

Les ondes électromagnétiques (2)

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 - 01/04/2004

Les différents mécanismes de propagation

- ▶ **L'onde , dans un milieu homogène, se propage sous forme de rayons rectilignes**
- ▶ **La phase varie régulièrement au fur et mesure de la propagation de l'onde le long du rayon**
- ▶ **Rencontre des obstacles**
 - Réflexion
 - Spéculaire
 - Diffuse
 - Transmission
 - Diffraction
 - Diffusion
 - Guidage

La réflexion

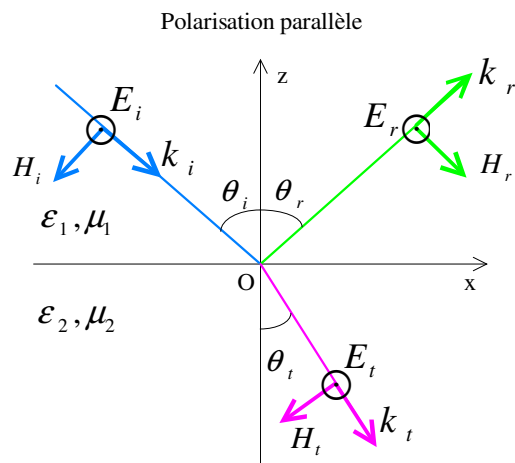


- ▶ L'onde rencontre une surface dont les dimensions sont grandes et les irrégularités petites par rapport à la longueur d'onde

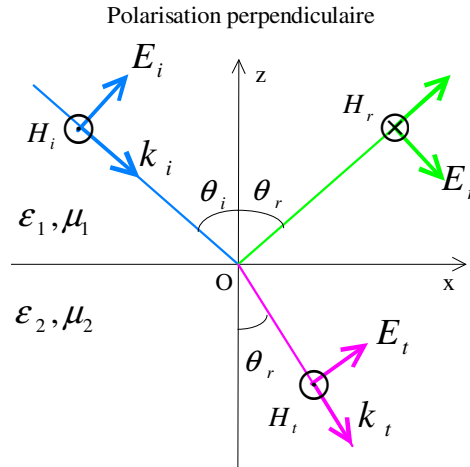
- ▶ Réflexion

- Spéculaire
 - surface homogène parfaitement plane
 - Le coefficient de réflexion dépend des caractéristiques diélectriques (permittivité, conductivité)
 - Relations de Fresnel
- Diffuse
 - Surface rugueuse (irrégularités de hauteur en certains points)
 - Diffusion de l'onde dans différentes directions
 - Lambert
 - PHONG

Relations de Fresnel



Relations de Fresnel



Relations de Fresnel



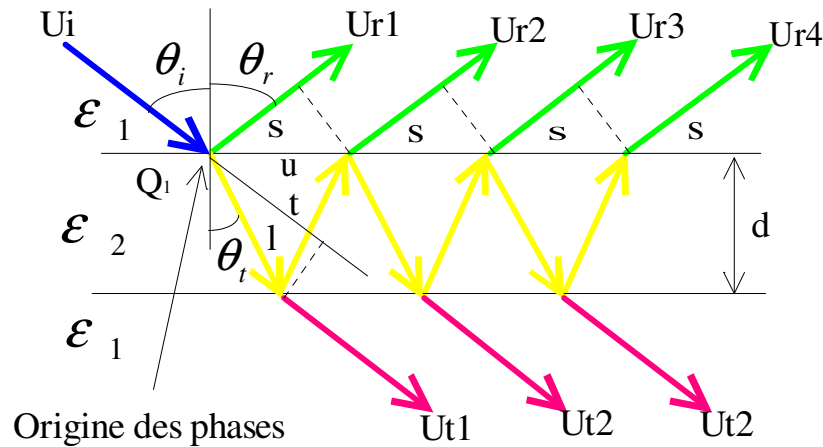
► Polarisation horizontale

$$R_{\parallel} = \frac{E_{r\parallel}}{E_{i\parallel}} = \frac{Z_2 \cos \theta_t - Z_1 \cos \theta_i}{Z_2 \cos \theta_t + Z_1 \cos \theta_i} \quad T_{\parallel} = \frac{E_{t\parallel}}{E_{i\parallel}} = \frac{2Z_2 \cos \theta_i}{Z_2 \cos \theta_t + Z_1 \cos \theta_i}$$

