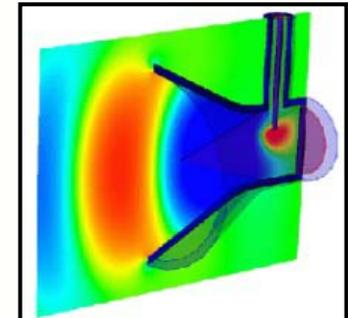
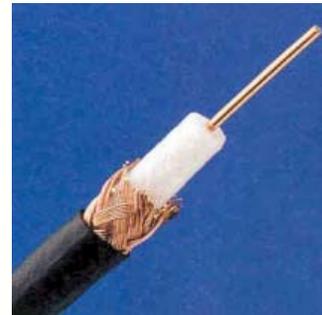




Propagation guidée sur les lignes





- 1- Propagation libre et guidée
- 2- Les structures de guidage
- 3- La ligne bifilaire
- 4- Le câble coaxial
- 5- La ligne imprimée
- 6- Le guide d'onde
- 7- La fibre optique
- 8- Les différents types de fibre optique
- 9- Différence entre une ligne et un circuit ordinaire
- 10- Retard sur une ligne en régime impulsionnel
- 11- Retard sur une ligne en régime sinusoïdal
- 12- Déphasage introduit par un câble
- 13- Modèle électrique d'une ligne
- 14- Constantes localisées ou constantes réparties
- 15- Retard introduit par une ligne à constantes localisées
- 16- Grandeurs caractéristiques d'un câble coaxial
- 17- Grandeurs caractéristiques d'une ligne imprimée
- 18- L'équation des télégraphistes
- 19- Les solutions de l'équation des télégraphistes
- 20- La ligne adaptée
- 21- Répartition de la tension sur une ligne adaptée
- 22- Impédance d'entrée d'une ligne adaptée
- 23- Coefficient de réflexion sur la ligne non adaptée
- 24- Quelques cas pratiques de réflexion
- 25- Ligne non adaptée en régime impulsionnel
- 26- Ligne non adaptée en régime indiciel
- 27- Ondes stationnaires sur la ligne non adaptée
- 28- Taux d'ondes stationnaires sur la ligne désadaptée
- 29- Application : réglage du ROS d'une antenne
- 30- La ligne en court-circuit
- 31- Application aux résonateurs
- 32- La ligne en circuit ouvert
- 33- Impédance d'entrée d'une ligne en circuit ouvert
- 34- Application : utilisation d'un cordon coaxial
- 35- Application à l'antenne dipôle
- 36- Champ créé par l'antenne dipôle
- 37- Application à l'antenne quart-d'onde
- 38- Application aux filtres à lignes
- 39- Exemple de répartition du courant dans une antenne
- 40- Exemple de champ créé par une antenne quart-d'onde





1- Propagation libre et guidée

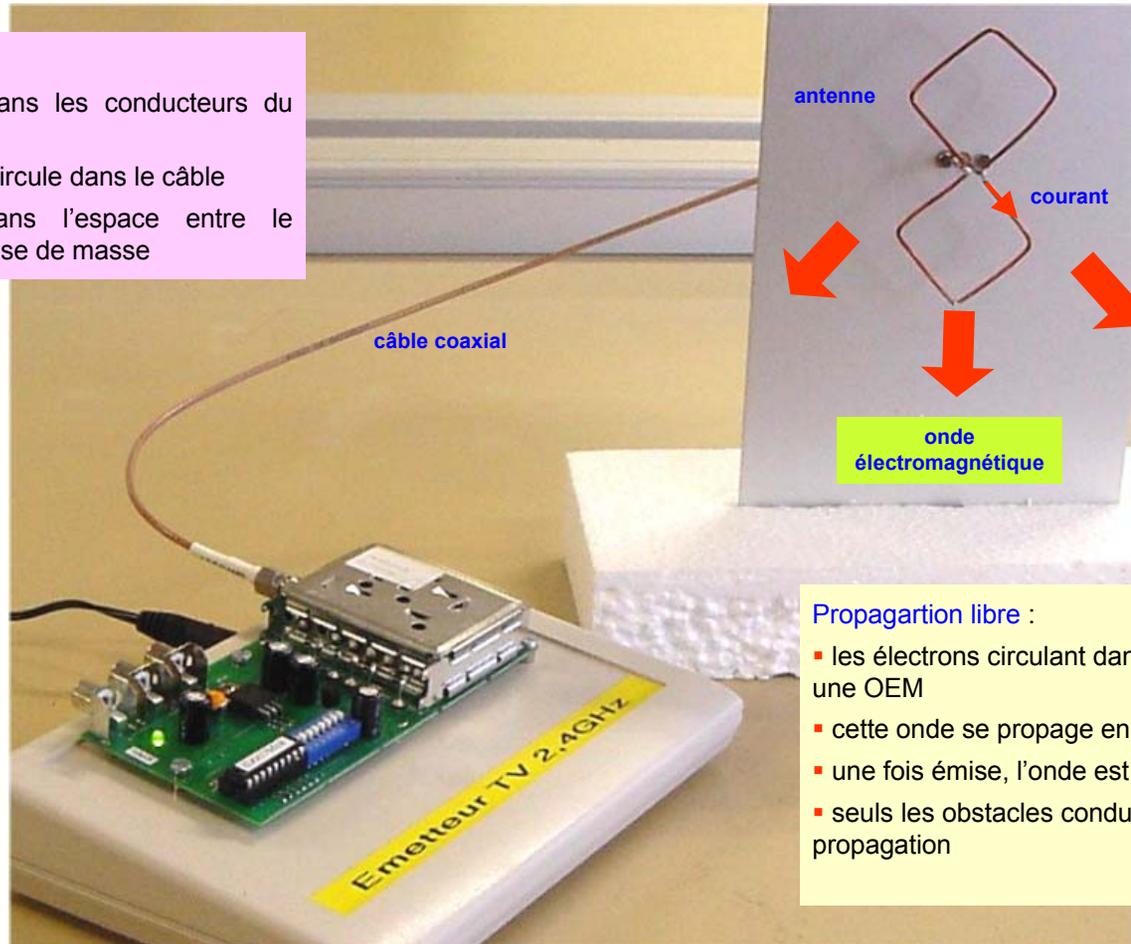


L'objectif d'un système de télécommunication est de transmettre d'un point à un autre une porteuse RF modulée par l'information qui peut :

- être transformée en onde électromagnétique OEM par l'antenne et se propager dans l'espace environnant : c'est la **propagation libre**
- être véhiculée par un support matériel (piste de circuit imprimé, câble câble coaxial ...) : c'est la **propagation guidée**

Propagation guidée :

- les électrons circulent dans les conducteurs du câble coaxial
- produisent une OEM qui circule dans le câble
- l'onde est confinée dans l'espace entre le conducteur central et la tresse de masse



Propagation libre :

- les électrons circulant dans l'antenne produisent une OEM
- cette onde se propage en s'éloignant de l'antenne
- une fois émise, l'onde est libre de se propager
- seuls les obstacles conducteurs limiteront sa propagation

Apulet : caractéristiques d'une onde électromagnétique plane



2- Les structures de guidage

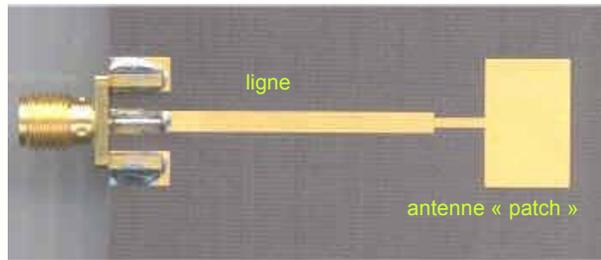


Pour guider une onde électromagnétique, différentes techniques sont utilisées aujourd'hui :

- les dispositifs formés de **2 conducteurs** : ligne bifilaire, câble coaxial, piste de circuit imprimé avec son plan de masse ...
- les dispositifs formés d'un **tube conducteur** ou **isolant** à l'intérieur duquel se propage l'OEM : guide d'onde, fibre optique
- des dispositifs qui **concentrent l'émission** dans une certaine direction : antennes directives



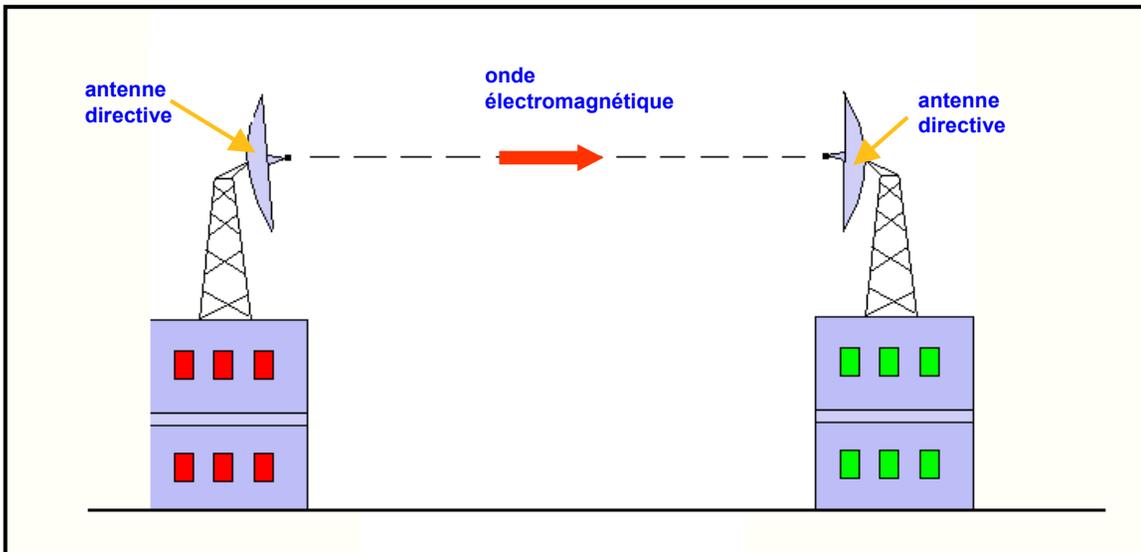
Câble coaxial



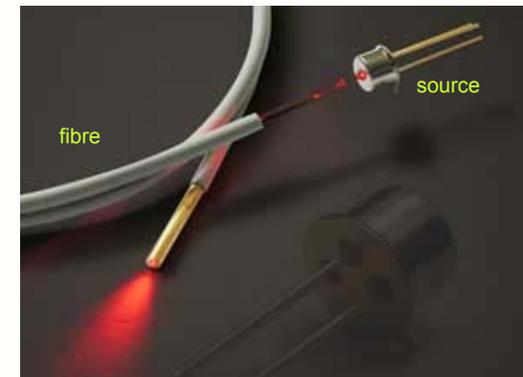
Ligne imprimée



Guide d'onde



Faisceau hertzien



Fibre optique

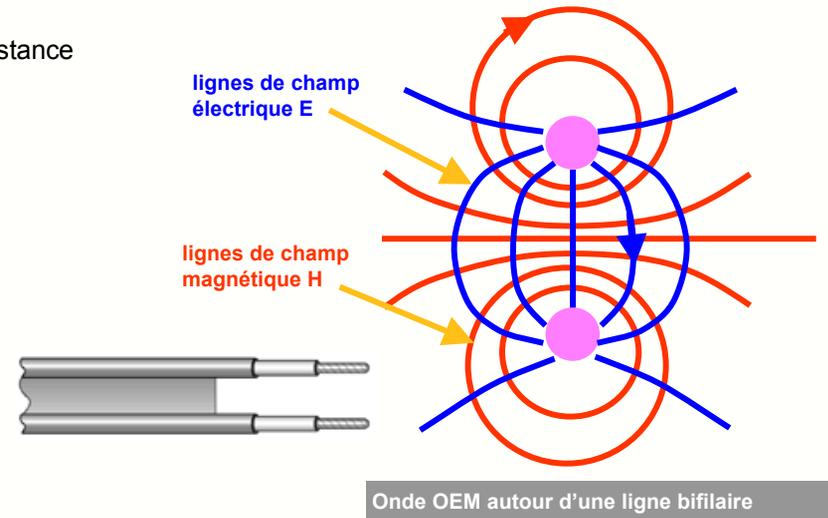
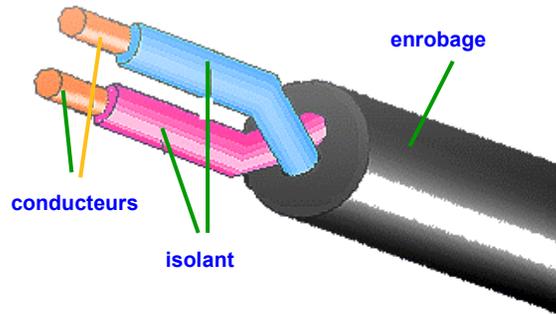


3- La ligne bifilaire



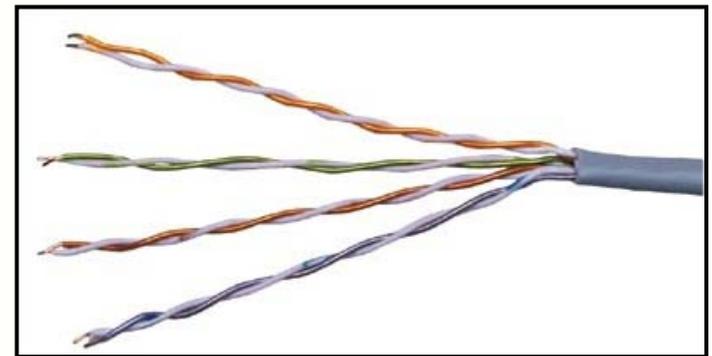
Historiquement, les premières lignes ont été utilisées pour le télégraphe et plus tard pour le téléphone :

- la ligne est constitué par deux conducteurs parallèles ou torsadés séparés par un isolant
- l'onde OEM accompagne le signal et se propage au voisinage de la ligne
- les champs sont intenses au voisinage des conducteurs et diminuent avec la distance



Exemple : caractéristiques d'une ligne bifilaire UTP données par le fabricant

- tension de service : 300 V
- type de l'isolant : polyoléfine
- impédance caractéristique : $Z_c = 100 \text{ ohms}$
- capacité entre conducteurs pour 1 mètre de ligne : $C = 56 \text{ pF/m}$
- atténuation : 6,6 dB pour 100 m à 10 MHz
- vitesse de propagation du signal : $v = 180\,000 \text{ km/s} = c/1,7$



Câble UTP formé de 4 paires torsadées

Remarque : l'impédance caractéristique n'est pas une résistance, l'importance de ce paramètre sera vue plus loin

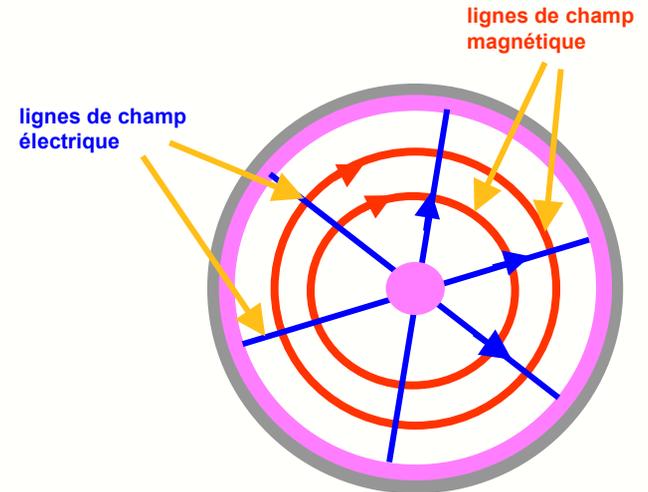
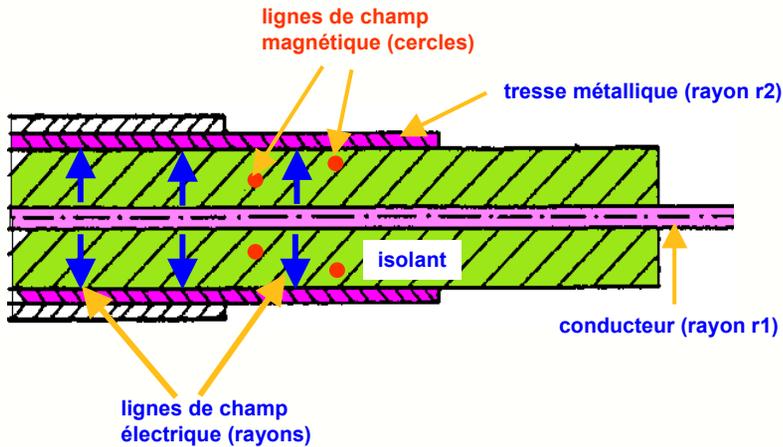
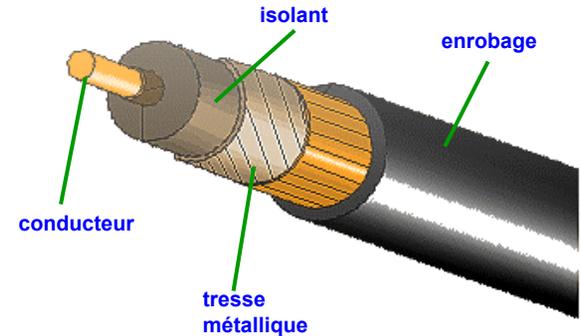


4- Le câble coaxial



Le câble coaxial est actuellement la structure de guidage la plus utilisée pour relier entre eux des équipements, depuis le domaine des basses-fréquences jusqu'à plus de 50 GHz :

- il est constitué d'un **conducteur central** et d'une **tresse périphérique**
- ces deux conducteurs sont séparés par un **diélectrique isolant**
- l'**onde OEM** se propage entre le conducteur central et la tresse
- les lignes de **champ électrique E** sont des rayons
- les lignes de **champ magnétique H** des cercles



Exemple : caractéristiques d'un câble RG 58C/U données par le fabricant

- tension maximale de service : 1400 V
- type du diélectrique : polyéthylène
- dimensions : $r1 = 0,2 \text{ mm}$, $r2 = 3 \text{ mm}$
- impédance caractéristique : $Zc = 50 \text{ ohms}$
- capacité entre conducteurs pour 1 mètre de ligne : $C = 100 \text{ pF/m}$
- atténuation : 34 dB pour 100 m à 400 MHz
- vitesse de propagation du signal : $v = 200\,000 \text{ km/s} = c/1,5$

