

243-562-RK (3-2-3)

***PROPAGATION DES ONDES ET LIGNES DE
TRANSMISSION***

NOTES DE COURS

Enseignant : Sébastien Richard

MODULE #1

243-562-RK (3-2-3)

*PROPAGATION DES ONDES ET LIGNES DE
TRANSMISSION*

Enseignant : Sébastien Richard

MODULE #1

LA NATURE DE L'ONDE

Enseignant : Sébastien Richard

MODULE #1 - NATURE DE L'ONDE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Spectre électromagnétique, longueur d'onde, onde sphérique, onde plane...

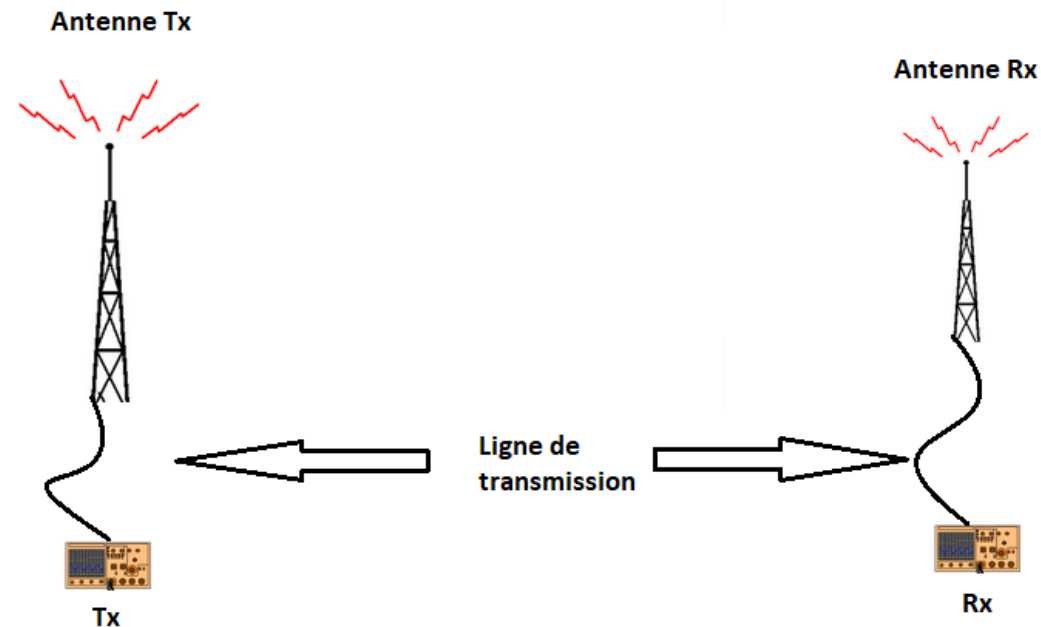
Ce module vise à donner à l'élève les connaissances de base des lois de la physique concernant les phénomènes de propagation des ondes électromagnétiques, de fréquences, de formes, et ce, dans des milieux différents.

Ce module permet également de distinguer les caractéristiques des lignes de transmission, leur mode de transport, la nécessité d'adapter la source, la ligne et la charge.

L'ONDE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Il est important de bien maîtriser la nature de l'onde électromagnétique afin de pouvoir comprendre le fonctionnement des antennes et des systèmes de communication par ondes radio.

Les ondes générées par l'appareillage électronique sont acheminées par une ligne de transmission vers l'antenne, puis irradiées dans l'espace. Une antenne de réception capte l'onde et celle-ci est de nouveau acheminée, via une ligne de transmission, vers l'équipement de réception.



NATURE DE L'ONDE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Ce qu'il y a de particulier avec l'onde électromagnétique c'est que bien avant sa découverte par le physicien HEINRICH HERTZ, le concept mathématique de l'onde électromagnétique fut développé de façon exacte par le célèbre mathématicien et physicien JAMES CLERK MAXWELL.

Maxwell fut le premier à unifier les théories de l'électricité et du magnétisme en donnant les lois générales du champ électromagnétique. Il identifia également la lumière comme élément d'onde électromagnétique.

Les concepts mathématiques de l'onde électromagnétique furent confirmés par la constatation expérimentale de l'identité entre vitesse de la lumière et la vitesse de l'onde électromagnétique.

NATURE DE L'ONDE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Les travaux de Maxwell mirent en évidence l'importance d'élaborer un modèle mathématique qui puisse par la suite être démontré par l'expérimentation de leur concordance avec la réalité.

Nous ne ferons pas ici la démonstration des équations de Maxwell car elle requière de notions de mathématique sur les dérivés vectorielles. De plus, notre principal intérêt demeure l'étude de l'aspect pratique de la production et de la détection de l'information associée à l'onde électromagnétique

$$1. \quad \nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho_V}{\epsilon}$$

$$2. \quad \nabla \cdot \mathbf{H} = 0$$

www.maxwells-equations.com

$$3. \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}$$

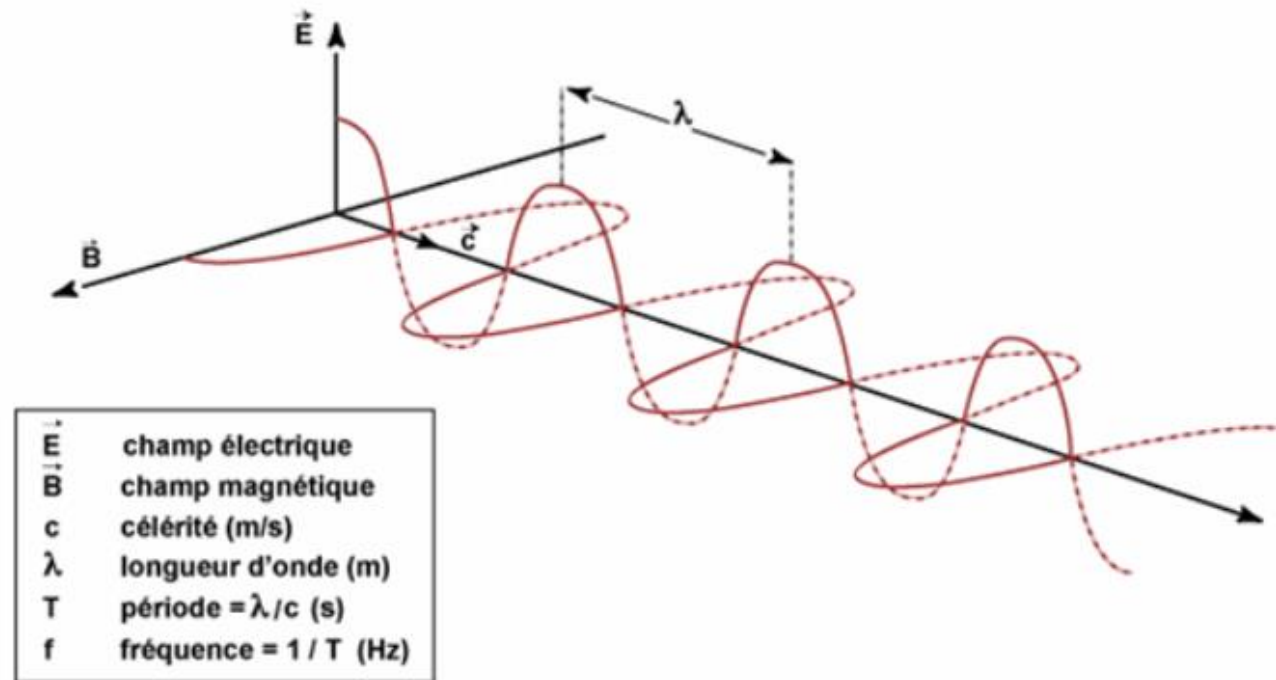
$$4. \quad \nabla \times \mathbf{H} = \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \sigma \mathbf{E}$$



C'est quoi une
onde électromagnétique ?

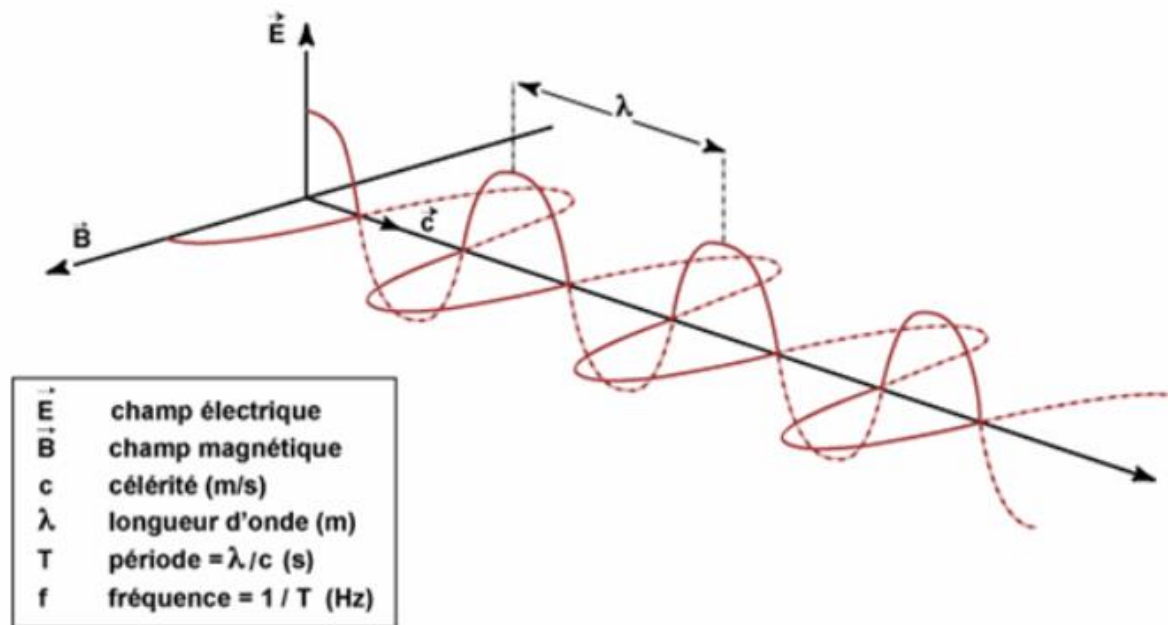
NATURE DE L'ONDE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Dans le but d'obtenir une compréhension de base du phénomène de **l'électromagnétisme**, il est important de comprendre la composition électrique et magnétique de celui-ci. On représente l'onde électromagnétique comme la combinaison d'onde sinusoïdale de champs électrique et magnétique.



