

Introduction aux microondes (hyperfréquences) et aux antennes

Anja Skrivervik
anja.skrivervik@epfl.ch, 021 693 4635

Contenu du cours

- Introduction et applications
- Propagation guidée (lignes de transmission généralisées)
- Théorie des circuits microondes
- Introduction aux composants distribués
- Introduction aux Antennes
- Systèmes de transmission

Forme du cours

- ex cathedra
- Exercices
- Sessions de simulation numérique
- Notes de cours, exercices, corrigés et slides accessibles sur Moodle
- Examen: écrit, lors de la session de janvier. Un examen à blanc aura lieu lors de la dernière semaine du cours, le lundi 15 décembre

Informations pratiques

- Cours: lundi de 08:15-10:00
- Exercices: lundi de 10:15-11:00
- Informations: anja.skrivervik@epfl.ch / 34635
- Assistants: Jiajun Li et Behnaz Bakhtiari
- Sessions de simulation numérique en salle ELG022

Apperçu historique

- 1872 Publication de "a treatise on electricity and magnetism" par James Clerk Maxwell
- 1887 Publication des commentaires de Oliver Heaviside's sur le travail de Maxwell
- 1887 Lord Rayleigh prouve théoriquement le concept des guides d'ondes
- 1891 Vérification expérimentale de la théorie de Maxwell par Heinrich Hertz
- 1901 Premier lien sans fils transatlantique par Guglielmo Marconi
- 1903 Service régulier de télégraphe sans fils
- 1918 Premiers générateurs à tube
- 1920 Première utilisation du changement de fréquences (hétérodynage) dans les émetteurs et les récepteurs
- 1921 Premier lien transatlantique en ondes moyennes
- 1938 Premier téléphone portable (Motorola)

Apperçu historique

- 1936 Redécouverte simultanée des guides d'ondes par G.C. Southworth et W.L. Barrow
- 1938-1945 : Recherche intensive sur les RADAR
- 1948 Théorie des filtres distribués par Richards
- 1950 Premiers filtres à cavité
- 1950 Introductions des lignes de transmission planaires (stripline, puis microstrip)
- 1950 Apparition des amplificateurs TWT
- 1951 Apparition des premiers transistors microonde
- 1970 Premiers MMICs
- 1971 Premiers outils de CAD

Apperçu historique

1990: Début de la téléphonie mobile digitale (2G)

1990-2000 : Boom de la téléphonie mobile

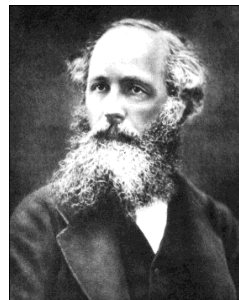
2000-2010: début de l'Internet of Things

2007: Premiers smartphones

Equation de Maxwell
(style télécom)

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}$$



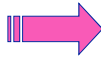
Des courants électrique variant Dans l'espace et le temps
agissant dans un milieu spécifique crée
des ondes électromagnétiques

Maxwell - Heaviside

$$\left. \begin{aligned} \frac{dQ}{dz} - \frac{dR}{dy} &= \mu \frac{d\alpha}{dt} \\ \frac{dP}{dy} - \frac{dQ}{dx} &= \mu \frac{d\gamma}{dt} \\ \frac{dR}{dx} - \frac{dP}{dz} &= \mu \frac{d\beta}{dt} \end{aligned} \right\} \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

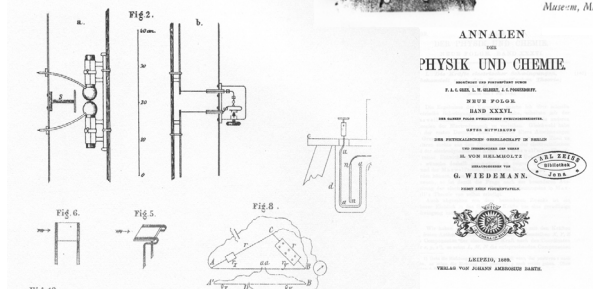
$$\left. \begin{aligned} p &= \frac{1}{4\pi} \left(\frac{d\gamma}{dy} - \frac{d\beta}{dz} - \frac{1}{\epsilon^2} \frac{dP}{dt} \right) \\ q &= \frac{1}{4\pi} \left(\frac{d\alpha}{dz} - \frac{d\gamma}{dx} - \frac{1}{\epsilon^2} \frac{dQ}{dt} \right) \\ r &= \frac{1}{4\pi} \left(\frac{d\beta}{dx} - \frac{d\alpha}{dy} - \frac{1}{\epsilon^2} \frac{dR}{dt} \right) \end{aligned} \right\} \nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J}$$

De Maxwell (1865) à Hertz (1888)