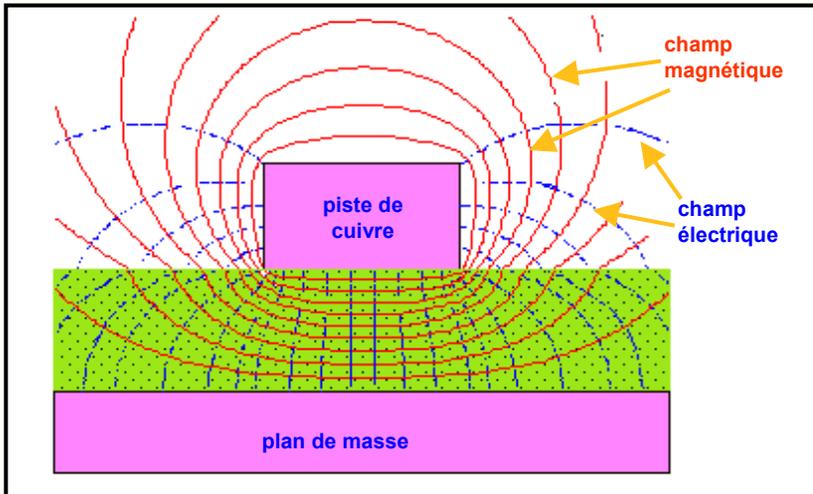
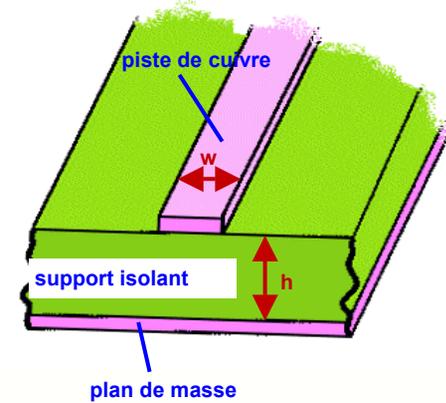


5- La ligne imprimée

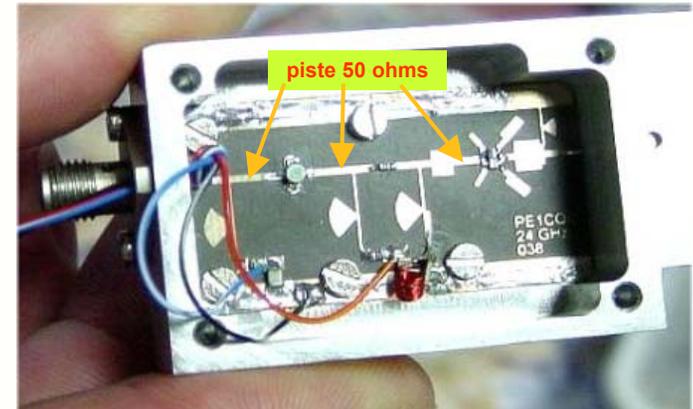


La **ligne imprimée** ou **microstrip** est très utilisée pour relier entre eux des composants RF sur un circuit imprimé, dès que la longueur de la piste est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde du signal transporté :

- elle est constituée d'une **piste en cuivre** et d'un **plan de masse**
- ces deux conducteurs sont séparés par un **diélectrique isolant** (époxy, téflon)
- l'onde OEM se propage au-dessus du plan de masse autour de la piste
- les lignes de **champ électrique E** vont de la piste au plan de masse
- les lignes de **champ magnétique** entourent la piste



Ampli-mélangeur 24 GHz



Exemple : ligne imprimée sur époxy d'épaisseur standard $h = 1,6 \text{ mm}$

- largeur de la piste : $w = 2,5 \text{ mm}$
- impédance caractéristique : $Z_c = 50 \text{ ohms}$
- capacité entre conducteurs pour 1 mètre de ligne : $C = 120 \text{ pF/m}$
- l'atténuation reste acceptable jusqu'à 2 GHz
- vitesse de propagation du signal : $v = 160\,000 \text{ km/s} = c/1,9$

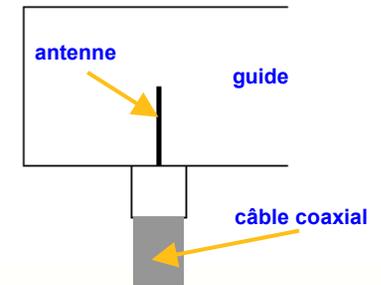
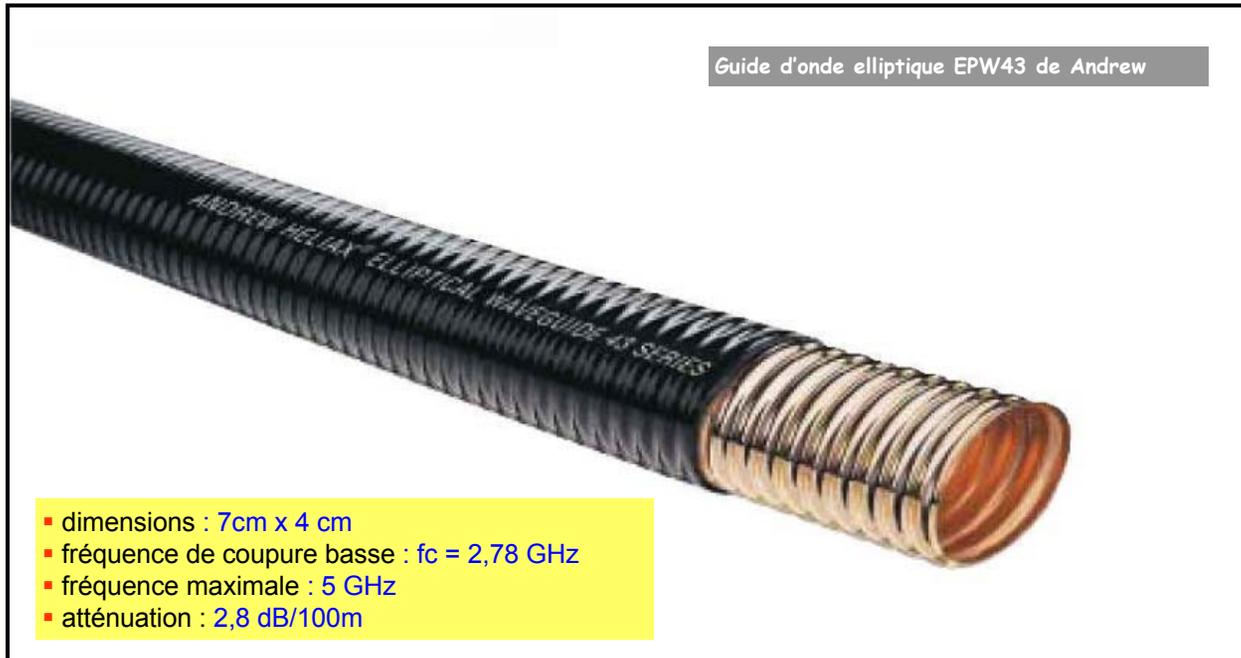


6- Le guide d'onde



Le guide d'onde est un **conducteur métallique creux** de section rectangulaire, circulaire ou elliptique dans lequel se propage l'OEM :

- le passage d'une ligne à un guide et inversement se fait à l'aide d'une antenne placée au bon endroit
- l'air étant un très bon diélectrique, les pertes liées à l'isolant sont très faibles
- pour un bon guide, les surfaces internes sont parfaitement polies, ce qui pose des problèmes de fabrication
- les guides de grande longueur restent d'un prix très élevé



Adaptateur guide rectangulaire-câble coaxial

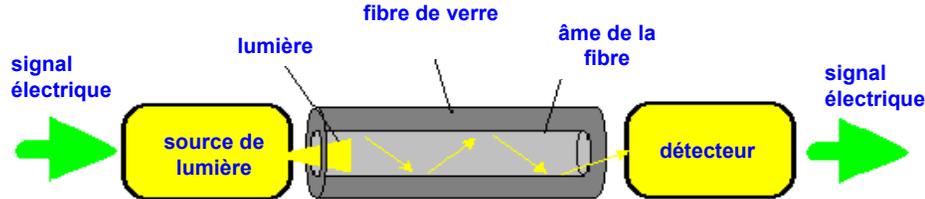
- contrairement aux lignes, les guides ont une **fréquence de coupure basse** qui dépend de leurs dimensions
- par exemple, pour un guide rectangulaire dont le grand coté vaut $a = 5$ cm, la fréquence de coupure basse vaut $f_c = 3$ GHz



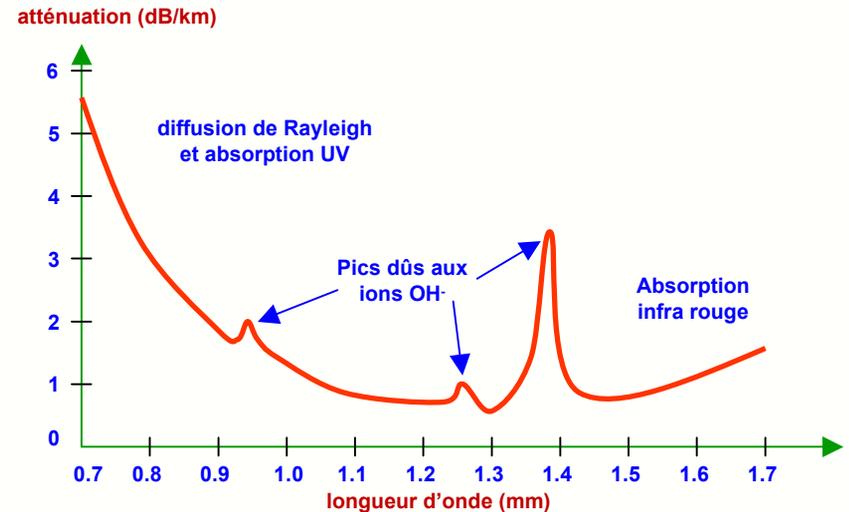
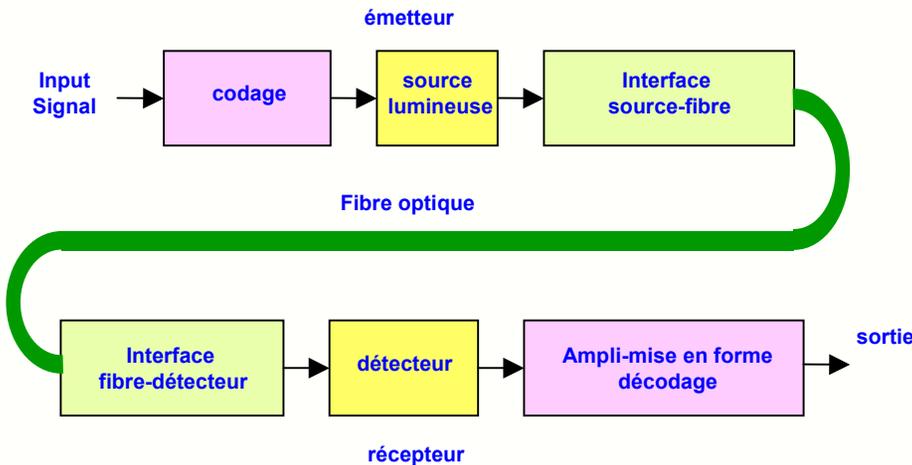
7- La fibre optique



Il existe un autre type de guide d'onde, entièrement isolant, appelé **guide d'onde diélectrique** dans lequel l'onde électromagnétique se propage dans le verre ou le plastique : la **fibre optique**.



- l'onde électromagnétique qui s'y propage est de très haute fréquence (longueur d'onde comprise entre 0,4 et 1,5 microns)
- les dimensions du cœur varient entre le micron pour les fibres **monomodes** et plusieurs dizaines de microns pour les fibres **multimodes**
- la fibre a de nombreux **avantages** par rapport au câble coaxial : **bande passante très large, pertes faibles, coût très bas**
- le **raccordement et des connecteurs** présentent cependant des difficultés de mise en oeuvre



8- Les différents types de fibres optiques

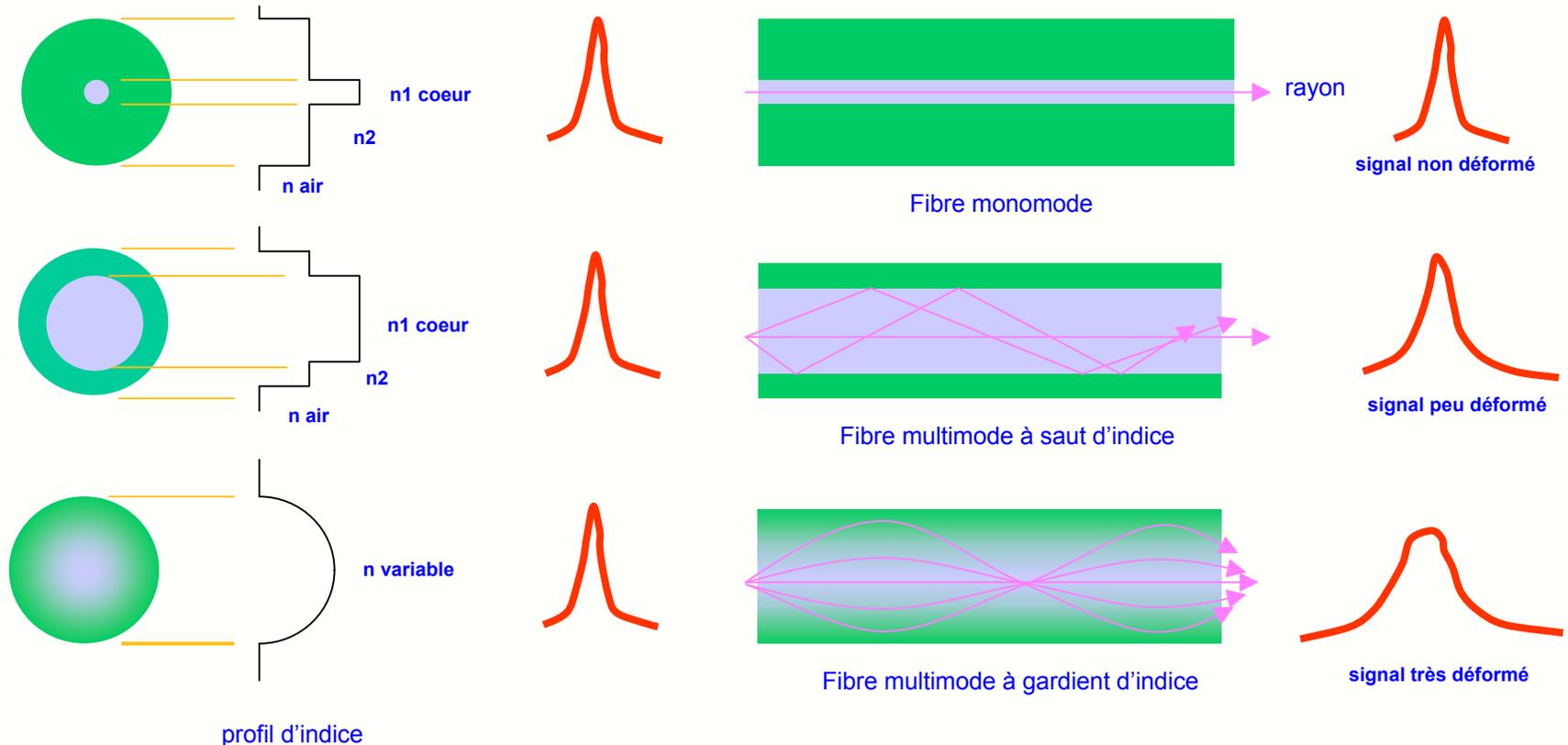


Les fibres multimodes :

- propagent plusieurs modes qui ont des parcours différents, d'où distorsion de phase et déformation du signal transmis
- à cause de leur diamètre plus grand, l'injection de lumière et le raccordement sont plus simples

Les fibres monomodes :

- ne propagent que le mode fondamental et le parcours de l'OEM par réflexions successives à l'intérieur de la fibre, est unique et bien défini
- les signaux sont transmis sans déformations, ce qui est intéressant pour des signaux analogiques
- raccorder deux tronçons de ces fibres nécessite un savoir-faire particulier





9- Différence entre une ligne et un circuit ordinaire



Les lignes sont des circuits dont les dimensions ne sont pas petites devant la longueur d'onde des signaux transmis :

- il faut alors tenir compte de la **vitesse de propagation** des grandeurs électriques qui est forcément inférieure à la vitesse de la lumière c
- par conséquent, à un instant donné, **tensions et courants ne seront pas identiques en tout point d'un conducteur**
- c'est la nouveauté par rapport à l'étude des circuits aux basses-fréquences où on applique l'**approximation des états quasi-stationnaires**

Premier cas :

- on travaille aux **basses-fréquences** ou
- avec une ligne de **longueur faible** devant la longueur d'onde du signal



Résultat :

- on **néglige le temps de propagation** que met le signal pour aller de l'entrée à la sortie de la ligne
- si la résistance des conducteurs est négligeable, la tension en sortie est alors égale à la tension d'entrée

$$s(t) = e(t)$$

Deuxième cas :

- on travaille à des **fréquences élevées** ou
- avec une ligne voisine ou plus **longue** que la longueur d'onde du signal



Résultat :

- on **tient compte du temps de propagation** t_0 que met le signal pour aller de l'entrée à la sortie de la ligne
- même si la résistance des conducteurs est négligeable, la tension en sortie n'est plus égale à la tension d'entrée

$$s(t) \neq e(t)$$

10- Retard sur une ligne en régime impulsionnel



Si on applique à l'entrée du câble une impulsion fine, le phénomène de propagation est bien visible :