NATURE DE L'ONDE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

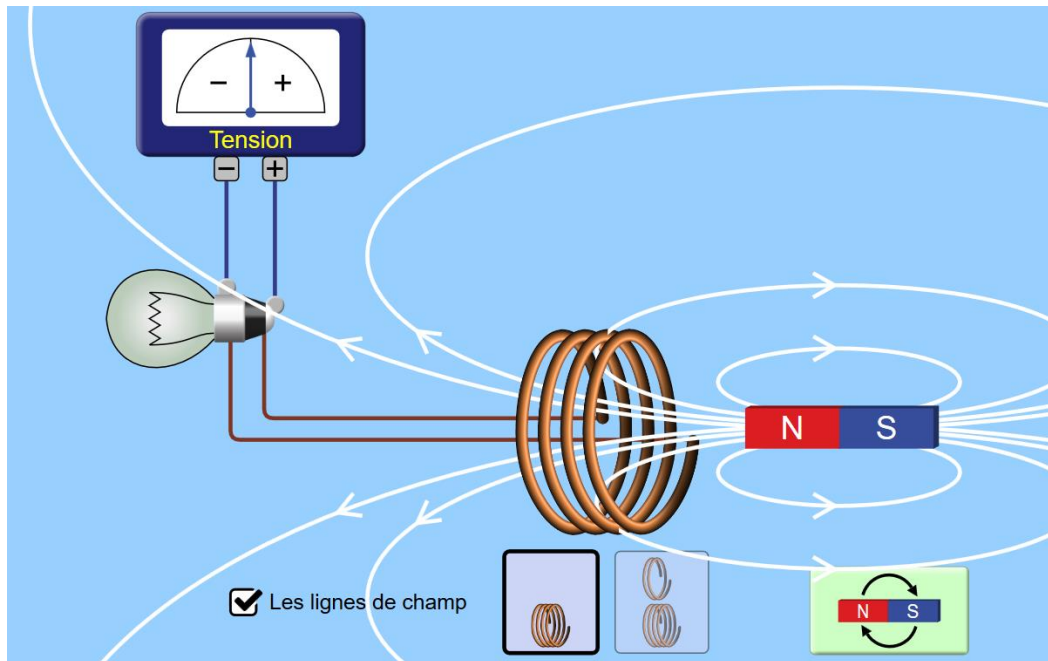
Une onde électromagnétique comporte donc à la fois un champ électrique et un champ magnétique oscillant à la même fréquence. Ces deux champs, perpendiculaires l'un par rapport à l'autre se propagent dans un milieu selon une direction orthogonale (figure ci-dessous). La propagation de ces ondes s'effectue à une vitesse qui dépend du milieu considéré..



NATURE DE L'ONDE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

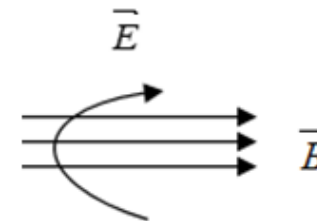
Composante transversale électrique TE :

La première composante de l'onde électromagnétique soit sa constituante de champ électrique produite par une charge Q . De même on peut obtenir un champ électrique par l'augmentation du flux magnétique.



Loi de Faraday :

$$E = \frac{d\Phi B}{dt}$$

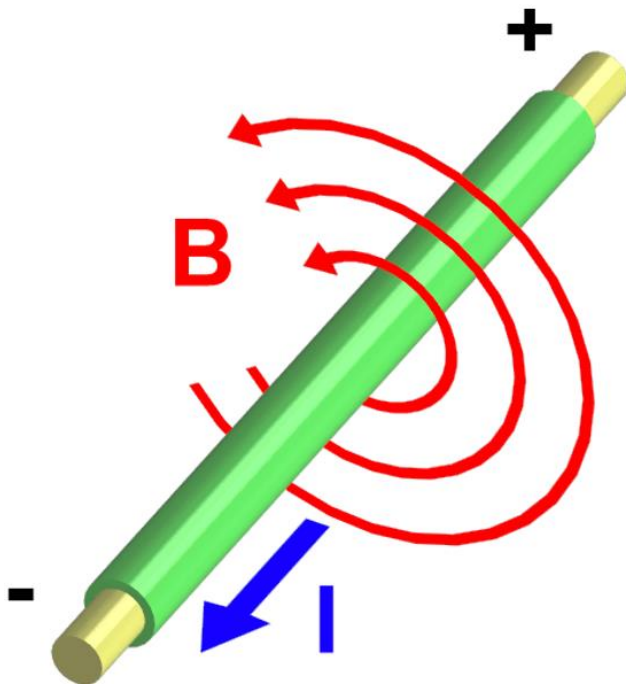


Champ B croissant

NATURE DE L'ONDE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

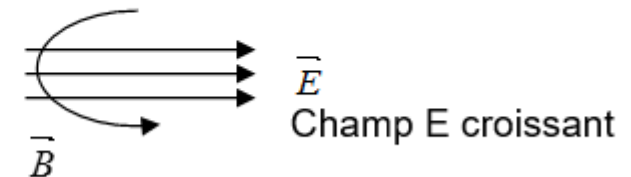
Composante transversale magnétique TM

La seconde composante de l'onde électromagnétique soit sa constituante de champ magnétique produite par l'augmentation du flux électrique.



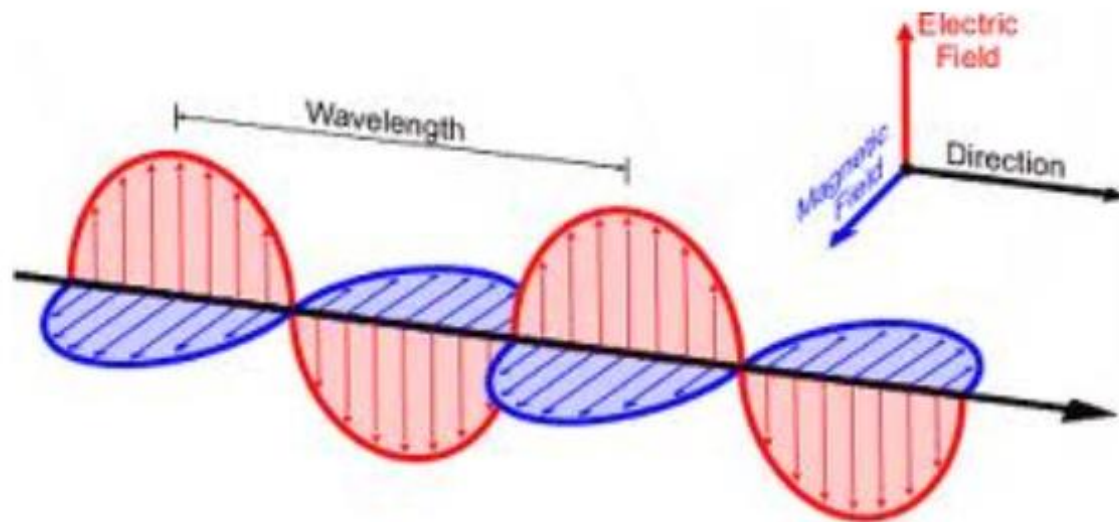
Le théorème d'Ampère-Maxwell :

$$\vec{B} = \mu_0 I \vec{e}$$



NATURE DE L'ONDE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

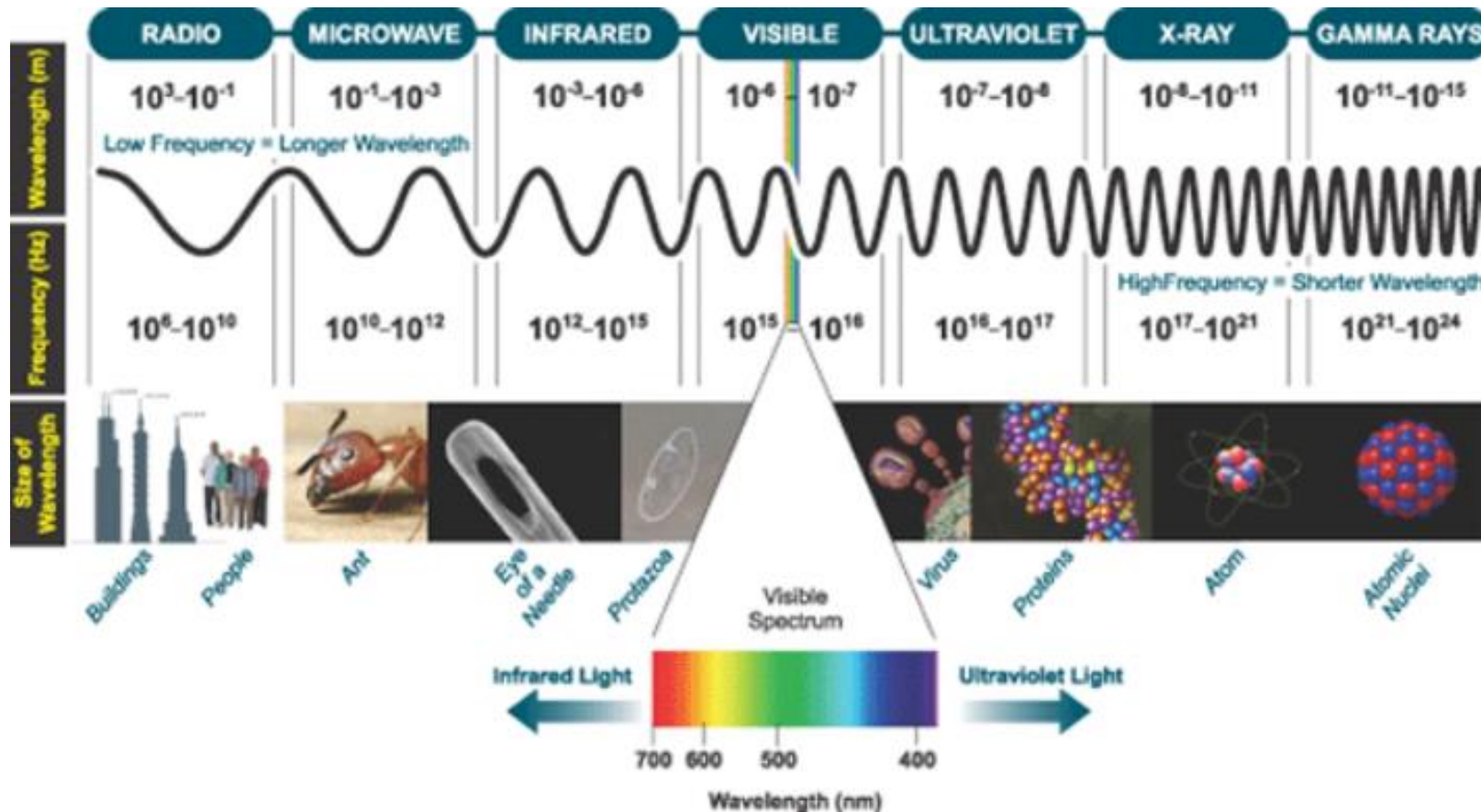
La projection spatiale du couplage mutuel des champs électrique et magnétique nous donnera donc l'onde électromagnétique suivante.



L'onde électromagnétique est donc constituée d'un champ électrique, engendré par un champ magnétique croissant qui lui est perpendiculaire de 90° . De même le champ magnétique sera engendré par le champ électrique produit. Les deux champs E et B sont également perpendiculaires à la direction de propagation.