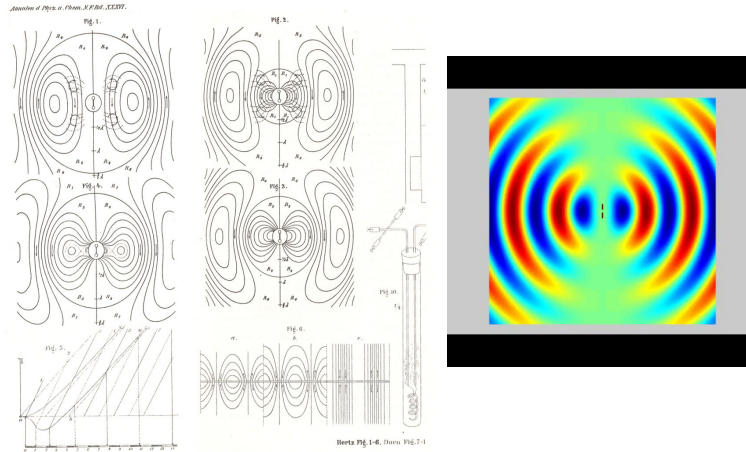


H. Hertz

Heinrich Hertz (1857-1894).
(Photograph courtesy of Deutsches
Museum, Munich.)



Dipôle de Hertz



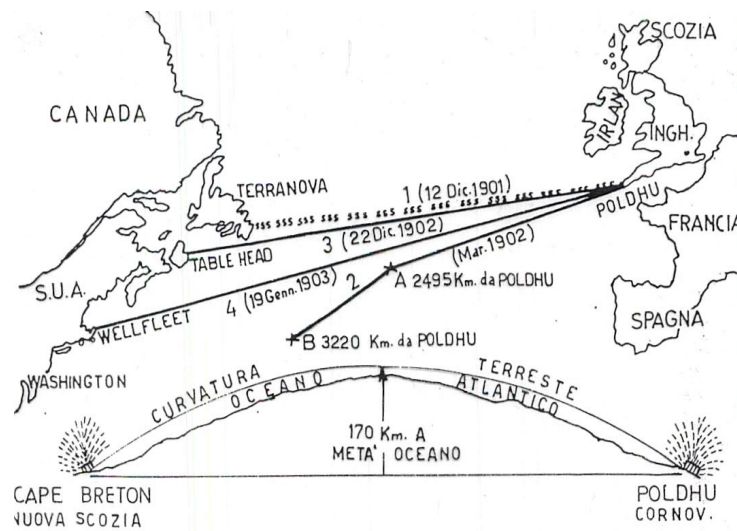
Apperçu historique

- 1872 Publication de "a treatise on electricity and magnetism" par James Clerk Maxwell
- 1887 Publication des commentaires de Oliver Heaviside's sur le travail de Maxwell
- 1887 Lord Rayleigh prouve théoriquement le concept des guides d'ondes
- 1891 Vérification expérimentale de la théorie de Maxwell par Heinrich Hertz
- 1901 Premier lien sans fils transatlantique par Guglielmo Marconi
- 1903 Service régulier de télégraphe sans fils
- 1918 Premiers générateurs à tube
- 1920 Première utilisation du changement de fréquences (hétérodynage) dans les émetteurs et les récepteurs
- 1921 Premier lien transatlantique en ondes moyennes
- 1938 Premier téléphone portable (Motorola)

Un pionnier : Marconi



MAG-EPFL 13



Premières transmissions transatlantiques: 1901-1903

1- Poldhu St. John 12 décembre 1901 3400 km

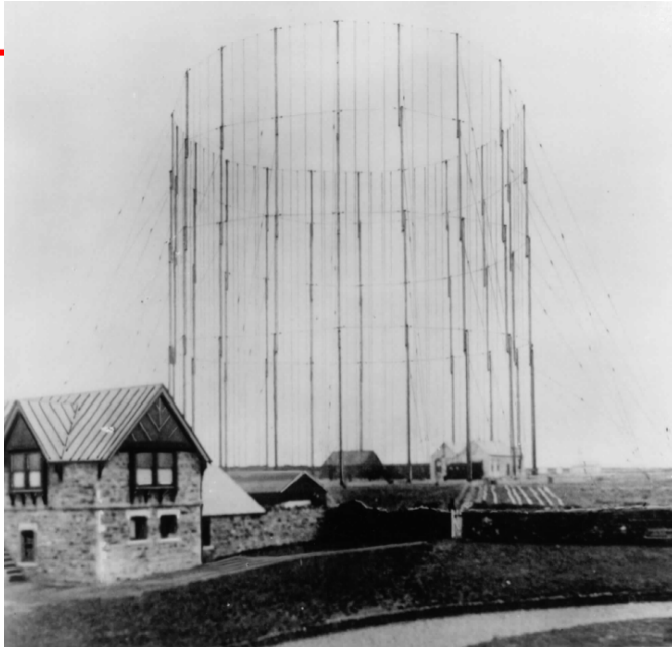
2- Poldhu - Philadelphia (bateau) Mars 1902 découverte de l'effet de nuit

