Electronique 2ème année

-

Cours sur la propagation guidée

- Généralités sur les guides d'onde
- Etude de quelques instruments de mesure associés aux guides d'onde

Laurent BECHOU – Gérard COUTURIER
Professeurs - IUT Bordeaux – Département GEii
Email : laurent.bechou@ims-bordeaux.fr

1- Généralités sur les guides d'onde : les types de propagation

Objectif des télécommunications : transmettre un signal, porteur d'une information, d'un point à un autre au travers d'un support physique

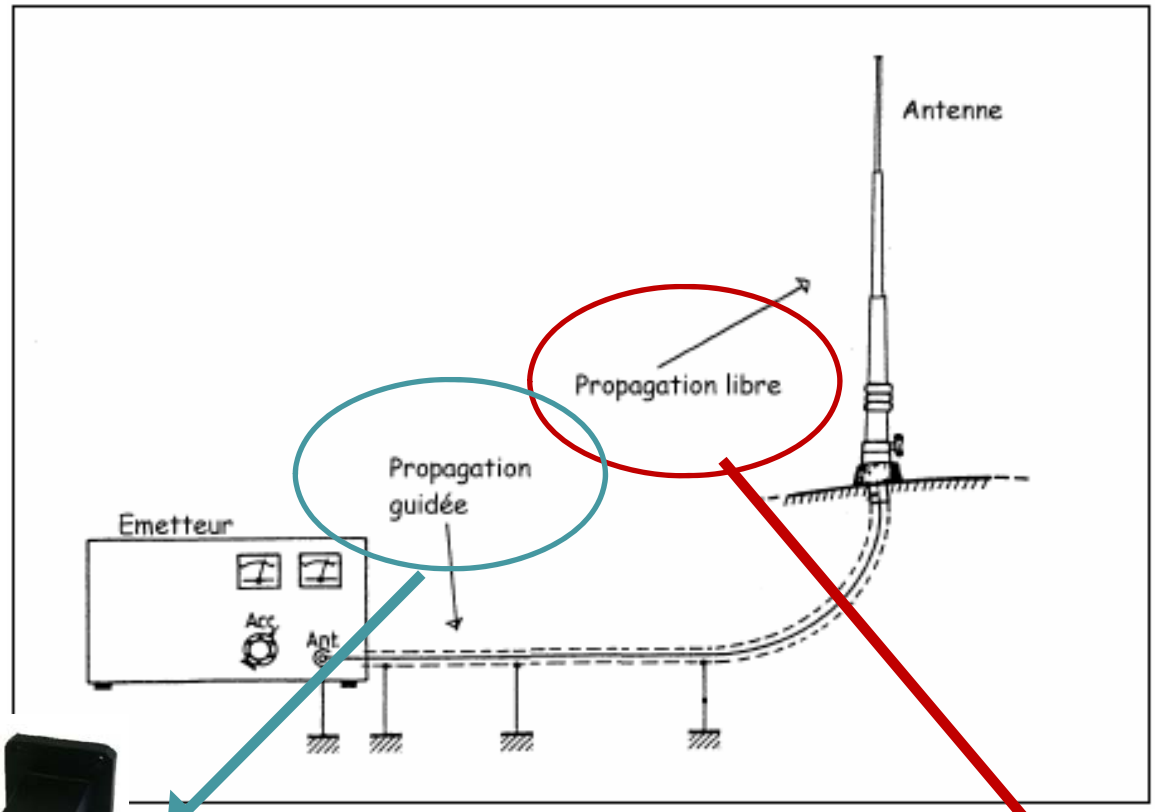
Pour atteindre cet objectif, on module une porteuse haute-fréquence, ce qui permet de transmettre des signaux sur un même support sans qu'ils se mélangent puisqu'ils ont des fréquences de porteuses différentes.

La distance à parcourir peut être très variable et les techniques utilisées sont différentes :

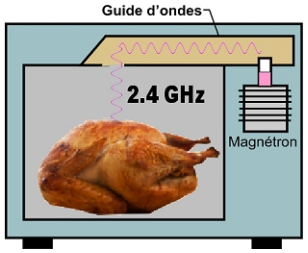
• transmission d'une information audio ou vidéo entre deux maisons, deux villes, d'une information numérique entre le téléphone mobile et sa base, entre un satellite de communication et un récepteur numérique (TNT) …
=> Le signal haute-fréquence modulé est transformé en onde EM par l'antenne et se propage dans l'espace environnant : c'est la **propagation libre.**

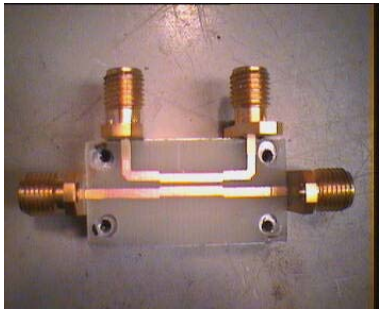
• transmission de la porteuse modulée en amplitude, en fréquence ou en numérique (GSM) du mélangeur à l'amplificateur de puissance radiofréquence puis à l'antenne.
=> Le signal HF entre deux composants suit des pistes sur les circuits ou des tronçons de câbles coaxiaux : c'est la **propagation guidée**.

1- Généralités sur les guides d'onde : les types de propagation

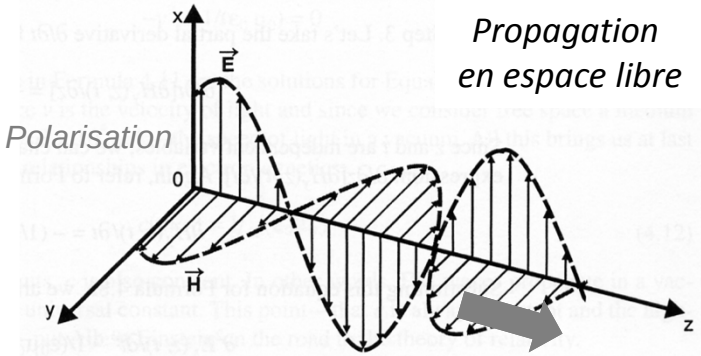


Guide d'ondes





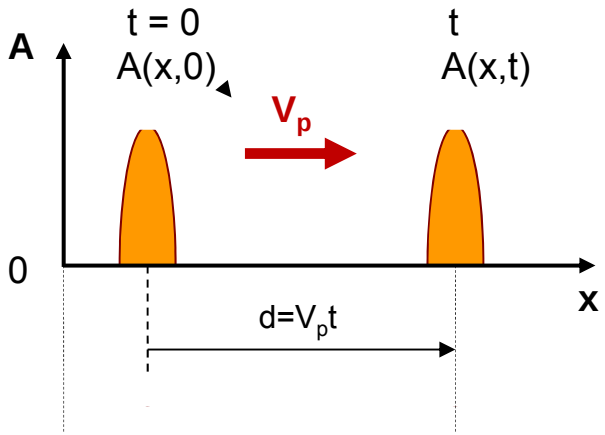
Ligne microruban (coupleur 2-4 GHz)



1- Généralités sur les guides d'onde : qu'est-ce qu'une onde ?

Onde = **perturbation énergétique se propageant de proche en proche** dans un milieu qui possède des caractéristiques physiques compatibles avec celles de la perturbation.

Types d'ondes : Mécanique , Acoustique, Thermique, Electromagnétique, Lumineuse



La perturbation au temps t est identique à ce qu'elle était à la position spatiale ($x-V_pt$). En un temps t, cette perturbation s'est déplacée dans l'espace d'une distance [$d= V_p.t$] => **$A(x, t) = A_+(x, t)\ f(x-V_pt)$ = Onde progressive**

$A_-(x,t) = f(x+V_pt)$ = Onde rétrograde

Onde = **superposition de ces deux ondes**

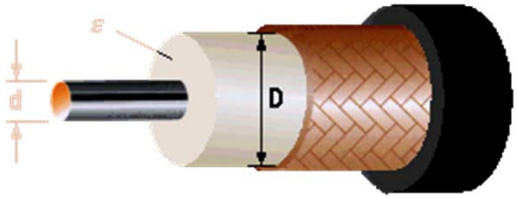
$$\underline{\text{Au final}} : A(x,t) = A_+(x,t) + A_-(x,t) = f(x-V_pt) + f(x+V_pt)$$

1- Généralités sur les guides d'onde : pourquoi un guide d'ondes ?

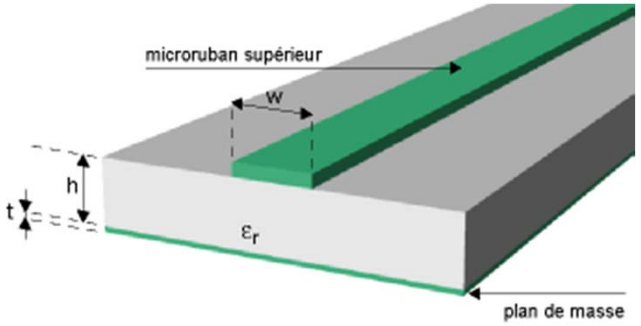
Supports les plus courants pour la propagation :

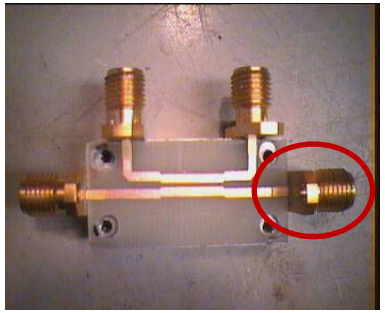
- **la ligne coaxiale** constituée par un conducteur central entouré d'un diélectrique et d'un blindage
- **la ligne imprimée ou « microruban »** constituée d'une piste de métal (cuivre) sur un substrat isolant (FR4, FR6, céramique…)

Ligne coaxiale



Ligne microruban





Connectique SMA + ligne 50Ω

Ligne microruban (coupleur 2-4 GHz)

1- Généralités sur les guides d'onde : pourquoi un guide d'ondes ?

