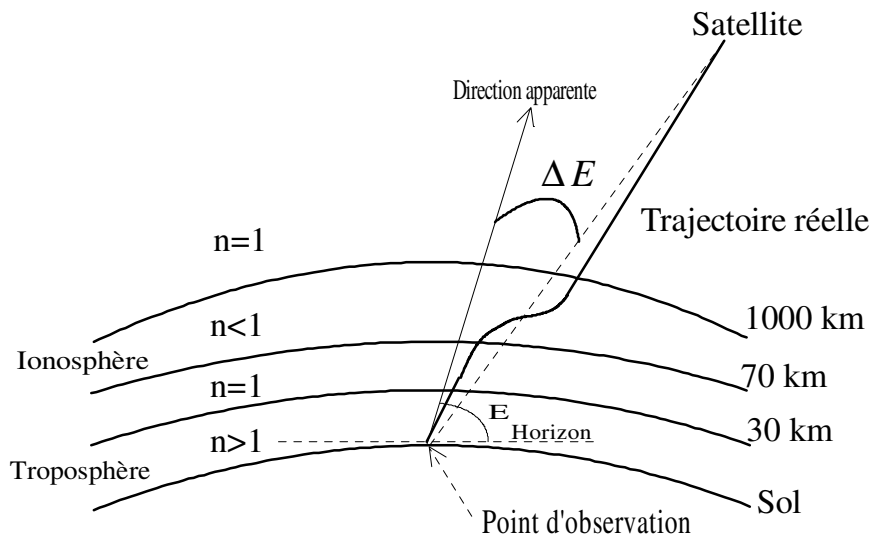


$$\frac{1}{\rho} = \frac{-\cos \varphi}{n} \frac{dn}{dr}$$

où :

- $\rho$  est le rayon de courbure de la trajectoire du rayon,
- $n$  est l'indice de réfraction de l'atmosphère,
- $\frac{dn}{dr}$  est le gradient vertical de l'indice de réfraction,
- $\varphi$  est l'angle de la trajectoire du rayon avec l'horizontale au point considéré.

## Trajectoire de l'onde



France Télécom R&D

La communication de ce document est soumise à autorisation de France Télécom R&D  
D13 - 23/04/2004

## Trajectoire de l'onde



La courbure des rayons est définie comme positive lorsque sa concavité est orientée vers la surface de la Terre.

Dans la troposphère le gradient vertical de l'indice de réfraction est négatif. Il en résulte que la courbure des trajectoires est toujours dans le même sens : sa concavité est orientée vers le centre de la Terre.

Dans l'ionosphère, le gradient vertical de l'indice de réfraction change de signe en traversant le maximum d'ionisation : La courbure des trajectoires change de sens en ce point

France Télécom R&D

La communication de ce document est soumise à autorisation de France Télécom R&D  
D14 - 23/04/2004

## Allongement du trajet/trajet géométrique



$$\Delta L = \int_0^S (n - 1) ds$$

où :

- $s$  est l'abscisse curviligne sur la trajectoire,
- $n$  est l'indice de réfraction,
- $S$  est la distance entre la station terminale terrestre et le satellite.

## Allongement du trajet (TROPOSPHERE)



$$\Delta L = 0.00227 * P + \frac{1.79V}{T \sin \theta}$$

où :

- $\Delta L$  est la différence de longueur (m),
- $P$  est la pression atmosphérique (hPa ou en mb),
- $T$  est la température au niveau du sol (°K),
- $\theta$  est l'angle d'élévation,
- $V$  le contenu total d'une colonne d'air en vapeur d'eau ( $\text{kg/m}^2$  ou mm d'eau précipitable)

$\Delta L$  varie de 2,2 à 2,7 m au niveau de la mer dans la direction du zénith.



