

Les ondes électromagnétiques (1)

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

Généralités



- Les paramètres caractéristiques

- Le champ électrique \vec{E}
- Le champ magnétique \vec{H}
- L'induction électrique \vec{D}
- L'induction magnétique \vec{B}

- Seuls les vecteurs \vec{E} et \vec{B} produisent des actions par lesquelles il est possible de mesurer le champ EM

- Les vecteurs \vec{D} et \vec{B} sont reliés aux vecteurs \vec{E} et \vec{H}

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E}$$
$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$$

- La permittivité ϵ
- La perméabilité du milieu μ

Généralités



▶ Dans le vide, nous avons:

$$\epsilon_0 = 10^{-9} / 36\pi = 8.842 * 10^{-12} \text{ (Farad par mètre);}$$

$$\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \text{ (Henry par mètre)}$$

▶ Dans un milieu matériel

$$\epsilon = \epsilon_0 * \epsilon_r$$

$$\mu = \mu_0 * \mu_r$$

▶ L'indice de réfraction

$$n = \sqrt{\epsilon \mu}$$

Les équations de maxwell



▶ Les paramètres sont reliés entre eux par les équations de Maxwell:

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} + \partial \vec{D} / \partial t$$

$$\text{rot } \vec{E} = - \partial \vec{B} / \partial t$$

$$\text{div } \vec{D} = \rho \text{ ou } \rho \text{ est la densité de charge libre}$$

$$\text{div } \vec{B} = 0$$

▶ Ecrites par Maxwell, elles rendent compte des résultats expérimentaux obtenus par :

- Ampère
- Faraday

Solutions des équations de Maxwell



- ▶ La résolution de ces équations nous amène à l'équation d'ondes de HELMOLTZ pour chacun des vecteurs

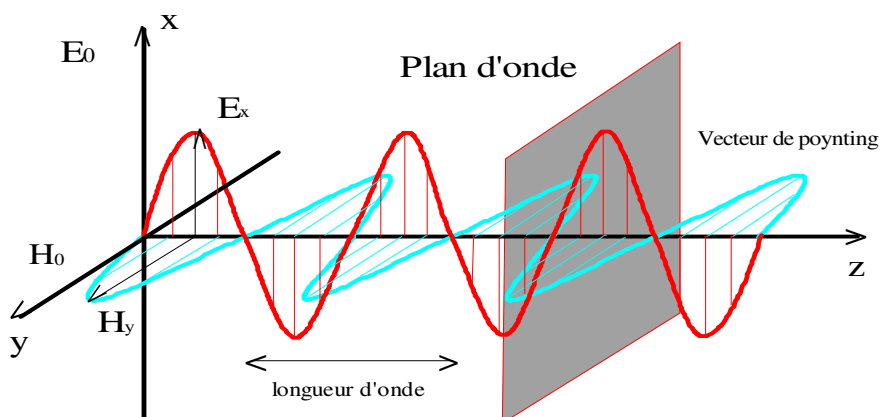
$$(\Delta - \epsilon\mu\partial^2/\partial t^2) \vec{E} = 0$$

où Δ est l'opérateur Laplacien : grad(div) - rot (rot)

- ▶ Une solution s'écrit sous la forme

$$E = E_0 \exp[j(\omega t - kz)]$$

Représentation schématique



Caractéristiques de l'onde



- ▶ La longueur d'onde
- ▶ La fréquence
- ▶ La vitesse de propagation
- ▶ L'impédance caractéristique du milieu de propagation
- ▶ Le vecteur de Pointing
- ▶ La polarisation, la transpolarisation
- ▶ L'effet doppler

Longueur d'onde; fréquence, Période



- ▶ La longueur d'onde : distance pour laquelle la phase de l'onde varie de 2 Pi
- ▶ La fréquence ; reliée à la longueur d'onde:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{\epsilon\mu}} = vT$$

- f est la fréquence de l'onde en Hertz,
- ω est la pulsation,
- T est la période.