Quelles doivent être les caractéristiques du support de transmission ?

- Il ne doit pas rayonner sinon une partie de l'énergie est perdue.
- Il doit présenter une impédance caractéristique égale à la résistance de source et à la résistance équivalente de l'antenne (adaptation de puissance).
- Il doit présenter le minimum de perte pour transmettre le maximum de puissance à l'antenne. *En fait, tout doit se passer comme si l'antenne se trouvait connectée juste en sortie de l'émetteur.*

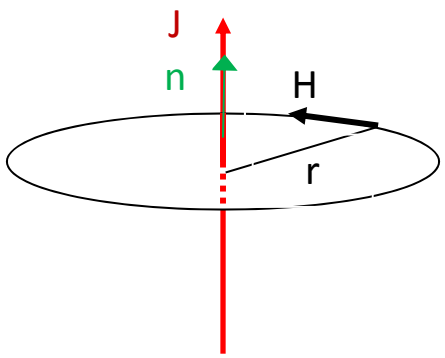
Au-delà de 10GHz, les lignes de transmission présentent des **pertes** (chaleur) :

- les **pertes « cuivre »** dues à la résistance des conducteurs qui augmente avec la fréquence (effet dit « de peau » => *Cours sur le câble coaxial*)
- les **pertes diélectriques** dues au matériau isolant qui se trouve entre les deux conducteurs *(pertes sont de même nature que les pertes dans les condensateurs)*

Pour supprimer les pertes diélectriques, il faudrait pouvoir enlever l'isolant !
Dans un **guide d'ondes,** il n'y a pas d'isolant puisqu'un guide est **généralement creux et rempli d'air**.

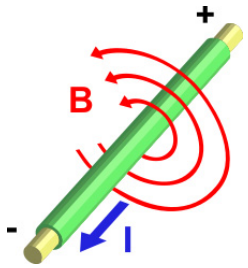
L'étude de la propagation guidée consiste à définir les règles qu'il convient de respecter pour transporter de façon correcte un signal haute-fréquence.

1- Généralités sur les guides d'onde : générer une onde ?



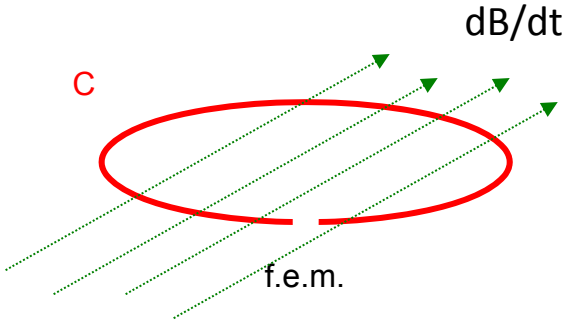
Théorème d'Ampère :

Le courant J qui circule dans le conducteur crée un champ $\vec{H}$.



$$\oint \vec{H}d\vec{l} = I = \iint_s \vec{J}.\vec{n}.ds$$

$$\int_c \vec{H}d\vec{l} = I_c \Rightarrow H = \frac{I_c}{2\pi r}$$



Loi de Lenz :

Un circuit placé en un point de l'espace où règne une induction magnétique B variable dans le temps voit apparaître une f.e.m. à ses bornes.

$$\phi = \iint_s \vec{B}\vec{n}ds$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \neq 0 \Rightarrow e = -\frac{d\phi(\omega)}{dt} \Rightarrow \text{création d'un champ } \vec{E}$$

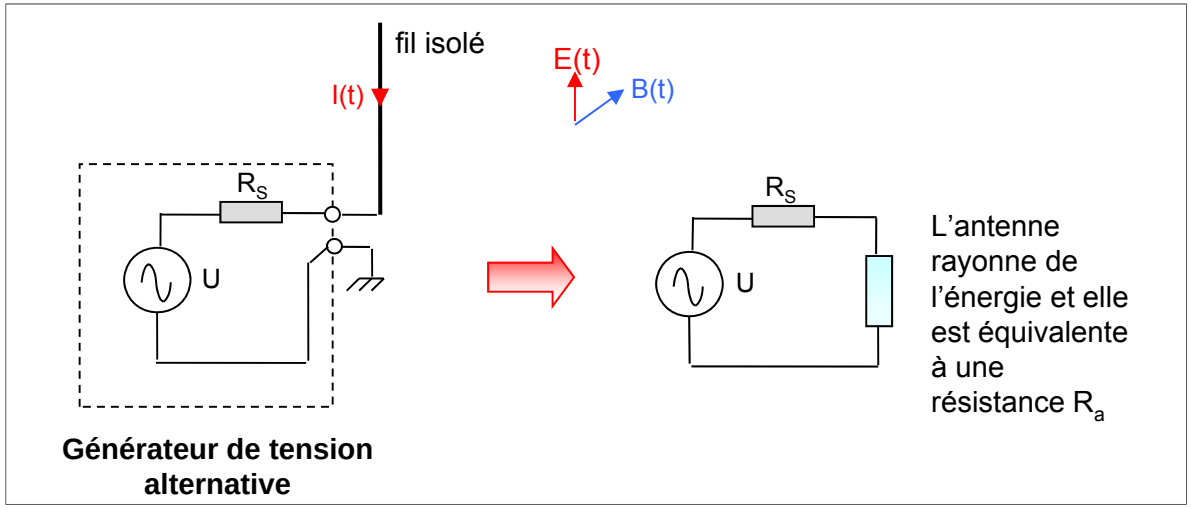
Φ est le flux du vecteur induction B à travers la surface S limitée par le circuit fermé

1- Généralités sur les guides d'onde : générer une onde ?

Une **onde électromagnétique** est donc constituée **de la superposition** d'un **champ magnétique (H) et d'un champ électrique (E).**

Un exemple de source :

Le fil, appelé **antenne filaire** dans ce cas particulier d'antenne, rayonne de l'énergie. L'énergie rayonnée est perdue pour la source. On peut modéliser la dissipation d'énergie par une résistance appelée **résistance de rayonnement.**



Le fil isolé est traversé par un courant I(t) variable dans le temps, il y a création d'un champ magnétique B(t) variable dans le temps. Au champ magnétique, est associé un champ électrique .

Le fil, appelé dans ce cas antenne, rayonne de l'énergie.

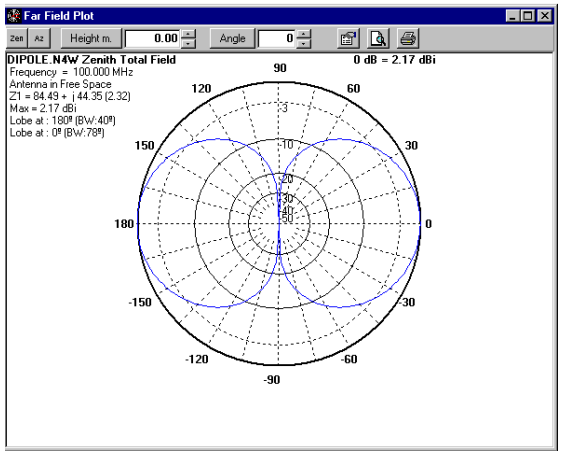
C'est de l'énergie dissipée vers le milieu extérieur et l'antenne est donc équivalente à une résistance.

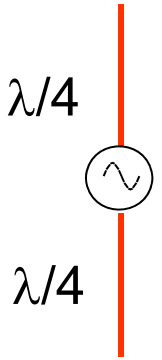
On a tout intérêt à avoir pour émettre le maximum d'énergie.

1- Généralités sur les guides d'onde : générer une onde ?

L'antenne émet de l'énergie dans tout l'espace mais pas de manière isotrope.
Elle est nulle à la verticale de l'antenne et maximale dans la direction perpendiculaire.