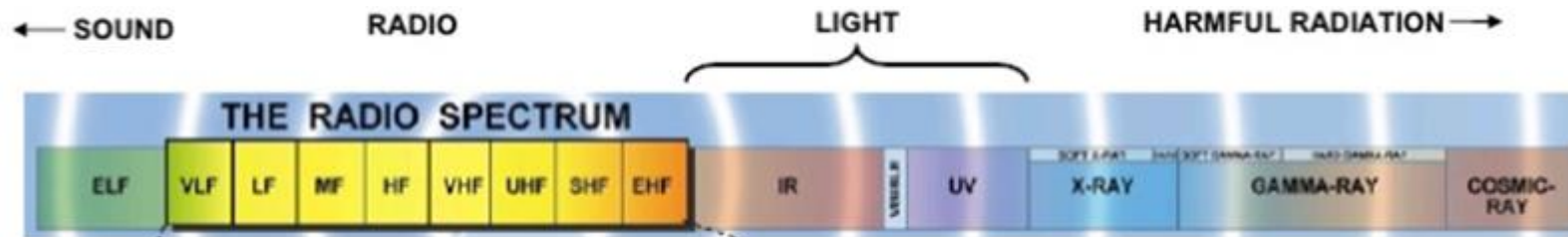
SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

La nature de l'onde électromagnétique est la même sur tout le spectre des ondes électromagnétiques couvrant les gammes de fréquences des ondes radio jusqu'aux radiations gamma.



SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

À l'intérieur de ce spectre de fréquences, nous retrouvons les ondes suivantes :



Band	Frequency range	Wavelength range
Extremely low frequency (ELF)	< 3 kHz	>100 km
Very low frequency (VLF)	3 - 30 Hz	10 - 100 krn
Low frequency(LF)	30 - 300 kHz	1 - 10 km
Medium frequency (MF)	300 kHz - 3 MHz	100m - 1km
High frequency (HF)	3 - 30 MHz	10 - 100m
Very high frequency (VHF)	30 - 300 MHz	1 - 10m
Ultra high frequency (UHF)	300 MHz - 3 GHz	10cm - 1m
Super high frequency (SHF)	3 - 30 GHz	1 - 10cm
Extremely high frequency (EHF)	30 - 300 GHz	1mm - 1cm

SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Exercice #1:

Quels sont les deux champs compris dans l'onde électromagnétique ?

Exercice #2:

Dans quelle bande se retrouve la fréquence de la station 98,7 de Rimouski.

Exercice #3:

Quelle composante fait le lien entre un émetteur et son antenne ?

LONGUEUR D'ONDE ET FRÉQUENCE

Comme toutes les ondes sont de nature électromagnétique, elles se propageront toutes à la vitesse de la lumière dans le vide ($\approx 3 \times 10^8$ m/sec.) ou encore, 300 000 km/sec... La fréquence et la longueur d'onde peuvent donc être mises en relation pour cette vitesse à partir de la relation suivante :

$$C = \lambda f \sqrt{k} \quad \text{où } k = \epsilon / \epsilon_0$$

$$V_P = \frac{C}{\sqrt{k}} = \lambda f$$

C	=	vitesse
λ	=	longueur d'onde en mètre
f	=	fréquence en Hertz
k	=	constante diélectrique du milieu
ϵ_0	=	permittivité du vide
ϵ	=	permittivité du milieu
V_p	=	vitesse de propagation

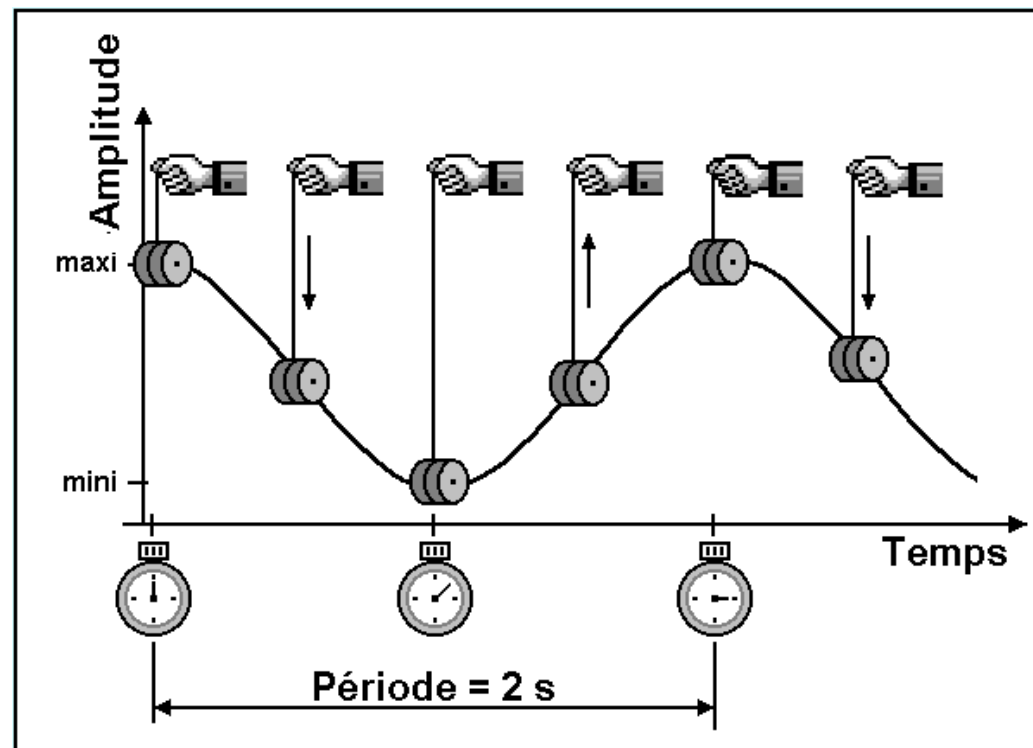
LONGUEUR D'ONDE ET FRÉQUENCE

Notez ici la présence d'une constante diélectrique k , parfois indiqué par le symbole ϵ . Cette constante diélectrique change avec le milieu et est en fait un rapport des différents milieux par rapport à la permittivité du vide ϵ_0 . Cette constante nous permet de déterminer la variation de la vitesse de l'onde électromagnétique dans les différents milieux.

Milieu	$k = \epsilon / \epsilon_0$
Vide	1,000
Air sec	1,006
Téflon	2,1
Polyéthylène	2,3
Polystyrène	2,56
Plexiglas	2,8
Papier	3,0
Cellulose	3,3 – 3,9
Quartz	3,8
Bakélite	4,4 – 5,4
Pyrex (verre)	4.8
Porcelaine	5,1 – 5,9
Mica	5,4
Verre	7,6 – 8,0
Céramique faible	10
Eau distillé	78-81
Céramique forte	100 - 10000

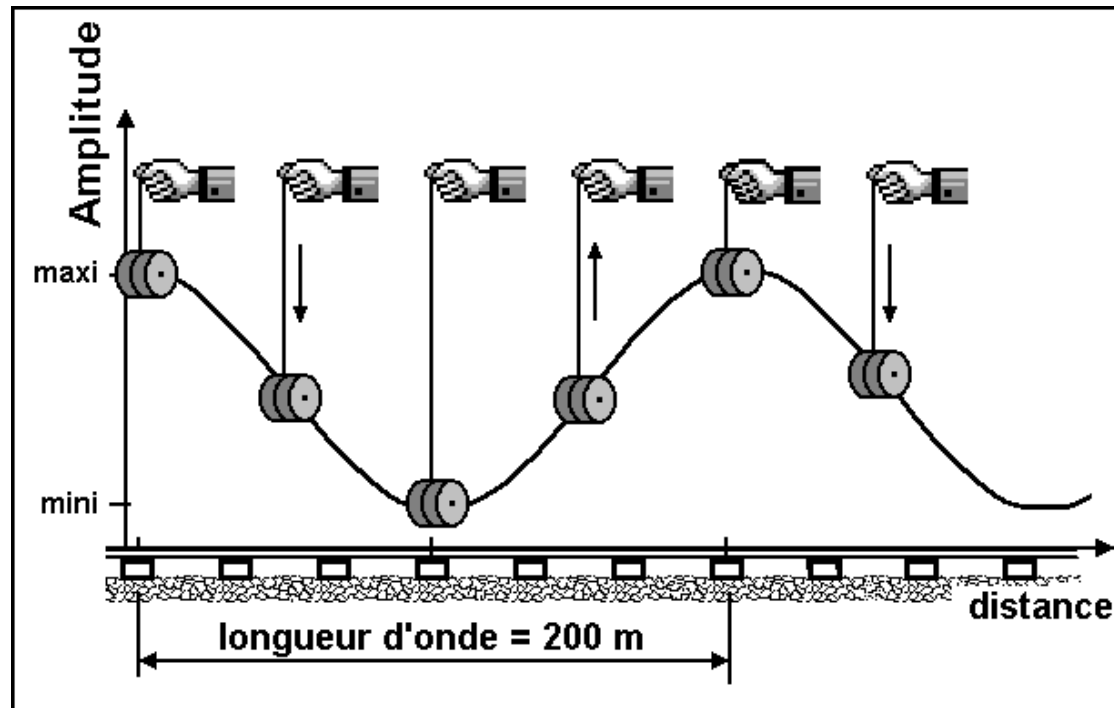
LONGUEUR D'ONDE ET FRÉQUENCE

Imaginons un voyageur jouant au yo-yo, la bobine du yo-yo met deux secondes pour descendre puis remonter à son point de départ, on peut dire que la période de son mouvement est égale à 2 secondes. Si $T = 2$ secondes on peut calculer facilement la fréquence du mouvement ($1/T$), la figure représente le mouvement du yo-yo dans le temps (avec la période T)



LONGUEUR D'ONDE ET FRÉQUENCE

Maintenant, si l'on place le joueur de YO-YO dans un TGV lancé à 360 km/h (100 mètres par seconde). Nous pourrions calculer la longueur d'onde à partir de la fréquence du mouvement mais aussi de la vitesse de déplacement du train. En 2 secondes le train, le voyageur et son yo-yo se sont déplacés de 200 m et la bobine du yo-yo a eu le temps de dessiner une belle courbe correspondant à une période entière. La distance de 200 m correspond à la longueur d'onde du mouvement oscillatoire du yo-yo.



SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Exercice #4:

Une onde électromagnétique cadencée à 2,5GHz possédant une longueur d'onde de 10 mm se propage plus ou moins rapidement que celle possédant une longueur d'onde de 20 mm ? Prouvez le tout à l'aide de calculs. Trouvez aussi la constante diélectrique k des deux milieux.

Exercice #5:

Déterminer la longueur d'onde de l'onde électromagnétique de 3 GHz se déplaçant dans une lentille de téflon, et calculer sa vitesse.

Exercice #6:

Une onde est propagée à une fréquence de 10 GHz dans l'air sec, quelle sera sa vitesse ? Si cette onde se propage maintenant dans l'eau avec une constante diélectrique de 80, quelle sera sa nouvelle vitesse ? Donnez la différence de vitesse de propagation et la longueur d'onde dans les deux milieux.

Si la fréquence est maintenant de 20 GHz, quelle sera la vitesse et sa longueur d'onde dans l'air sec ? Et dans l'eau ?

SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Exercice #7:

Si vous étiez en mission sur la planète Jupiter et que vous désireriez communiquer avec votre ami à Rimouski, combien de temps aurait besoin l'onde pour passer de Jupiter à la terre. Considérez que l'on reste toujours dans le vide. La distance entre la terre et Jupiter est d'environ 750 millions de km. Combien de temps si vous étiez sur Neptune à 4500 millions de km. ?