► Polarisation verticale

$$R_{\perp} = \frac{E_{r\perp}}{E_{i\perp}} = \frac{Z_2 \cos \theta_i - Z_1 \cos \theta_t}{Z_2 \cos \theta_i + Z_1 \cos \theta_t} \quad T_{\perp} = \frac{E_{t\perp}}{E_{i\perp}} = \frac{2Z_2 \cos \theta_i}{Z_2 \cos \theta_i + Z_1 \cos \theta_t}$$

Réflexion et transmission multiples



France Télécom R&D

La communication de ce document est soumise à autorisation de France Télécom R&D
D7 - 01/04/2004

Réflexion et transmission multiples



▶ Réflexions multiples

$$R = \left(\frac{R_1 (1 - P_a P_d^2)}{1 - R_1 P_a P_d^2} \right)$$

- R_1 est le coefficient de réflexion de l'onde sur la première surface de réflexion
- $P_a = e^{jk_1 s}$
- $P_d = e^{-jk_2 l}$

▶ Transmissions multiples

$$T = \left(\frac{P_d (1 - R_1^2)}{1 - R_1^2 P_a P_d^2} P_t \right)$$

- R_1 est le coefficient de réflexion de l'onde sur la première surface de réflexion
- $P_a = e^{jk_1 s}$
- $P_d = e^{-jk_2 l}$
- $P_t = e^{jk_1 l}$

France Télécom R&D

La communication de ce document est soumise à autorisation de France Télécom R&D
D8 - 01/04/2004

Le modèle de Lambert



- **Réflexion du rayonnement dans toutes les directions indépendamment du rayonnement incident**

$$R(\theta_0) = \rho R_i \frac{1}{\pi} \cos(\theta_0)$$

- ρ est le coefficient de réflexion de la surface,
- R_i représente la puissance incidente,
- θ_0 est l'angle d'observation.

Le modèle de PHONG



- **Somme de deux composantes:**

- La composante diffuse
- La composante spéculaire

$$R(\theta_i, \theta_0) = \rho \frac{R_i}{\pi} \left[r_d \cos(\theta_0) + (1 - r_d) \cos^m(\theta_0 - \theta_i) \right]$$

- ρ est le coefficient de réflexion de la surface,
- R_i représente la puissance incidente,
- r_d est le pourcentage du rayon qui est réfléchi sous forme diffuse (c'est une valeur comprise entre 0 et 1),
- m est un paramètre qui contrôle la directivité de la composante spéculaire de la réflexion.
- θ_i est l'angle d'incidence,
- θ_0 est l'angle d'observation.

La Transmission



- ▶ **Phénomène qui permet aux EM de passer à travers les obstacles**
 - Immeubles
 - Végétation
- ▶ **Cf les relations de Fresnel**
- ▶ **La profondeur de pénétration :**
 - Celle à laquelle l'intensité de l'onde est affaiblie dans le rapport $1/e$ (37%) de celle qu'elle avait à sa surface

La diffraction



- ▶ **Elle se produit chaque fois qu'une onde EM rencontre une arête dont les dimensions sont grandes devant la longueur d'onde**
 - Immeubles (toits (arêtes horizontales), coins de bâtiments (arêtes verticales))
 - Colline
 - Végétation
- ▶ **Elle constitue l'un des facteurs les plus importants intervenant dans la propagation des OEM**