3- Activation du lien Glace Bay Poldhu 22 December 1902

4- Activation du lien Cape Cod Poldhu 19 January 1903

MAG-EPFL 14

EPFL

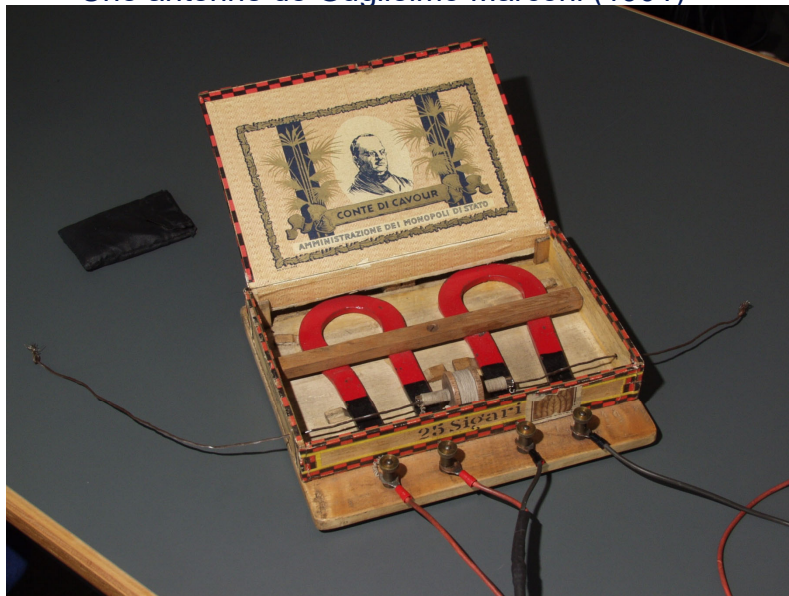


Photographie de l'antenne conique originale installée à Poldhu, Cornwall (d'après **BAE Systems Marconi Research Centre, Chelmsford, Essex**)

MAG-EPFL 15

EPFL

Une antenne de Guglielmo Marconi (1901)

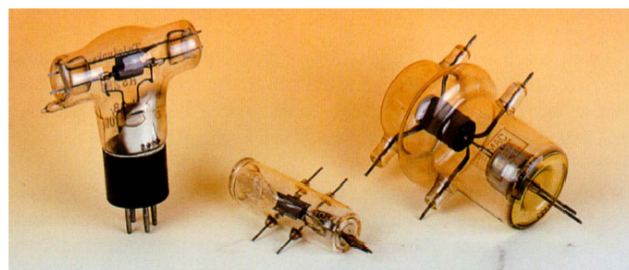
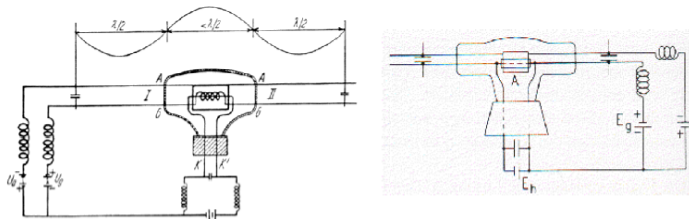


MAG-EPFL 16

Apperçu historique

- 1872 Publication de "a treatise on electricity and magnetism" par James Clerk Maxwell
- 1887 Publication des commentaires de Oliver Heaviside's sur le travail de Maxwell
- 1887 Lord Rayleigh prouve théoriquement le concept des guides d'ondes
- 1891 Vérification expérimentale de la théorie de Maxwell par Heinrich Hertz
- 1901 Premier lien sans fils transatlantique par Guglielmo Marconi
- 1903 Service régulier de télégraphe sans fils
- 1918 Premiers générateurs à tube
- 1920 Première utilisation du changement de fréquences (hétérodynage) dans les émetteurs et les récepteurs
- 1921 Premier lien transatlantique en ondes moyennes
- 1938 Premier téléphone portable (Motorola)

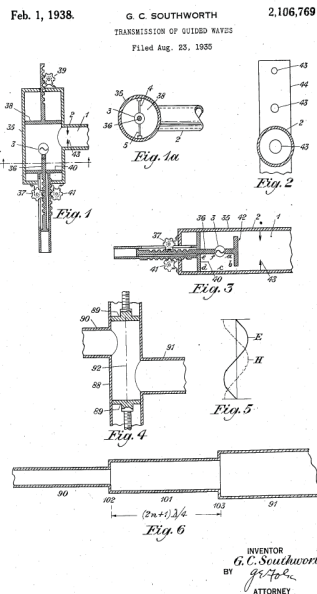
Tubes microondes



Tube à champ retardé RS296 et son circuit(Kühle 1932 at Telefunken)
 "Hammer Tube" [8, 11]. La photo montre aussi les tubes à champ retardé 8012 de RCA (centre) et VT 127 A de Eimac (droite)