Exemple de diagramme de rayonnement en espace libre d'une antenne « demi-onde »





Si r = distance à l'antenne

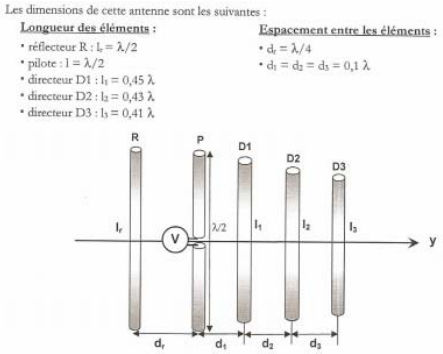
- Si $r < \lambda/2\pi$ => conditions dites de **champ proche**, les champs E et H ne sont pas perpendiculaires et l'onde n'est pas dite TEM (Transverse ElectroMagnétique)
- Si $r > \lambda/2\pi$ => conditions dites de **champ lointain**, les champs E et H sont perpendiculaires et l'onde est dite TEM (Transverse ElectroMagnétique)

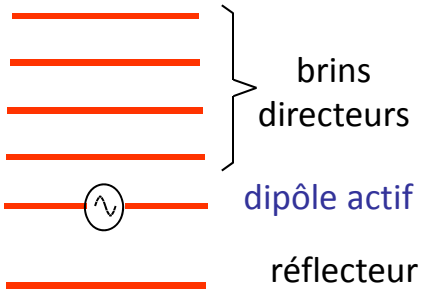
AN :
A quelle distance de l'émetteur France Inter à 89,7 MHz en modulation de fréquence en région Bordelaise, faut-il se trouver pour que l'OEM soit TEM ?
$\lambda = c/F = 3.10^8/89{,}7.10^6 = 3{,}3m$ => **distance > $\lambda/2\pi$ = 0,53m**

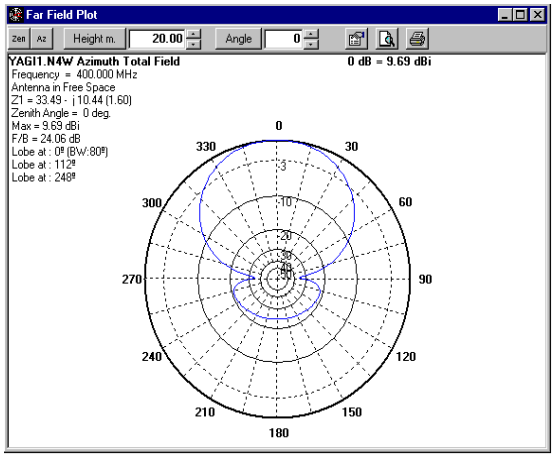
1- Généralités sur les guides d'onde : ondes et notre environnement

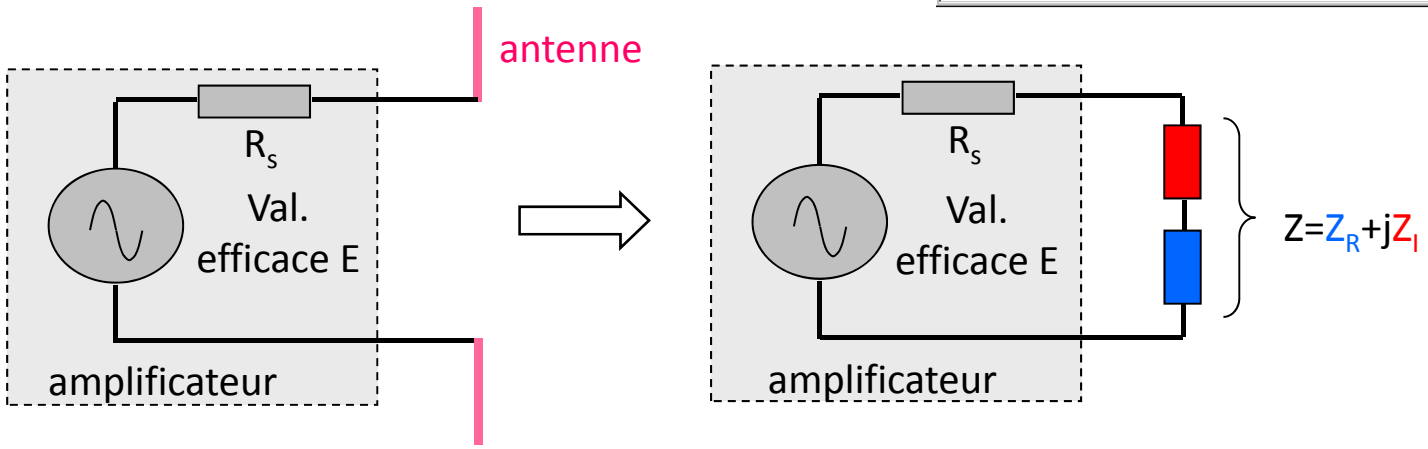
Antenne de réception TV (antenne dite « à rateaux » ou YAGI)

=> **Intérêt : Augmenter la directivité de l'antenne**









L'amplificateur transmet le maximum de puissance à la charge (antenne) quand **$Z_R=R_S$ et $Z_l=0$**. Le maximum de puissance est déposée dans la charge, l'adaptation en impédance est réalisée.

=> On montre que la puissance totale rayonnée est maximale lorsque la résistance de rayonnement $Z_R = 73\Omega$ (d'où $Z_C = 75\Omega$ pour les câbles TV)

1- Généralités sur les guides d'onde : ondes et notre environnement

Le Wi-Fi

Carte Wifi PCMCIA avec connecteur pour antenne externe

Caractéristiques de l'émetteur

	débit	puissance
	Rate	Power
Transmit Power 802.11b/g	1-24 Mbps	24 dBm, +/- 1dB
	36 Mbps	23 dBm, +/- 1dB
	48 Mbps	22 dBm, +/- 1dB
	54 Mbps	20 dBm, +/- 1dB

Caractéristiques du récepteur

	débit	sensibilité
	Rate	Level
Receive Sensitivity	1 Mbps	-96 dBm, +/- 2dB
	2 Mbps	-95 dBm, +/- 2dB
	5.5 Mbps	-91 dBm, +/- 2dB
	11 Mbps	-91 dBm, +/- 2dB
	6 Mbps	-93 dBm, +/- 2dB
	9 Mbps	-92 dBm, +/- 2dB
	11 Mbps	-91 dBm, +/- 2dB
	12 Mbps	-90 dBm, +/- 2dB
	18 Mbps	-89 dBm, +/- 2dB
	24 Mbps	-85 dBm, +/- 2dB
	36 Mbps	-82 dBm, +/- 2dB
	48 Mbps	-76 dBm, +/- 2dB
	54 Mbps	-73 dBm, +/- 2dB

1- Généralités sur les guides d'onde : ondes et notre environnement

Fréquence d'émission à 2,45GHz => Longueur d'onde $\lambda = 0{,}12m$

La puissance de l'émetteur Wi-Fi : $P_a \approx 10mW$ soit $\approx 10dBm$

Hypothèse : Gains des antennes en émission et réception : $G_E = G_R = 1{,}64$

En espace libre, à une distance r =100m, la puissance P_R reçue par le récepteur est égale à :

$$P_R = P_a G_E G_R \frac{\lambda^2}{r^2 (4\pi)^2} = 10^{-2} \text{x} 1{,}64 \text{x} 1{,}64 \frac{(0{,}12)^2}{100^2 (4\pi)^2} = 245pW$$

soit en *dBm* : $10\log_{10}\left(\frac{245 \text{x} 10^{-12}}{10^{-3}}\right) = -66dBm$

La sensibilité des récepteurs Wi-Fi est de l'ordre de –75dBm pour conserver un rythme de transmission de 54Mbits/s (adaptation du débit en fonction du niveau de réception).

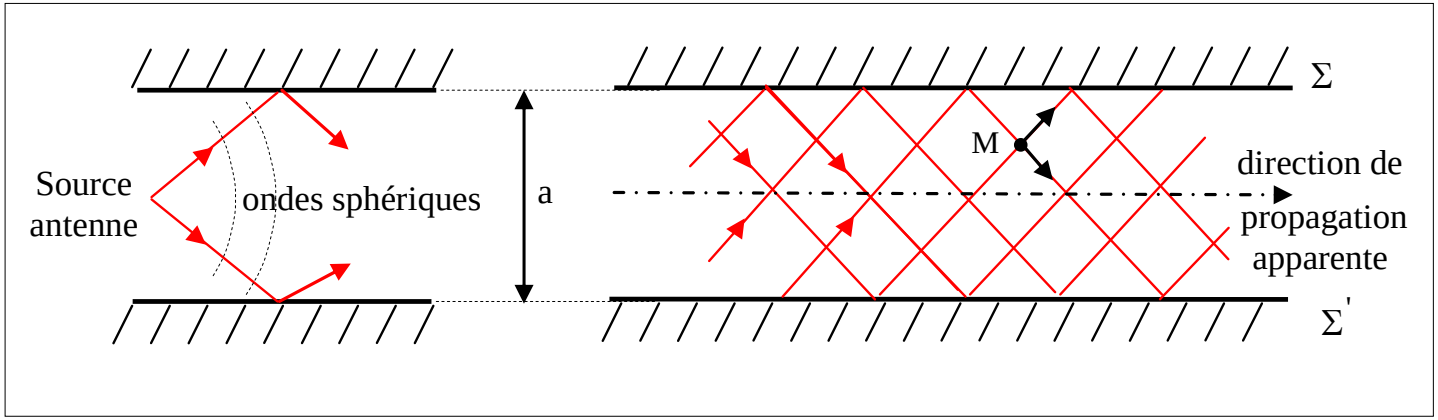
En réalité en espace confiné (intérieur d'une maison), la puissance reçue P_R est supérieure à celle calculée :

$$P_R = P_a G_E G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^n \quad \text{avec } 2<n<4$$