Caractéristiques de l'onde



Vitesse de l'onde

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$$

Pour le vide :

$$\frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} = c = 3.10^8 \text{ m/s} \text{ où } c \text{ est la vitesse de la lumière.}$$

Caractéristiques de l'onde



► Impédance d'onde (impédance caractéristique du milieu de propagation)

Le rapport de l'amplitude du champ électrique à l'amplitude du champ magnétique :

$$E_x/H_y = (\mu/\epsilon)^{1/2} = Z_c$$

On vérifie que ce rapport a les dimensions physiques d'une résistance électrique. On l'appelle l'impédance caractéristique du milieu de propagation.

Pour le vide sa valeur est :

$$Z_0 = (\mu_0/\epsilon_0)^{1/2} = 377 \text{ ohms}$$

Caractéristiques de l'onde



▶ Le vecteur de Pointing

Mesuré en Watts par mètre carré (W/m^2), il décrit l'amplitude et la direction du flux de puissance transportée par l'onde par mètre carré de surface parallèle au plan (x, y), c'est à dire la densité de puissance. Sa valeur instantanée est donnée par la relation :

$$P = E \times H$$

Sa valeur moyenne sur une période, représentant la puissance réelle transportée par l'onde, est généralement utilisée. Elle est donnée par la relation :

$$P_{\text{moyen}} = \frac{E_0 \cdot H_0}{2}$$

Caractéristiques de l'onde



▶ L'indice de réfraction (1/2)

$$n = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$$

Il en résulte que la vitesse de propagation est égale à :

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \mu_r}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \times \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} = \frac{c}{n}$$

Dans un milieu absorbant l'indice de réfraction peut s'écrire sous forme complexe :

$$n = n' - in''$$

Caractéristiques de l'onde



▶ L'indice de réfraction (1/2)

Le champ de l'onde devient :

$$\begin{aligned}E &= E_0 \exp[j(\omega t - n k_0 z)] \\E &= E_0 \exp[j(\omega t - (n' - j n'') k_0 z)] \\E &= E_0 \exp(-n'' z) \exp[j(\omega t - n' k_0 z)]\end{aligned}$$

Le terme $\exp(-n'' z)$ représente l'affaiblissement subi par l'onde à la traversée du milieu de propagation. La partie imaginaire de l'indice de réfraction représente le coefficient d'affaiblissement de l'onde (α en m^{-1}). Il dépend de la permittivité, de la perméabilité et de la conductivité (Sm^{-1} ou $(\Omega\text{m})^{-1}$) du milieu ainsi que de la fréquence de l'onde. Les paramètres diélectriques tels que permittivité, perméabilité et conductivité caractérisent les milieux de propagation, les matériaux.

La polarisation de l'onde



▶ Onde EM: 2 composantes orthogonales actives (vecteurs E et H) en phase dans le temps et dans l'espace

▶ Le plan de polarisation

- direction de propagation Oz et celle du champ E (Ox)
- Onde polarisée verticalement (cf figure précédente)

▶ La polarisation

- Découle de la façon dont elle a été générée
 - Verticale
 - Horizontale

La polarisation de l'onde



Les équations de MAXWELL étant linéaires, nous pouvons combiner linéairement plusieurs ondes électromagnétiques transverses entre elles :

$$E_x = E_1 e^{j(\omega t - \beta z)}$$

$$E_y = E_2 e^{j(\omega t - \beta z + \psi)}$$

où :

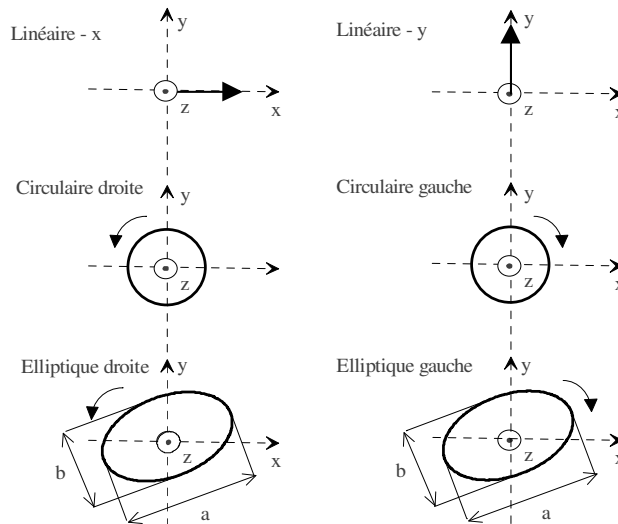
$$- \beta = \omega/v = 2\pi f/c\lambda$$

- ψ représente un déphasage de la seconde onde par rapport à la première.