## Allongement du trajet (IONOSPHERE)



$$\Delta L \simeq \frac{40}{f^2} \int_0^s N ds$$

où :

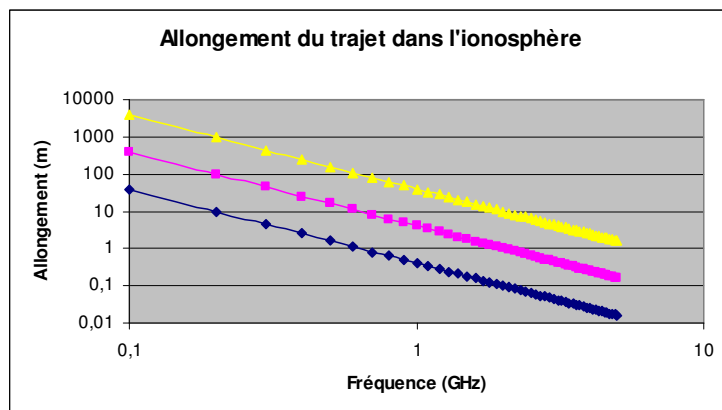
- f est la fréquence en MHz,
- N le nombre d'électrons (el/m<sup>3</sup>).

Pour un contenu électronique de 30 10<sup>16</sup> el/m<sup>2</sup>, on a un allongement approximatif de 1200 m à la fréquence de 100 MHz.

## Allongement du trajet (IONOSPHERE)



▶ 10<sup>16</sup>, 10<sup>17</sup> et 10<sup>18</sup> el/m<sup>3</sup>



## Retard /trajet rectiligne



$$\Delta t = \frac{d\left(\frac{\Delta L}{c}\right)}{df} = \frac{80\Delta f}{cf^3} \int_0^s N ds$$

## Variation de fréquence



$$\Delta f = \frac{40}{cf} \frac{d}{dt} \int_0^s N ds$$

La fréquence de l'onde reçue au sol diffère de celle émise par le satellite.

Les variations apparentes de fréquence dues à l'ionosphère sont généralement comprises entre 0,1 Hz (1,6 GHz) à quelques Hertz (satellite défilant émettant à 150 MHz).

## Direction d'arrivée



$$\Delta E = \frac{(L + r \sin E) r \cos E}{h_i (2r + L) + (r \sin E)^2} \frac{\Delta L}{L}$$

où :

- L est la distance au satellite,
- R est le rayon de la Terre,
- E est l'angle d'élévation apparent du satellite (angle mesuré),
- $h_i$  est l'altitude de la moyenne du contenu électronique (300-450 km).

## Rotation du plan de polarisation



$$\Delta \Omega = \frac{2,36 * 10^{-5}}{f^2} \int_0^S NB \cos \theta \sec \chi ds$$

où :

- N est le contenu total électronique,
- B est l'intensité du champ magnétique terrestre,
- $\theta$  est l'angle entre le champ magnétique et la direction de propagation,
- $\chi$  est l'angle zénithal solaire.

$\Delta \Omega$  est en général compris entre 1 et 500 radians.

# Scintillation



A la traversée du milieu ionosphérique, l'onde électromagnétique subit des variations rapides d'amplitude, de phase et de directions d'arrivée appelées scintillations dues à la présence d'irrégularités à l'intérieur du milieu. Elles sont caractérisées par leur profondeur, leur période et leur vitesse de variation.

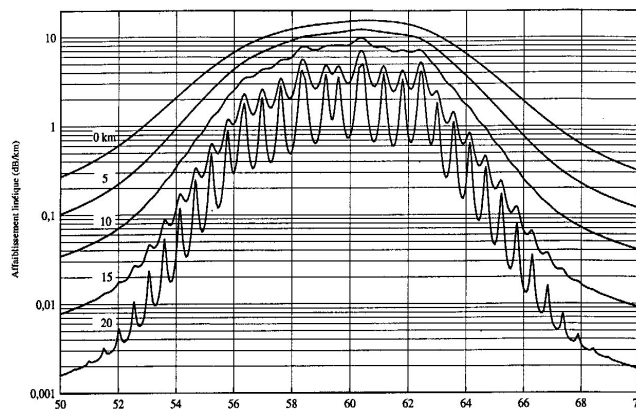
Différents indices ( $S_2$ ,  $S_I$ , etc.) ont été définis pour l'étude des scintillations :