Apperçu historique

- 1936 Redécouverte simultanée des guides d'ondes par G.C. Southworth et W.L. Barrow
- 1938-1945 : Recherche intensive sur les RADAR
- 1948 Théorie des filtres distribués par Richards
- 1950 Premiers filtres à cavité
- 1950 Introductions des lignes de transmission planaires (stripline, puis microstrip)
- 1950 Apparition des amplificateurs TWT
- 1951 Apparition des premiers transistors microonde
- 1970 Premiers MMICs
- 1971 Premiers outils de CAD

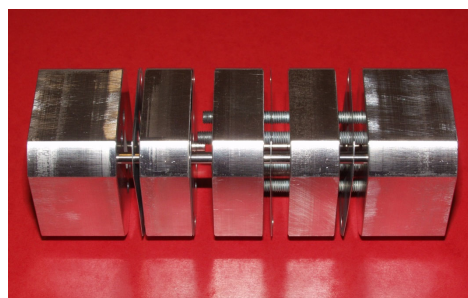


1st page du brevet
de Southworth

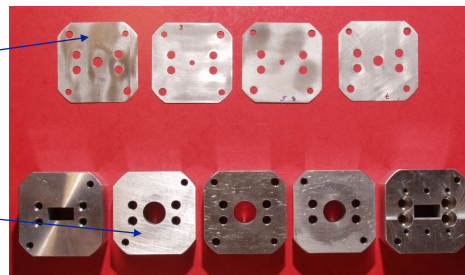
Exemple d'un filter distribué:
LPF réalisé en technologie microruban



Filtre à cavités
(vue explosée)

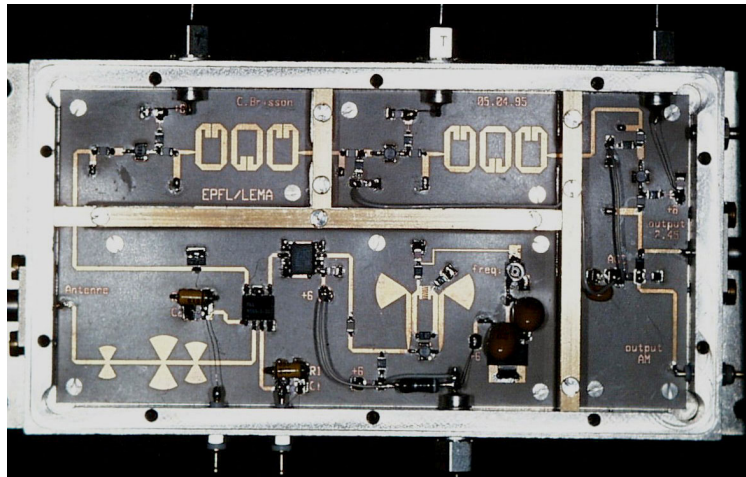


iris



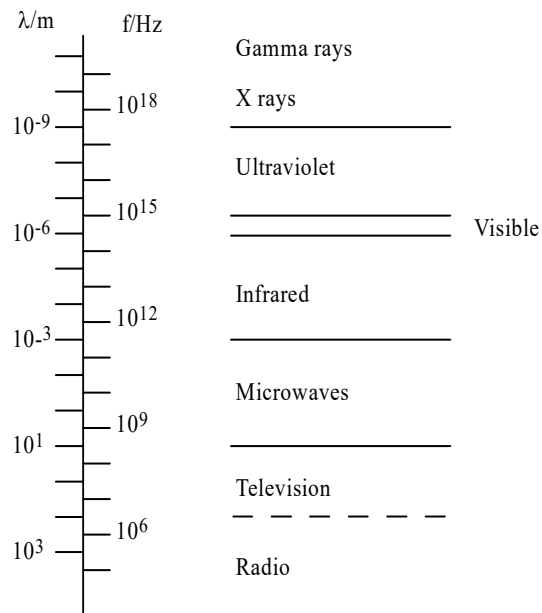
Sections de guide

exemple de circuit microruban: émetteur récepteur complet à 2.45 GHz



Définition des microondes

Fréquence (f)	300 MHz-300 GHz
Période (T)	3 ns - 3 ps
Longueur d'onde (λ)	1 m - 1 mm
Energie (hf)	$1.2 \cdot 10^{-6} \text{eV} - 1.2 \cdot 10^{-3} \text{eV}$



Band	Frequenc y
L	1-2 GHz
S	2-4 GHz
C	4-8 GHz
X	8-12 GHz
Ku	12-18 GHz
K	18-26 GHz
Ka	26-40 GHz
Q	40-60 GHz
E	60-90 GHz

Propriétés des microondes

- Bande basse
- 1% de 10 GHz = 100 MHz, mais 1% of 100 MHz = 1MHz
- Transparence de la ionosphère
 - Satellites

Ionosphère

4 couches: D, E, F1, F2
altitude: environ 70-800 km

$$\epsilon_e = \epsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right) \qquad \omega_p = \sqrt{\frac{Nq^2}{m\epsilon_0}}$$