1- Généralités sur les guides d'onde : conditions de guidage

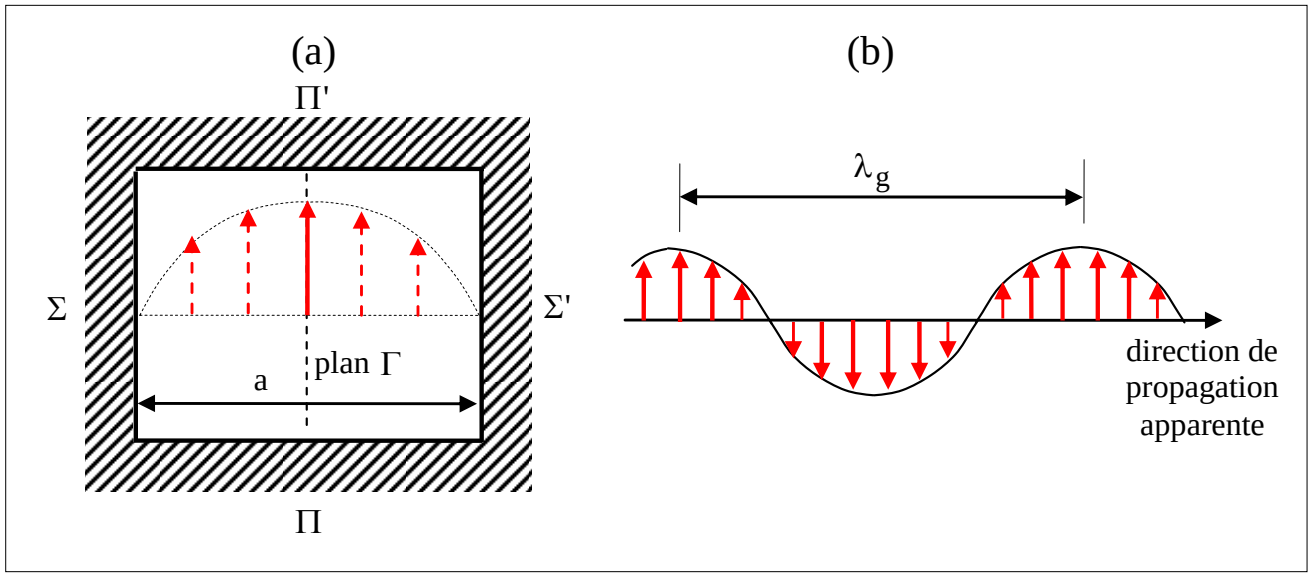
Le guide d'ondes le plus simple est constitué de 2 plans conducteurs parallèles séparés d'une distance *a*.
On envoie entre les plans conducteurs une **OEM plane progressive** dont la direction de propagation est oblique par rapport à ces plans. **Elle se propage en se réfléchissant alternativement sur chacun d'eux**. *On peut comparer le phénomène au parcours d'un projectile lancé obliquement entre les parois d'un couloir par exemple.*

Techniquement, le guide est excité à une extrémité par une **source ponctuelle** (antenne), laquelle envoie une **onde** plus ou moins **sphérique** qui se réfléchit sur les 2 parois. Après un faible parcours, il s'installe dans le guide une onde résultante provenant de la **superposition** permanente en tout point M de **deux ondes planes** obliques.



1- Généralités sur les guides d'onde : conditions de guidage

Sur les parois métalliques conductrices, le champ électrique E est nul, (propriété d'un conducteur) => cela impose la distribution du champ électrique (mode TE_{01})



Dans un guide d'onde, on a :

- la **longueur d'onde guidée (λ_g)**
- la **longueur d'onde en espace libre (λ)**

$$\frac{1}{\lambda^2} = \frac{1}{\lambda_g^2} + \frac{1}{\lambda_C^2}$$

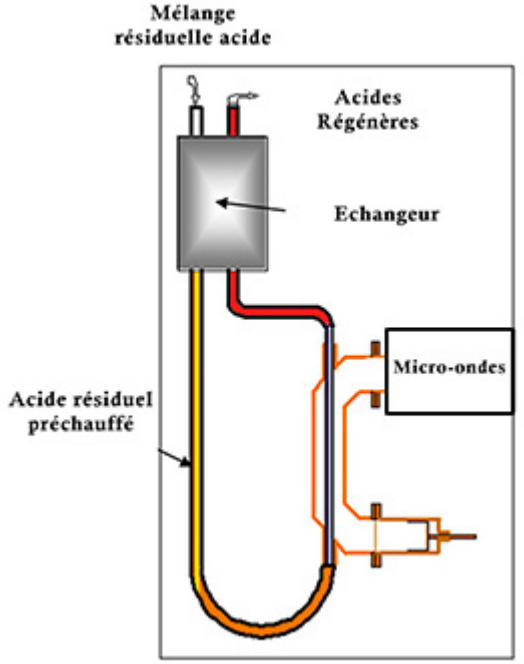
λ_C est appelée la **longueur d'onde de coupure** et elle est égale à 2xa
La longueur d'onde guidée est plus grande que la longueur d'onde libre.
Au-dessous d'une certaine fréquence (f_C), l'OEM ne se propage plus.
Le guide se comporte comme un filtre passe haut.

AN : si a = 22,86mm => λ_C = 45,72mm et f_C = 6,56GHz

1- Généralités sur les guides d'onde : autres applications des guides

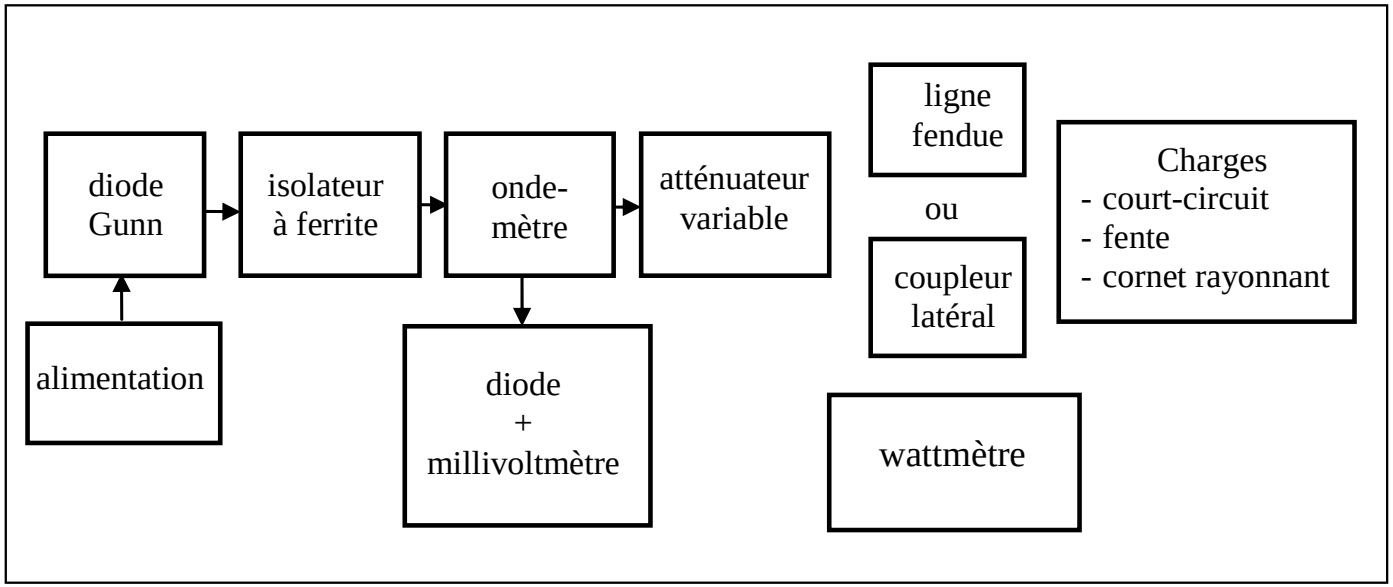
Les guides d'onde sont utilisés dans de nombreuses applications industrielles comme le séchage de produits manufacturés ou agroalimentaires. Dans ce cas, le guide d'ondes est terminé par un applicateur : **un cornet rayonnant.**

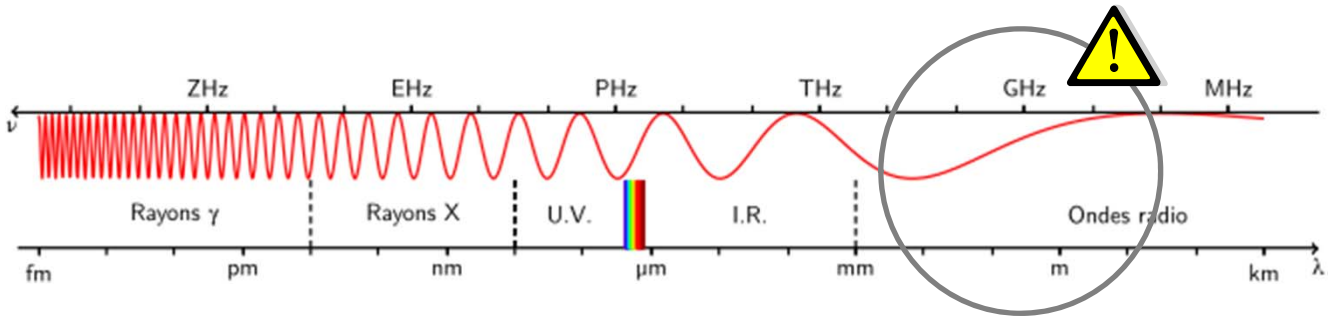
Le rôle du cornet est d'assurer la transition entre le guide d'ondes et l'espace libre. L'énergie doit être transférée au milieu extérieur et non retournée vers la source. **Le cornet peut réaliser une adaptation d'impédance.**