On vous relocalise sur une planète tout près de l'étoile la plus près de notre système solaire, Proxima Centauri située à 4,22 années-lumière. Combien de temps devriez-vous prévoir afin de recevoir une réponse au "salut" que vous avez lancé à votre ami ?.

Exercice #8:

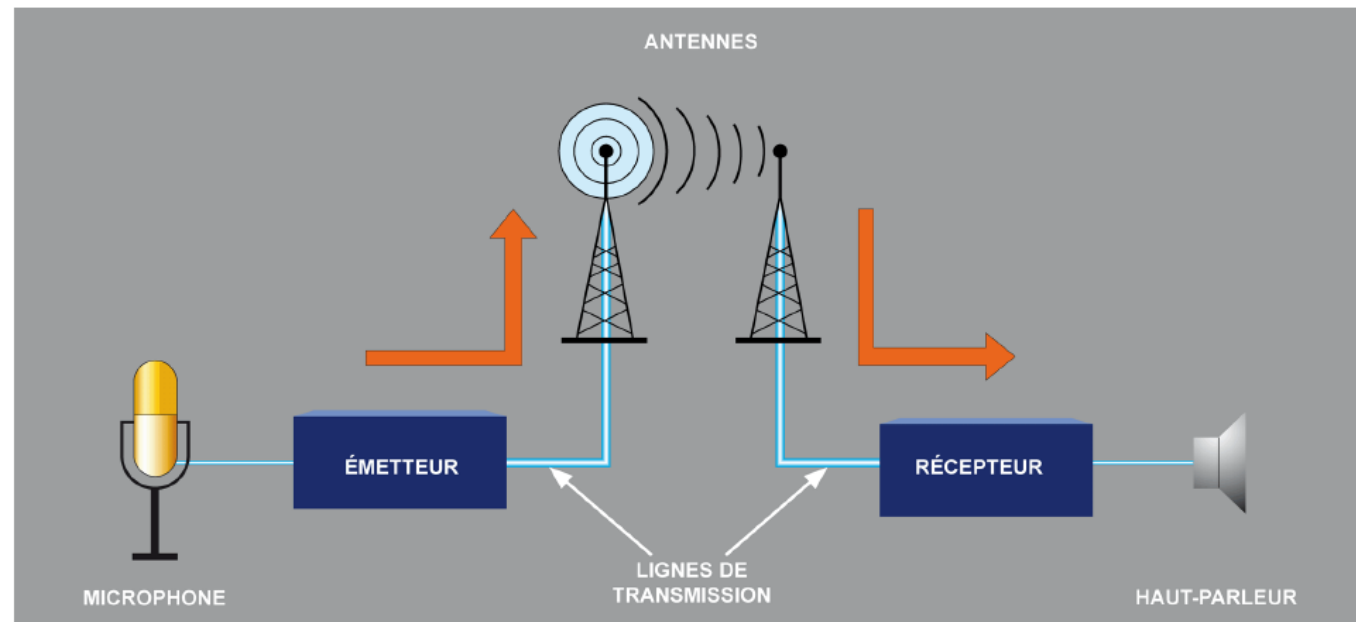
Trouvez la fréquence d'une onde électromagnétique dont la longueur d'onde est de 100 m dans l'air libre. Si sa longueur est toujours de 100 m mais dans le verre avec une constante diélectrique de 8.

Exercice #9:

D'après vous, est-ce que la lumière propagée dans une fibre optique possède une vitesse plus ou moins rapide que dans l'air libre ?

MODULE #1 – Lignes de transmission

On appelle « ligne de transmission » tout système, ordinairement une paire de conducteurs électriques, qui transfère l'énergie électrique d'une source de puissance à un autre circuit électrique que l'on appelle « charge ». Dans les systèmes de radio et de télévision, par exemple, les lignes de transmission sont utilisées pour raccorder les émetteurs aux antennes ou les antennes aux récepteurs.

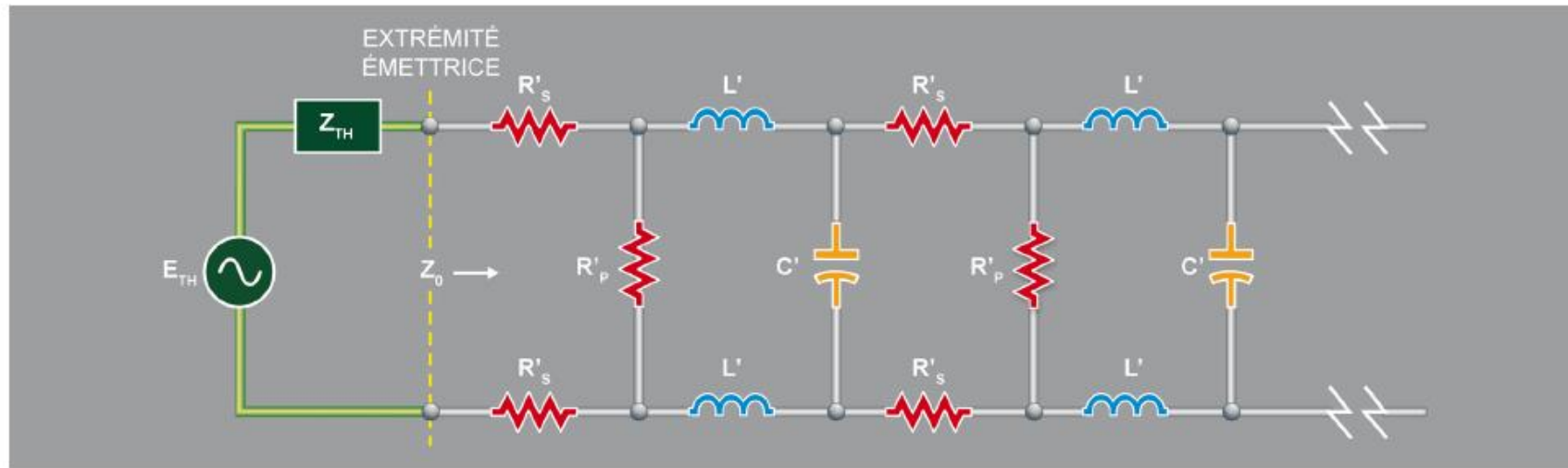


MODULE #1 – Lignes de transmission

Pour le transfert de la **puissance CC**, la seule exigence d'une ligne de transmission est une faible valeur de résistance CC afin de minimiser les pertes de puissance.

MODULE #1 – Lignes de transmission

Dans le transfert de la **puissance CA** aux fréquences aussi basses que 60 à 400 cycles par seconde, la réactance des lignes de transmission est perceptible, mais elle est **négligeable** à comparer à sa résistance. Cependant, lorsque la fréquence augmente, les effets capacitifs et inductifs augmentent, ce qui affecte le transfert de l'énergie



MODULE #1 – Lignes de transmission

Les lignes de transmission sont un réseau complexe d'éléments équivalents aux trois composants électriques de base : **résistance**, **capacitance** et **inductance**.

Il existe plusieurs types de lignes de transmission. Chacun d'eux présente différentes propriétés touchant la transmission : la **bande passante**, **l'impédance caractéristique**, la **constante d'affaiblissement** qui précise les pertes dans la ligne, et la **vitesse de propagation** des signaux, qui dépend du diélectrique utilisé pour fabriquer la ligne.

Selon le type de ligne de transmission et les exigences en matière de communication, différentes parties du spectre de fréquences électromagnétiques sont utilisées.

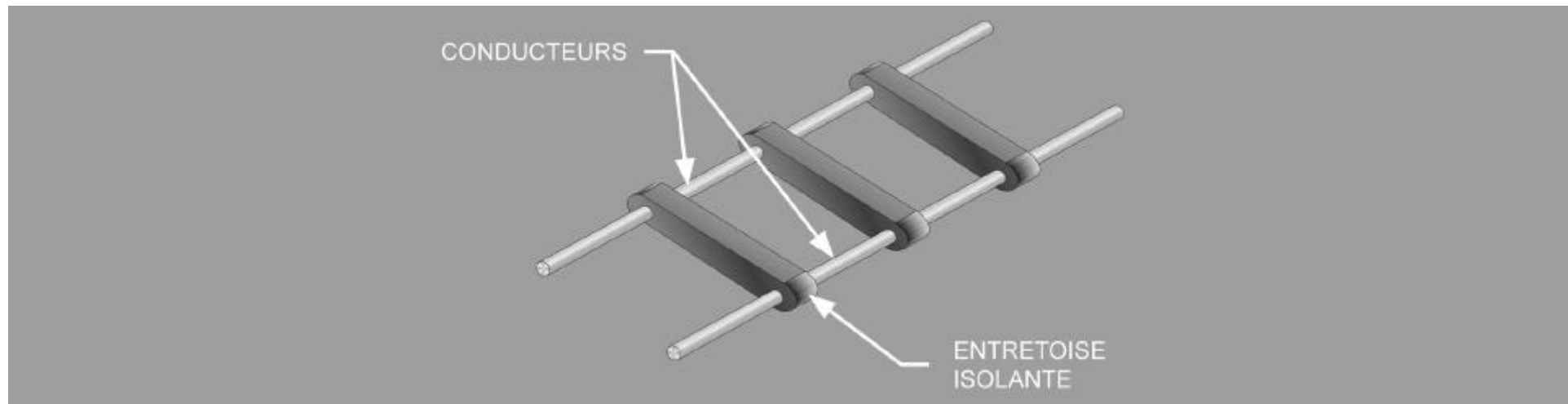
MODULE #1 – TYPES DE LIGNES DE TRANSMISSION

Il existe des nombreuses formes de lignes de transmission :

- double ligne parallèle
- double ligne torsadée
- double ligne parallèle blindée
- double ligne torsadée blindée
- lignes coaxiales
- guides d'ondes

MODULE #1 – TYPES DE LIGNES DE TRANSMISSION

La ligne ouverte à deux fils est constituée de deux conducteurs parallèles espacés de quelques centimètres et maintenus par des entretoises placées à intervalles réguliers. Ce type de ligne est principalement utilisé pour des connexions sur de courtes distances de lignes haute puissance et pour les lignes téléphoniques rurales. La ligne est sensible aux bruits, mais elle est économique et simple.



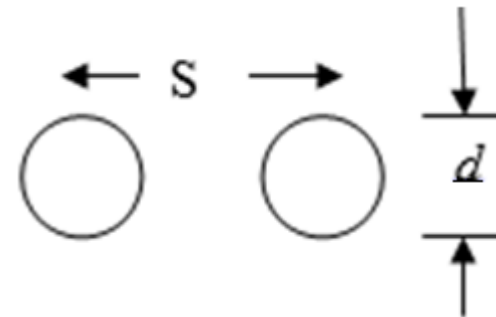
MODULE #1 – TYPES DE LIGNES DE TRANSMISSION

La ligne ouverte à deux fils est la forme la plus simple et la plus ancienne ligne de transmission. Elle est composée de deux lignes de diamètre d , séparées l'une de l'autre par une distance espacement S .