- à l'entrée l'impulsion $e(t)$ s'écrit :

$$e(t) = g(t)$$

- le signal se propage à la vitesse v et arrive en bout de ligne avec un retard :

$$\tau = \frac{l}{v}$$

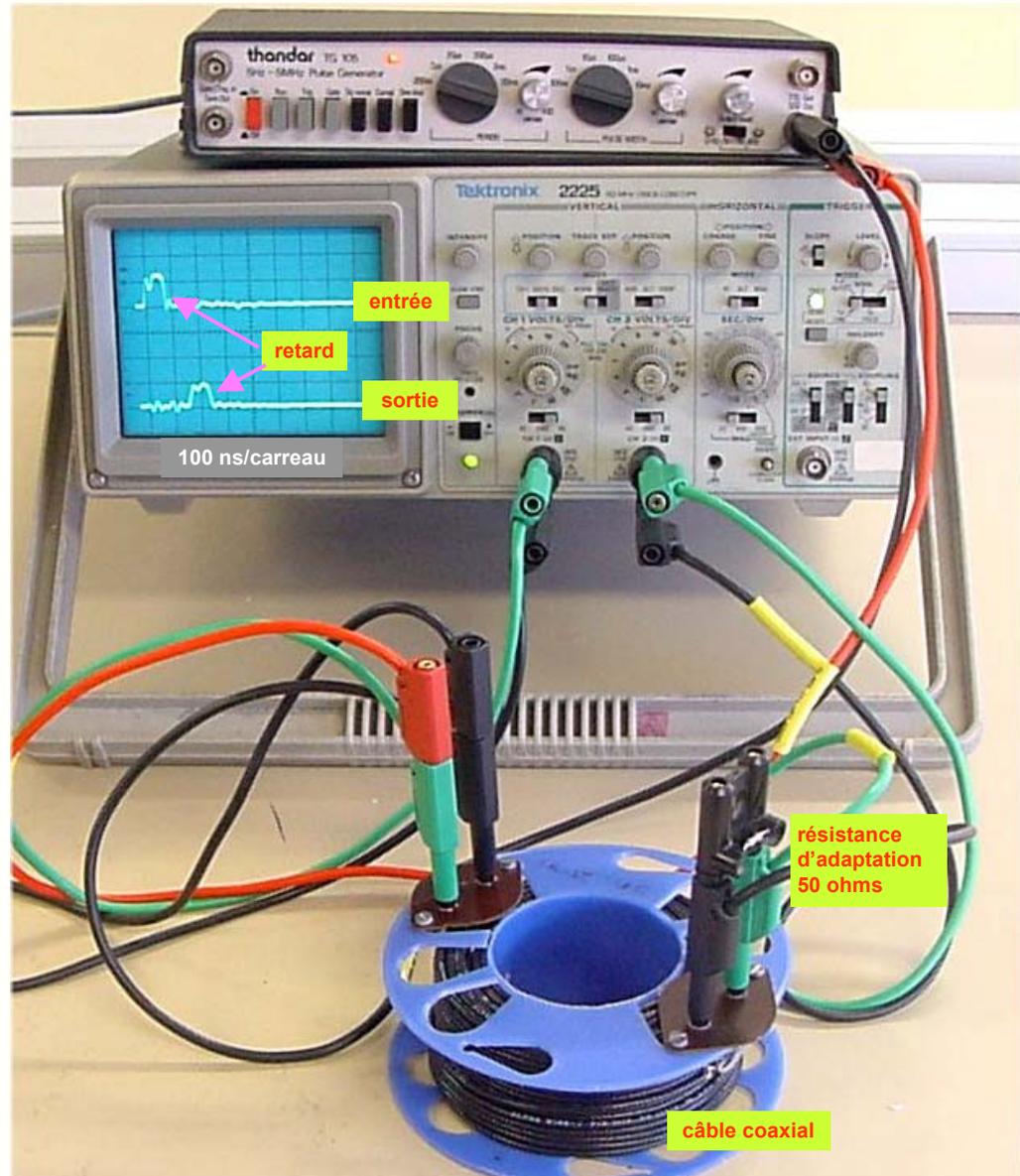
- la tension en bout de ligne s'écrit donc :

$$s(t) = g(t - \tau)$$

Câble coaxial :

- longueur $l = 30$ m
- impédance caractéristique : $Z_c = 50$ ohms
- vitesse de propagation $v = 187\,000$ km/s
- résistance de charge $R = 50$ ohms
- largeur de l'impulsion : 100 ns
- retard théorique : 160 ns

Remarque : le rôle de la résistance de charge sera expliqué plus loin (adaptation de la ligne)





11 - Retard sur une ligne en régime sinusoïdal



Examinons le cas concret d'un câble de grande longueur relié à un générateur sinusoïdal :

- si on applique à l'entrée de la ligne une tension sinusoïdale $e(t)$:

$$e(0,t) = E \cdot \cos(\omega t)$$

- le signal va se propager à la vitesse v et arrive à la position d'abscisse x avec un retard :

$$\tau = \frac{x}{v}$$

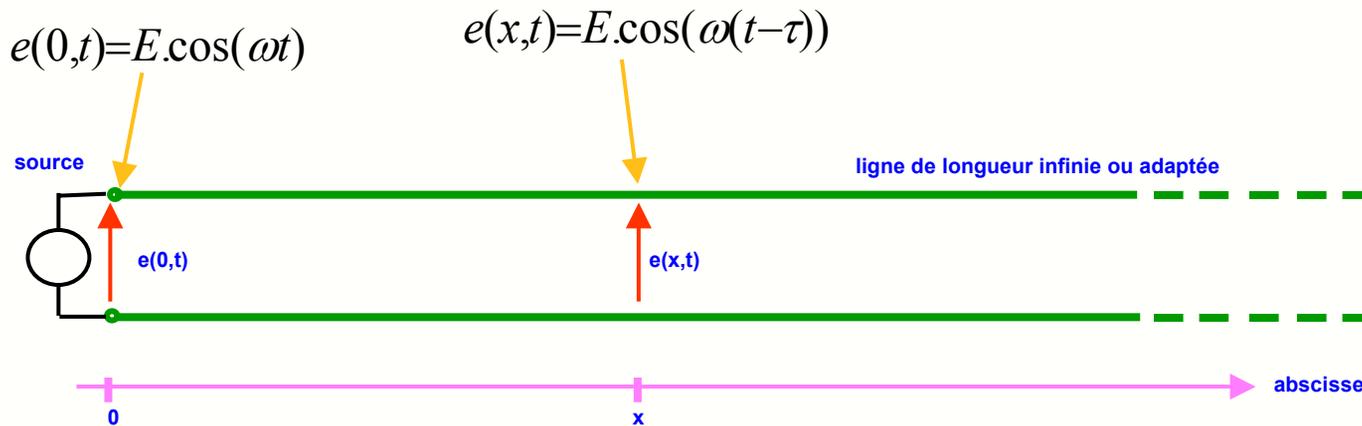
- la tension en un point d'abscisse x s'écrit donc :

$$e(x,t) = E \cdot \cos(\omega(t - \tau)) = E \cdot \cos(\omega(t - \frac{x}{v})) = E \cdot \cos(\omega t - \varphi)$$

- ce retard se traduit en régime sinusoïdal par un déphasage entre l'entrée et la sortie :

$$\varphi = \omega \frac{x}{v} = k \cdot x$$

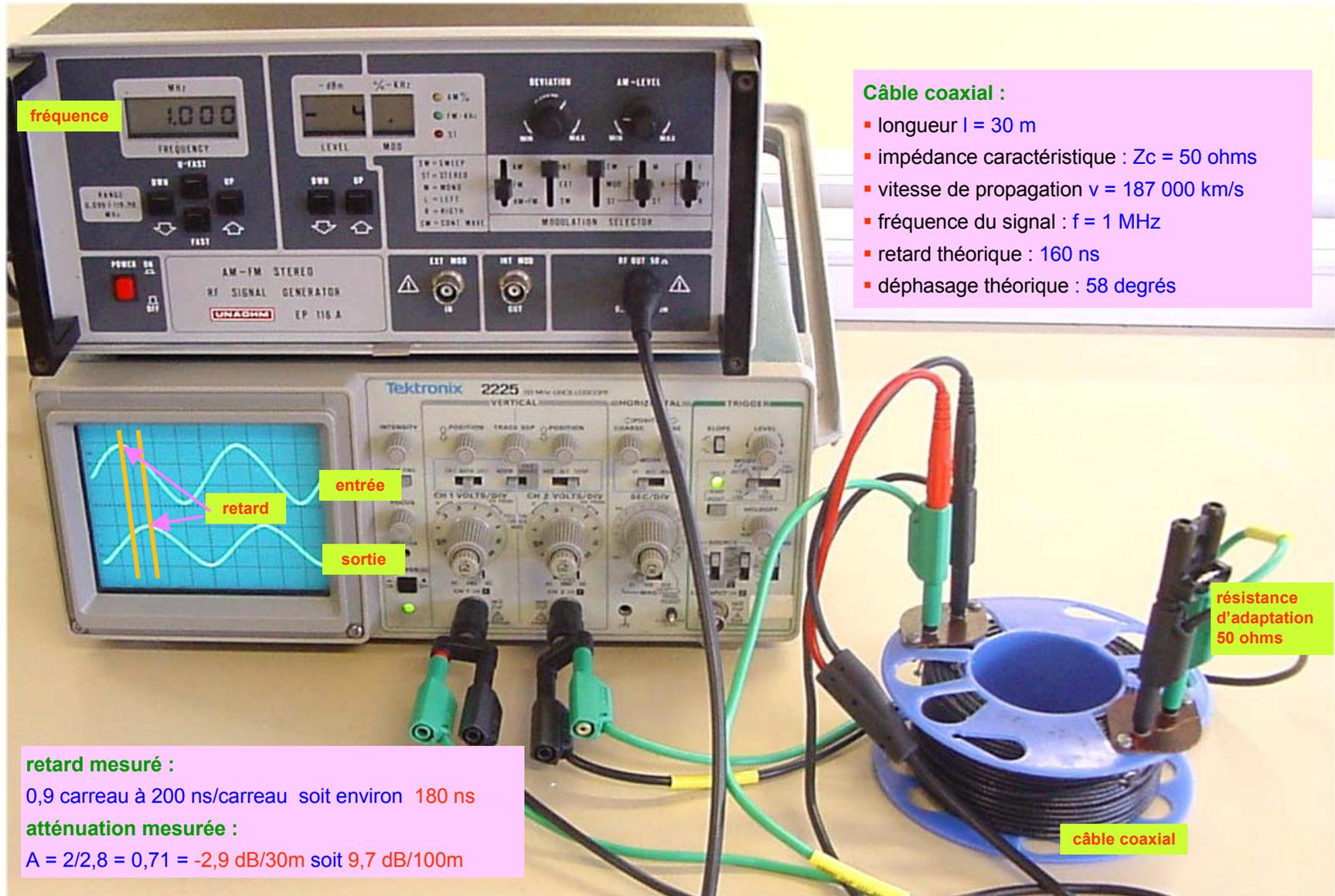
si on pose $k = \frac{\omega}{v}$



Remarque : le signal $e(t)$ qui se propage de l'entrée vers la sortie du câble est aussi appelé « onde progressive »



12- Déphasage introduit par un câble



fréquence

Câble coaxial :

- longueur $l = 30 \text{ m}$
- impédance caractéristique : $Z_c = 50 \text{ ohms}$
- vitesse de propagation $v = 187\,000 \text{ km/s}$
- fréquence du signal : $f = 1 \text{ MHz}$
- retard théorique : 160 ns
- déphasage théorique : 58 degrés

entrée

retard

sortie

résistance d'adaptation 50 ohms

câble coaxial

retard mesuré :

0,9 carreau à 200 ns/carreau soit environ 180 ns

atténuation mesurée :

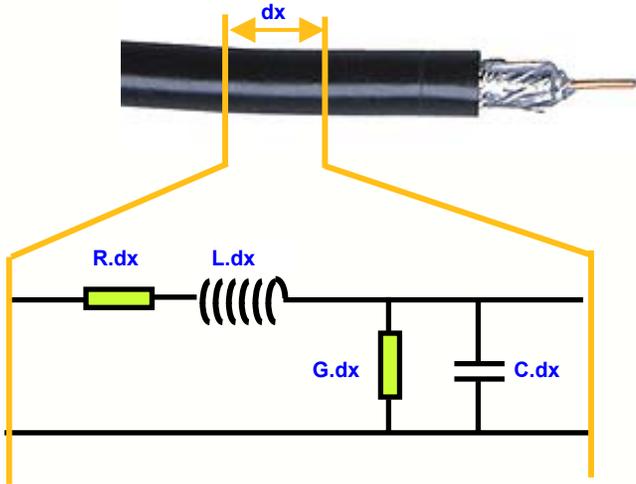
$A = 2/2,8 = 0,71 = -2,9 \text{ dB}/30\text{m}$ soit $9,7 \text{ dB}/100\text{m}$



13- Modèle électrique d'une ligne



Pour modéliser une ligne, on considère qu'elle est formée d'une infinité de tronçons de longueur infiniment petite dx en cascade :



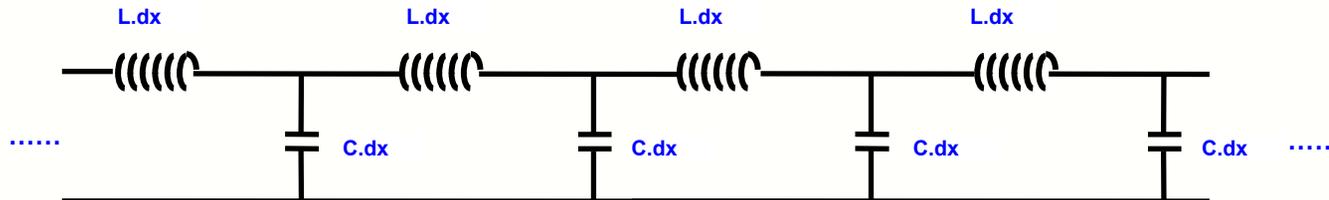
On définit pour la ligne 4 grandeurs :

- la **résistance linéique** R ou résistance des conducteurs par unité de longueur qui est en général très faible (en ohms/m)
- l'**inductance linéique** L : chaque tronçon de ligne est soumis à un champ variable créé par le courant circulant dans les tronçons voisins. Il est donc le siège de phénomènes d'induction caractérisés par l'inductance par unité de longueur (en H/m)
- la **conductance linéique** G : c'est l'inverse de la résistance entre les deux conducteurs constituant la ligne. Pour un bon diélectrique, la résistance de fuite est très élevée et on prend souvent $G = 0$ (en Siemens/m)
- la **capacité linéique** C : c'est la capacité qui existe entre les deux fils (en F/m)

Ordres de grandeur :	$R = 0,01 \text{ ohm/m}$	$G = 0,01 \text{ S/m}$
	$C = 100 \text{ pF/m}$	$L = 250 \text{ nH/m}$

Les lignes actuelles (câble coaxial, lignes imprimées) ayant des pertes très faibles, on peut donc dans une première étude négliger ces pertes et admettre que la résistance linéique est nulle et la conductance linéique infinie.

Le câble pourra alors être considéré comme la **mise en cascade** d'un grand nombre de **cellules LC** élémentaires :





14- Constantes localisées ou constantes réparties

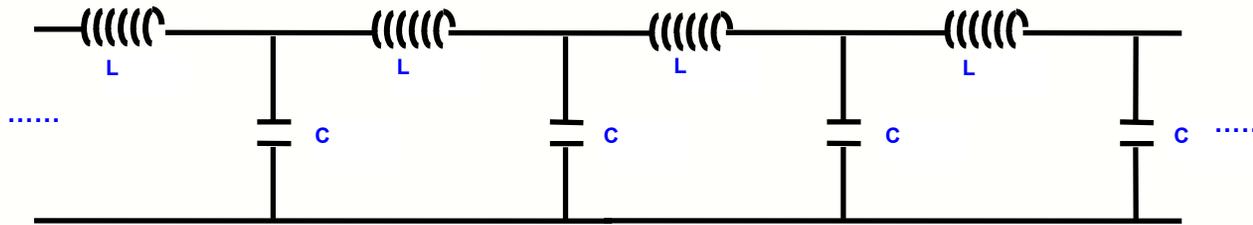


▪ dans le cas d'une ligne ou d'un câble, la **capacité et l'inductance** sont dites délocalisées ou **réparties** le long de la ligne.



Ligne à constantes réparties

▪ si on réalise un montage identique avec des bobines et des condensateurs on obtient une ligne à retard à **constantes localisées**



Ligne à constantes localisées

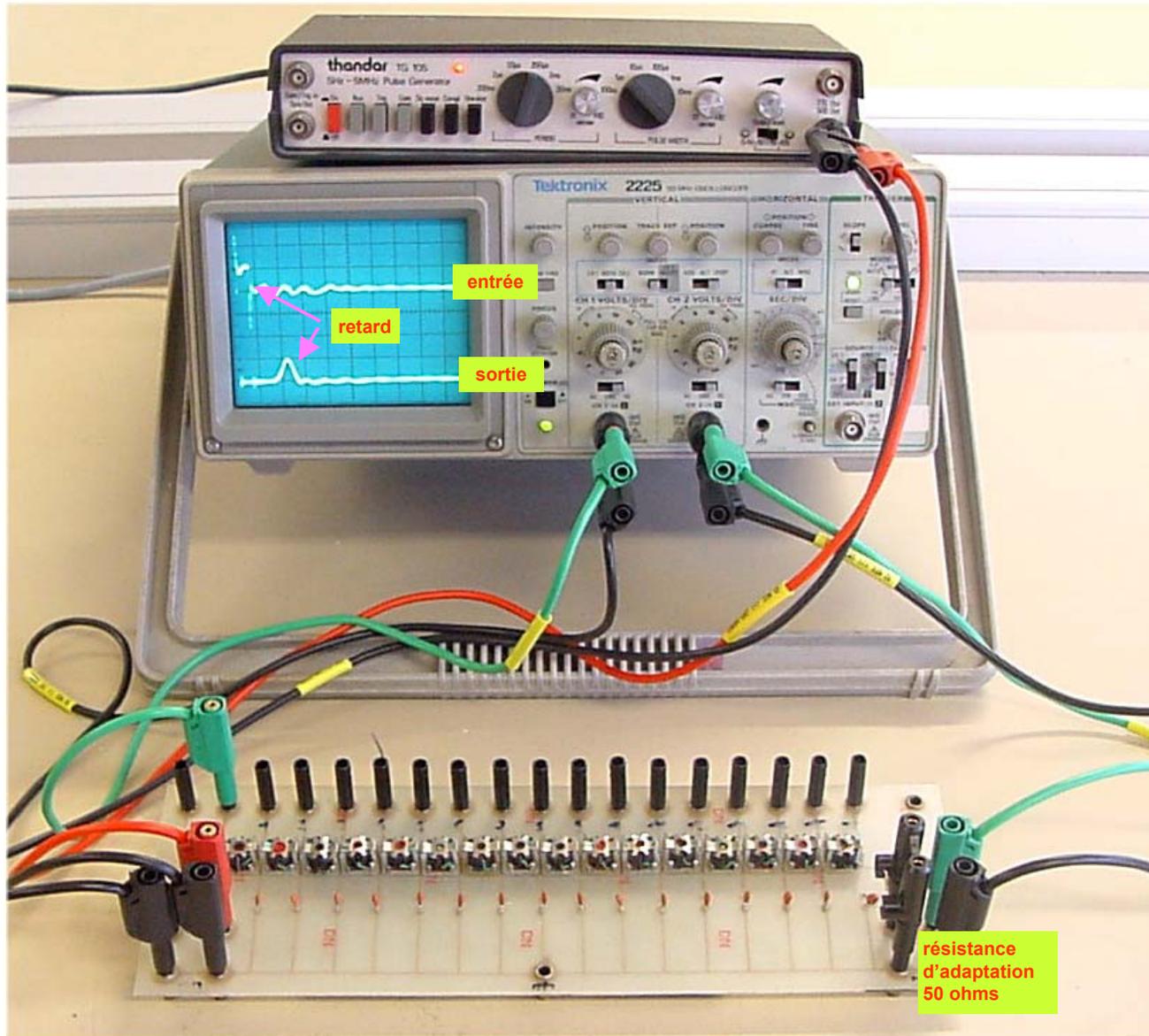
Exemple :

- 16 cellules
- $L = 12 \mu\text{H}$
- $C = 4,7 \text{ nF}$
- $Z_c = 50 \text{ ohms}$
- retard $3,8 \mu\text{s}$





15- Retard introduit par une ligne à constantes localisées



- Ligne à retard :**
- 16 cellules
 - $L = 12 \mu\text{H}$
 - $C = 4,7 \text{ nF}$
 - $Z_c = 50 \text{ ohms}$
 - largeur de l'impulsion 1 μs
 - retard 3,8 μs

La ligne à constante localisée :

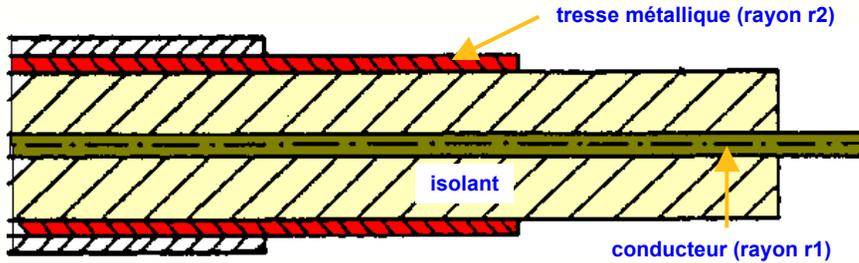
- se comporte de la même façon qu'un câble
- introduit un retard qui augmente avec le nombre de cellules LC
- a une atténuation plus forte aux hautes fréquences
- l'atténuation des harmoniques déforme l'impulsion en l'arrondissant



16- Grandeurs caractéristiques d'un câble coaxial



Un câble coaxial est essentiellement caractérisé par les dimensions de ses deux conducteurs et la nature du diélectrique.