La diffraction



► Expressions théoriques

$$\nu = h \cos \alpha \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} = \theta \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} \quad \frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{2} - \xi(\nu) \right)^2 + \left(\frac{1}{2} - \eta(\nu) \right)^2 \right]$$

$$\xi(\nu) = \int_0^\nu \cos \frac{\pi t^2}{2} dt$$

$$\eta(\nu) = \int_0^\nu \sin \frac{\pi t^2}{2} dt$$

► Expressions approchées

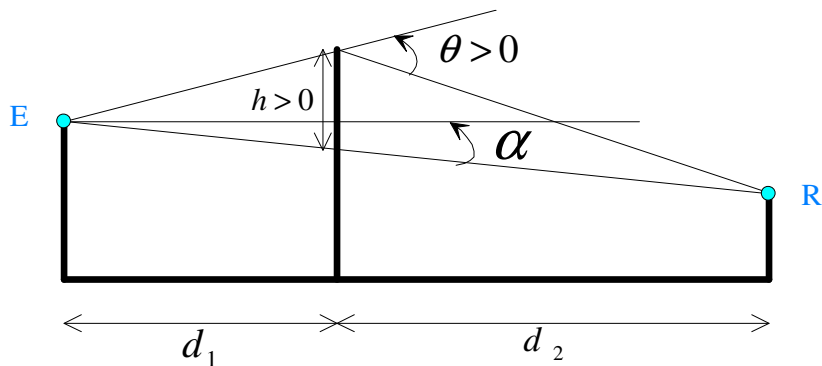
$$A_{dB} = 0$$

$$\nu \leq -0.71$$

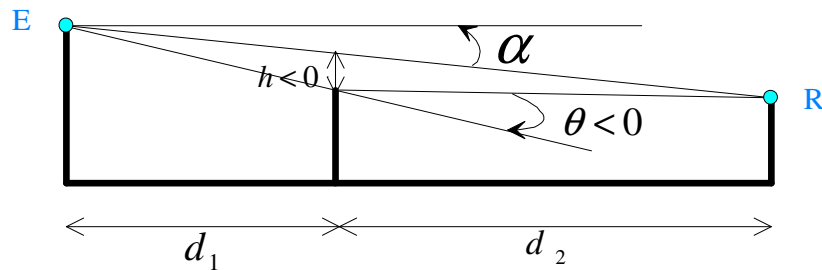
$$A_{dB} = -6.9 + 20 \log \left[\sqrt{(\nu - 0.1)^2} + 1 - \nu + 0.1 \right] \quad -0.71 < \nu \leq 2.3$$

$$A_{dB} = -12.95 - 20 \log \nu \quad \nu > 2.3$$

La diffraction



La diffraction



La diffusion



- ▶ Bien que les obstacles soient généralement de grandes tailles par rapport à la longueur d'onde, leur surface est parfois considérée comme rugueuse
 - Balcons
 - Fenêtres des façades
 - Végétation
- ▶ Apparaît lorsque l'obstacle présente de nombreuses irrégularités de la taille de la longueur d'onde.

Le guidage



▶ Certains environnements se présentent comme de véritables guides d'ondes par rapport à la propagation de OEM

- ▶ Rues encaissées
- ▶ Corridors
- ▶ Tunnels
- ▶ Contexte microcellulaire

Les différents trajets de propagation



▶ La propagation (radio mobile notamment) est une propagation multi-trajets

- ▶ Trajet direct
- ▶ Trajet transmis
- ▶ Trajets réfléchis
- ▶ Trajet diffractés
- ▶ Trajets diffusés

▶ Caractéristiques de ces différents trajets

- ▶ Amplitude
- ▶ Phase

▶ Interférences au niveau du récepteur

- ▶ Constructives (trajets en phase)
- ▶ Destructives (trajets en opposition de phase)