L'espacement entre les deux conducteurs varie de 0,25 à 6 pouces. Cette ligne de transmissions est surtout utilisée entre l'ampli de puissance du transmetteur et l'antenne en VLF, MF, et HF.

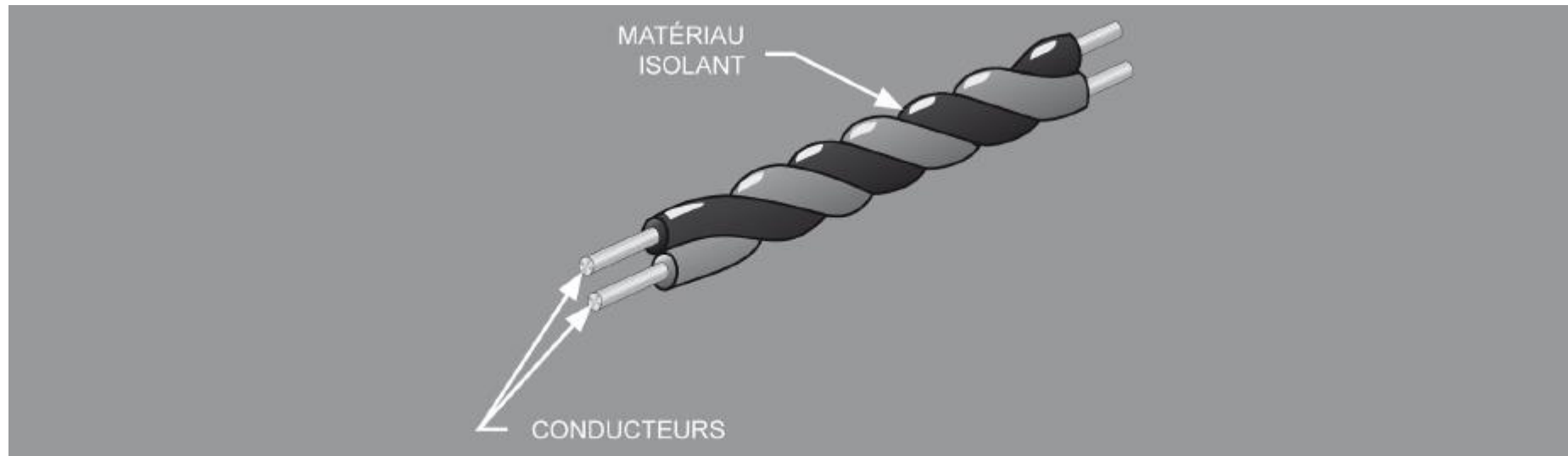
Son principal avantage est sa simplicité de construction. Son plus gros désavantage est la perte par radiation. L'indépendance caractéristique pour ce type de ligne est déterminée par l'équation :

$$Z_o \approx \frac{276}{\sqrt{K}} \text{Log} \left[\frac{2S}{d} \right]$$



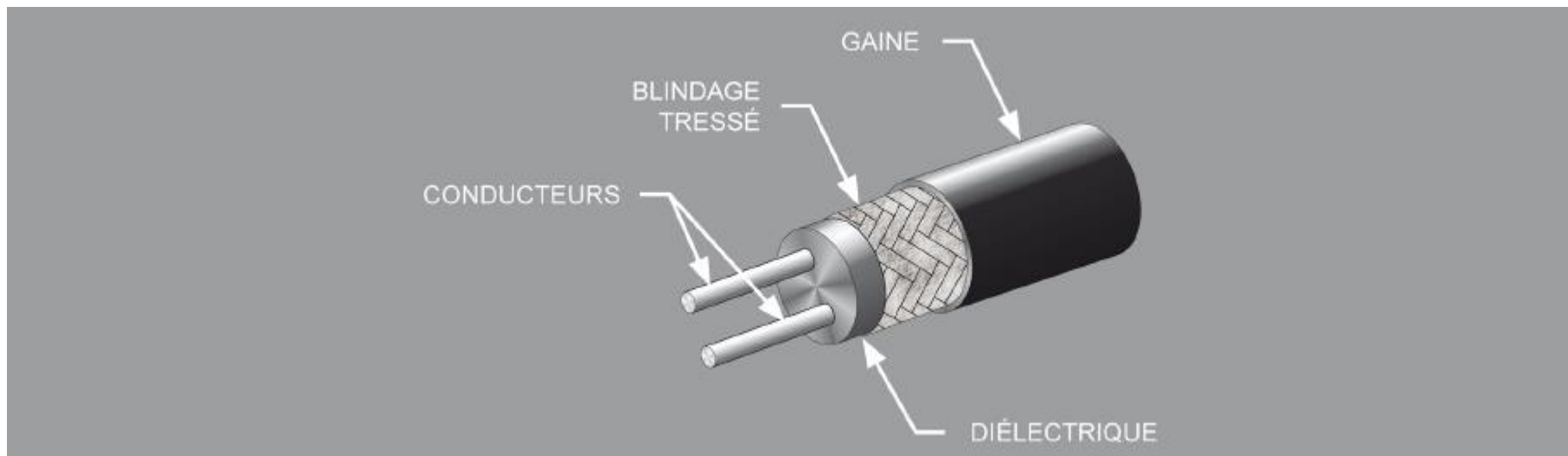
MODULE #1 – TYPES DE LIGNES DE TRANSMISSION

La **ligne à paire torsadée** est constituée de deux conducteurs blindés dans un matériau isolant et torsadés pour les rendre flexibles. Ce type de ligne est utilisé pour des connexions sur de courtes distances. Elle n'est pas recommandée pour transmettre des signaux hautes fréquences en raison de l'affaiblissement important se produisant dans le matériau isolant.



MODULE #1 – TYPES DE LIGNES DE TRANSMISSION

La **ligne à paire blindée** est constituée de deux conducteurs parallèles entourés et séparés par un matériau diélectrique. Le matériau diélectrique est entouré d'une tresse en cuivre qui agit en blindage électrique. L'ensemble est inséré dans une gaine de protection flexible. Le principal avantage de ce type de ligne est que les conducteurs sont isolés des sources de bruits externes.

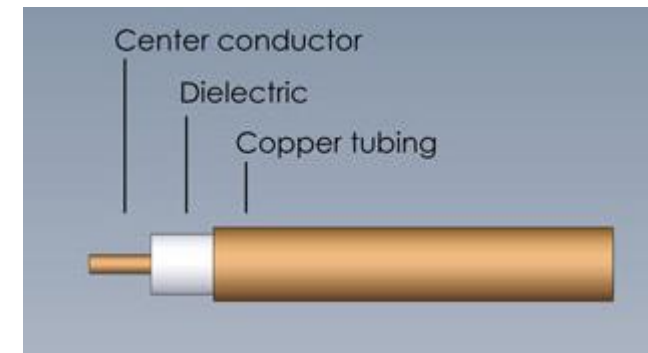
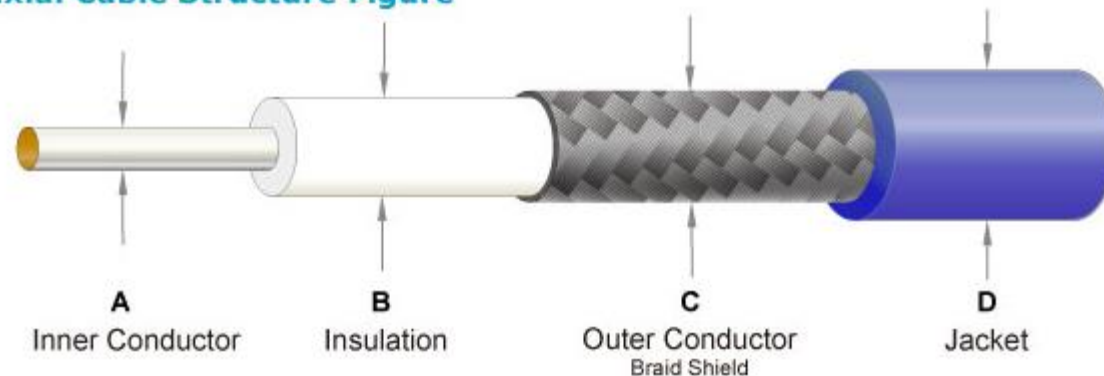


MODULE #1 – TYPES DE LIGNES DE TRANSMISSION

La **ligne coaxiale** est largement utilisée en câblodistribution. Il en existe deux types : la ligne **rigide** et la ligne **flexible**.

Les deux types sont fabriqués de la même façon : un conducteur interne est entouré par un conducteur externe tubulaire. Ce type de conducteur minimise les pertes par rayonnement, ainsi que le brouillage provenant d'autres lignes. Dans le cas de la ligne coaxiale flexible, que montre la figure, le conducteur interne est isolé du conducteur externe par un matériau diélectrique massif. Le conducteur externe est constitué d'un blindage en cuivre tressé qui donne au câble sa flexibilité.

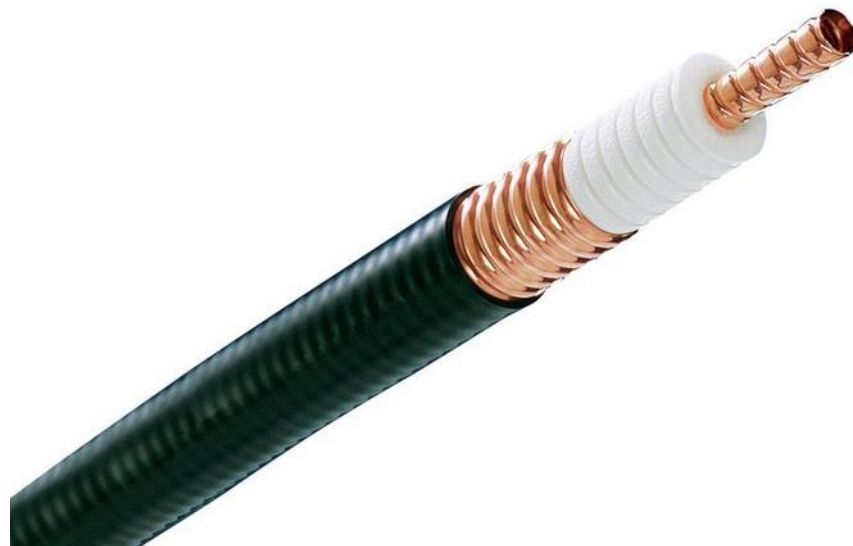
Coaxial Cable Structure Figure



MODULE #1 – TYPES DE LIGNES DE TRANSMISSION

Ce type de ligne minimise l'effet du rayonnement électromagnétique et de l'effet pelliculaire (ou effet de peau). L'effet de peau résulte du fait que pour les hautes fréquences la conduction ne se fait qu'à la surface du conducteur.