Dans un plan d'onde donné (par exemple $z=0$), l'extrémité du champ électrique résultant $\vec{E} = \vec{E}_x + \vec{E}_y$ va décrire une ellipse

Lorsque $E_1=E_2$ et si $\psi = \pi/2$, l'ellipse se transforme en un cercle et l'onde devient polarisée circulairement. Suivant le sens de rotation de \vec{E} la polarisation peut être circulaire gauche (lévogyre) ou droite (dextrogyre).

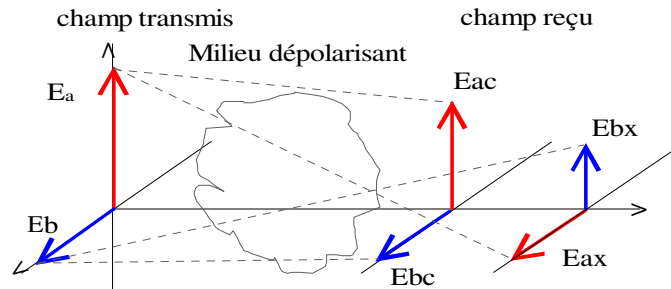
La polarisation de l'onde



La transpolarisation



- ▶ **Apparition au cours de la propagation d'une composante orthogonale (composante contrapolaire) à la polarisation initiale (composante copolaire)**



La transpolarisation



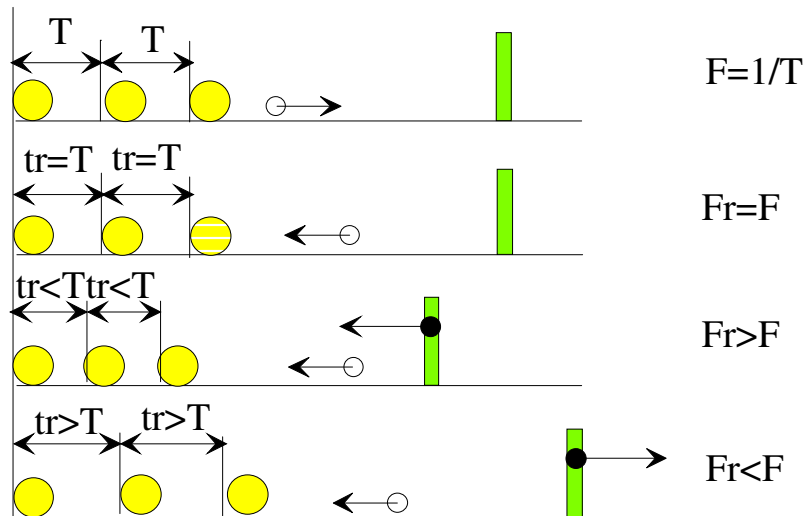
- ▶ **Plusieurs origines possibles**
 - Pluie ou hydrométéores dans la troposphère
 - La propagation par trajets multiples
 - La scintillation troposphérique ou ionosphérique
- ▶ **La discrimination de polarisation (rapport de découplage) : XPD**
 - $XPD = 20 \log (E_{ac}/E_{ax})$
 - Exprime combien une onde se retrouve sur la polar orthogonale
- ▶ **L'isolation de polarisation: XPI**
 - $XPI = 20 \log(E_{ac}/E_{bx})$
 - Rapport de la puissance copolaire à la puissance contrapolaire quand les 2 polar sont émises

L'effet doppler



- ▶ Variation apparente de la fréquence causée par le déplacement de la source (système émetteur) ou de l'observateur (système récepteur)
- ▶ Se traduit pour celui-ci par une modification de la fréquence perçue
 - Son plus aigu quand celui-ci s'approche
 - Plus grave quand celui-ci s'éloigne
- ▶ Mis à profit pour mesurer la vitesse des mobiles
 - Cinémomètre Doppler
 - Anémomètre Doppler à laser