Figure d'interférences

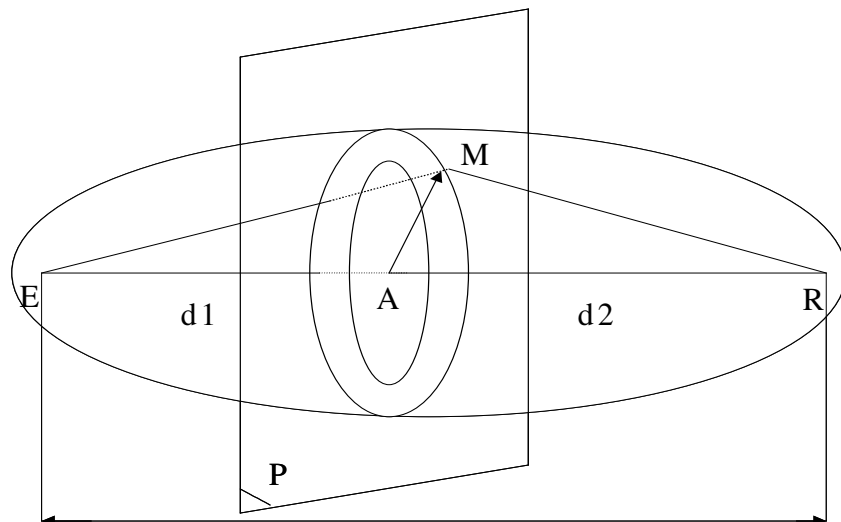


- ▶ **Le mobile se déplace dans la figure d'interférences**
 - Tâches lumineuses
 - Tâches sombres
- ▶ **Du fait de la présence de trajets multiples et du déplacement du mobile, les propriétés du canal sont:**
 - Affaiblissement
 - Variabilité
 - Sélectivité en fréquence
- ▶ **En analogique**
 - Etude de l'affaiblissement suffisante
- ▶ **En numérique**
 - Les évanouissements dus à la variabilité et à la sélectivité en fréquence induisent des dégradations de la qualité de la communication indépendamment de l'affaiblissement.

France Télécom R&D

La communication de ce document est soumise à autorisation de France Télécom R&D
D19 - 01/04/2004

Ellipsoïde de FRESNEL



France Télécom R&D

La communication de ce document est soumise à autorisation de France Télécom R&D
D20 - 01/04/2004

Ellipsoïdes de Fresnel



- ▶ Subdivision de l'espace par une famille d'ellipsoïdes ayant E et R pour foyers tels qu'un point M quelconque de l'espace satisfasse la condition :

$$EM + MR = ER + n\lambda/2$$

où :

- n est un nombre entier qui caractérise l'ellipsoïde considéré (n=1 caractérise le 1^{er} ellipsoïde de FRESNEL, ...),
- λ est la longueur d'onde.

Ellipsoïde de Fresnel



- ▶ On dira que la propagation est en visibilité directe (avec des phénomènes de diffraction négligeables), s'il n'y a pas d'obstacle à l'intérieur du 1^{er} ellipsoïde (délimitant la région de l'espace où passe la quasi-totalité de l'énergie).

- ▶ Rayon

$$R_n = \sqrt{\frac{n \lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}}$$

- ▶ Valeur maximale

$$r_{\max} = \frac{1}{2} \sqrt{\lambda d}$$

Affaiblissement



- ▶ **Affaiblissement en espace libre (dispersion de l'énergie au fur et à mesure de la propagation de l'onde)**

$$A_0 (dB) = 32.4 + 20 \log_{10} (f) + 20 \log_{10} (d)$$

où :

- d est la distance entre l'émetteur et le récepteur (km),
- λ est la longueur d'onde (km),
- f est la fréquence (MHz).

- ▶ **Affaiblissement en excès**

- ▶ Différence entre l'affaiblissement de propagation et l'affaiblissement en espace libre (gaz, hydrométores, végétation, par diffraction, par transmission,)

Variabilité



- ▶ **L'environnement radio mobile est fluctuant :**
 - ▶ Passage de véhicules et de personnes,
 - ▶ Ouverture de portes, ...
 - ▶ Le vent dans les arbres, ...
- ▶ **Fluctuations des trajets radioélectriques**
- ▶ **Génération de variations rapides du signal**
- ▶ **Combinés avec le mouvement du mobile, ces phénomènes créent une variabilité du canal de propagation**
 - ▶ Dans l'espace
 - ▶ Dans le temps

Variabilité



- ▶ Les variations du signal sont de nature aléatoire
- ▶ Une analyse statistique permettra d'évaluer l'impact des trajets multiples sur la transmission des systèmes radiomobiles
 - ▶ Loi du champ reçu,
 - ▶ Le temps moyen des évanouissements