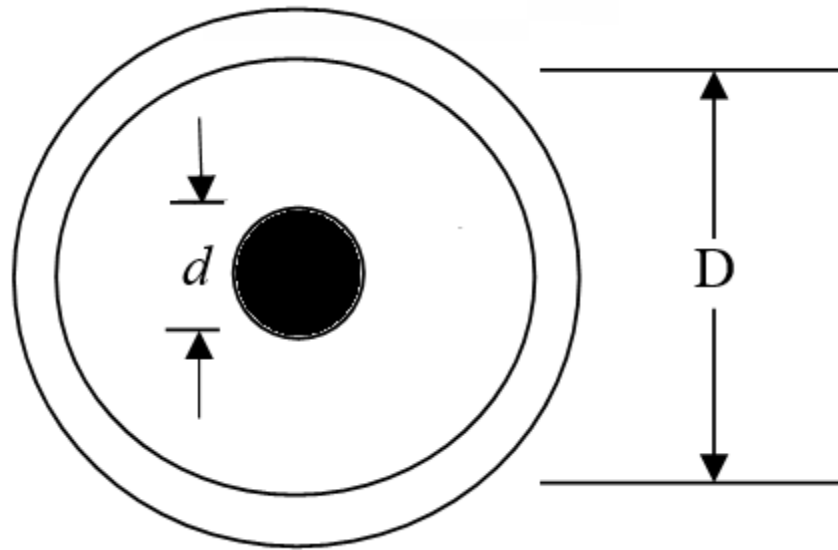
Pour les fréquences plus basses, le diélectrique peut être du polyéthylène ou de la mousse de polyéthylène. Pour les fréquences plus élevées, il est généralement en téflon. Pour des signaux de haute puissance, on utilise parfois de l'air sec ou de l'azote. L'onde électromagnétique se propage dans la région entre les deux conducteurs.



MODULE #1 – TYPES DE LIGNES DE TRANSMISSION

L'impédance caractéristique peut être déterminée à l'aide de l'équation :

$$Z_o \approx \frac{138}{\sqrt{K}} \text{Log} \left| \frac{D}{d} \right|$$



MODULE #1 – TYPES DE LIGNES DE TRANSMISSION

TECHNICAL DATA SHEET

RG213/U

Configuration

Inner Conductor Material and Plating	Copper
Dielectric Type	PE
Shield Materials	Copper Braid
Jacket Material and Color	PVC, Black

Electrical Specifications

Impedance, Ohms	50
Velocity of Propagation, %	66
Maximum Operating Frequency, MHz	1000
Capacitance, pF/ft [pF/m]	30.8 [101.05]

Electrical Specifications by Frequency

Frequency 1

Frequency, MHz	100
Attenuation, dB/100ft [dB/100m]	2.1 [6.89]

Frequency 2

Frequency, MHz	400
Attenuation, dB/100ft [dB/100m]	4.8 [15.75]

Frequency 3

Frequency, MHz	1000
Attenuation, dB/100ft [dB/100m]	8 [26.25]

Mechanical Specifications

Inner Conductor	
Number of Strands	7
Material	Copper
Diameter, in [mm]	0.09 [2.29]

Dielectric:

Type	PE
Diameter, in [mm]	0.285 [7.24]

Shield:

Number of	1
Material 1	Copper Braid
Diameter, in [mm]	0.314 [7.98]

MODULE #1 – TYPES DE LIGNES DE TRANSMISSION



LDF6-50, HELIAX® Low Density Foam Coaxial Cable, corrugated copper, 1-1/4 in, black PE jacket

Product Classification

Brand	HELIAX®
Product Series	LDF6-50
Product Type	Coaxial wireless cable

Construction Materials

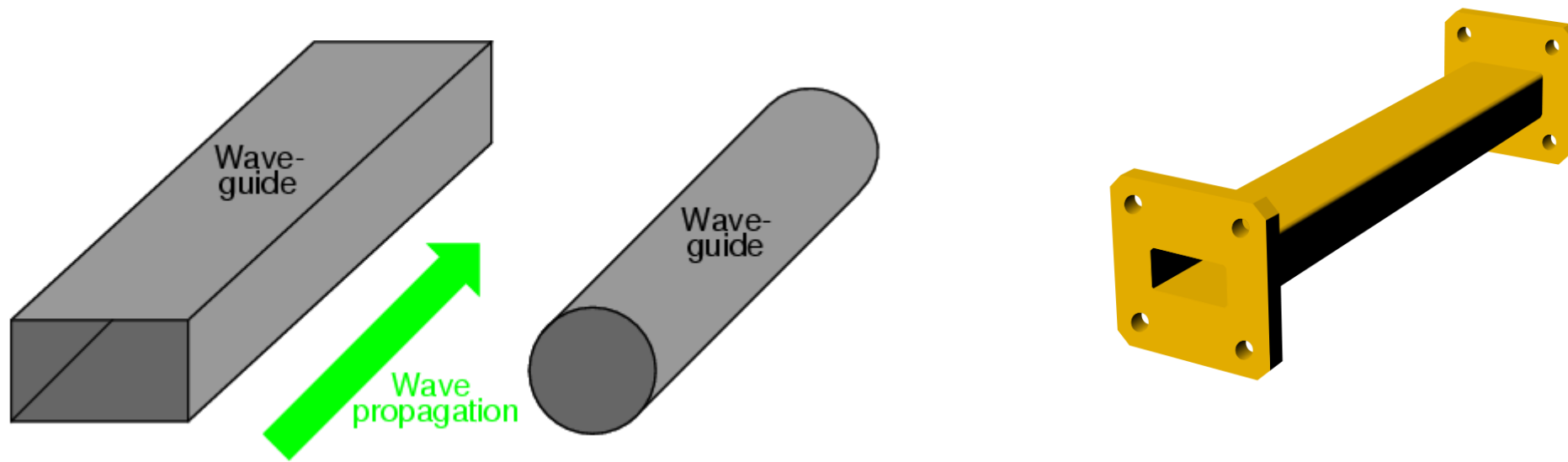
Jacket Material	PE
Outer Conductor Material	Corrugated copper
Dielectric Material	Foam PE
Flexibility	Standard
Inner Conductor Material	Copper tube
Jacket Color	Black

Dimensions

Nominal Size	1-1/4 in
Cable Weight	0.60 lb/ft 0.89 kg/m
Diameter Over Dielectric	33.782 mm 1.330 in
Diameter Over Jacket	39.370 mm 1.550 in
Inner Conductor OD	13.2080 mm 0.5200 in
Outer Conductor OD	35.814 mm 1.410 in

MODULE #1 – TYPES DE LIGNES DE TRANSMISSION

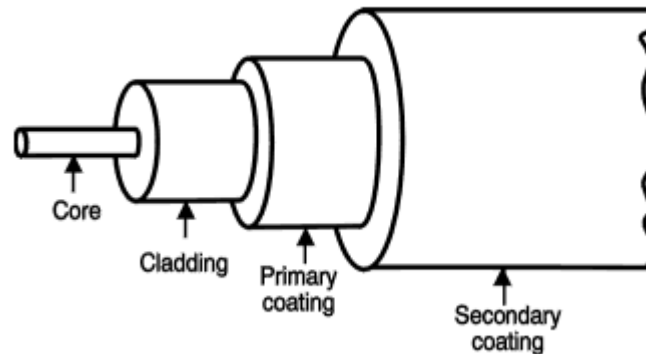
Le guide d'ondes est un support de transmission qui confine des ondes électromagnétiques et guide leur propagation. Le guide d'ondes est normalement constitué d'un conducteur métallique creux de section habituellement cylindrique, rectangulaire ou elliptique. Ce type de guide d'ondes peut, dans certaines conditions, contenir un matériau diélectrique massif ou gazeux. Les guides d'ondes sont utilisés dans les systèmes radio hyperfréquence.



MODULE #1 – TYPES DE LIGNES DE TRANSMISSION

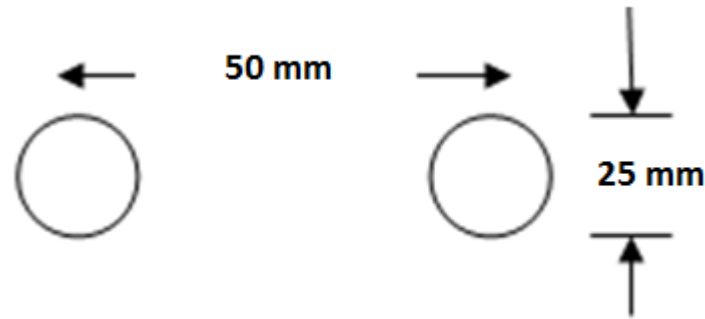
La **fibre optique** est conçue spécialement pour transmettre la lumière qui peut être modélisée comme une onde électromagnétique. La fibre optique est constituée d'un conducteur central, appelé coeur, constitué de verre ou de plastique.

Le coeur est entouré d'une gaine de protection. L'ensemble est entouré d'une enveloppe de protection. Les avantages de la fibre optique sont les suivants : bande passante très étendue, immunité contre le bruit et petite taille.

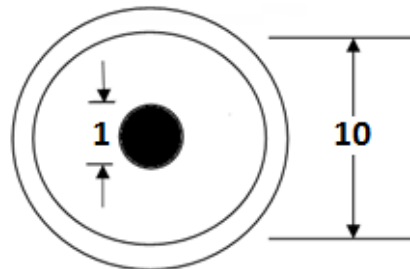


MODULE #1 – TYPES DE LIGNES DE TRANSMISSION

Exercice #10 Calculer l'impédance caractéristique du lien de transmission ci-dessous. La constante diélectrique est de 1,4



Exercice #11 Calculer l'impédance caractéristique du lien de transmission ci-dessous. La constante diélectrique est de 1,2

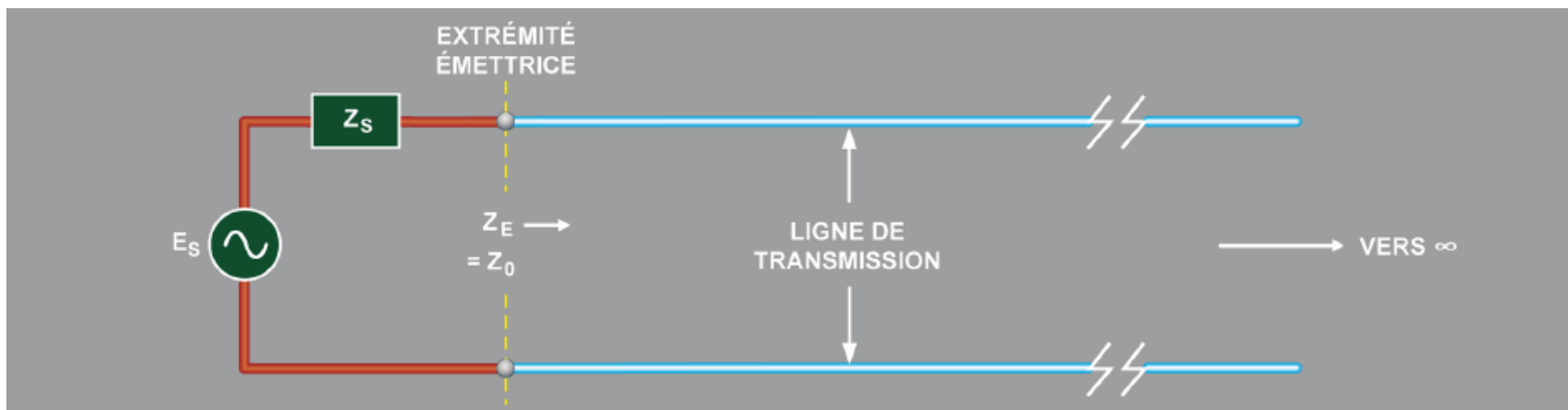


MODULE #1 – Impédance caractéristique

Le paramètre le plus important d'une ligne de transmission est son **impédance caractéristique**. Cette impédance est représentée par le symbole Z_0 et on l'appelle aussi l'impédance de ligne. Z_0 est principalement déterminée par les caractéristiques physiques de la ligne :