L'effet doppler



L'effet doppler

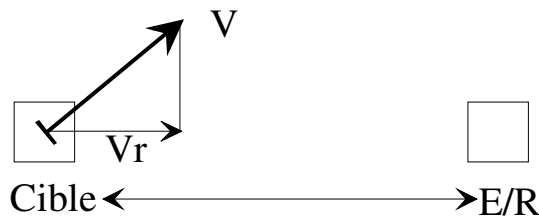


Mode aller simple



$$\Delta f/f = V/c$$

Mode aller-retour (mode radar)



$$\Delta f/f = 2Vr/c$$

Le spectre des fréquences



Fréquence											
300 Hz		3 kHz		30 kHz		300 KHz		3 MHz		30 MHz	
	ELF		VLF		LF		MF		HF		VHF
1000 km		100 km		10 km		1 km		100 m		10 m	
Longueur d'onde											

Fréquence							
300 MHz		3 GHz		30 GHz		300 GHz	
	UHF		SHF		EHF		Sub-EHF
1m		10 cm		1 cm		1 mm	
							0,1 mm

Ondes ELF (300 Hz -3 kHz); (1000 km-100km) : ondes sub-myriamétriques

- ▶ **Influence atmosphérique:**
 - L'ionosphère forme la limite supérieure du guide d'onde de propag.
- ▶ **Influence terrestre**
 - La surface de la Terre forme la limite inférieure du guide d'onde
- ▶ **Considération système**
 - Nécessité d'antennes très longues
 - Débit d'information très lent
 - Sensibilité au bruit (antenne, atmosphériques (décharges orageuses lointaines et décharges électriques de proximité)
- ▶ **Services**
 - Communications sous marines
 - Communications souterraines
 - Télédétection interne du sous-sol terrestre

Ondes VLF (3 kHz -30 kHz); (100 km-10km): ondes myriamétriques

- ▶ **Influence atmosphérique:**
 - La région D: la limite supérieure du guide d'onde de propag.
- ▶ **Influence terrestre**
 - La surface de la Terre forme la limite inférieure du guide d'onde
- ▶ **Considération système**
 - Nécessité d'antennes très longues
 - Difficulté de construire des antennes directives
 - Débit d'information très lent
- ▶ **Services**
 - Télégraphie maritime mondiale
 - Communications sous marines
 - Communications souterraines
 - Système de navigation (OMEGA)
 - Télédétection interne du sous-sol terrestre

Ondes LF (30 kHz -300 kHz); (10 km-1km): ondes kilométriques



- ▶ **Influence atmosphérique:**
 - Onde de ciel dans le guide Terre-région D
 - Onde de sol et onde de sol aux fréquences > à 100 kHz
- ▶ **Influence terrestre**
 - Onde de sol subit l'influence de la courbure terrestre
- ▶ **Considération système**
 - Nécessité d'élever les antennes très longues
 - Difficulté de construire des antennes directives
- ▶ **Services**
 - Communications maritime longue distance
 - Services fixes sur de grandes distances
 - Radio diffusion
 - Radio navigation

Ondes MF (300 kHz -3 MHz); (1 km-100m): ondes hectométriques



- ▶ **Influence atmosphérique:**
 - Onde de ciel pour les longues distances et les fréq. les + élevées
 - Onde de sol pour les courtes distances et les fréq. les + basses
- ▶ **Influence terrestre**
 - Réflexion de l'onde sur le sol
- ▶ **Considération système**
 - Possibilité d'utiliser des antennes directives
- ▶ **Services**
 - Radio diffusion
 - Radio navigation
 - Communications mobiles (terrestre, maritime, aéronautique)
 - Services fixes

Ondes HF (3 MHz -30 MHz); (100 m-10m): ondes décamétriques



- ▶ **Influence atmosphérique:**
 - Onde de ciel pour les longues distances et les fréq. les + élevées
 - Onde de sol pour les courtes distances et les fréq. les + basses
- ▶ **Influence terrestre**
 - Réflexion et diffusion
- ▶ **Considération système**
 - Utilisation d'antenne fouet verticale
 - Utilisation d'antenne dipôle horizontal
 - Utilisation de réseau d'antenne Log-périodique
- ▶ **Services**
 - Radio diffusion
 - Communications mobiles (terrestre, maritime, aéronautique)
 - Services fixes point à point