N : nombre de ions/volume

q : charge de l'électron

m : masse de l'électron

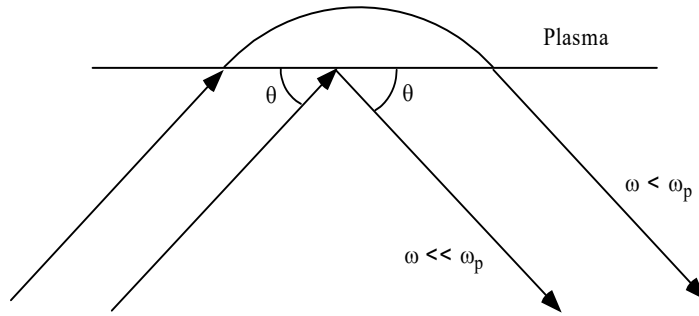
$\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ As/Vm : permittivité de l'espace libre.

Ionosphère

$\omega \ll \omega_p$

$\epsilon_e \rightarrow -\infty$

$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \rightarrow j0$

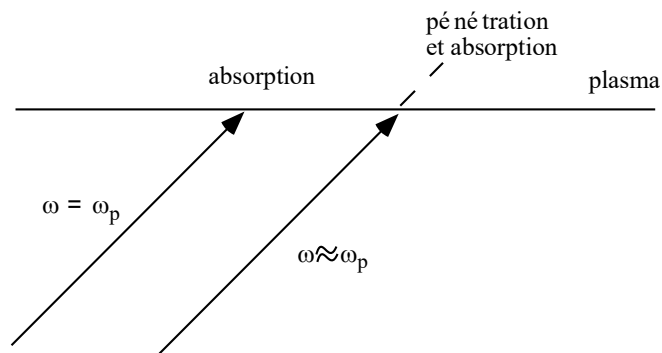


Ionosphère

$\omega = \omega_p$

$\epsilon_e \rightarrow 0$

$k = \omega\sqrt{\epsilon\mu} = 0$

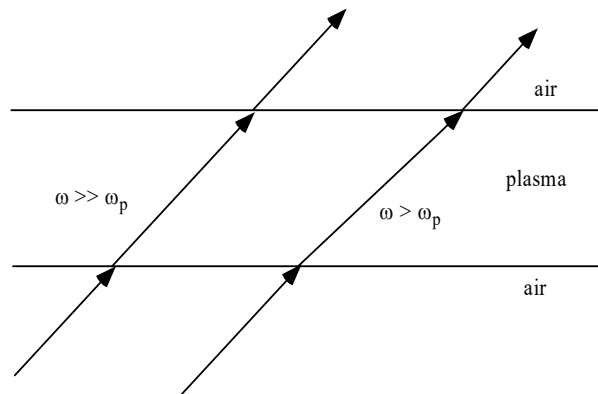


Ionosphere

$$\omega \gg \omega_p$$

$$\epsilon_e \rightarrow 1$$

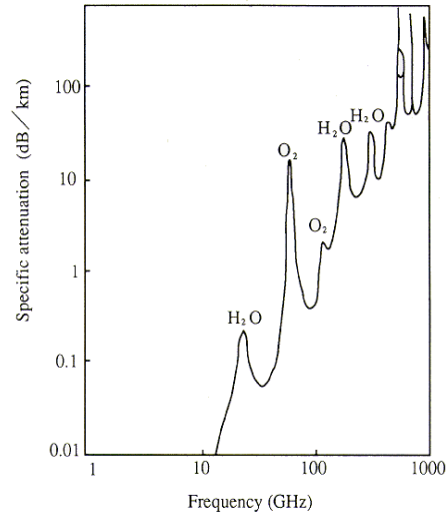
$$k = \omega \sqrt{\epsilon \mu} = k_o$$



Propriétés des microondes

- Transparence de l'atmosphère jusqu'à 10 GHz
- Minimum de bruit électromagnétique entre 1 et 10 GHz, amplificateurs bas bruit

Atmosphère

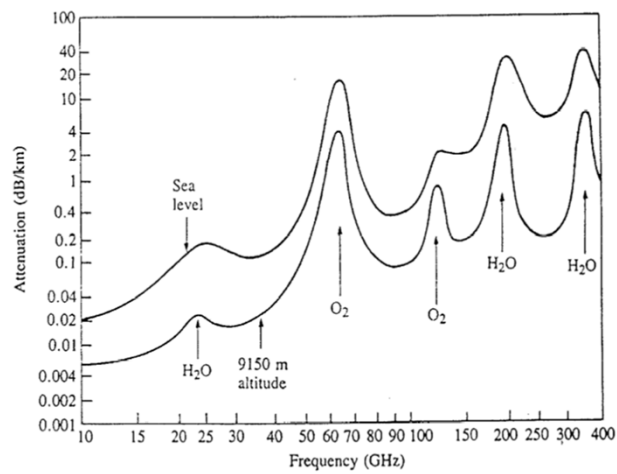


Utilisation stratégique de l'absorption!