- rayon du conducteur intérieur : r_1
- rayon du conducteur extérieur : r_2
- permittivité relative du diélectrique : ϵ_r
- perméabilité relative du diélectrique : μ_r
- résistance des conducteurs : $R=G=0$
- permittivité du vide : $\epsilon_0 = \frac{1}{36 \cdot \pi \cdot 10^9}$
- perméabilité magnétique du vide : $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$

On démontre alors les résultats suivants :

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad v = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} = k \cdot c \quad \text{coefficient de vitesse } k = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

Application : câble coaxial caractérisé par

- un rapport de rayons $r_2/r_1 = 5$
- une permittivité relative de l'isolant de 4
- une perméabilité relative de l'isolant de 1



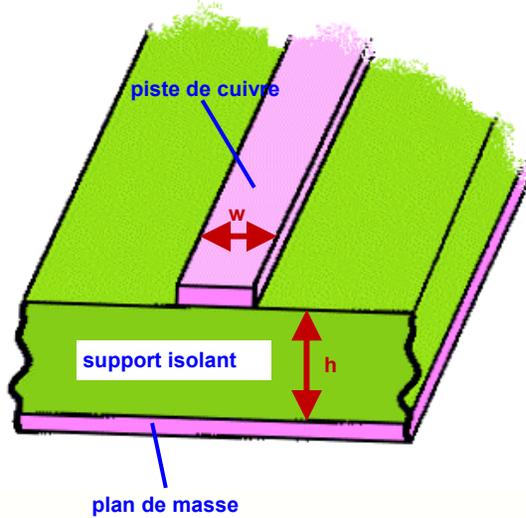
$Z_c = 48 \text{ ohms}$
 $v = 150\,000 \text{ km/s}$
 $C = 133 \text{ pF/m}$
 $L = 330 \text{ nH/m}$
 coefficient de vitesse $k = 0,5$



17- Grandeurs caractéristiques d'une ligne imprimée



L'impédance caractéristique dépend essentiellement du type de support isolant (époxy, téflon ...) et de la largeur de la piste.

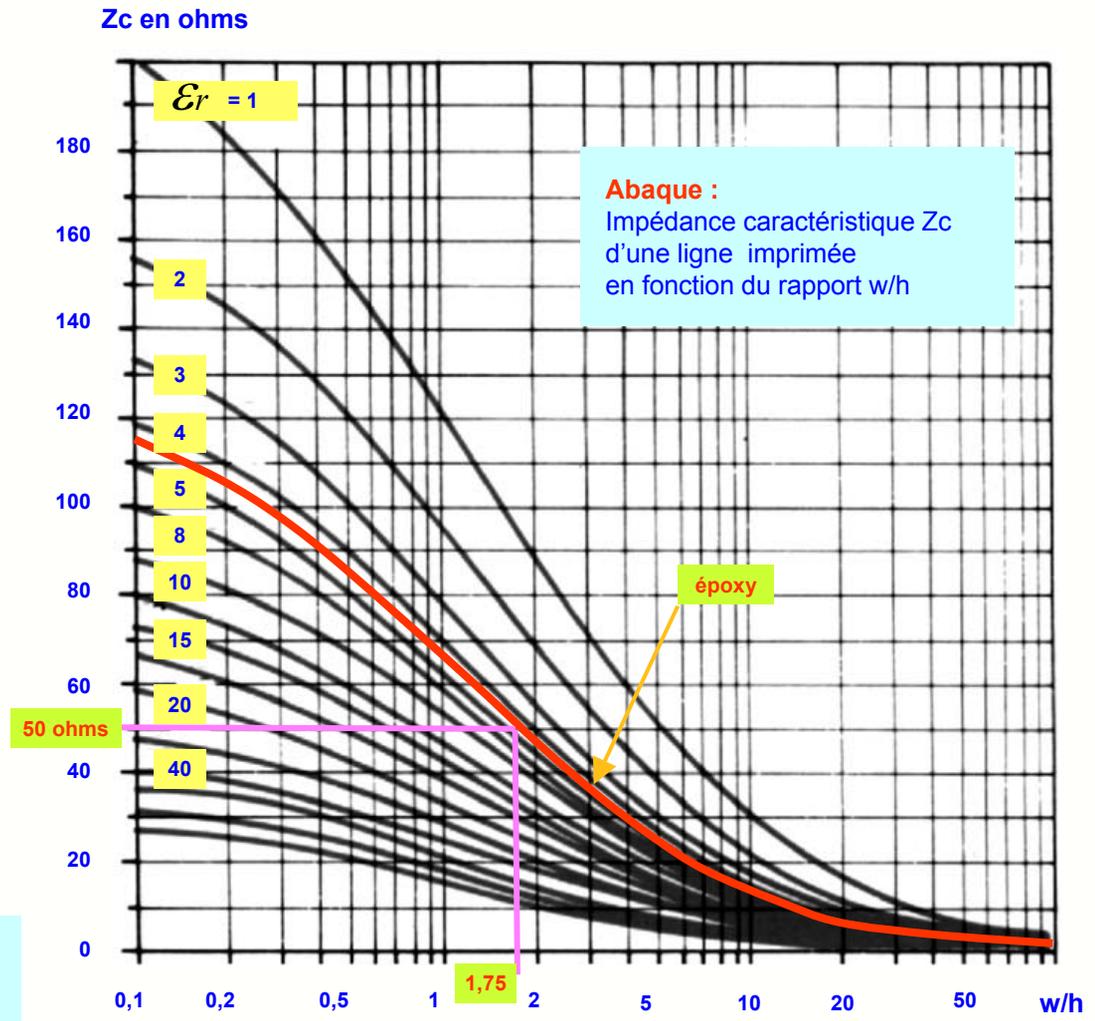


Exemple :

- pour l'époxy d'épaisseur $h = 1,6 \text{ mm}$
- la permittivité relative vaut environ 4,5
- une impédance caractéristique de $Z_c = 50 \text{ ohms}$
- est obtenue pour $w/h = 1,75$
- soit une largeur de piste de $w = 2,8 \text{ mm}$

Remarques :

- une piste large est essentiellement capacitive
- une piste fine est essentiellement inductive

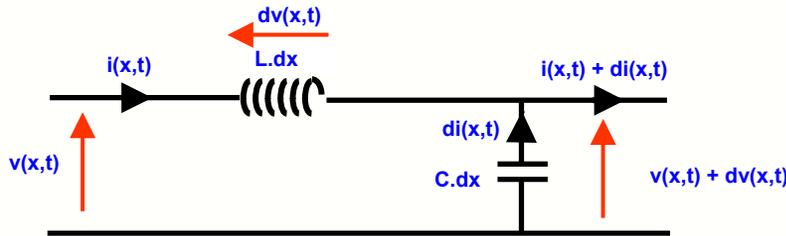




18- L'équation des télégraphistes



Pour établir les équations différentielles que vérifient tension et courant sur la ligne, on raisonne sur un tronçon de ligne de longueur dx :



la loi d'Ohm pour la bobine s'écrit : $dv(x,t) = Ldx \cdot \frac{d(i(x,t))}{dt}$ soit $\frac{dv(x,t)}{dx} = L \frac{d(i(x,t))}{dt}$

la loi d'Ohm pour le condensateur s'écrit : $di(x,t) = -Cdx \cdot \frac{d(v(x,t) + dv(x,t))}{dt} \approx -Cdx \cdot \frac{d(v(x,t))}{dt}$ soit $\frac{di(x,t)}{dx} = -C \frac{d(v(x,t))}{dt}$

nous en déduisons : $\frac{d^2v(x,t)}{dx^2} = L \frac{d}{dx} \left[\frac{d(i(x,t))}{dt} \right]$ et $\frac{d^2i(x,t)}{dx^2} = -C \frac{d}{dx} \left[\frac{d(v(x,t))}{dt} \right]$

d'où les équations de propagation appelées **équations des télégraphistes** :

$$\frac{d^2v(x,t)}{dx^2} = -LC \cdot \frac{d^2v(x,t)}{dt^2} \quad \text{et} \quad \frac{d^2i(x,t)}{dx^2} = -LC \cdot \frac{d^2i(x,t)}{dt^2}$$

Quelle que soit la forme du signal, tension et courant sur la ligne vérifient ces deux équations différentielles.



19- Les solutions de l'équation des télégraphistes

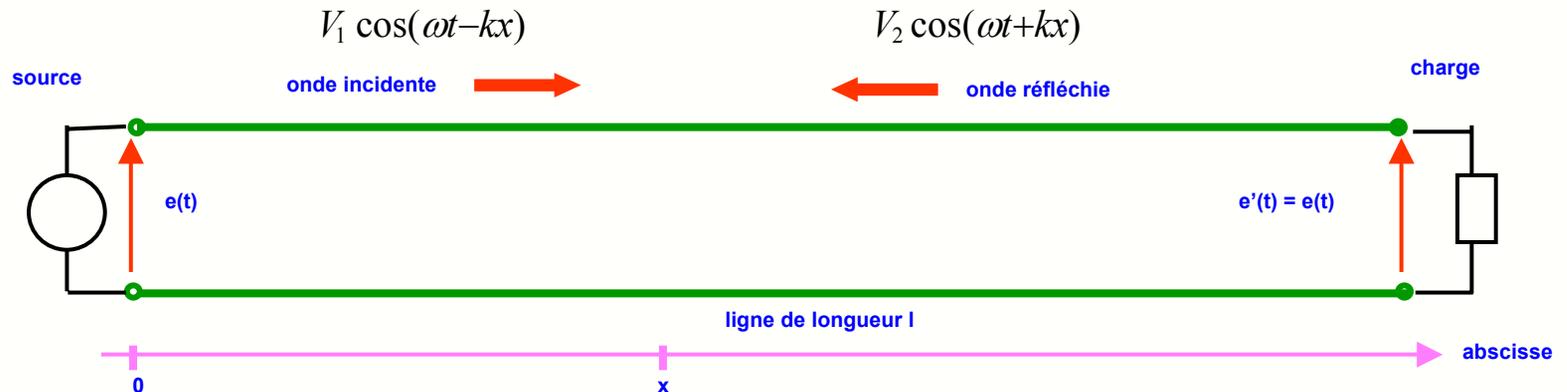


En régime sinusoïdal, ces deux équations différentielles du second ordre se résolvent aisément à l'aide de l'outil mathématique approprié et admettent les solutions suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} v(x,t) = V_1 \cos(\omega t - kx) + V_2 \cos(\omega t + kx) \\ i(x,t) = \frac{V_1}{Z_c} \cos(\omega t - kx) - \frac{V_2}{Z_c} \cos(\omega t + kx) \end{array} \right. \quad \text{avec} \quad \left\{ \begin{array}{l} k = \frac{\omega}{v} \\ Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \end{array} \right. \quad v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

La tension sur la ligne est la somme de deux termes qui sont deux ondes progressives se propageant en sens contraire :

- une onde progressive d'amplitude V_1 se propageant de la source vers la charge avec une vitesse v : c'est l'onde incidente
- une onde progressive d'amplitude V_2 se propageant de la charge vers la source : c'est l'onde réfléchie



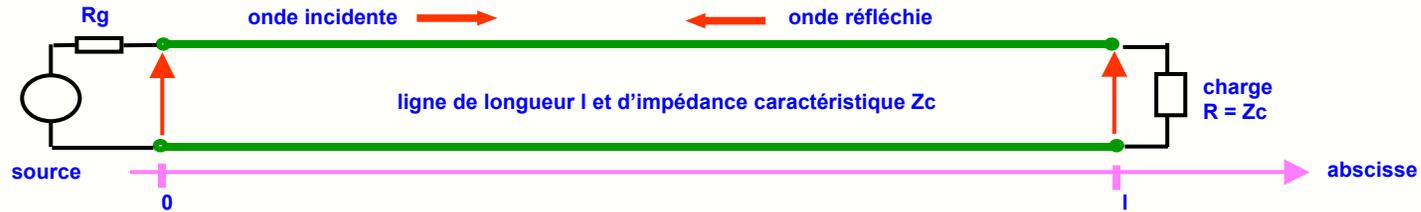
Exemple : si on applique un signal sinusoïdal à l'entrée d'un câble coaxial, ce signal va se propager vers la sortie du câble, et une partie de ce signal va se réfléchir sur la résistance terminale et revenir vers la source.



20- La ligne adaptée



On dit qu'une ligne est **adaptée** si elle est terminée sur une résistance égale à son impédance caractéristique.

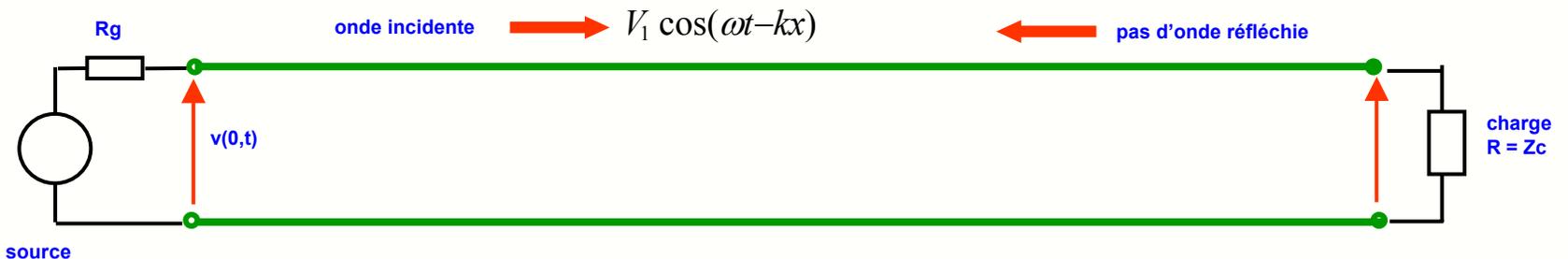


▪ en bout de ligne soit à l'abscisse $x = l$, on peut écrire :

$$\left\{ \begin{aligned} v(l,t) &= V_1 \cos(\omega t - kl) + V_2 \cos(\omega t + kl) \\ i(l,t) &= \frac{V_1}{Z_c} \cos(\omega t - kl) - \frac{V_2}{Z_c} \cos(\omega t + kl) \end{aligned} \right.$$

▪ on a évidemment aussi la loi d'ohm appliquée à la charge : $v(l,t) = Z_c \cdot i(l,t)$

▪ on en déduit : $v(l,t) = V_1 \cos(\omega t - kl) + V_2 \cos(\omega t + kl) = V_1 \cos(\omega t - kl) - V_2 \cos(\omega t + kl)$ qui ne peut être vérifiée que si $V_2 = 0$



Résultat important : sur la ligne adaptée, il n'y a qu'une onde progressive se propageant de la source vers la charge



21 - Répartition de la tension sur une ligne adaptée



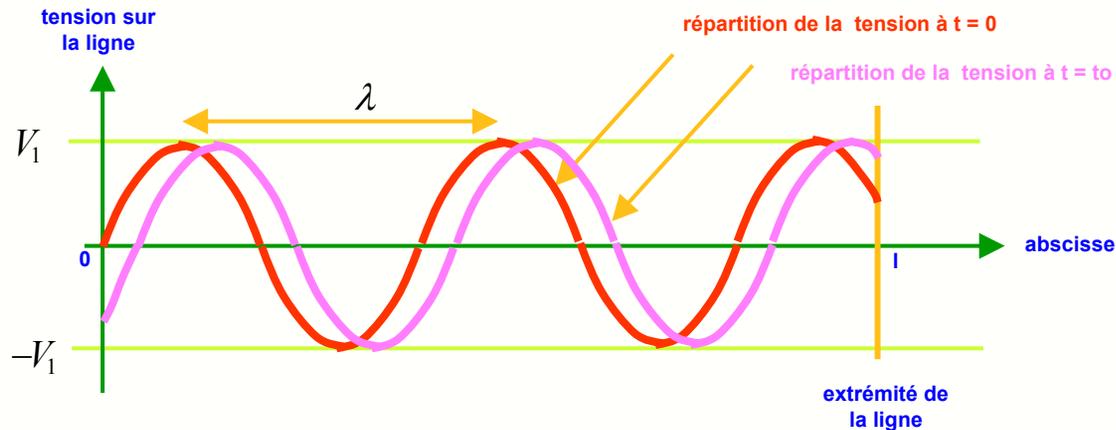
La tension sur la ligne adaptée a pour expression : $v(x,t)=V_1 \cos(\omega t-kx)$

à l'entrée de la ligne ($x = 0$) on a : $v(0,t)=V_1 \cos(\omega t)$

à une distance x de l'entrée, on a : $v(x,t)=V_1 \cdot \cos(\omega(t-\frac{x}{v}))=V_1 \cdot \cos(\omega t-\varphi)$ avec $\varphi=\omega\frac{x}{v}=k \cdot x$

Les points en phase sont séparés par un intervalle tel que le déphasage soit un multiple de 2π :

$$\varphi=\omega\frac{x}{v}=N \cdot 2 \cdot \pi \quad \text{avec } N \text{ entier, soit} \quad x=N \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{v}{\omega}=N \cdot \lambda$$