$$S_2 = \frac{\overline{X^2} - (\overline{X})^2}{(\overline{X})^2}$$

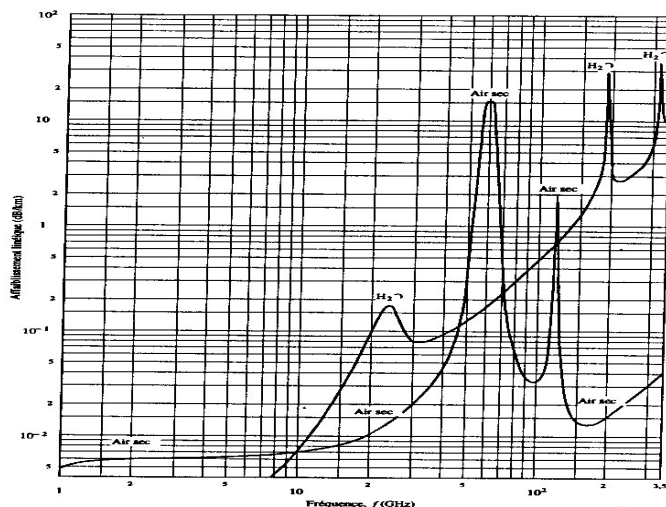
# Affaiblissement par les gaz



► **Résulte de la résonance moléculaire de l'oxygène et de la vapeur d'eau**



## Affaiblissement par les gaz



France Télécom R&D

La communication de ce document est soumise à autorisation de France Télécom R&D  
D25 - 23/04/2004

## Affaiblissement par les nuages et brouillards



$$\gamma_c = K_l M \quad \text{dB/km}$$

où:

$\gamma_c$ : affaiblissement linéique (dB/km) à l'intérieur du nuage

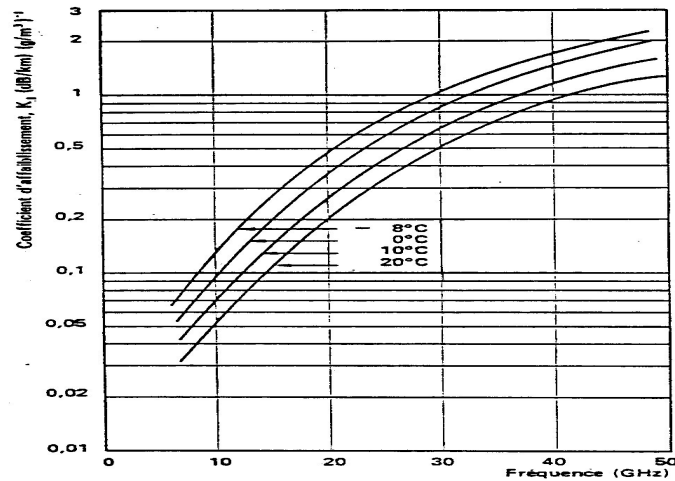
$K_l$ : affaiblissement linéique spécifique ((dB/km)/(g/m<sup>3</sup>))

$M$ : concentration en eau liquide dans les nuages ou le brouillard (g/m<sup>3</sup>).

France Télécom R&D

La communication de ce document est soumise à autorisation de France Télécom R&D  
D25 - 23/04/2004

## Affaiblissement par les nuages et brouillards



France Télécom R&D

La communication de ce document est soumise à autorisation de France Télécom R&D  
D27 - 23/04/2004

## Affaiblissement par la pluie

L'affaiblissement linéique  $\gamma_r$  (dB/km) est obtenu à partir de l'intensité de pluie  $R$  (mm/h) à partir de la relation suivante :

$$\gamma_r = kR^\alpha$$

Les coefficients  $k$  et  $\alpha$  dépendent de la fréquence et de la polarisation [IUT-R P.837].