Ondes VHF (30 MHz -300 MHz); (10 m-1m): ondes métriques



- ▶ **Influence atmosphérique:**
 - Réfraction et réflexion dues à des irrégularités de l'indice de réfraction (liaisons transhorizons)
 - Diffusion ionosphérique (liaison transhorizon)
 - Rotation Faraday et scintillation ionosphériques sur liaisons Terre-Espace
- ▶ **Influence terrestre**
 - Effets de masque (collines, montagnes)
 - Diffraction à l'intérieur des vallées
 - Réflexions sur les lacs, la mer et les terrains plats favorisant les trajets multiples
- ▶ **Considération système**
 - Utilisation d'antennes dipôle multi-éléments
 - Utilisation d'antennes hélice,...
- ▶ **Services**
 - Radio diffusion (jusqu'à 100 km)
 - Communications mobiles (terrestre, maritime, aéronautique)
 - Téléphone mobile

Ondes UHF (300 MHz -3 GHz); (1 m-10 cm): ondes décimétriques



- ▶ **Influence atmosphérique:**
 - Réfraction et réflexion sur les couches atmosphériques
 - Effets de conduit
 - Fluctuation de l'indice de réfraction
- ▶ **Influence terrestre**
 - Effets de masque (collines, bâtiments)
- ▶ **Considération système**
 - Utilisation d'antennes dipôle multi-éléments
 - Utilisation possible de systèmes large bande
 - Utilisateur d'antenne à réflecteur aux fréquences les plus élevées
- ▶ **Services**
 - Télévision
 - Services fixes point à point
 - Communications avec les mobiles
 - Communications cellulaires

France Télécom R&D

La communication de ce document est soumise à autorisation de France Télécom R&D
D29 - 01/04/2004

Ondes SHF (3 GHz -30 GHz); (10 cm-1 cm): ondes centimétriques (1/2)



- ▶ **Influence atmosphérique:**
 - Affaiblissement par les hydrométéores (pluie, neige, grêle)
 - Réfraction
 - Effets de conduit
 - Scintillation due de l'indice de réfraction
- ▶ **Influence terrestre**
 - Diffraction par les bâtiments
 - Effets de masque (bâtiments, ...)
 - Réflexion et diffusion par l'environnement (bâtiments, arbres,)
- ▶ **Considération système**
 - Utilisation d'antennes paraboliques ou cornet
 - Utilisation de guide d'ondes
 - Possibilité d'utiliser plusieurs canaux sur chaque porteuse

France Télécom R&D

La communication de ce document est soumise à autorisation de France Télécom R&D
D30 - 01/04/2004

Ondes SHF (3 GHz -30 GHz); (10 cm-1 cm): ondes centimétriques (2/2)

Services

- Services fixes (son, télévision multicanaux)
- Radar
- Liaisons Terre-satellite fixe
- Télémétrie satellitaire

Ondes EHF (30 GHz -300 GHz); (10 mm - 1mm): ondes millimétriques

Influence atmosphérique:

- Affaiblissement important par les hydrométéores (pluie, neige, grêle)
- Affaiblissement par les nuages, la brume, la poussière, la fumée
- Diffusion par les hydrométéores (pluie, neige, grêle)
- Scintillations dues à des fluctuations de l'indice de réfraction
- Affaiblissement par l'oxygène et la vapeur d'eau

Influence terrestre

- Effets de masque (bâtiments, arbres)

Considération système

- Utilisation de petite antennes parabolique

Services

- Communications de proximité en visibilité
- Télédétection par satellite

Ondes sub-EHF (300 GHz -3000 GHz); (1 mm – 0,1mm): ondes sub-millimétriques



- ▶ **Influence atmosphérique:**
 - Affaiblissement important par les météores (pluie, neige, grêle, nuages,)
 - Affaiblissement par les nuages, la brume, la poussière, la fumée
 - Scintillations dues à des fluctuations de l'indice de réfraction
 - Affaiblissement par l'oxygène et la vapeur d'eau
- ▶ **Influence terrestre**
 - Effets de masque (arbres)
- ▶ **Considération système**
 - Utilisation d'antennes à réflecteur ou à lentille
- ▶ **Services**
 - Communications à courte portée en visibilité
 - Télédétection

France Télécom R&D

La communication de ce document est soumise à autorisation de France Télécom R&D
D33 - 01/04/2004