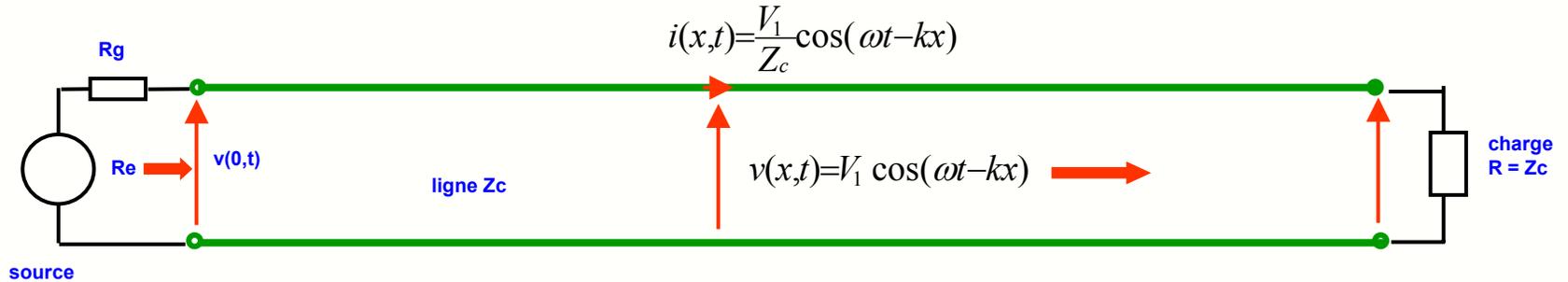
- après t_0 secondes, tous les maxima ont avancé d'une distance $x_0 = v \cdot t_0$
- la ligne est le siège d'une **onde progressive de tension** se déplaçant à la vitesse v de la source vers la charge
- de la même façon, la ligne est le siège d'une **onde progressive de courant** se déplaçant à la vitesse v de la source vers la charge



22- Impédance d'entrée d'une ligne adaptée



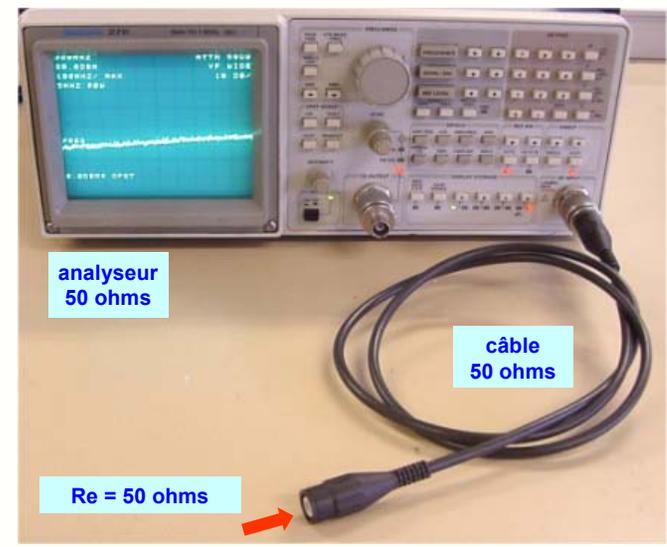
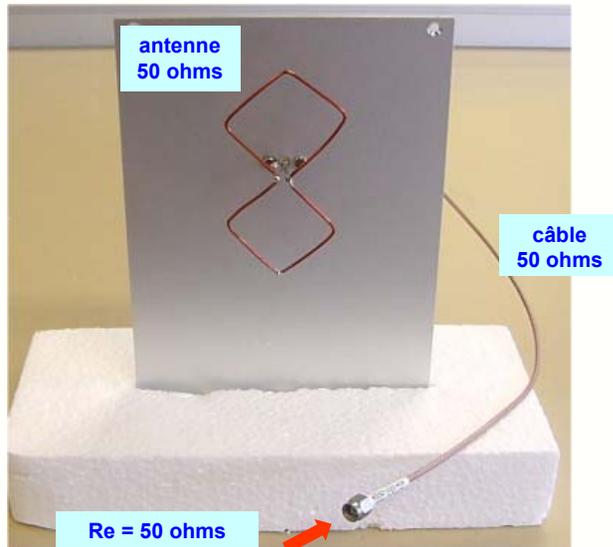
La tension et le courant sur la ligne adaptée ont pour expression :



A l'entrée de la ligne ($x = 0$) on a : $v(0,t) = V_1 \cos(\omega t)$ et $i(0,t) = \frac{V_1}{Z_c} \cos(\omega t) = I_1 \cos(\omega t)$

La tension et le courant sont en phase, l'impédance d'entrée est donc résistive et vaut : $R_e = \frac{V_1}{I_1} = Z_c$

Résultat important : une ligne d'impédance caractéristique Z_c adaptée présente une résistance d'entrée $R_e = Z_c$



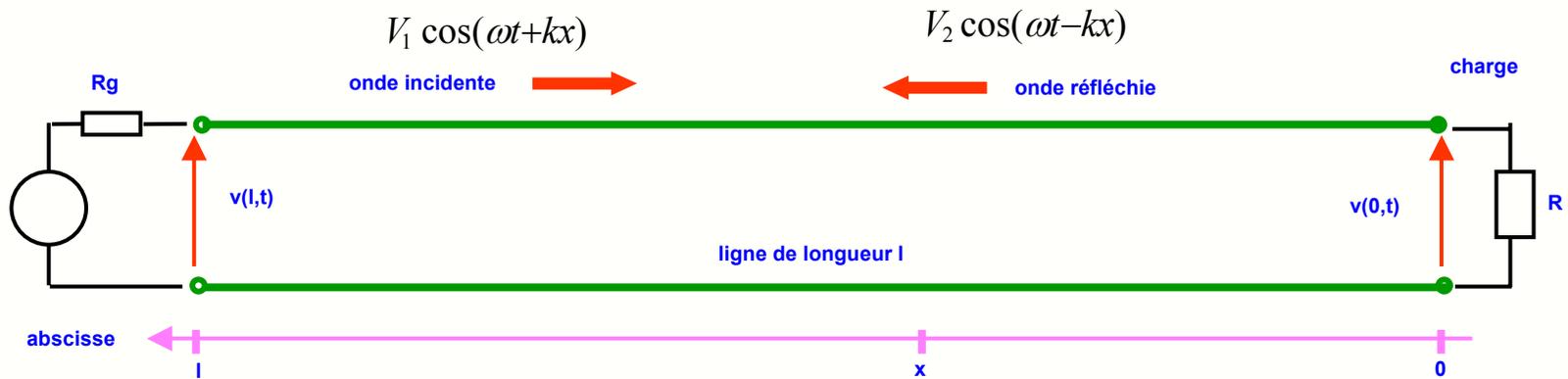


23- Coefficient de réflexion sur la ligne non adaptée



Pour étudier ce cas, faisons un changement de repère en prenant :

- un axe qui a son origine en bout de ligne et orienté de la sortie vers l'entrée
- la variable x représente maintenant la distance entre le point courant et l'extrémité de la ligne
- une origine des temps telle que la phase de l'onde incidente soit nulle au niveau de la charge



- tension et courant sur la ligne s'écrivent maintenant :

$$\left\{ \begin{aligned} v(x,t) &= V_1 \cos(\omega t + kx) + V_2 \cos(\omega t - kx) \\ i(x,t) &= \frac{V_1}{Z_c} \cos(\omega t + kx) - \frac{V_2}{Z_c} \cos(\omega t - kx) \end{aligned} \right.$$

- or en bout de ligne, on a aussi : $v(0,t) = R \cdot i(0,t)$ soit $V_1 \cos(\omega t) + V_2 \cos(\omega t) = \frac{R}{Z_c} [V_1 \cos(\omega t) - V_2 \cos(\omega t)]$

- on en déduit l'expression du coefficient de réflexion :

$$r = \frac{V_2}{V_1} = \frac{R - Z_c}{R + Z_c}$$



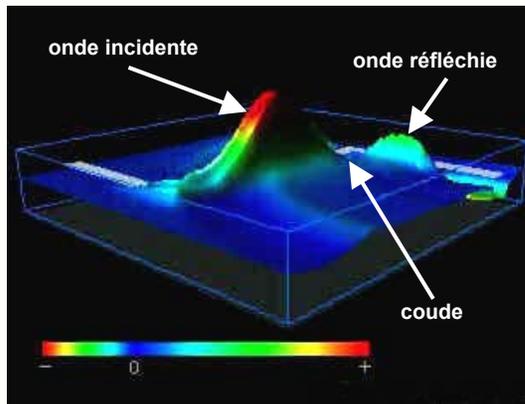
24- Quelques cas pratiques de réflexion



Dès que l'impédance caractéristique n'est plus respectée une partie plus ou moins importante du signal se réfléchit :

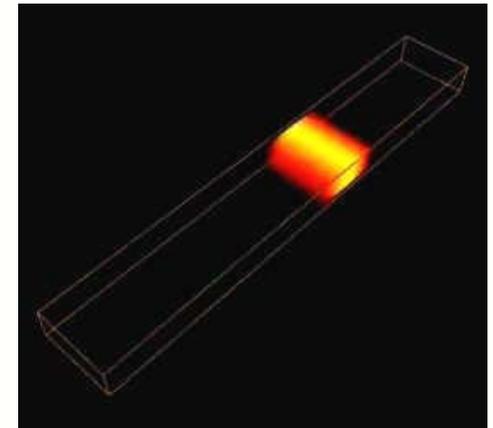
- ce phénomène n'est pas propre aux lignes mais se produit aussi dans d'autres domaines comme la **mécanique** et l'**acoustique**
- une **réflexion totale** est obtenue pour une charge infinie , le coefficient de réflexion valant alors $r = 1$ (réflexion **sans changement de signe**)
- une **réflexion totale** est aussi obtenue pour une charge $R = 0$, on a alors $r = -1$ (réflexion **avec changement de signe**)
- dans le cas général, c'est une partie du signal qui se réfléchit et revient vers la source, ce qui est presque toujours gênant

Vidéo : réflexions mécaniques



Vidéo : réflexion sur un coude

Vidéo : réflexion dans un guide



Réflexions en mécanique :

- une onde mécanique se propage sur un dispositif appelé « échelle de perroquet »
- en fonction de la contrainte mécanique en bout de structure, l'onde se réfléchit ou non, avec ou sans changement de signe

Réflexions sur une piste :

- une impulsion se propage sur une piste présentant des angles à 90°
- il en résulte une rupture d'impédance caractéristique à l'origine d'une réflexion

Réflexions dans un guide :

- une impulsion se propage dans un guide d'onde fermé à ses extrémités
- il en résulte une réflexion avec changement de signe à chaque bout du guide

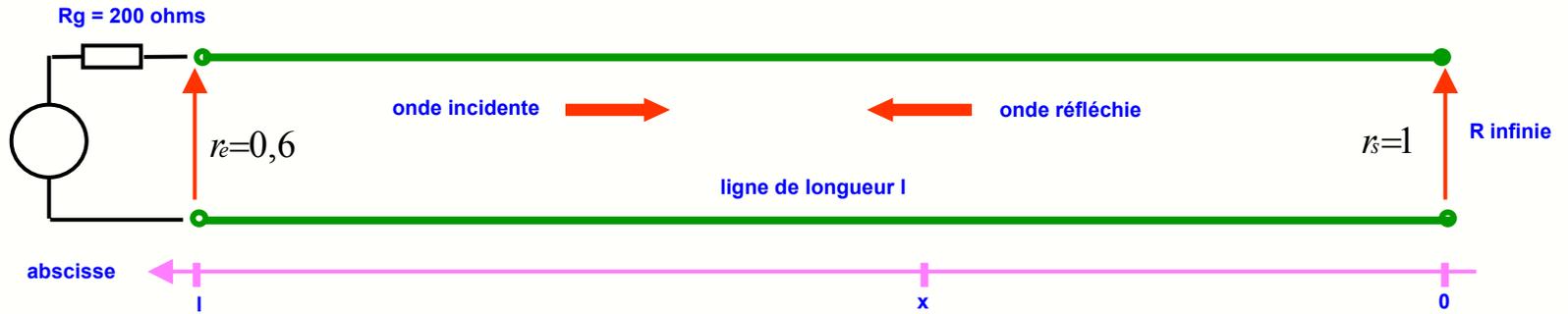
ondes mécaniques : [Applet](#)



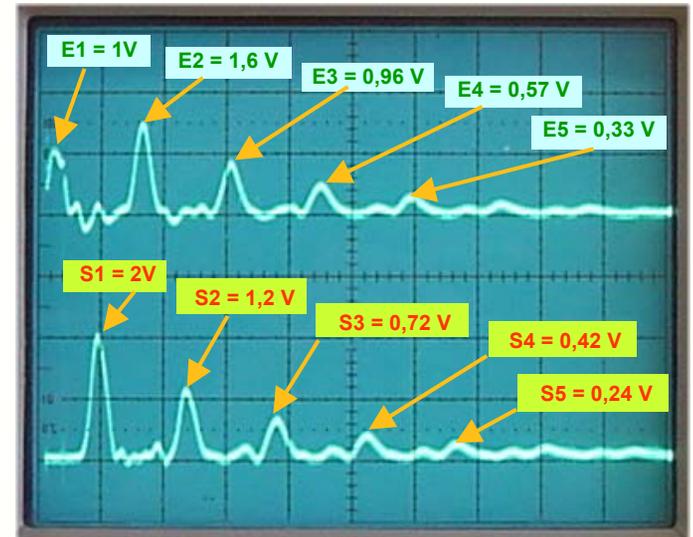
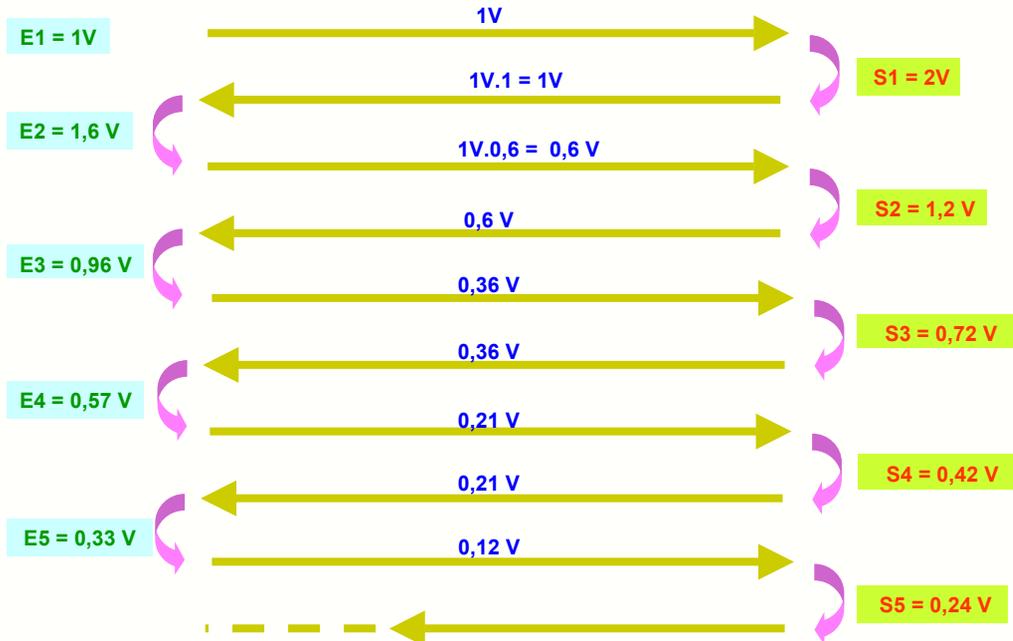
25- Ligne non adaptée en régime impulsionnel



Si on envoie une impulsion fine sur une ligne non adaptée en entrée et en sortie, elle va faire des aller-retour en s'atténuant peu à peu :



- à chaque réflexion, l'amplitude du signal est multipliée par le coefficient de réflexion correspondant
- à chaque extrémité, onde incidente et onde réfléchie se superposent



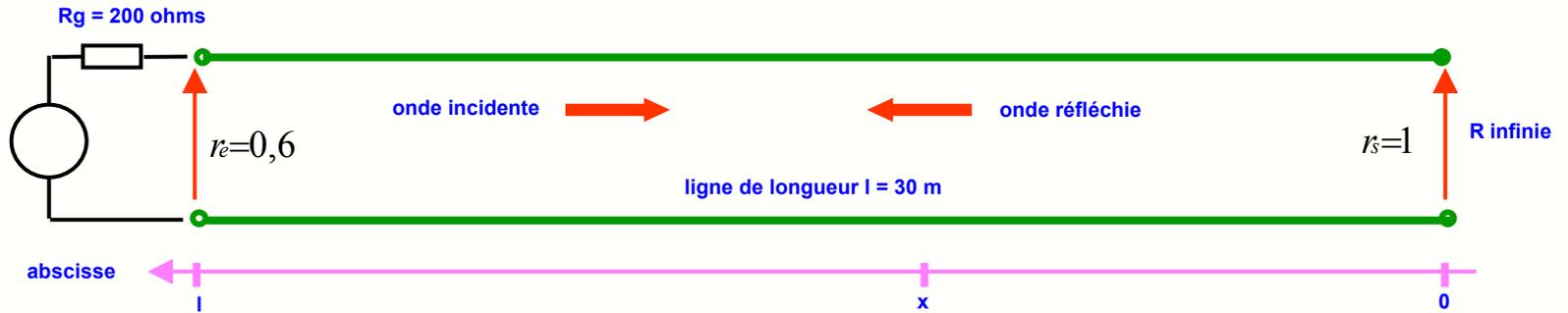
Oscillogrammes à l'entrée et à la sortie



26- Ligne non adaptée en régime indiciel



Si on envoie un échelon sur une ligne non adaptée en entrée et en sortie, il va faire des aller-retour en se superposant à la tension existante :



- à chaque réflexion, l'amplitude du signal est multipliée par le coefficient de réflexion correspondant comme pour la ligne en régime sinusoïdal ou impulsionnel
- à chaque extrémité, onde incidente et onde réfléchie se superposent

Oscillogrammes à l'entrée et à la sortie

régime transitoire dû aux réflexions

- le régime transitoire est en escaliers, la durée d'un niveau étant égal à la durée de l'aller-retour
- l'amplitude du signal réfléchi diminuant peu à peu, le signal finit par se stabiliser à la valeur prévue par un raisonnement d'électricité classique



Applet : ligne en régime indiciel (simple)

Applet : ligne en régime indiciel (plus complète)



27- Ondes stationnaires sur la ligne non adaptée



Si on applique à l'entrée de la ligne une tension sinusoïdale, les ondes incidentes et réfléchies vont se superposer pour donner un système d'ondes stationnaires :