Chimie assistée par micro-ondes à 2,45GHz

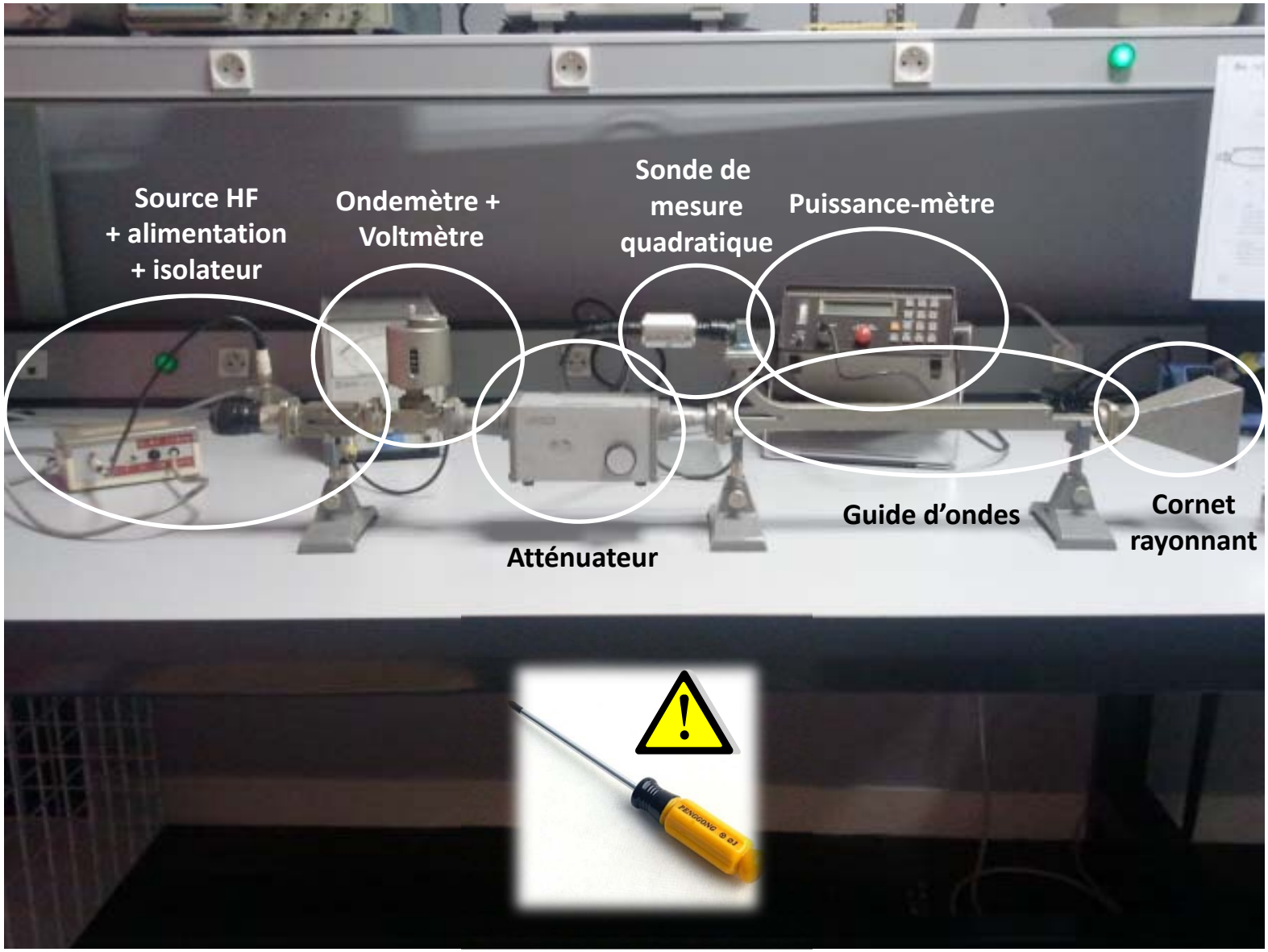
2- Etude de quelques instruments de mesure associés aux guides d'onde : banc expérimental de propagation guidée (TP)





Spectre électromagnétique

2- Etude de quelques instruments de mesure associés aux guides d'onde : banc expérimental de propagation guidée (TP)



2- Etude de quelques instruments de mesure associés aux guides d'onde : la source hyperfréquence

Objectif : générer une OEM de fréquence particulière sur une largeur spectrale définie et rayonnée dans la cavité.

Deux types de source à SC sont généralement utilisés :

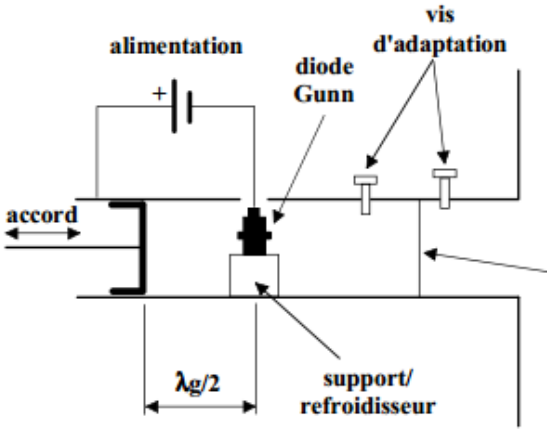
- Diode IMPATT
- Diode GUNN

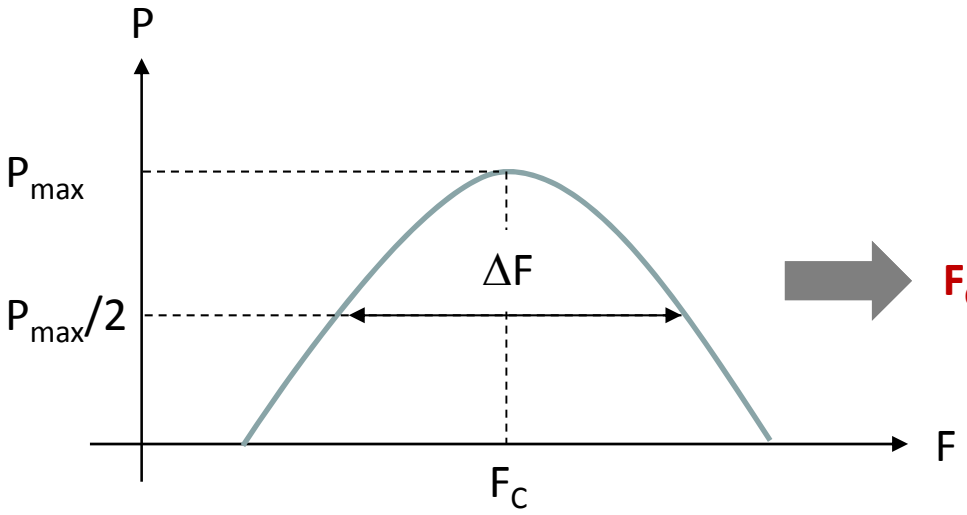
Ces composants sont utilisés comme sources à faible puissance dans des systèmes de transmission et réception et associés à un oscillateur HF.

La diode GUNN (il ne s'agit pas à proprement parler d'une diode, mais bien d'un barreau de semiconducteur à deux accès), apparue dans les années 60-65, permet de construire des oscillateurs HF compacts, légers et bon marché, et a permis aux hyperfréquences de se répandre dans l'électronique grand public (radar à effet Doppler).

Si **on place la diode GUNN dans une cavité résonante appropriée**, on forme un oscillateur délivrant un signal à la fréquence de résonance de la cavité.