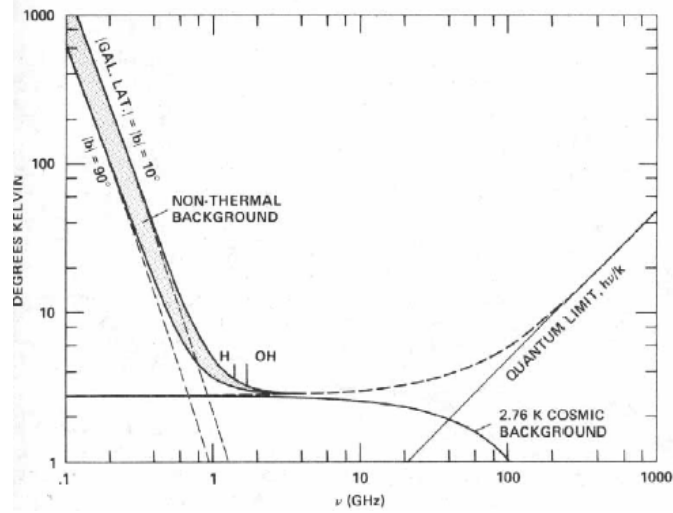
détection de la pollution depuis les satellites

Fig.3.2.1 Microwave absorption due to atmospheric gases

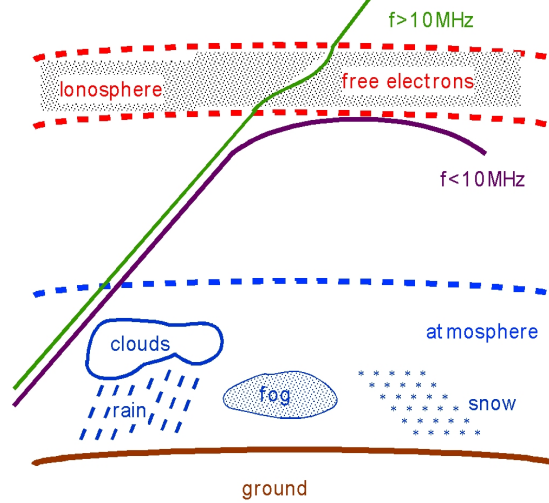
Atmosphère



Bruit



Propagation



Lien avec Mars

- Mission Mars Pathfinder : 1996
- Distance Terre-Mars : 228'000'000 km

Formule de Friis:

$$P_r = P_f \cdot G_1 \cdot G_2 \cdot (\lambda/4\pi L)^2$$

De la Terre à Mars

- Frequence : 7.175 GHz ($\lambda = 41.8$ mm)
- Gain de l'antenne terrestre : 4'265'795
 - $\varnothing = 70$ m
- Gain de l'antenne sur le satellite : 13.8
- Puissance transmise depuis: 22 kW
 - (une petite voiture)
- Puissance reçue sur Mars: $3.16 \cdot 10^{-16}$ W
 - (Pas grand chose)

De Mars à la Terre

- Fréquence : 8.425 GHz ($\lambda = 35.6$ mm)
- Gain de l'antenne terrestre : 25'118'864
- Gain de l'antenne sur le satellite: 141
- Puissance émise sur Mars: 13 W
 - (une lampe basse consommation)
- Puissance recue sur la Terre: $7 \cdot 10^{-18}$ W
 - (Presque rien !!)

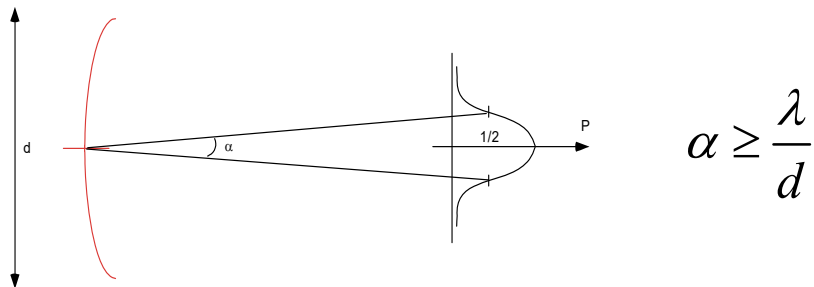
Propriétés des microondes

- Directivité des antennes
- Réflexions sur les obstacles
 - Surfaces effectives, radar
- Interaction avec la matière
 - Chauffage, mesure
- Rayonnement non ionisé
 - ne cause pas de mutation
- Fréquences d'oscillation stables
 - Horloges atomiques et références en fréquences