Variabilité (loi de Rayleigh)



- ▶ Si l'on suppose que le mobile se déplace dans une figure d'interférences générée par la superposition d'un grand nombre d'ondes planes d'amplitudes, de phases et directions d'arrivée aléatoires, la puissance reçue suit une loi de Rayleigh (fading de Rayleigh)
- ▶ La densité de probabilité:

$$f_R(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), \quad x \geq 0 \quad f_R(x) = 0, \quad x < 0$$

- ▶ Le paramètre $(\sigma)^2$ représente la puissance moyenne

Variabilité (Rice)



- ▶ Dans le cas d'un trajet prédominant la puissance reçue suit une loi de Rice

- ▶ Visibilité
- ▶ Banlieue
- ▶ Milieu rural

- ▶ La densité de probabilité

$$f_R(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + r^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{xr}{\sigma^2}\right), \quad x \geq 0 \quad f_R(x) = 0, \quad x < 0$$

où I_0 est la fonction de Bessel modifiée de 1^{ière} espèce et d'ordre 0.

- ▶ Le fading de Rice est caractérisé par « r » et « sigma »
- ▶ $r=0$ (absence de trajets directs) : Rayleigh

Variabilité (RICE)



- ▶ Le fading de Rice (prédominance d'un trajet direct) est également caractérisé par le coefficient K (paramètre de Rice)

$$K = 10 \log\left(\frac{r^2}{2\sigma^2}\right)$$

- ▶ Le paramètre K représente le rapport entre la puissance du trajet direct et la contribution des trajets secondaires obéissant à une loi de Rayleigh
- ▶ Autres lois:
 - ▶ Weibull
 - ▶ Nakagami

Variabilité (autres paramètres)



- ▶ **La probabilité de descendre au-dessous d'un certain niveau**
 - ▶ Quand la puissance du signal est inférieure au seuil de bruit toléré par le récepteur (bruit thermique, brouillage, parasite industriels, etc.) le signal est masqué par le bruit
- ▶ **La durée statistique d'un évanouissement**
 - ▶ Durant l'évanouissement les paquets d'informations sont perdus
 - ▶ Les temps de coupure sont d'autant plus longs que le mobile se déplace lentement.

Variabilité due au mouvement



- ▶ **Caractérisée par le spectre Doppler**
- ▶ **Une raie de fréquence pure à l'émission subit un élargissement proportionnellement à la vitesse du mobile**

Le spectre Doppler est réparti sur l'intervalle fréquentiel $[f_0 - f_d, f_0 + f_d]$ où f_0 est la fréquence émise et f_d est la fréquence Doppler maximale donnée par la relation :

$$f_d = f_0 \frac{v}{c}$$

où:

v est la vitesse du mobile

c la vitesse de l'onde électromagnétique.

- ▶ **L'inverse de la largeur du spectre Doppler (la dispersion Doppler) est appelé temps de cohérence (temps pendant lequel un récepteur en mouvement ne percevrait pas la variabilité du canal)**

Sélectivité en fréquence



- ▶ Lorsque les différences de temps de parcours des trajets multiples sont importants, la fonction de transfert n'est plus constante sur toute la largeur du spectre
 - L'affaiblissement de propagation dépend de la fréquence
 - Le canal est dit sélectif en fréquence
- ▶ Nécessité de modéliser le canal en large bande afin d'évaluer:
 - les performances d'une chaîne complète de transmission,
 - concevoir les nouveaux systèmes
 - Assurer la qualité de transmission de signaux numériques

Réponse impulsionnelle



- ▶ Le canal de propagation est représenté par sa réponse impulsionnelle variable dans le temps:

$$h(t, \tau)$$

- ▶ Fonction de deux variables, elle traduit les trois caractéristiques du canal:
 - L'affaiblissement
 - La variabilité (t)
 - La sélectivité (« tau »)
- ▶ Les variables duales par transformée de Fourier de «tau» et de t sont respectivement la fréquence et la vitesse doppler.

Les différentes représentations du canal radiomobile