2- Etude de quelques instruments de mesure associés aux guides d'onde : la source hyperfréquence

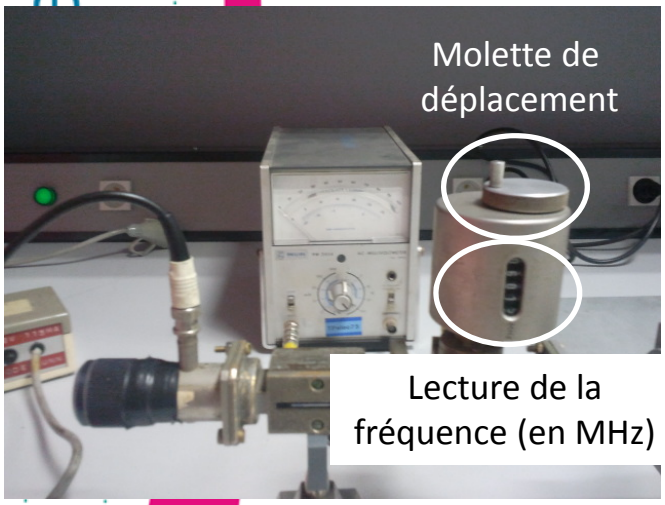


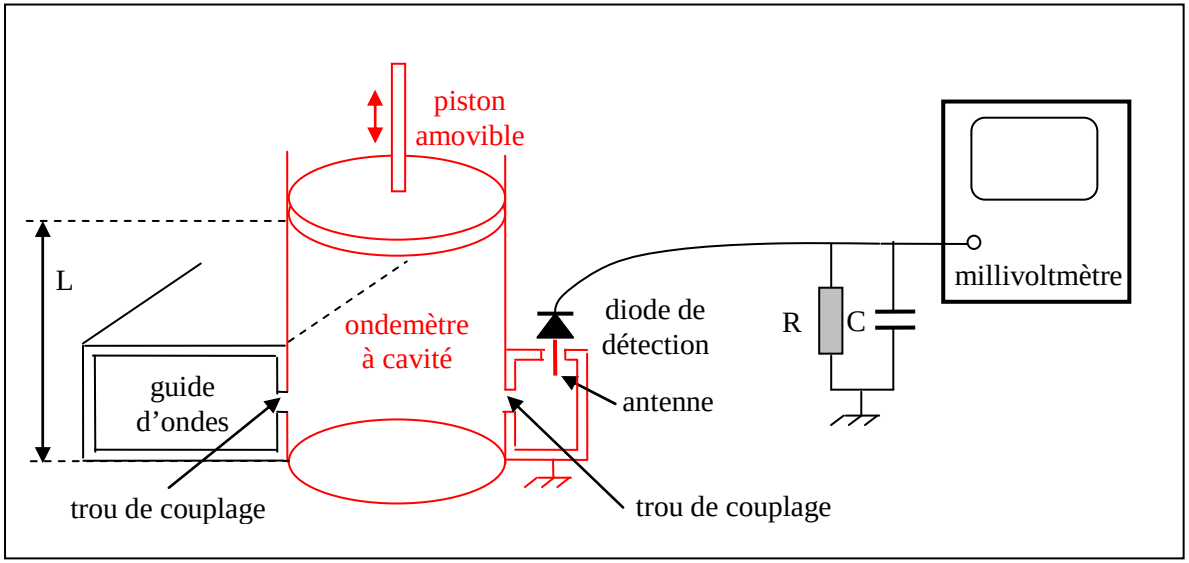


F_C et ΔF seront à mesurer en TP

2- Etude de quelques instruments de mesure associés aux guides d'onde : l'ondemètre

Objectif : dispositif permettant de mesurer avec précision la fréquence et la largeur de spectre d'une source HF en le couplant au guide d'ondes.

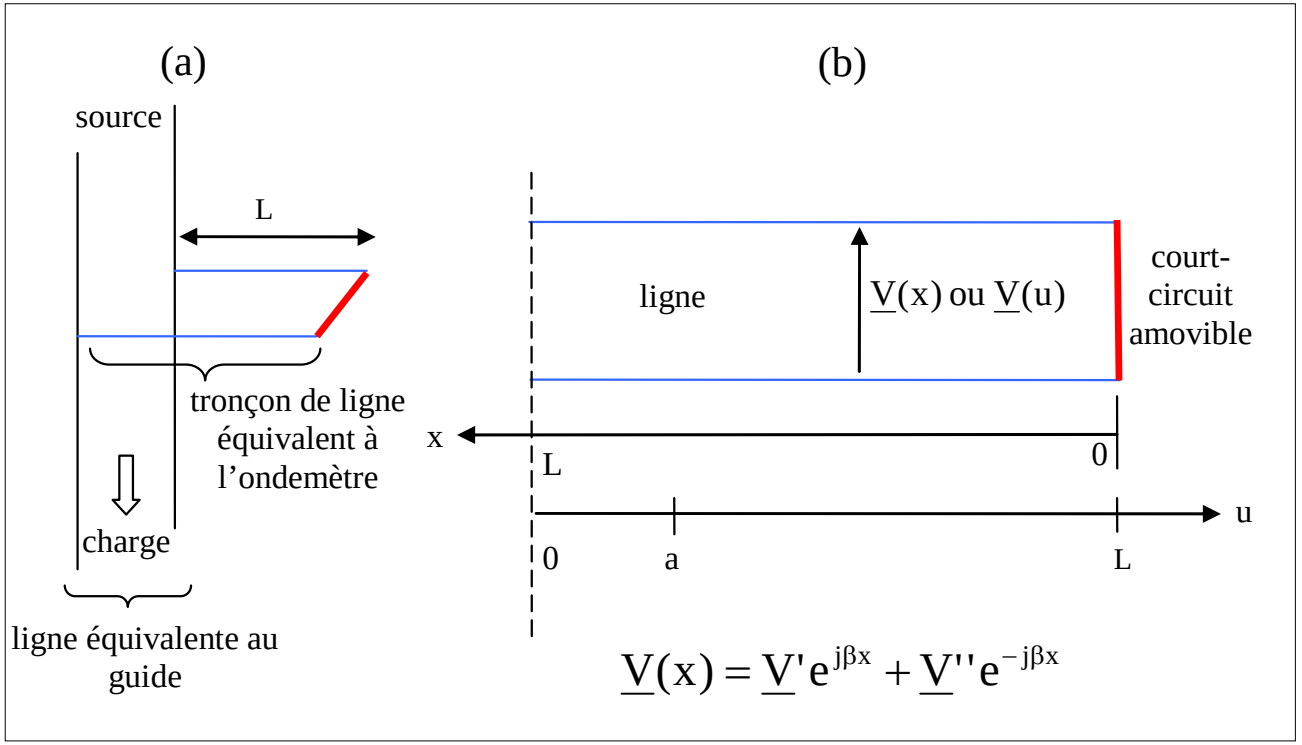




- L'ondemètre est couplé au guide d'ondes par un petit trou.
- La cavité de l'ondemètre est un cylindre creux dont la longueur L dépend de la position du piston amovible (molette).
- L'ondemètre est couplé à un tronçon de guide dans lequel une petite antenne prélève de l'énergie. L'antenne, la diode, le circuit R-C et le millivoltmètre continu constituent un détecteur quadratique. Pour une fréquence donnée, **la tension affichée par le millivoltmètre passe par un maximum** pour une longueur L donnée.

2- Etude de quelques instruments de mesure associés aux guides d'onde : l'ondemètre

Modélisation du principe de l'ondemètre



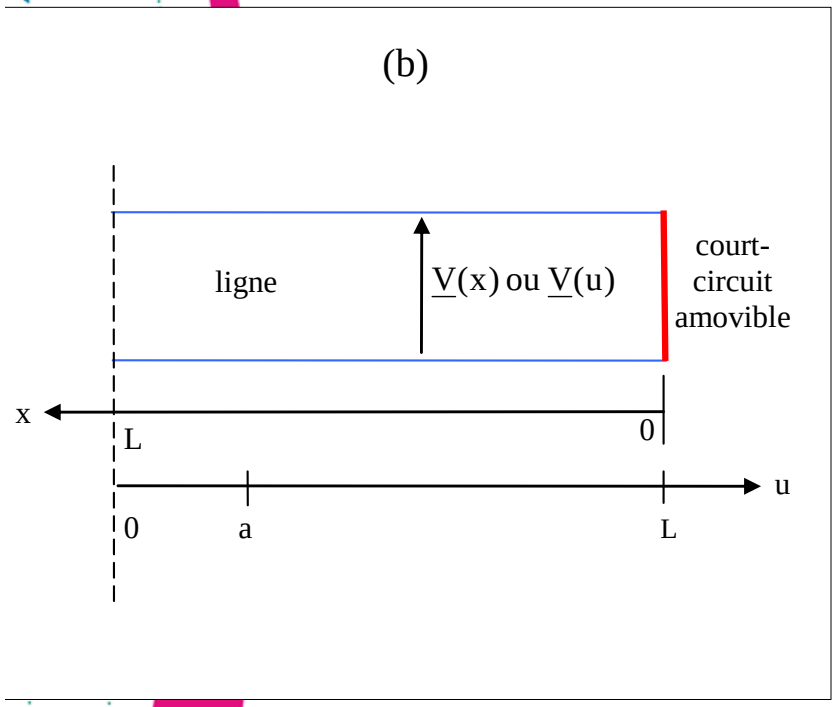
En x=0 => **le court-circuit** impose que : $\underline{V}' = -\underline{V}''$