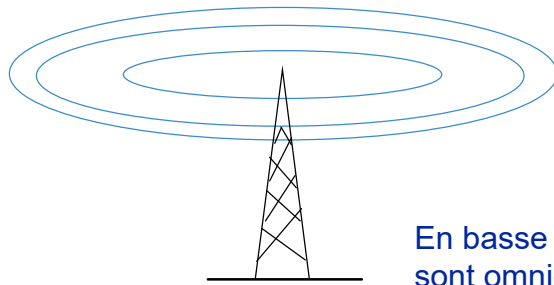
Définition des microondes

Fréquence (f)	300 MHz-300 GHz
Period (T)	3 ns - 3 ps
Longueur d'onde	1 m - 1 mm
Energie (hf)	$1.2 \cdot 10^{-6} \text{eV} - 1.2 \cdot 10^{-3} \text{eV}$

Directivité des antennes

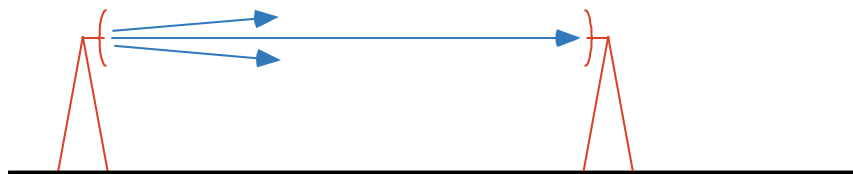


Directivité des antennes



En basse fréquence, les antennes sont omnidirectionnelles

Directivité des antennes



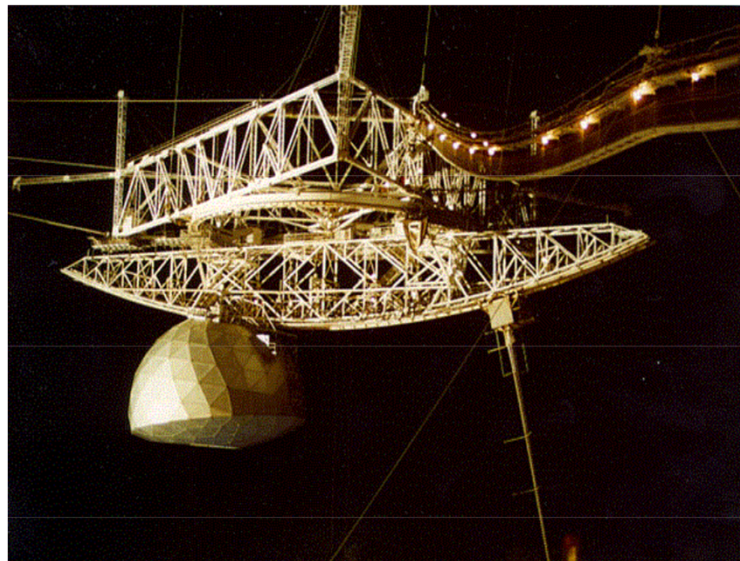
Aux fréquences élevées, les antennes peuvent être directives

Antenne d'Arecibo



diamètre: 305 m !

Excitation de l'antenne d'Arecibo





Largeur de faisceau de l'antenne d'Arecibo

- 50 MHz, $\lambda=6\text{m}$ and $\alpha=1.12^\circ$
- 10GH, $\lambda=3\text{cm}$ and $\alpha=0.0056^\circ$

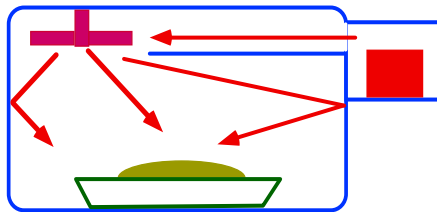
Propriétés des microondes

- Directivité des antennes
- Réflexions sur les obstacles
 - Surfaces effectives, radar
- Interaction avec la matière
 - Chauffage, mesure
- Rayonnement non ionisé
 - ne cause pas de mutation
- Fréquences d'oscillation stables
 - Horloges atomiques et références en fréquences

Définition des microondes

Fréquence (f)	300 MHz-300 GHz
Période (T)	3 ns - 3 ps
Longueur d'onde	1 m - 1 mm
Energie (hf)	$1.2 \cdot 10^{-6} \text{eV} - 1.2 \cdot 10^{-3} \text{eV}$

Interaction avec la matière: Chauffage microonde

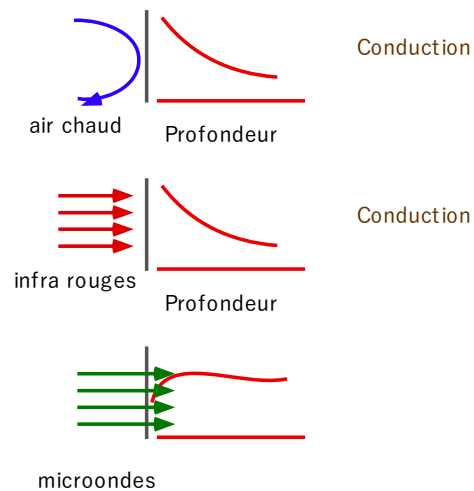


L'onde pénètre dans la matière et génère de la chaleur

Interaction avec la matière: Chauffage microonde

- Appicateurs :
 - Cavités
 - Onde progressive
 - Onde lente
 - Antenne
- Principe :
 - L'onde est absorbée par l'eau. L'absorption décroît lorsque la température croît