Des valeurs de  $k$  et  $\alpha$  peuvent être obtenues à des fréquences différentes en utilisant une échelle logarithmique pour la fréquence, une échelle logarithmique pour  $k$  et une échelle linéaire pour  $\alpha$ .

France Télécom R&D

La communication de ce document est soumise à autorisation de France Télécom R&D  
D28 - 23/04/2004

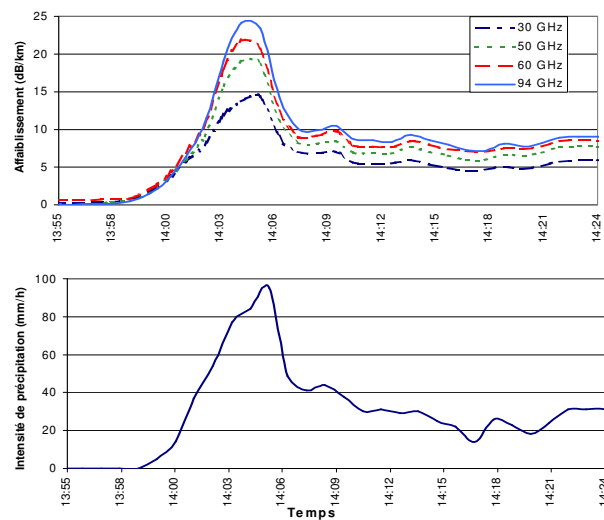
# Affaiblissement par la pluie



Pour une intensité de 20 mm/h (valeur dépassée pendant 0,1 % du temps à Belfort), un ordre de grandeur des affaiblissements dus à la pluie sont à 20 et 60 GHz respectivement égal à 2 et 8 dB/km.

Pour une intensité de 40 mm/h valeur dépassée pendant 0,01 du temps, les valeurs sont de l'ordre de 3,2 et 13 dB/km.

# Affaiblissement par la pluie



## Affaiblissement de pénétration



### ▶ Perte de puissance subie par l'onde entre l'extérieur autour du bâtiment et une ou plusieurs positions à l'intérieur de l'immeuble

- ▶ L'environnement proche (quartiers dégagés, tours, bâtiments, ...)
- ▶ La profondeur de réception à l'intérieur du bâtiment
- ▶ L'angle d'incidence (cf coefficient de réflexion et de transmission)
- ▶ La fréquence
- ▶ Le type de matériaux traversés

## Affaiblissement de pénétration (17 et 60 GHz pour différents types de matériaux)



Matériaux	17 GHz (V)	17 GHz (H)	60 GHz(V)	60 GHz(H)
Verre métallique	1,6 dB	0,03 dB	4,3 dB	0,6 dB
Verre	1,4 dB	0,9 dB	1,8 dB	2,2 dB
Contreplaqué (3/4" d'épaisseur)	5,6 dB	5, 8 dB	12,7 dB	10,9 dB
Placoplâtre (1/4" d'épaisseur)	0,9 dB	0,8 dB	0,8 dB	2,6 dB
Placoplâtre (2 épaisseurs)	1,9 dB	1,8 dB	7,3 dB	6,4 dB
Bloc de "thermolite"	54,7 dB	46,0 dB	56,8 dB	51,4 dB
Feuille d'aluminium	48,8 dB	43,2 dB	51,9 dB	42,3 dB



# Effets de masquage



▶ Par les bâtiments

▶ Par la végétation (modèle de Stephens)

$$A_{\text{végétation}} = - \left( R_{\infty} d + k \left( 1 - \exp \left( - \frac{(R_0 - R_{\infty})}{k} \right) \right) \right)$$

où :

- $R_0$  est le taux d'affaiblissement linéique initial,
- $R_{\infty}$  est le taux d'affaiblissement linéique final,
- $d$  représente la distance dans la végétation,
- $k$  est un coefficient de normalisation.

Pour un rideau d'arbres à 11,2 GHz, on obtient :

- $R_0 = 5,67$  dB/m,
- $R_{\infty} = 0,33$  dB/m,
- $k = 19,10$ .