à une distance x du bout de la ligne la tension s'écrit : $v(x,t)=V_1 \cos(\omega t+kx)+r.V_1 \cos(\omega t-kx)$

aux points où $x=N.\frac{\lambda}{2}$ le déphasage vaut $kx=\frac{\omega}{v}.N.\frac{\lambda}{2}=N.\pi$

les 2 termes sont en phase, et si r est positif, la tension sera maximale :

$$V_{\max}=V_1 (1+r)$$

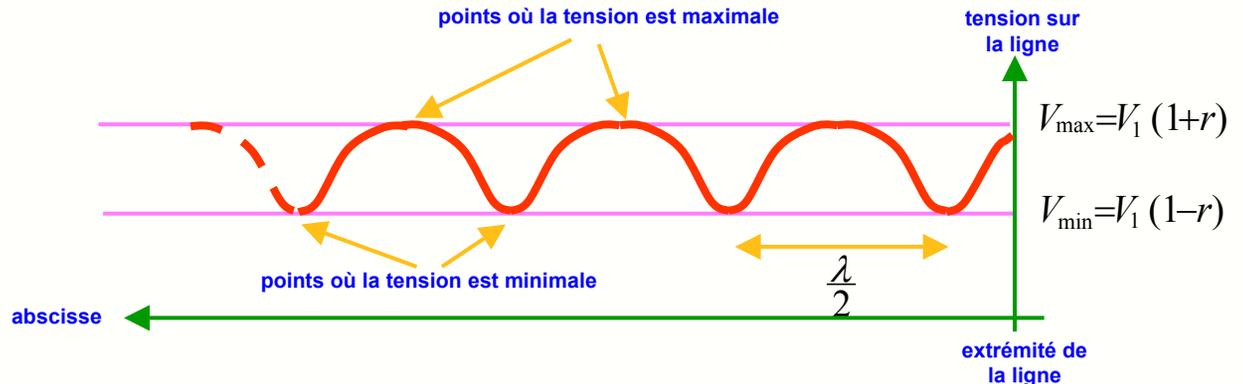
aux points où $x=(2N+1).\frac{\lambda}{2}$ le déphasage vaut $kx=(2N+1).\frac{\pi}{2}$

les 2 termes sont en opposition de phase et la tension minimale :

$$V_{\min}=V_1 (1-r)$$

Résultat : sur une ligne désadaptée, la tension n'est pas la même partout mais dépend de l'endroit où on la mesure

- les points où la tension est maximale s'appellent des **ventres**
- les points où la tension est minimale s'appellent des **nœuds**



[Vidéo](#) : ondes stationnaires en mécanique

[Applet](#) : ondes stationnaires sur une ligne



28- Taux d'ondes stationnaires sur la ligne désadaptée



Sauf exception, on recherche toujours l'adaptation et on caractérise la situation par le **rapport d'ondes stationnaires ROS** souvent improprement appelé **taux d'ondes stationnaires TOS** (Voltage Standing Wave Ratio des anglo-saxons) :

$$ROS = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{1+|r|}{1-|r|}$$

On peut retenir comme repères les valeurs suivantes :

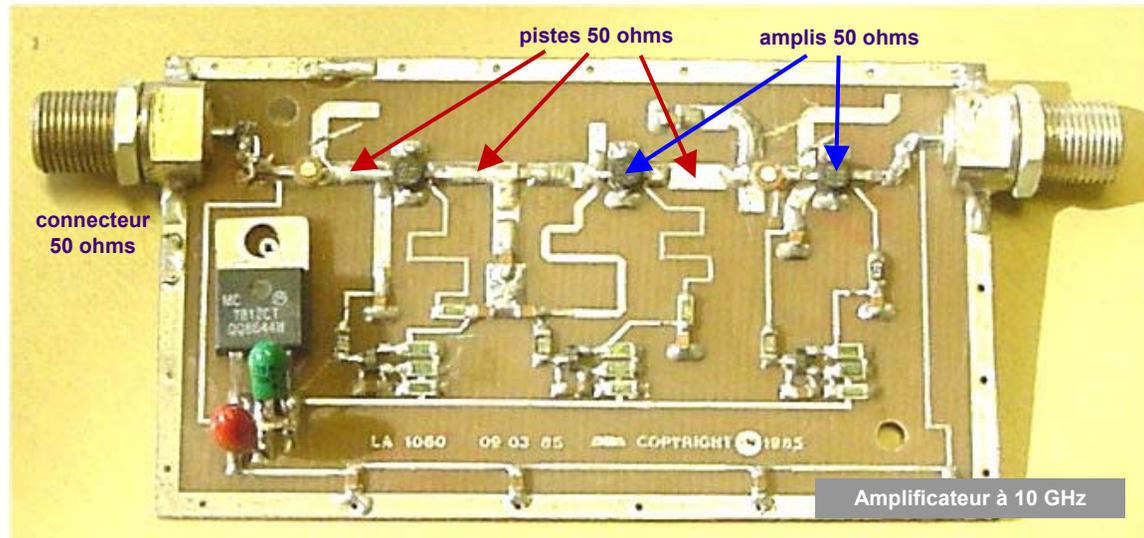
- ROS = 1 ligne parfaitement adaptée , r = 0
- ROS de 1 à 1,5 ligne presque adaptée
- ROS supérieur à 2 ligne désadaptée

Lorsqu'on applique à l'entrée d'une ligne désadaptée une tension d'amplitude V1, la tension en sortie de la ligne a une valeur dépendant de la désadaptation et comprise entre 0 et 2V1.

Dans la pratique, c'est très gênant de ne pas maîtriser la valeur du signal en un point.

Dans tous les équipements travaillant aux fréquences élevées, on veille donc autant que possible à rester dans les conditions de l'adaptation d'impédance, avec une **impédance normalisée** qui est de **50 ohms** en général et de **75 ohms** pour la télévision :

- les composants (amplis, filtres, mélangeurs ...) ont une **impédance d'entrée** et de **sortie** résistive égale à **50 ohms**
- les pistes qui relient ces composants sont des **pistes** d'impédance caractéristique **Zc = 50 ohms**
- les câbles qui relient les équipements entre eux ont une impédance **Zc = 50 ohms**
- les connecteurs pour le branchement du câble sur la carte ont une impédance **Zc = 50 ohms**



Appllet : tension et courant sur un câble

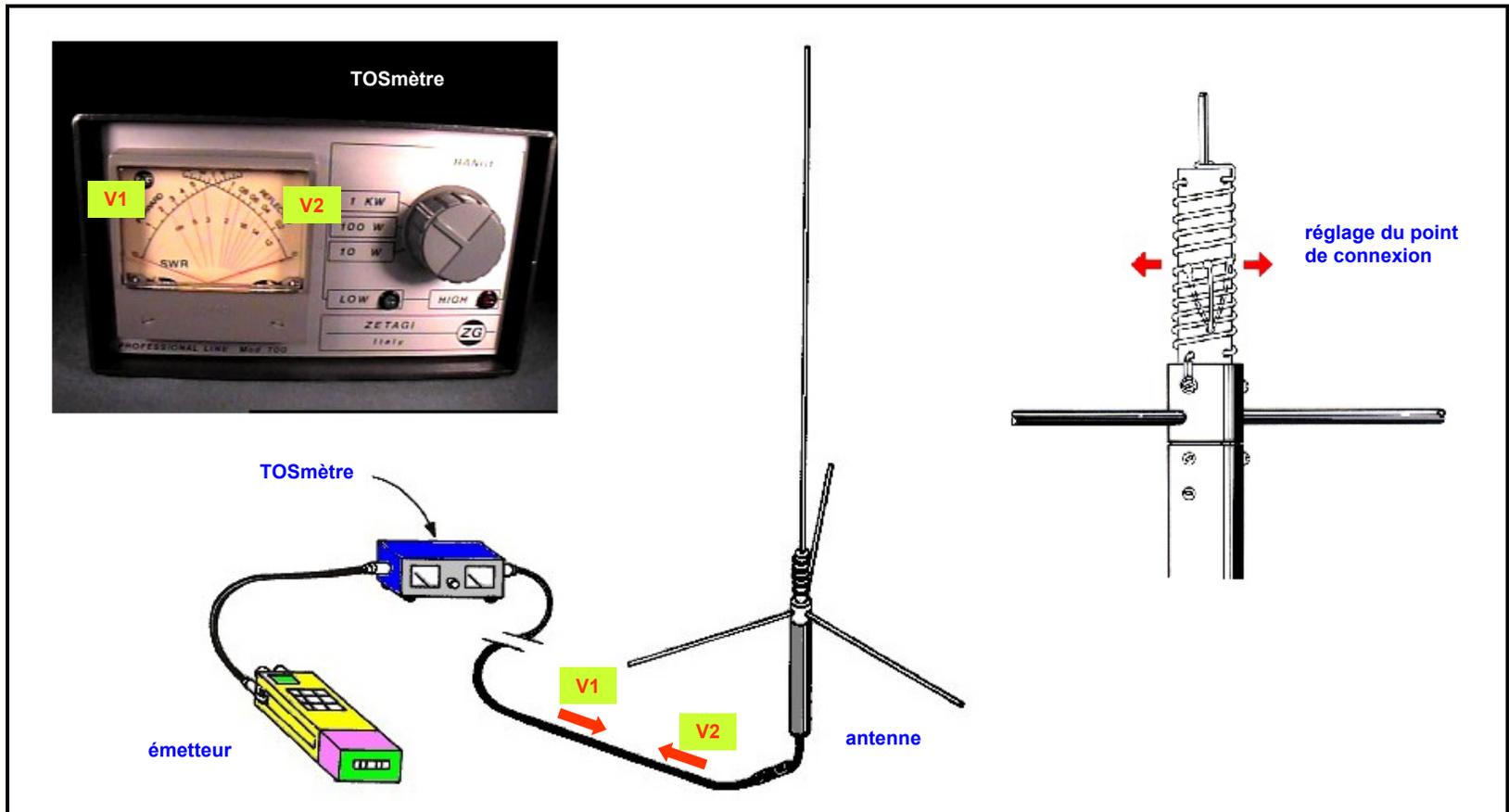
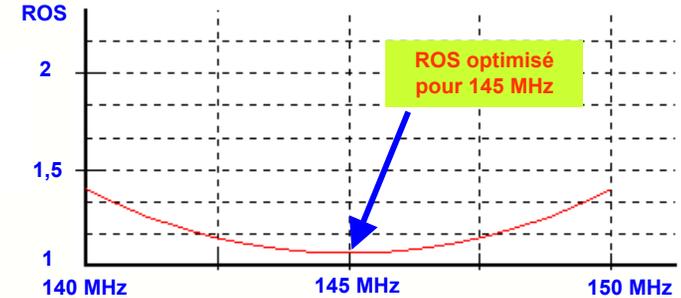
29- Application : réglage du ROS d'une antenne



La liaison entre un émetteur et l'antenne est un exemple typique d'adaptation :

- on souhaite que toute la puissance produite par l'émetteur soit rayonnée
- pour cela, il est important de minimiser l'onde réfléchie au niveau de l'antenne
- on recherche donc un coefficient de réflexion le plus faible possible

Le **TOSmètre** qui s'intercale entre l'émetteur et l'antenne permet, en ajustant un des paramètres de l'antenne, d'ajuster le TOS à une valeur voisine de 1.

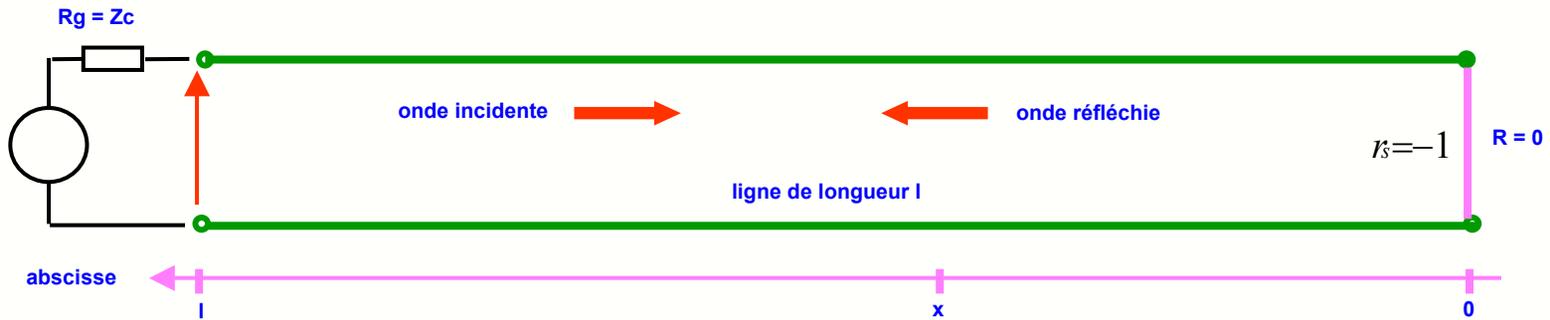




30- La ligne en court-circuit



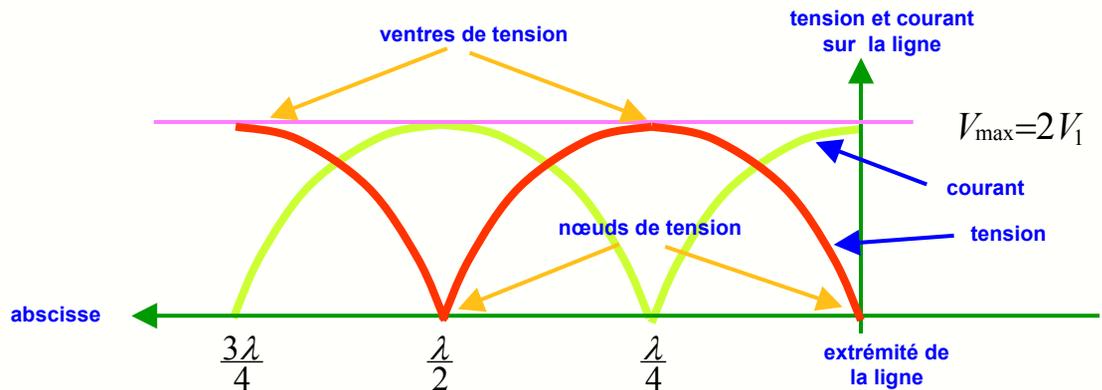
Si la ligne est court-circuitée à son extrémité le coefficient de réflexion vaut $r=-1$: l'onde arrivant à l'extrémité de la ligne se réfléchit avec changement de signe et repart vers le générateur.



tension et courant sur la ligne s'écrivent :

$$\begin{cases}
 v(x,t) = V_1 \cos(\omega t - kx) - V_1 \cos(\omega t + kx) = -2V_1 \sin(kx) \sin(\omega t) \\
 i(x,t) = \frac{V_1}{Z_c} \cos(\omega t - kx) + \frac{V_1}{Z_c} \cos(\omega t + kx) = 2\frac{V_1}{Z_c} \cos(kx) \cos(\omega t)
 \end{cases}$$

- les ventres et nœuds sont très prononcés
- à un ventre de tension correspond un nœud de courant et inversement
- deux nœuds ou deux ventres sont séparés d'une demi longueur d'onde





31 - Application aux résonateurs



A l'entrée de la ligne, tension et courant s'écrivent : $v(l,t) = -2V_1 \sin(kl) \sin(\omega t)$ et $i(l,t) = 2 \frac{V_1}{Z_c} \cos(kl) \cos(\omega t)$

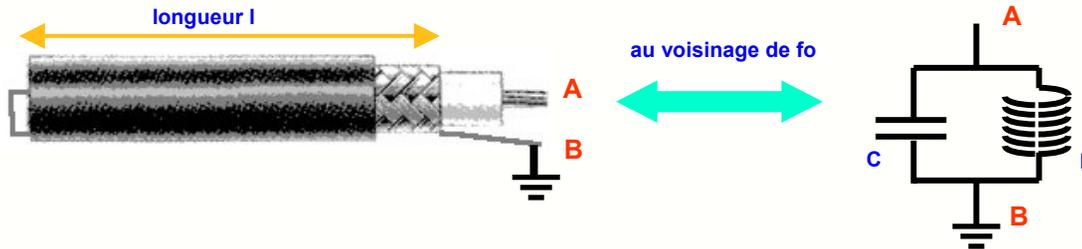
- le courant est déphasé de 90 ° sur la tension et l'impédance d'entrée complexe s'écrit alors :

$$\underline{Z_e} = jZ_c \cdot \text{tg}(kl) = jZ_c \cdot \text{tg}(2\pi \frac{l}{\lambda})$$

- cette impédance devient infinie si la longueur de la ligne est égale au quart de la longueur d'onde

- la ligne est alors équivalente à un circuit LC bouchon résonant à la fréquence f_0 : $l = \frac{\lambda}{4} = \frac{v}{4f_0} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r} 4f_0}$ soit

$$f_0 = \frac{c}{4l\sqrt{\epsilon_r}}$$



Résonateurs céramiques

- au-dessus de 1 GHz, les circuits accordés sont difficiles à réaliser car ils nécessitent des valeurs d'inductances et de capacités très faibles
- on peut remplacer un circuit LC par un tronçon de ligne en court-circuit de longueur adéquate
- on peut aussi utiliser un résonateur constitué d'un tube de céramique argenté sur les faces intérieures et extérieures ayant la structure d'une ligne coaxiale en court-circuit.
- grâce à la permittivité relative très élevée (8 -20 -36 - 98 selon la composition), la longueur de ce composant est raisonnable

Exemple de résonateur :

- longueur $l = 8,8 \text{ mm}$
- permittivité relative 38
- résonance à $f_0 = 1,38 \text{ GHz}$
- coefficient de qualité $Q = 500$

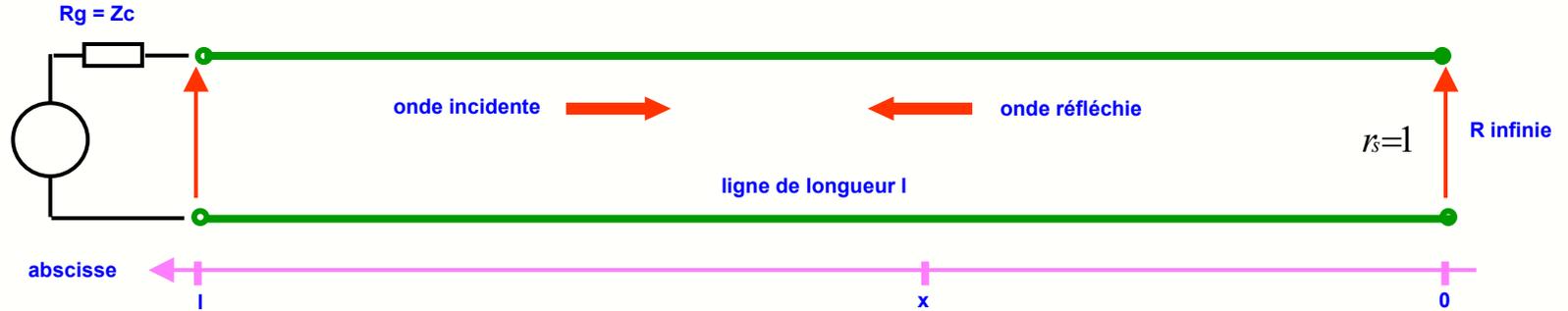


32- La ligne en circuit ouvert



Si la ligne est ouverte à son extrémité le coefficient de réflexion vaut $r_s=1$:

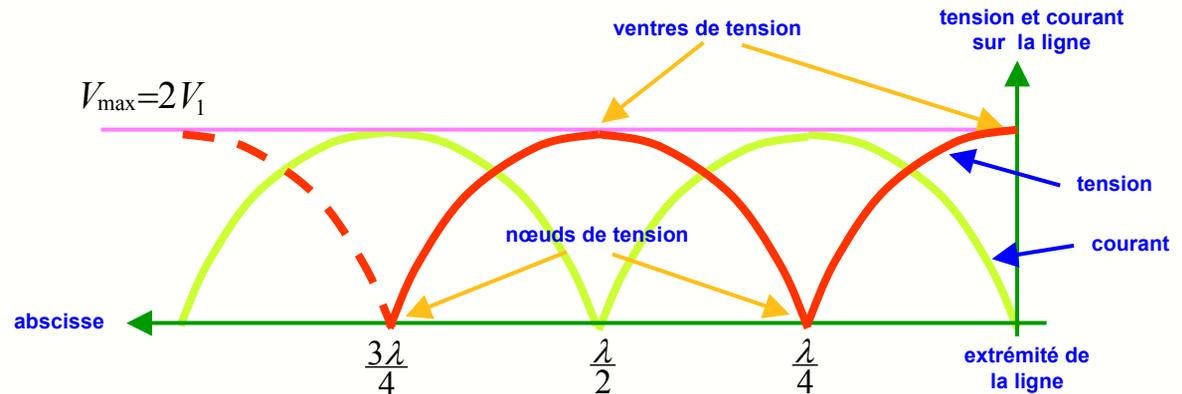
- l'onde arrivant à l'extrémité de la ligne se réfléchit entièrement et repart vers le générateur
- c'est ce qui se produit dans la pratique lorsqu'on débranche l'antenne du câble qui l'alimente



tension et courant sur la ligne s'écrivent :

$$\begin{cases} v(x,t) = V_1 \cos(\omega t - kx) + V_1 \cos(\omega t + kx) = 2V_1 \cos(kx) \cos(\omega t) \\ i(x,t) = \frac{V_1}{Z_c} \cos(\omega t - kx) - \frac{V_1}{Z_c} \cos(\omega t + kx) = -2\frac{V_1}{Z_c} \sin(kx) \sin(\omega t) \end{cases}$$

- les ventres et nœuds sont très prononcés
- à un ventre de tension correspond un nœud de courant et inversement
- deux nœuds ou deux ventres sont séparés d'une demi longueur d'onde
- au bout de la ligne, la tension est maximale et le courant nul





33- Impédance d'entrée d'une ligne en circuit ouvert



A l'entrée de la ligne, tension et courant s'écrivent : $v(l,t)=2V_1 \cos(kl)\cos(\omega t)$ et $i(l,t)=-2\frac{V_1}{Z_c}\sin(kl)\sin(\omega t)$

le courant est déphasé de 90° sur la tension et l'impédance d'entrée complexe s'écrit alors :

$$Z_e = \frac{Z_c}{j \operatorname{tg}(kl)} = \frac{Z_c}{j \operatorname{tg}(2\pi \frac{l}{\lambda})}$$

suivant sa longueur, une ligne en circuit ouvert est capacitive ou inductive

l'impédance d'entrée est nulle si $l=(2N+1)\frac{\lambda}{4}$ et infinie si $l=N\frac{\lambda}{2}$

Résultat important : une ligne ouverte à son extrémité se comporte à son entrée comme un court-circuit lorsque sa longueur est égale à un multiple impair de $\lambda/4$.

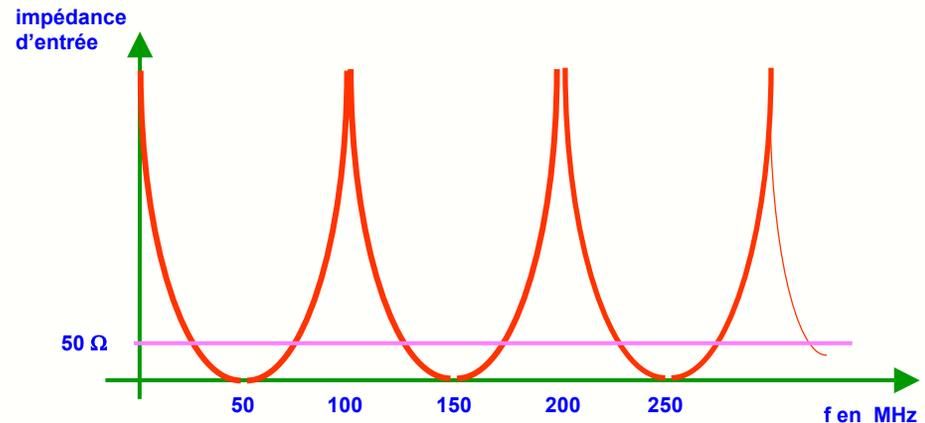


Exemple d'un câble coaxial de 1m

- impédance caractéristique $Z_c = 50 \text{ ohms}$
- capacité linéique $C = 100 \text{ pF/m}$
- inductance linéique $L = 250 \text{ nH/m}$
- vitesse de propagation $v = 200\,000 \text{ km/s}$

Ce câble devient un court-circuit aux fréquences f_0 telles que $l = v/4f_0$ soit :

$f_0 = 50 \text{ MHz}, 150\text{MHz}$ etc...



34- Application : utilisation d'un cordon coaxial



Question : quelle est l'influence d'un tronçon de câble coaxial de 1m utilisé pour faire une mesure à l'oscilloscope ?

L'impédance d'entrée de l'oscilloscope est équivalente à une $R = 1 \text{ Mohm}$ en parallèle avec $C = 25 \text{ à } 35 \text{ pF}$ environ. Pour simplifier, on va supposer que l'impédance est infinie, et que le tronçon de câble coaxial est en circuit-ouvert :

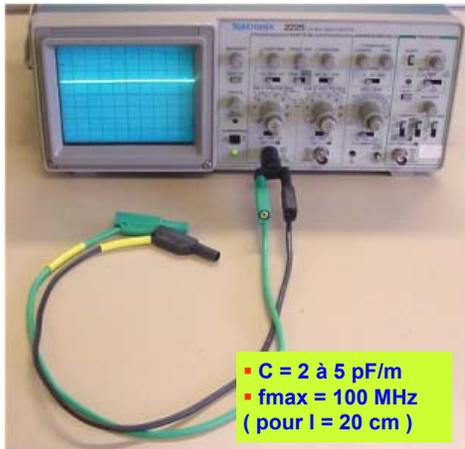
▪ aux basses-fréquences, l'impédance à l'entrée du câble s'écrit :

$$Z_e = \frac{Z_c}{jtg(kl)} = \frac{Z_c}{jtg(\omega \frac{l}{v})} \approx \frac{Z_c}{j\omega \frac{l}{v}} \approx \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{j\omega l \sqrt{LC}} \approx \frac{1}{jCl\omega}$$

Le câble se comporte comme un condensateur de capacité $C_e = C.l$ soit $C_e = 100 \text{ pF}$ pour un câble de capacité linéique 100 pF/m

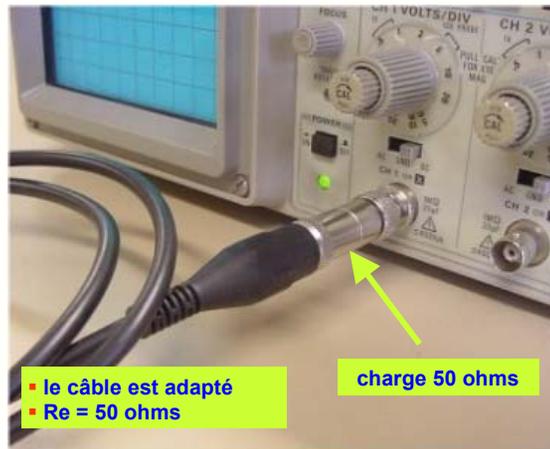
- à **50, 150, 250 ... MHz**, l'impédance à l'entrée du câble est nulle et le câble introduit donc un court-circuit à l'endroit où il est branché !
- à **100, 200, 300 ... MHz**, l'impédance à l'entrée du câble est grande et le câble ne perturbe pas le montage, mais comme il y a un nœud de tension à son extrémité on ne mesure plus rien à l'oscilloscope !

Résultat : le cordon coaxial de 1m ne peut donc être utilisé avec un oscilloscope qu'à des fréquences inférieures à 30 MHz environ



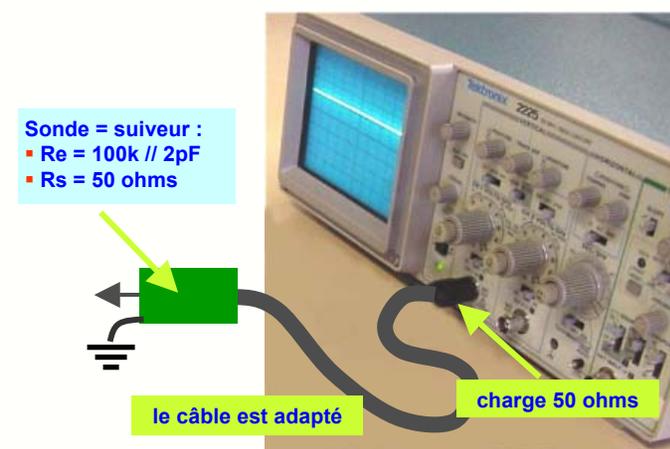
▪ $C = 2 \text{ à } 5 \text{ pF/m}$
 ▪ $f_{\text{max}} = 100 \text{ MHz}$
 (pour $l = 20 \text{ cm}$)

Solution 1 : utiliser des fils courts



▪ le câble est adapté
 ▪ $R_e = 50 \text{ ohms}$
 charge 50 ohms

Solution 2 : utiliser une charge 50 ohms



Sonde = suiveur :
 ▪ $R_e = 100k \parallel 2pF$
 ▪ $R_s = 50 \text{ ohms}$

le câble est adapté
 charge 50 ohms

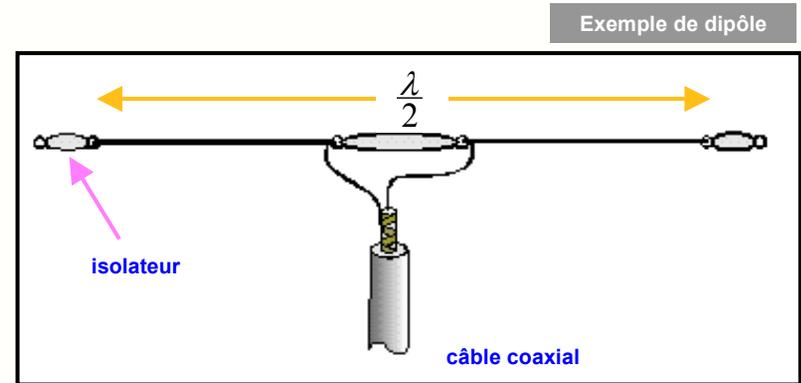
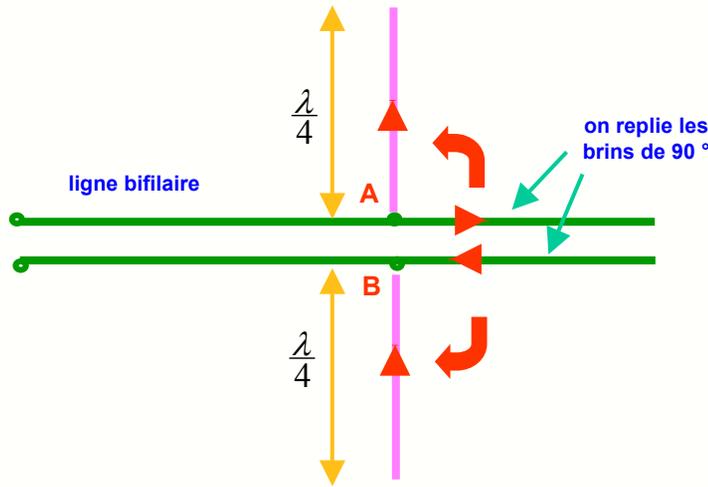
Solution 3 : utiliser une sonde active



35- Application à l'antenne dipôle



Lorsqu'on se trouve à une distance suffisante d'une ligne, les champs électromagnétiques créés par les courants dans chaque fil s'annulent puisque les courants sont de sens contraires : **une ligne ne rayonne donc pratiquement pas d'énergie.**



Si on replie les brins sur un quart de la longueur d'onde :

- les champs E et H créés par les 2 tronçons ouverts s'additionnent
- le champ créé à distance de l'antenne n'est donc plus négligeable
- la ligne rayonne et on a réalisé une **antenne demi-onde ou dipôle**

Exemple d'une antenne dipôle pour $f_0 = 100 \text{ MHz}$:

- la longueur de l'antenne sera $L = c/2f_0 = 1,5 \text{ m}$
- l'impédance présentée par ce dipôle est d'environ $R = 75 \text{ ohms}$
- l'antenne fonctionne aussi bien en émission qu'en réception
- le gain est maximal dans la **direction perpendiculaire à l'axe** de l'antenne
- ce gain peut être augmenté en rajoutant des brins réflecteurs et directeurs, ce qui conduit à l'**antenne Yagi**

Dipôles verticaux d'un émetteur FM



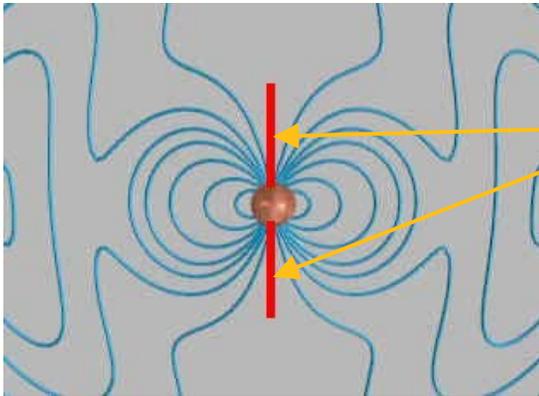


36- Champ créé par l'antenne dipôle

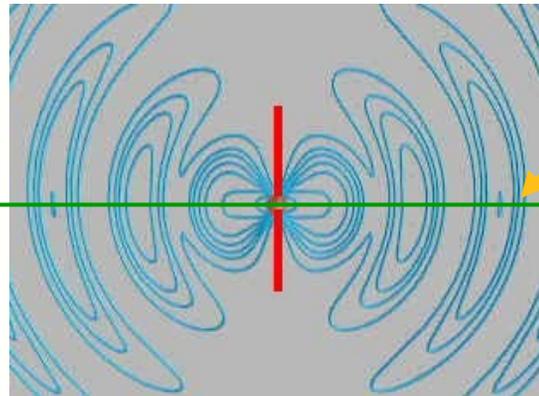


La structure de l'onde électromagnétique créée par un dipôle est assez complexe à proximité de la source, mais lorsqu'on s'éloigne d'une dizaine de longueurs d'onde on peut assimiler l'onde à une **onde plane**.

Lignes de champ magnétique



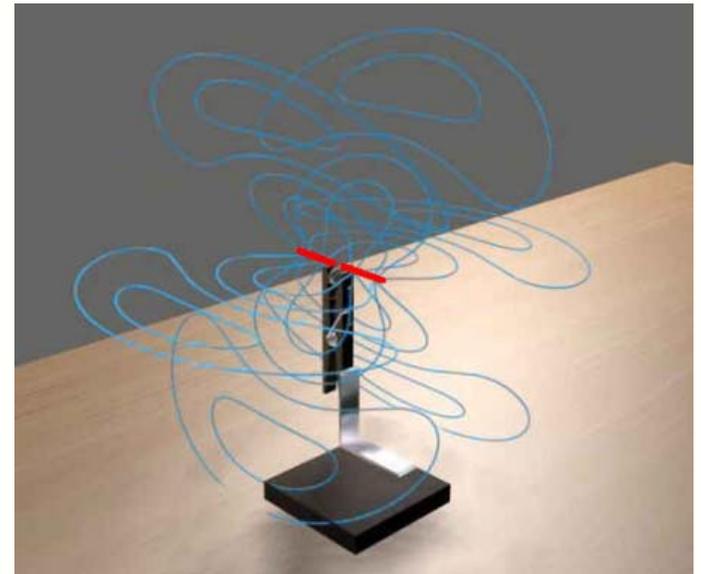
antenne dipôle



l'onde se rapproche d'une onde plane

Plan où l'émission est maximale

Lignes de champ magnétique autour du dipôle



[Vidéo](#) : dipôle en champ proche

[Vidéo](#) : dipôle en champ lointain

[Vidéo](#) : dipôle en rotation

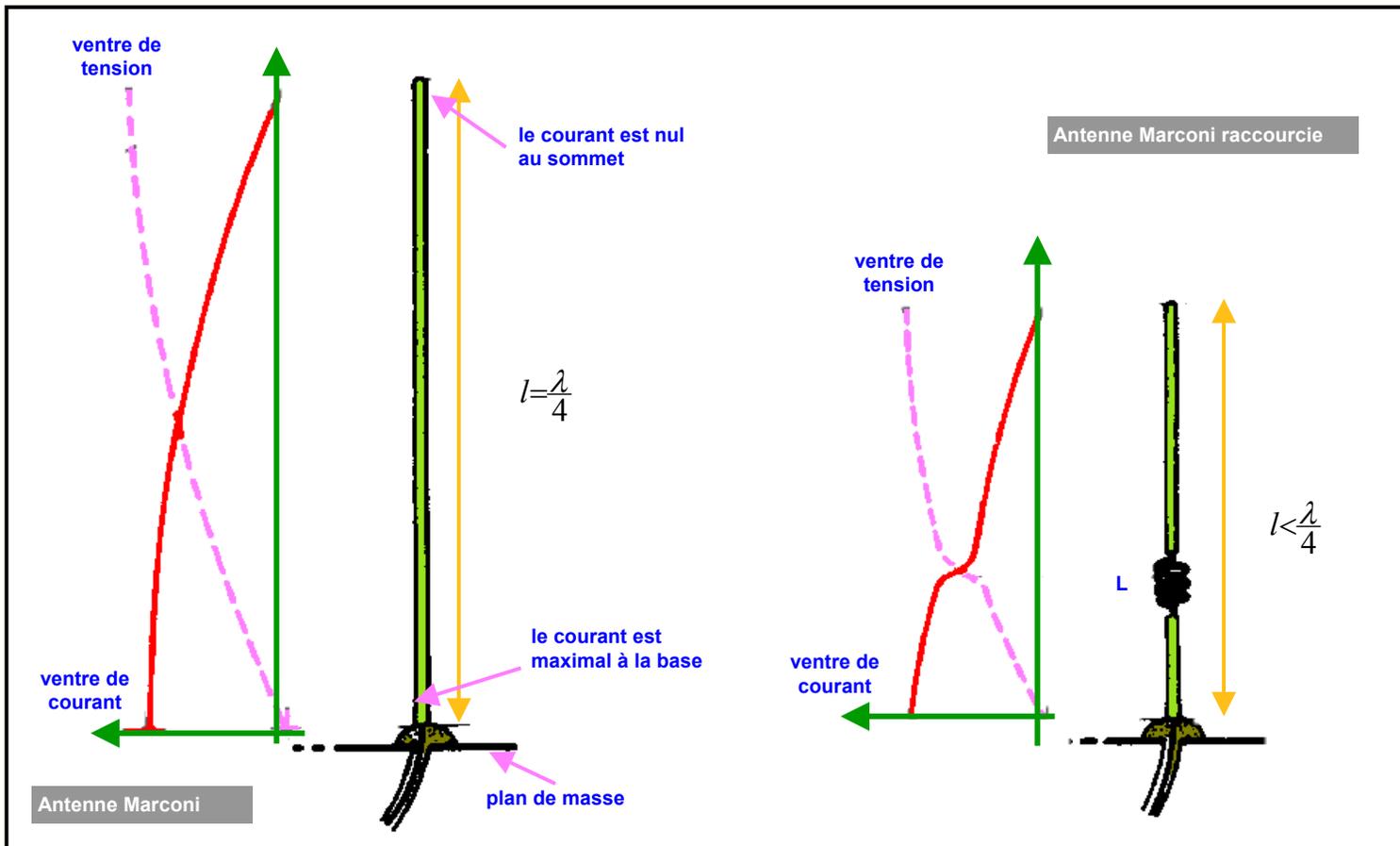


37- Application à l'antenne quart-d'onde



On peut aussi n'utiliser qu'un seul brin associé à un plan de masse, ce qui est plus pratique dans le cas des émetteurs portables, le plan de masse étant matérialisé par le boîtier en plastique conducteur : c'est l'antenne **quart-d'onde** ou **Marconi**.