Ondes infrarouges et lumineuses



- ▶ **Influence atmosphérique:**
 - Affaiblissement important par les météores (pluie, neige, grêle, nuages,)
 - Affaiblissement par les nuages, la brume, la poussière, la fumée
 - Scintillations dues à des fluctuations de l'indice de réfraction
 - Affaiblissement par l'oxygène et la vapeur d'eau
- ▶ **Influence terrestre**
 - Effets de masque (objets de petites dimensions)
- ▶ **Considération système**
 - Utilisation d'antennes à réflecteur ou à lentille
 - Utilisateur de laser
- ▶ **Services**
 - Communications à courte portée
 - Communications « indoor »

France Télécom R&D

La communication de ce document est soumise à autorisation de France Télécom R&D
D34 - 01/04/2004

Bandes satellites

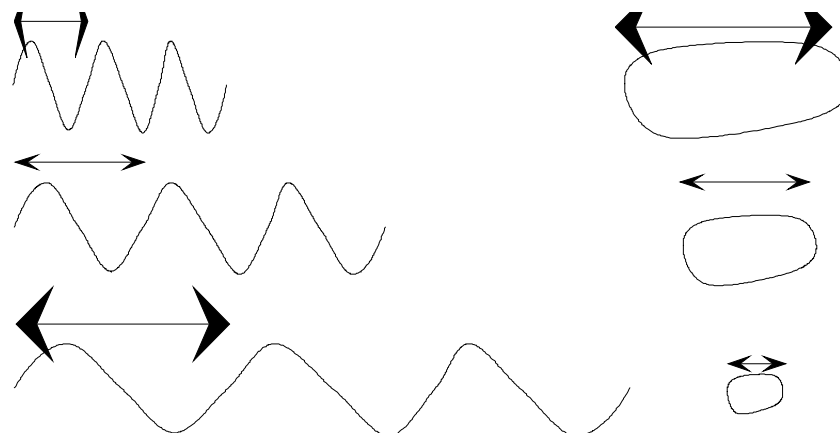


Bande de fréquence	Fréquences (montante/descendante)	Exemple de service
L	1.6/1.5 GHz	Communications mobiles (INMARSAT, IRIIDIUM)
S	2 /2.4 GHz	Communications mobiles (ICO Global)
C	6/4 GHz	PSTN, Video (INTELSAT, ANIK, US Domestic, PALAPA)
X	8/7 GHz	Communications militaires (SKYNET)
Ku	14/11 et 14/12 GHz	PSTN, video (INTELSAT, EUTELSAT) (ASTRA)
Ka	30/20 GHz	Multimédia (TELEDESIC)
	44/20 GHz	Communications militaires (MILSTAR, SKYNET IV)
V	48/47 GHz	Multimédia (Plateforme de haute altitude)
	40/50 GHz	Multimédia (PANAMSAT)

France Télécom R&D

La communication de ce document est soumise à autorisation de France Télécom R&D
D35 - 01/04/2004

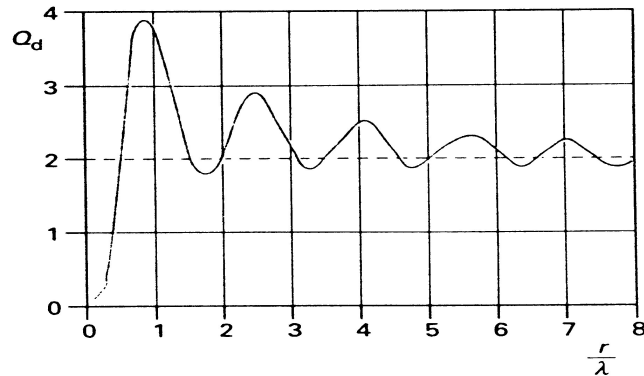
Rôle de la fréquence, de la longueur d'onde



France Télécom R&D

La communication de ce document est soumise à autorisation de France Télécom R&D
D35 - 01/04/2004

Rôle de la fréquence, de la longueur d'onde: section efficace de rétrodiffusion



Rôle de la fréquence, de la longueur d'onde



▶ **Paramètre caractéristique** : taille de l'irrégularité/longueur d'onde

- ▶ $\ll 1$: application des méthodes statistiques
- ▶ $\#1$: zone de résonance (les approximations ne sont pas applicables)
- ▶ $\gg 1$: zone application des méthodes asymptotiques basées sur l'optique et la théorie des rayons.