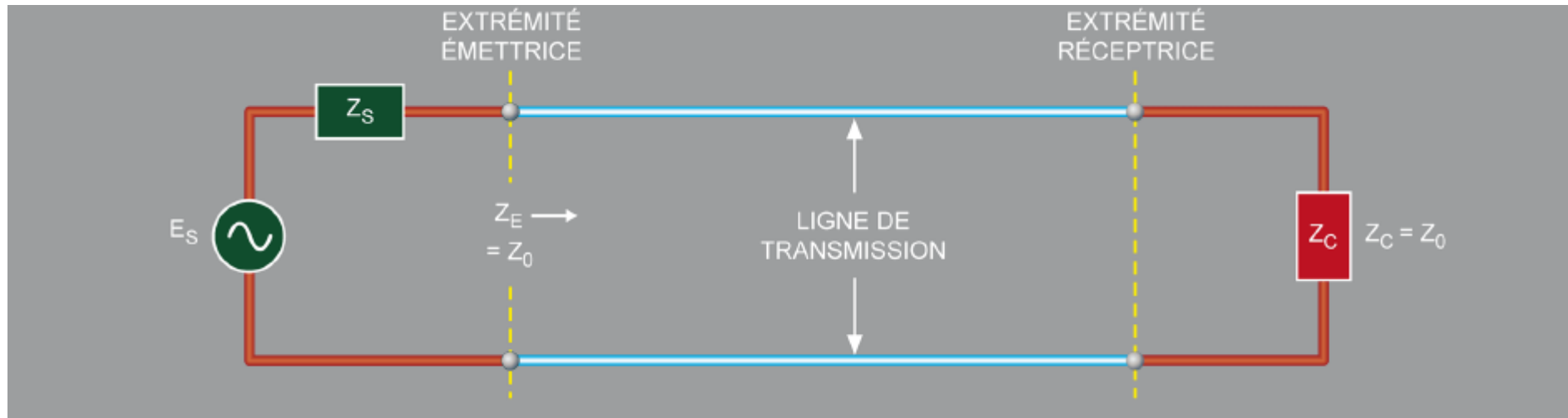
1. le diamètre et la forme des conducteurs;
2. l'espace relatif entre les conducteurs,
3. le type de matériau isolant qui sépare les conducteurs.

Cependant, Z_0 est indépendante de la longueur de la ligne de transmission. Théoriquement, Z_0 peut se définir comme l'impédance d'entrée, Z_E , d'une ligne de longueur infinie.



MODULE #1 – Impédance caractéristique

Une définition plus pratique de Z_0 est la suivante : Z_0 est égale à l'impédance d'entrée Z_E d'une ligne de longueur finie lorsque l'impédance de la charge Z_C est parfaitement égale à l'impédance de ligne Z_0 .

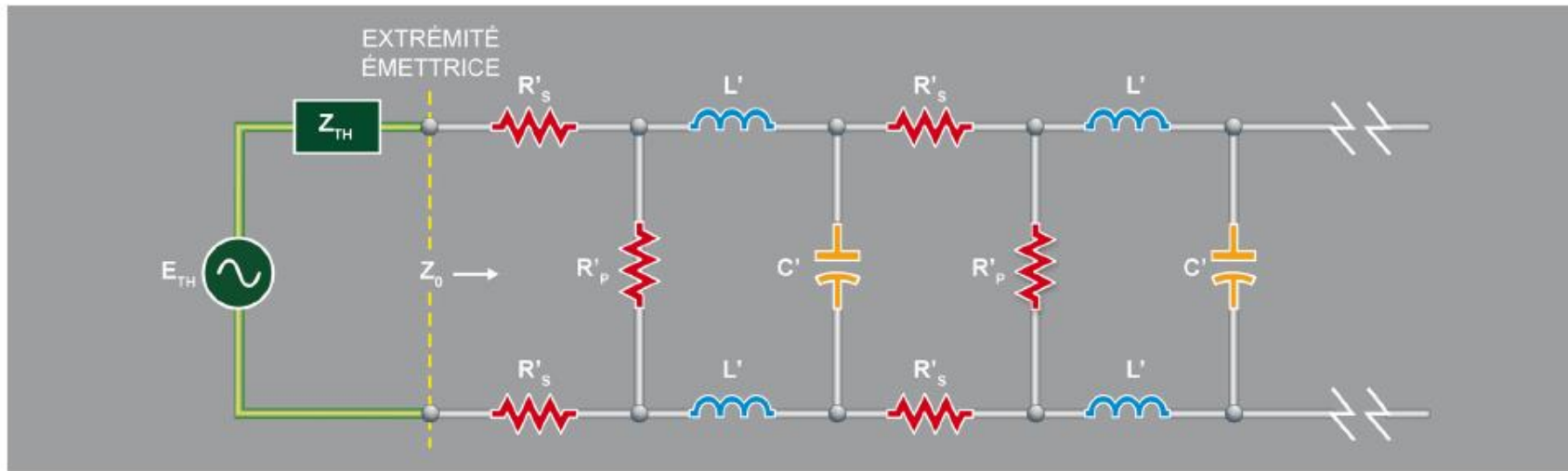


Exercice #12:

Quelle sera l'impédance de ligne d'une ligne de transmission bien balancée avec la source et la charge, si Z_C est calculé pour optimiser au maximum le transfert de puissance de la source qui elle possède un Z_s de 75Ω

MODULE #1 – Impédance caractéristique

Pour chacune des différentes lignes de transmission qui a été présentée, nous avons une équation nous permettant de déterminer la valeur de l'impédance de cette ligne.



une résistance série $R.s$ en général très faible (prendra $R.s = 0$, pas de pertes)

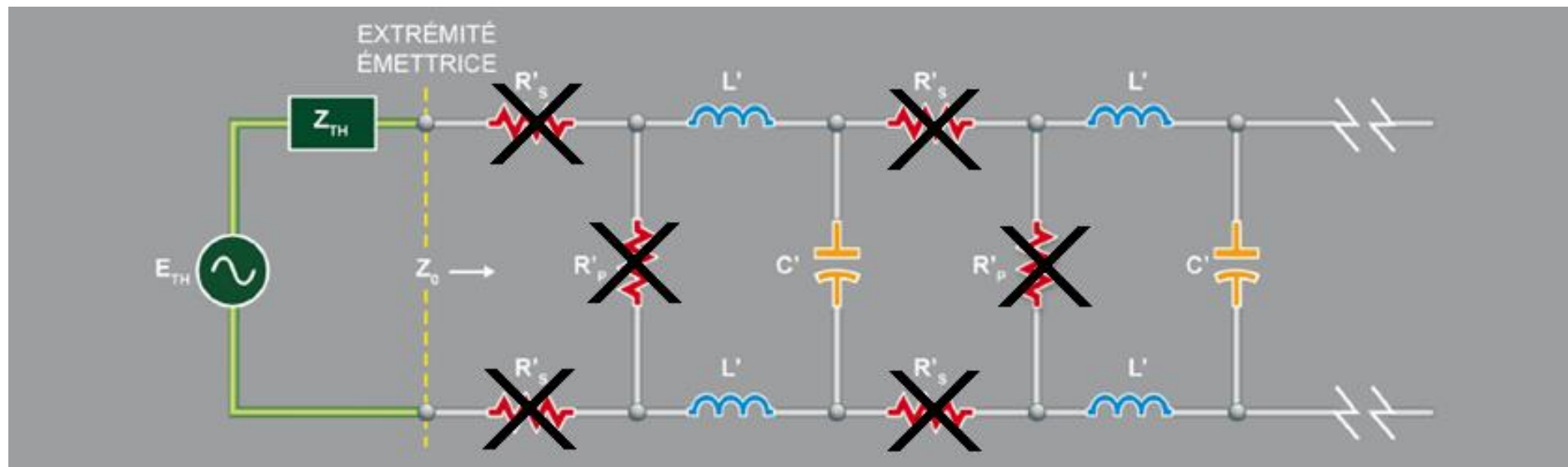
une conductance parallèle $R.p$ en général élevé (prendra $R.p = \infty$, **isolation parfaite**)

une inductance série L' , où L est l'inductance linéique (0,5 à 5 mH/m)

une capacité parallèle C' , où C est la capacité linéique (50 à 100 pF/m)

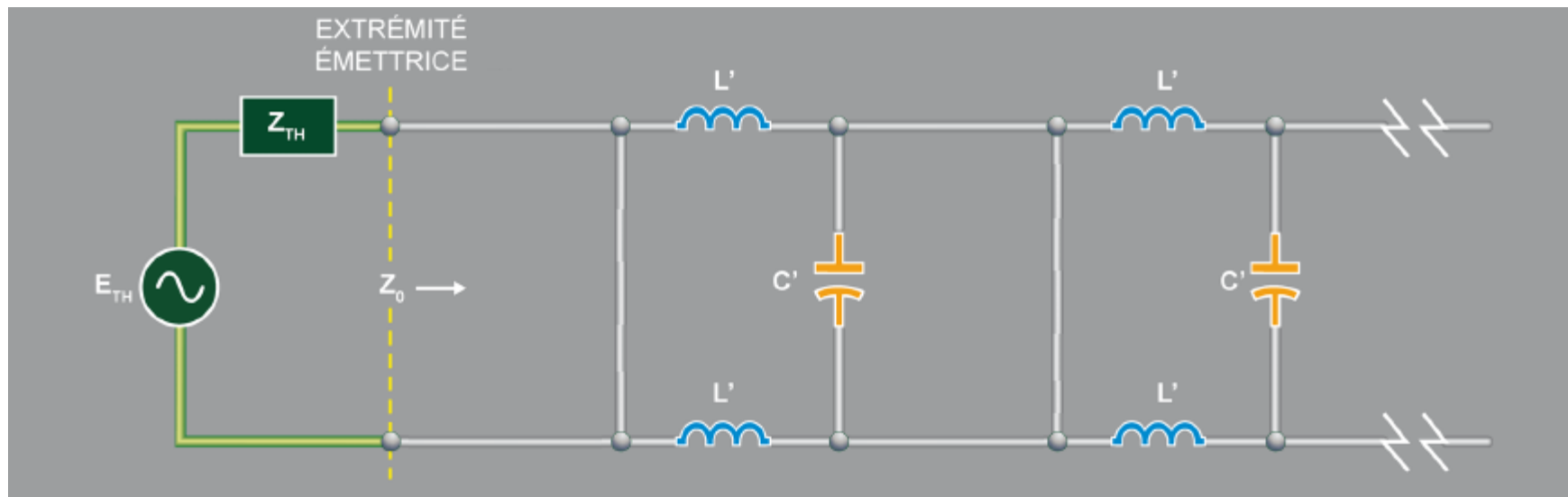
MODULE #1 – Impédance caractéristique

Lorsque la ligne de transmission est utilisée à des fréquences élevées, soit plus grande que 10 kHz, alors l'importance des inductances et des capacités rendent les valeurs des résistances négligeables. Nous pouvons alors modifier notre circuit équivalent en conséquence.