- une antenne quart-d'onde taillée correctement a donc une longueur adaptée à la fréquence sur laquelle elle doit travailler
- à sa fréquence de travail, l'antenne quart-d'onde a une impédance résistive valant environ $R = 50 \text{ ohms}$
- c'est une des raisons pour laquelle on a choisi cette valeur comme impédance de référence normalisée
- une antenne plus courte que le quart de la longueur d'onde peut être rallongée artificiellement par une bobine placée en série





38- Application aux filtres à ligne



Nous avons vu qu'un tronçon de ligne quart d'onde a des propriétés particulières :

- en circuit ouvert, il est équivalent à un **circuit LC série**
- en court-circuit, il est équivalent à un **circuit LC parallèle**
- un simple brin quart-d'onde constitue une bonne **antenne**

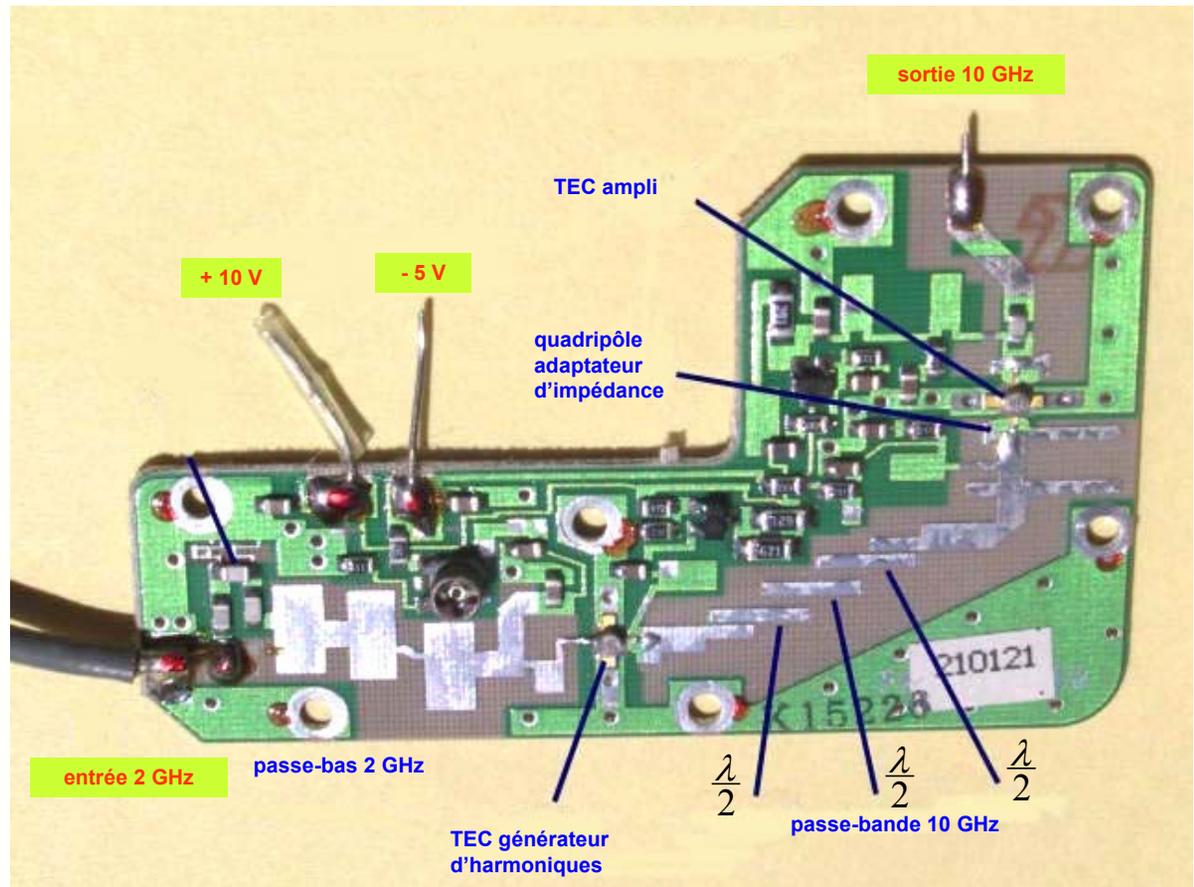
Ces propriétés sont largement mises à profit pour réaliser des filtres réjecteurs et passe-bande ainsi que tous les montages réalisés aux fréquences plus basses par des bobines et des condensateurs.

Exemple d'un multiplicateur de fréquence

- fréquence d'entrée **2 GHz**
- fréquence de sortie $5 \times 2 = 10 \text{ GHz}$
- génération d'harmoniques par **TEC**
- filtre d'entrée **passe-bas 2 GHz à lignes**
- filtre **passe-bande 10 GHz à lignes**
- ampli de sortie à **TEC**
- niveau d'entrée **10 dBm**
- niveau de sortie **7 dBm**

Ces filtres à lignes sont élaborés à l'aides d'outils logiciels de conception de circuits RF.

Applet : adaptation par « stub »

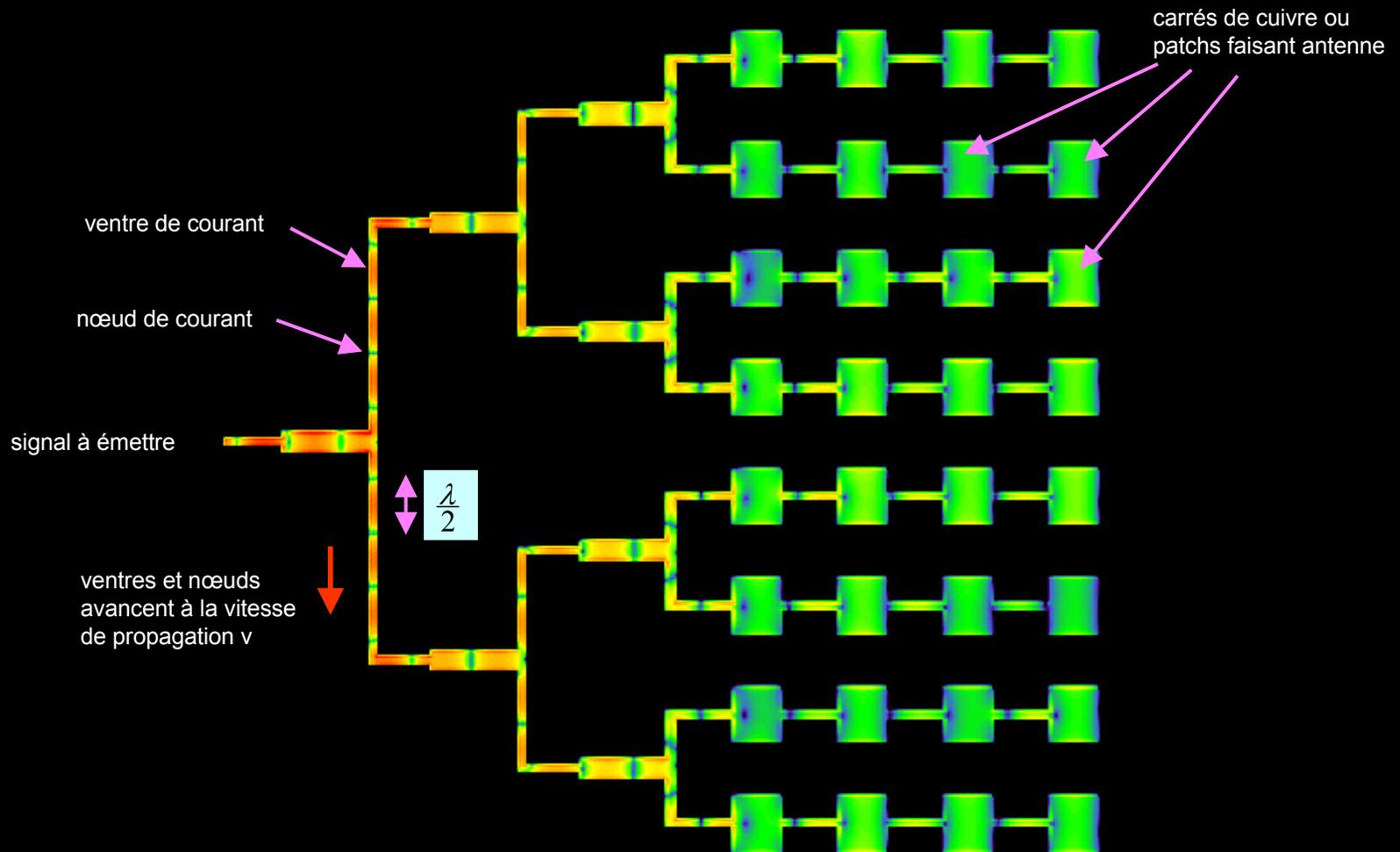




39- Exemple de répartition du courant dans une antenne



Antenne « patch »

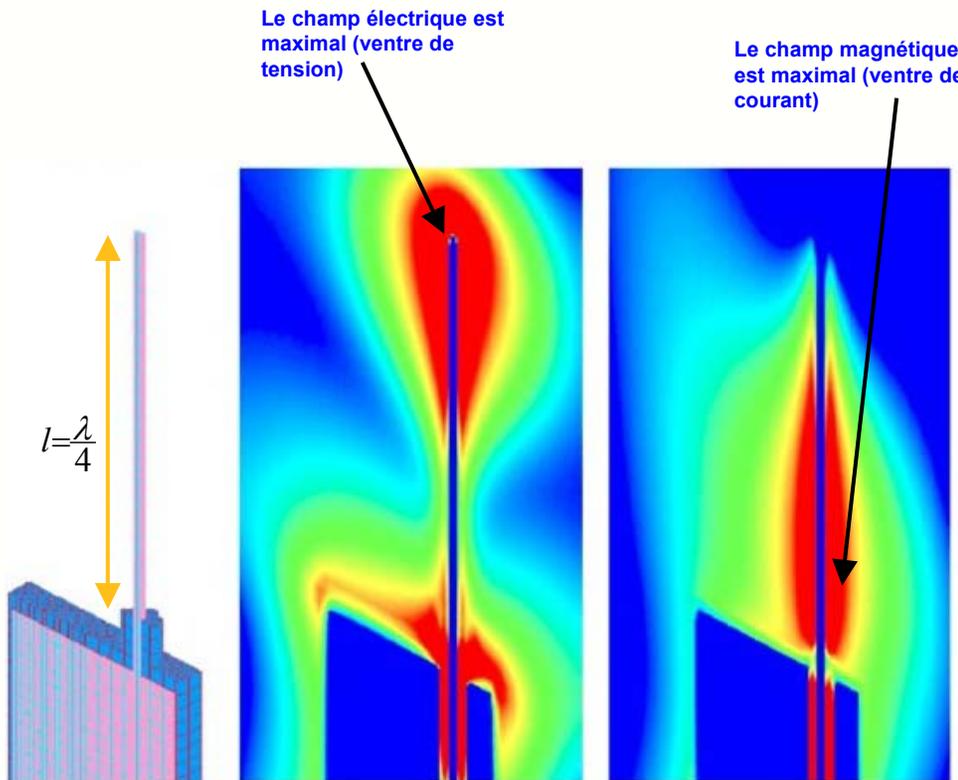


dB scale. Max J disp.
0dB=1.00e+004Amps/m²

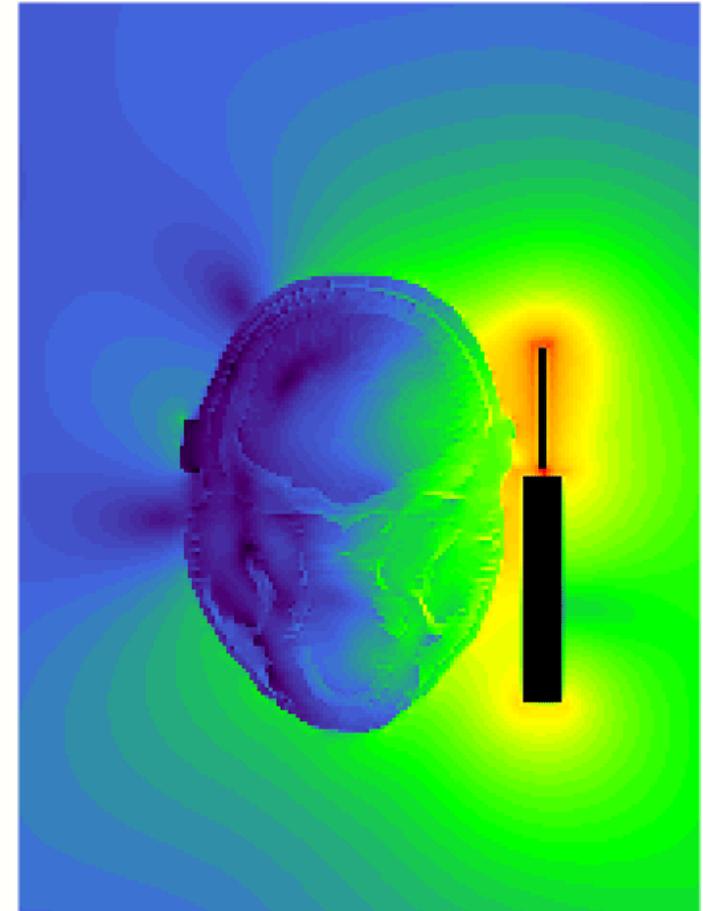




40- Exemple de champs créés par une antenne quart-d'onde

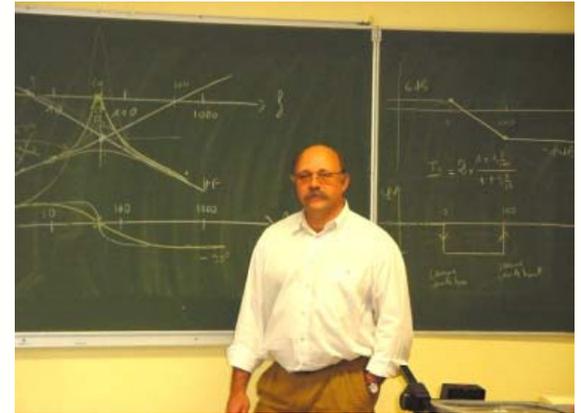


Champs électrique et magnétique créé par une antenne Marconi

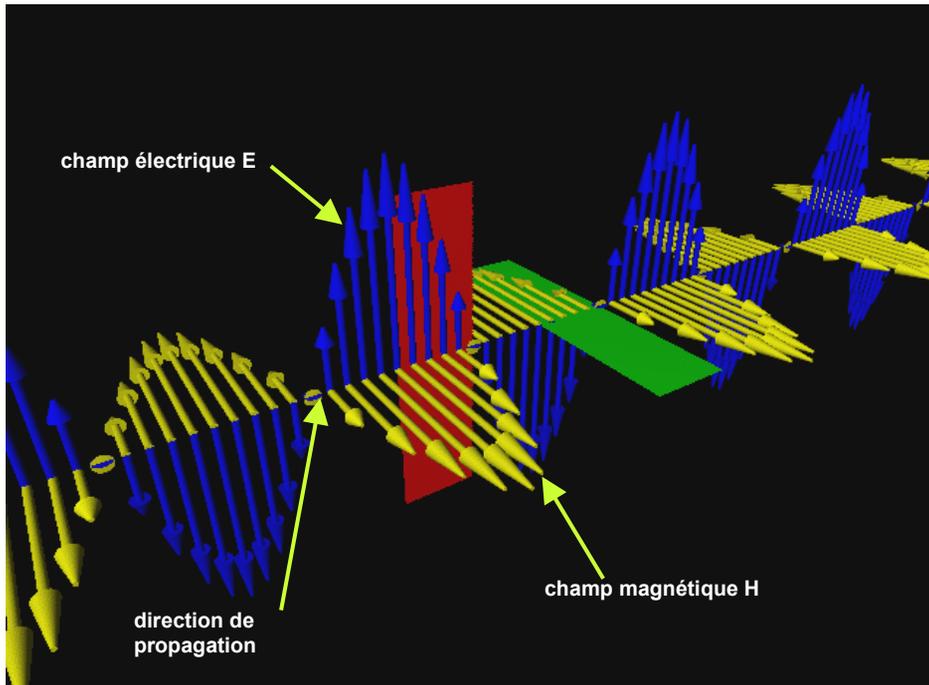


Champ électrique créé par un téléphone GSM

- rouge = champ intense
- bleu = champ faible



Onde électromagnétique plane



FIN