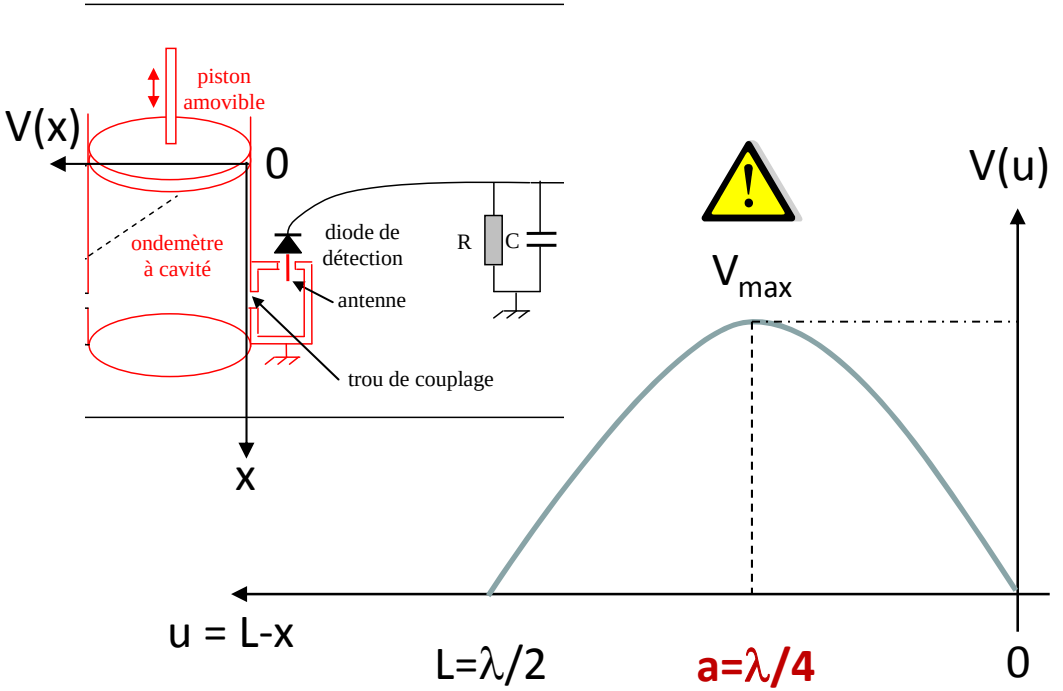
$$\underline{V}(x) = V'(e^{j\beta x} - e^{-j\beta x}) = V'\frac{(e^{j\beta x} - e^{-j\beta x})}{2j}.2j = 2jV'\sin(\beta x)$$

Changement de variable : u = L-x et on obtient :

$\underline{V}(u) = 2j\underline{V}'\sin[\beta(L-u)]$

2- Etude de quelques instruments de mesure associés aux guides d'onde : l'ondemètre



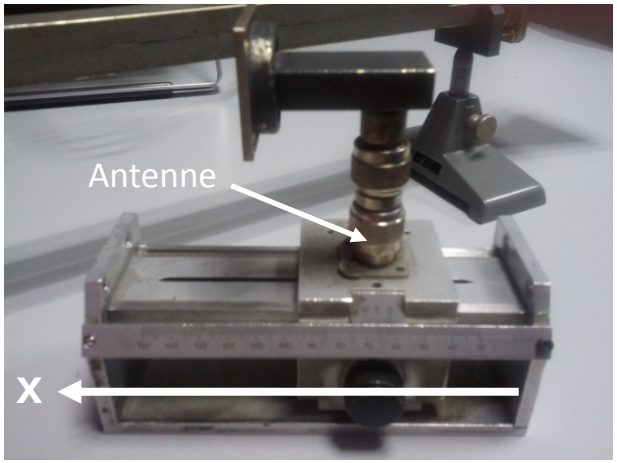


L'antenne de mesure reliée à la diode de détection et au circuit RC (en réalité le trou de couplage) **est située à une distance a = 5,263mm** de l'origine (u=0).
Pour quelle fréquence d'OEM obtient-on alors un maximum de tension ?
(La vitesse des OEM est prise égale à $v_p = 2.10^8$ m.s^{-1})

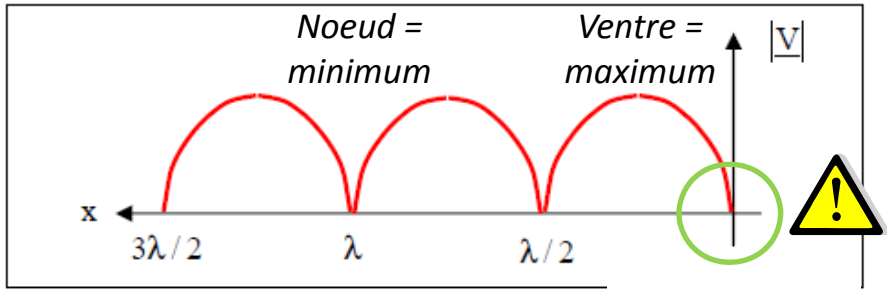
AN : a = 5,263mm = $\lambda/4$ => $\lambda = v_p/F$ => **F = 9,5GHz**

2- Etude de quelques instruments de mesure associés aux guides d'onde : Ligne de mesure - Détection quadratique

Objectif : Une ligne fendue est un dispositif permettant la **mesure du rapport d'ondes stationnaires ROS** (en anglais VSWR: Voltage Standing Wave Ratio, souvent abrégé en "SWR") dans le guide d'ondes.
Une sonde capacitive faiblement couplée (antenne), mobile le long de la fente (vernier) , prélève un signal proportionnel au champ électrique.



Ex. Tension le long d'un guide d'ondes terminé par un court-circuit



Pas accessible

En faisant varier la position de la sonde le long du guide d'ondes, on trouve des minima et des maxima de tension tels que :

$V_{min} = V'' - V'$ et $V_{max} = V'' + V'$

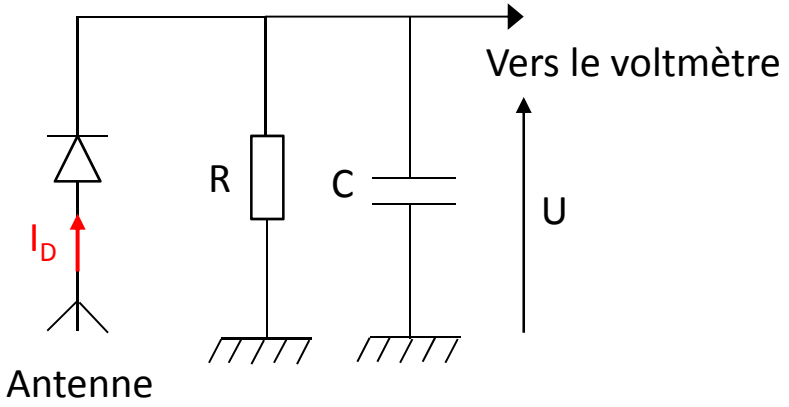
$$ROS = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V''+V'}{V''-V'} = \frac{1+\frac{V''}{V'}}{1-\frac{V''}{V'}} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} = SWR$$

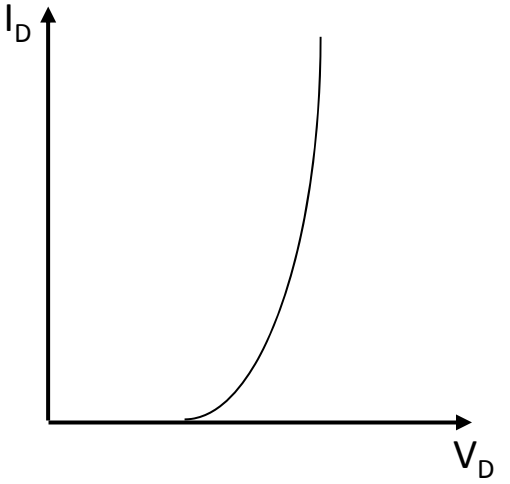
Si ROS->1, adaptation

Si ROS->∞, désadaptation

2- Etude de quelques instruments de mesure associés aux guides d'onde : Ligne de mesure - Détection quadratique

Le signal électrique induit dans l'antenne doit être détecté. Cette détection est réalisée au moyen d'une diode suivie d'un circuit RC. La capacité C est souvent celle du câble reliant l'antenne à l'appareil de mesure (voltmètre).





$$I_D = I_S \exp[\frac{qV_D}{kT} - 1] \approx I_S[\cancel{1} + \frac{qV_D}{kT} + \frac{1}{2}(\frac{qV_D}{kT})^2 + \ldots - \cancel{1}]$$

$$\text{si } V_D = A\cos(\omega t) \Rightarrow I_D \approx I_S[\frac{qV_D}{kT} + \frac{1}{2}(\frac{qV_D}{kT})^2] \approx I_S[\frac{qA\cos(\omega t)}{kT} + \frac{1}{2}(\frac{qA\cos(\omega t)}{kT})^2]$$

$$\text{si } \tau = RC \text{ est très grande (filtre passe-bas)} \Rightarrow U \approx R.I_D \approx \frac{RI_S}{4}\frac{q^2A^2}{(kT)^2} \propto A^2 = C^{ste}$$

En conclusion : la mesure réalisée par le voltmètre est en réalité homogène à des (Volts)² ou homogène à des Watts si on entre le signal sur une charge R_i

2- Etude de quelques instruments de mesure associés aux guides d'onde : Ligne de mesure - Détection quadratique

Si on considère A=f(x) :