Interaction avec la matière: Chauffage microonde

Interaction avec la matière: Chauffage microonde.
Avantages

- Bonne efficacité (50% de la puissance est transférée à l'élément à chauffer)
- Chauffage sélectif
 - Céréales ou insectes
 - électrons et ions
- Coûts et maintenance modérés
- Moins de volume de stockage, car le chauffage est plus rapide
- Pas de nécessité de préchauffage

Interaction avec la matière: Chauffage microonde. Inconvénients

- Cher à développer
- Grillage impossible
- Difficulté à évacuer des solvants (industrie d'impression)
- Nécessite un personnel qualifié
- Nécessite un haut niveau de sécurité

Propriétés des microondes

- Directivité des antennes
- Réflexions sur les obstacles
 - Surfaces effectives, radar
- Interaction avec la matière
 - Chauffage, mesure
- Rayonnement non ionisé
 - ne cause pas de mutation
- Fréquences d'oscillation stables
 - Horloges atomiques et références en fréquences

Definition des microondes

Frequence (f)	300 MHz-300 GHz
Période (T)	3 ns - 3 ps
Longueur d'onde	1 m - 1 mm
Energie (hf)	$1.2 \cdot 10^{-6} \text{eV} - 1.2 \cdot 10^{-3} \text{eV}$

Effets biologiques: ionisation

Énergie de cohésion moléculaire

Type	<i>kJ/mole</i>	<i>eV/atom</i>
ionic	750	7800
dipolar	~20	207
Van der Waals	10	103
covalent		2,5

Dans les microondes, l'énergie d'un photon vaut:
 $1,2 \cdot 10^{-6}$ to $1,2 \cdot 10^{-3}$ eV

Effets biologiques: effets thermiques

- Les limites existent depuis longtemps
 - USA : $\sim 10 \text{ mW/cm}^2 = 100 \text{ W/m}^2$
 - Russie : $\sim 10 \text{ }\mu\text{W/cm}^2 = 0.1 \text{ W/m}^2$
- Diathermie : $1\text{-}10 \text{ kW/m}^2$!!
- Flux solaire : 1 kW/m^2 (au niveau du sol)

LES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES, SONT-ELLES DANGEREUSES ?

(1)
Energie à niveau
MICROSCOPIQUE
 $E = hf$
(constante de Planck
fois fréquence)

	Fréquence	Longueur d'onde	Facteur de protection
Radio FM	100 MHz	3 m	800'000
Natel	1 GHz	30 cm	80'000
TV Sat	10 GHz	3 cm	8000
Radar	100 GHz	3 mm	800
Infrarouge	10 THz	3 microns	8
Lumière visible	500 THz	600 nm	4
Ultraviolet UVA	1000 THz	300 nm	2
Ultraviolet UVB	10000 THz	30 nm	0.2
Rayons X	Million THz	0.3 nm	0.0002
Rayons gamma	plus	moins	moins

LES ONDES
ÉLECTROMAGNÉTIQUES,
SONT-ELLES DANGEREUSES
?

(2)

DENSITÉ de PUISSANCE à
NIVEAU
MACROSCOPIQUE



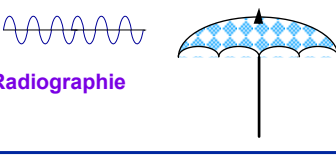
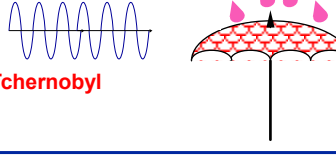
$$P = E H =$$

champ électrique X champ
magnétique

$$[mW/cm^2]$$

Dans un four microondes	500
Radar aéroport à 10 m	300
Radiation solaire hors atmosphère	140
Danger évident	>100
Effets systématiques	>50
Soleil, bonne journée de ski	10
FCC Public Exposure Standard	0.5
Bon NATEL dans la tête	0.3
Ampoule de 60 W à 1 m	0.02
Station NATEL bien fichue	5E-04
Émetteur radio FM à 10 Km	1E-04
Satélite TV au niveau de la rue	1E-06

Analogie Ondes électromagnétiques = Pluie
Fréquence = taille des gouttes ; Puissance = concentration des gouttes

<p>Basse fréquence Intensité faible</p>  <p>Télécoms</p>	<p>Basse fréquence Intensité forte</p>  <p>Four microondes</p>
<p>Haute fréquence Intensité faible</p>  <p>Radiographie</p>	<p>Haute fréquence Intensité forte</p>  <p>Tchernobyl</p>

- Sujet à controverse depuis 50 ans
 - Existent-ils ? (probablement)
 - Sont ils dommageables? (probablement pas)
- Dans le doute:
- **Baisser les valeurs limites légales**