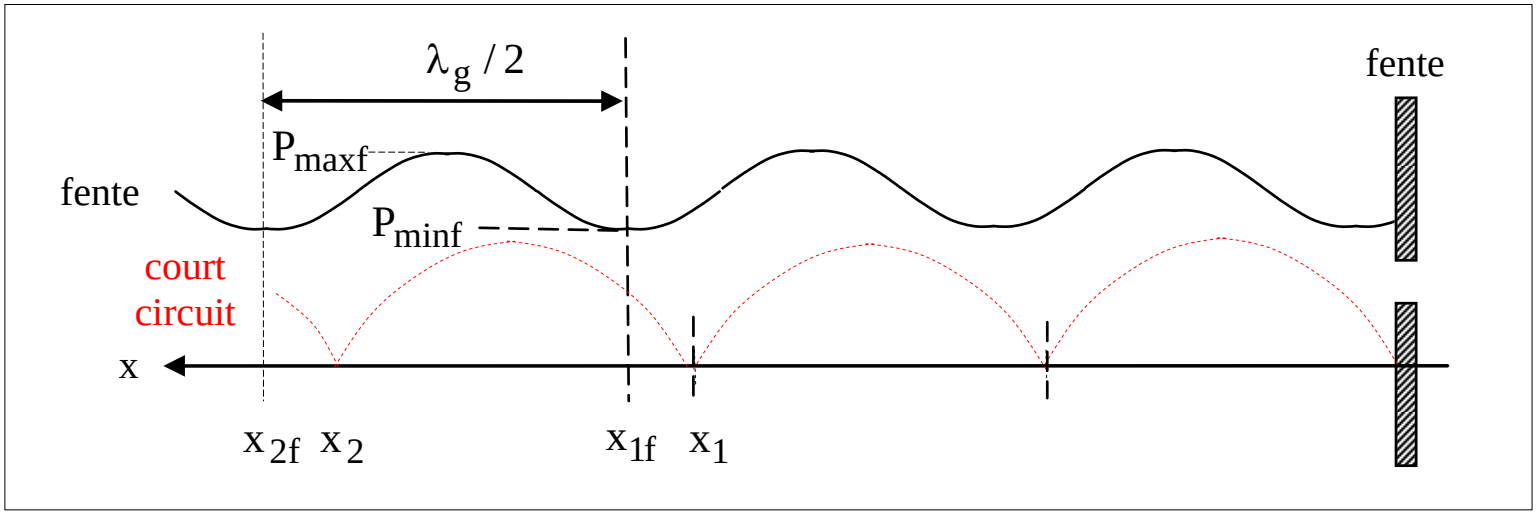
$$V_{det} = k.|V(x)|^2$$

$$\text{avec } \underline{V}(x) = \underline{V}'e^{j\beta x} + \underline{V}''e^{-j\beta x} = \underline{V}'e^{j\beta x} + \underline{\Gamma}(x)\underline{V}'e^{-j\beta x} = \underline{V}'[1 + |\underline{\Gamma}_l|e^{j(\phi - 2\beta x)}]$$

$$V_{det} = k.|\underline{V}'|^2\sqrt{[1 + |\underline{\Gamma}_l|^2 + 2|\underline{\Gamma}_l|\cos(\phi - 2\beta x)]} = f(\text{charge}, x)$$

$$\Rightarrow V_{det} \text{ est maximale si } \cos(\phi - 2\beta x) = 1$$

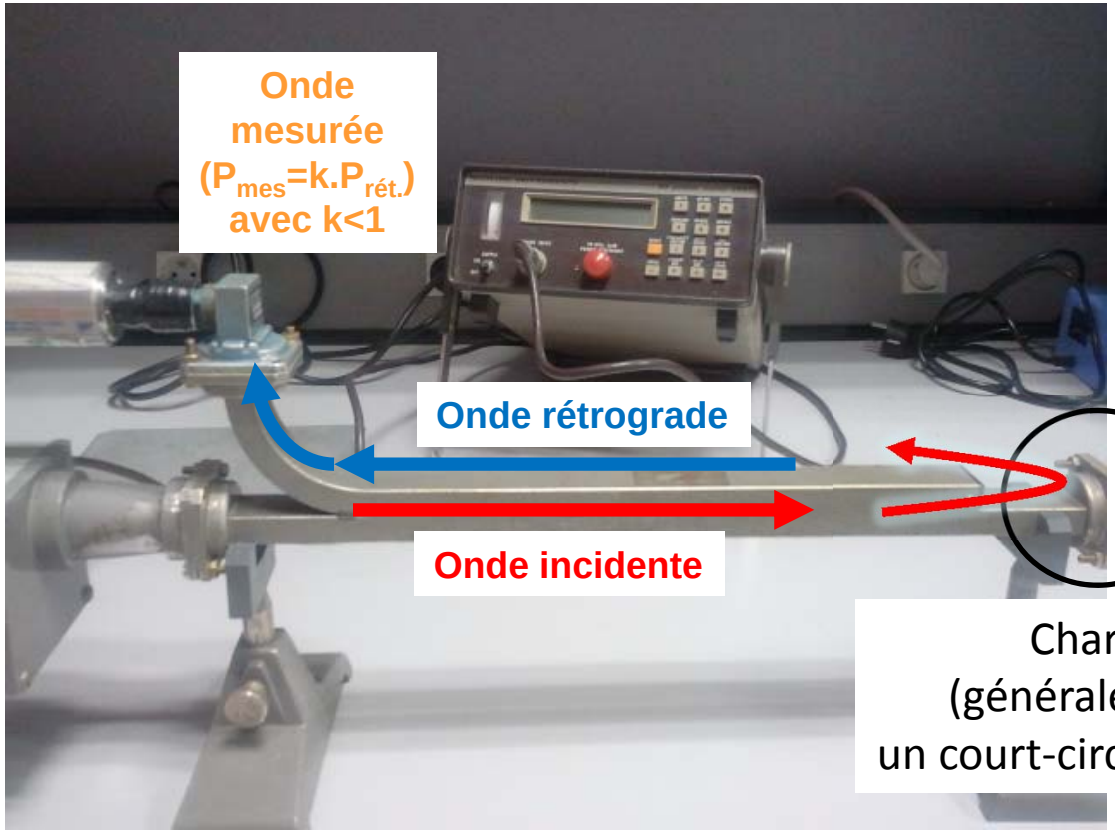
$$\Rightarrow V_{det} \text{ est minimale si } \cos(\phi - 2\beta x) = -1$$



En conclusion : la ligne fendue permet de valider qu'une ligne ou un guide n'est pas équipotentiel quand $\lambda < L$ [λ = 2,1cm et L = 16cm] => Tension ou Puissance = f(x)

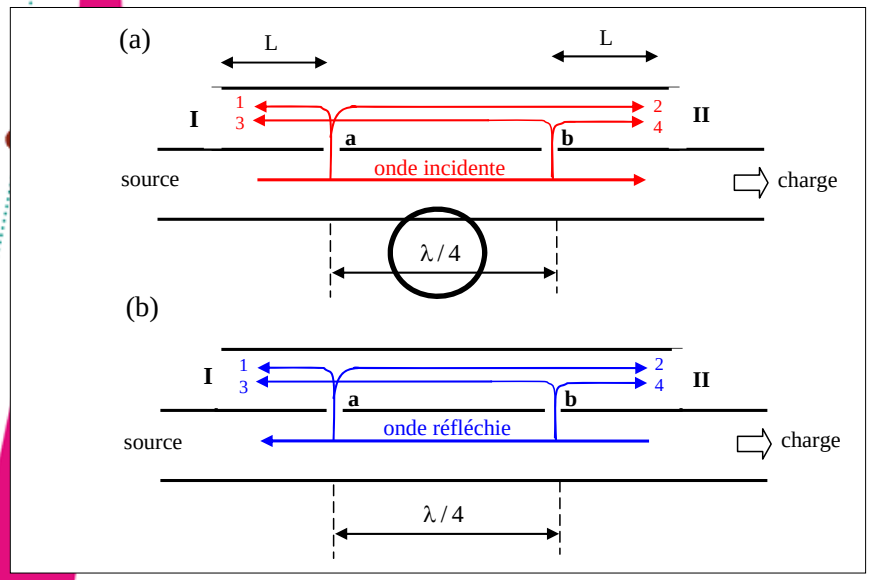
2- Etude de quelques instruments de mesure associés aux guides d'onde : le coupleur latéral

Objectif : Un coupleur latéral est un dispositif permettant des mesures identiques à celles effectuées avec une ligne de mesure fendue **en évitant** le rayonnement vers l'extérieur et les perturbations par l'environnement. Le but d'un coupleur latéral est **de séparer l'onde réfléchie de l'onde incidente.**



2- Etude de quelques instruments de mesure associés aux guides d'onde : le coupleur latéral

On étudie ici une version simplifiée du coupleur dans lequel le couplage est effectué seulement par **deux ouvertures a et b distantes de λ/4**.
On suppose que par les ouvertures **a** et **b** ne passe qu'une fraction k de l'amplitude de l'onde. La constante k du coupleur utilisé en TP est égale à $1/\sqrt{10}$



Onde incidente (en x = a) : V = Acos(ωt)

Onde incidente (en x = b) : V = Acos(ωt-βλ/4)

Onde rétrograde (en x = b) : V = Bcos(ωt-ϕ)

Onde rétrograde (en x = a) : V = Bcos(ωt-ϕ–βλ/4)

L'onde incidente pénètre dans l'ouverture **a** pour donner naissance à deux ondes notées 1 et 2.
Elle pénètre aussi dans l'ouverture **b** pour donner naissance à deux ondes notées 3 et 4.
La distance contrôlée (λ/4) entre les ouvertures **a et b** impose des valeurs spécifiques de tension en position I et II :

Onde incidente :	Sortie I => V = 0, **Sortie II => V ≠ 0**
Onde rétrograde :	**Sortie I => V ≠ 0**, Sortie II => V = 0