MODULE #1 – Impédance caractéristique

Lorsque la ligne de transmission est utilisée à des fréquences élevées, soit plus grande que 10 kHz, alors l'importance des inductances et des capacités rendent les valeurs des résistances négligeables. Nous pouvons alors modifier notre circuit équivalent en conséquence.



MODULE #1 – Impédance caractéristique

Pour une ligne de transmission réelle (avec pertes), l'impédance caractéristique est un nombre complexe :

$$Z_o = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

où R et G sont respectivement la résistance et la conductance de pertes par unités de longueur (Ω/m et S/m). On remarque qu'à haute fréquence ($\omega = 2\pi f$ assez grand) R et G sont négligeables devant $j\omega L$ et $j\omega C$ d'où la bonne approximation sur une ligne réelle à haute fréquence de :

$$Z_o = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Il est important de souligner l'importance de terminer la ligne de transmission par une impédance équivalente à la ligne. Sinon l'impédance de cette ligne sera différente et affectera les signaux qu'elle transporte.

MODULE #1 – Impédance caractéristique

Plus l'espacement augmente, plus l'inductance augmente

$$(D \uparrow = L \uparrow)$$

Plus le diamètre du conducteur diminue, plus l'inductance augmente

$$(d \downarrow = L \uparrow)$$

Plus l'espacement augmente, plus la capacitance diminue.

$$(S \uparrow = C \downarrow)$$

Plus le diamètre du conducteur diminue, plus la capacitance diminue

$$(d \downarrow = C \downarrow)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

MODULE #1 – Impédance caractéristique

Exercice #13 : Trouver l'impédance caractéristique du câble suivant :

Nom. Inductance:

Inductance ($\mu\text{H}/\text{m}$)

0.193579

Nom. Capacitance Conductor to Shield:

Capacitance (pF/m)

80.7126

Exercice #14 : Trouver la capacitance du câble suivant sachant que :

Nom. Characteristic Impedance:

Impedance (Ohm)

75

Nom. Inductance:

Inductance ($\mu\text{H}/\text{m}$)

0.193579

MODULE #1 – Impédance caractéristique

À partir de ce tableau, il est possible de déterminer l'impédance d'une ligne selon ses dimensions physiques et sa constante diélectrique. Le symbole K est la constante diélectrique du matériau utilisé. La constante diélectrique est symbolisée par $K = E/E_0$ qui est le rapport de la permittivité du milieu, du matériau par la permittivité du vide.

Milieu	K (E/E ₀)
Vide	1,000
Air sec	1,006
Téflon	2,1
Polyéthylène	2,3
Foam de polyéthylène	1,6
Polystyrène	2,56
Plexiglass	2,8
Papier	3,0
Cellulose	3,3-3,9
Quartz	3,8
Bakelite	4,4-5,4
Pyrex	4,8
Porcelaine	5,1-5,9
Mica	5,4
Verre	7,6-8,0
Céramique faible	10
Céramique forte	100-10 000

MODULE #1 – Impédance caractéristique

À partir de ce tableau, il est possible de déterminer l'impédance d'une ligne selon ses dimensions physiques et sa constante diélectrique.

Double ligne II :
$$Z_o \approx \frac{276}{\sqrt{K}} \text{Log} \left[\frac{2S}{d} \right]$$

Double ligne II blindée :
$$Z_o \approx \frac{276}{\sqrt{K}} \text{Log} \left[\frac{2S}{d} \left(\frac{1 - (S/D)^2}{1 + (S/D)^2} \right) \right]$$

Ligne coaxiale :
$$Z_o \approx \frac{138}{\sqrt{K}} \text{Log} \left[\frac{D}{d} \right]$$

Ligne plane :
$$Z_o \approx \frac{377}{\sqrt{K}} \left[\frac{T}{W} \right]$$

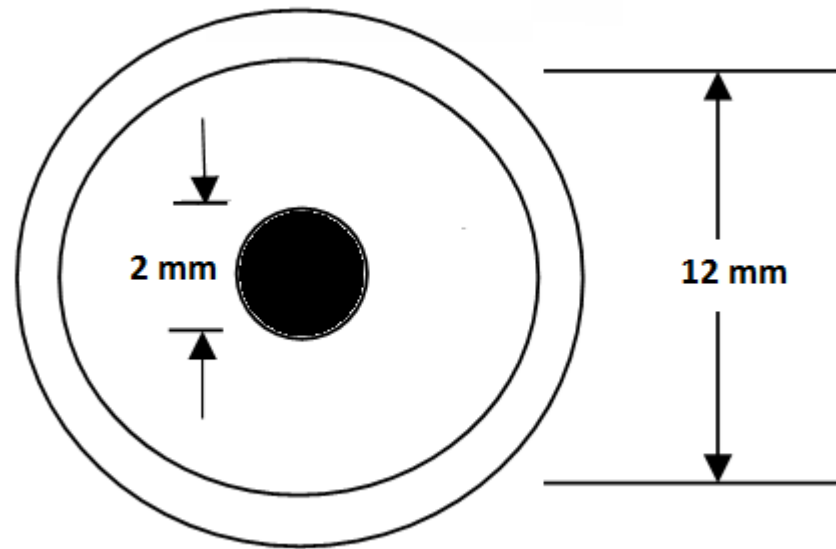
MODULE #1 – Impédance caractéristique

Il est important de retenir que l'industrie cherche à normaliser la valeur des impédances utilisées dans l'ensemble des systèmes de télécommunication. L'impédance caractéristique des lignes de transmission est généralement comprise entre 50 et 600 Ω .

- Les lignes coaxiales, utilisées comme descentes d'antennes dans les réseaux de câblodistribution pour raccorder les émetteurs radio à leurs antennes, présentent une impédance caractéristique de **50 Ω (radiocommunication)** ou **75 Ω (câblodistribution)**.
- Les lignes de transmission à deux conducteurs utilisées pour raccorder les téléviseurs à leur antenne présentent généralement une impédance caractéristique de 300 Ω .
- Les lignes de transmission à deux conducteurs utilisées dans la distribution téléphonique présentent une impédance caractéristique de 600 Ω .

MODULE #1 – Impédance caractéristique

Exercice #15 : Trouver la constante diélectrique du câble suivant afin d'obtenir une impédance caractéristique de 75Ω .



MODULE #1 – Facteur de vélocité – velocity factor

Nous pouvons également déterminer la vitesse de propagation des ondes dans les différents milieux à partir de la relation suivante:

$$V.F. = \frac{V_p}{C}$$

Nous utilisons couramment une caractéristique pour un câble de ligne de transmission que l'on appelle constante de propagation. La constante de propagation (velocity constant ou velocity factor) est le rapport de la vitesse réelle de propagation versus la vitesse de la lumière dans le vide. Nous employons également une formule d'approximation pour cette constante.

$$V.F. \approx \frac{1}{\sqrt{K}}$$

MODULE #1 – Facteur de vélocité – velocity factor

Voici, le facteur de vélocité de certains câble coaxial. Pour l'ensemble des lignes de transmission, le facteur de la constante de propagation est une valeur comprise entre 0,55 et 0,97.

TYPE	VF
RG-6/U PE (Belden 8215)	66.0
RG-6/U Foam (Belden 9290)	81.0
RG-8/U (PE (Belden 8237)	66.0
RG-8/U Foam (Belden 8214)	78.0
RG-8/U (Belden 9913)	84.0
RG-8X (Belden 9258)	82.0
RG-11/U Foam HDPE (Beld. 9292)	84.0
RG-58/U PE (Belden 9201)	66.0
RG-58A/U Foam (Belden 8219)	73.0
RG-59A/U PE (Belden 8241)	66.0
RG-59A/U Foam (Belden 8241F)	78.0
RG-174 PE (Belden 8216)	66.0
RG-174 Foam (Belden 7805R)	73.5
RG-213/U (Belden 8267)	66.0

MODULE #1 – Facteur de vélocité – velocity factor

Exercice #16 : Trouver la vitesse de propagation ainsi que la longueur d'onde d'une onde se propageant dans un câble RG-58/U PE (Belden 9201) à la fréquence de 1,4 GHz.

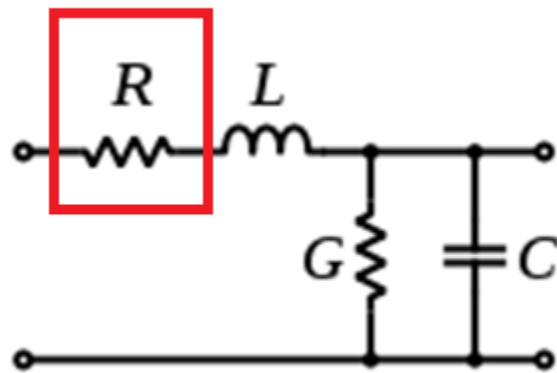
Exercice #17 : Trouver la constante diélectrique et le facteur de vélocité d'un câble dont une onde se propage à la fréquence de 3 GHz et dont la longueur d'onde est de 66,6 mm. Déterminez aussi la vitesse de propagation.

Exercice #18 : Un câble RG-8 Belden 8214 est utilisé dans un système de transmission. L'onde utilisée par le système fonctionne à la fréquence de 200 MHz. Quelle doit être la longueur du câble si l'on veut qu'il mesure $\lambda/4$

Exercice #19 : Déterminer le $\lambda/4$ dans le même système que le numéro 18 mais cette fois avec un câble RG-6 Belden 8215

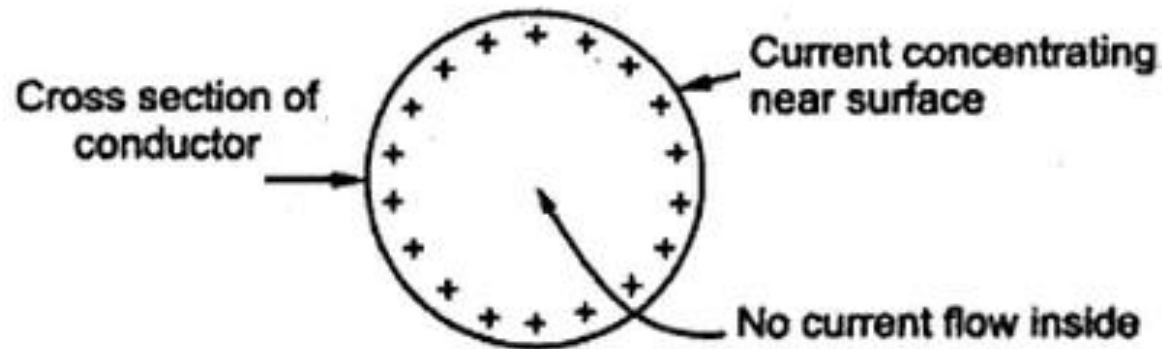
MODULE #1 – Pertes de ligne de transmission

Il ne faut pas oublier que si nous modifions le circuit équivalent d'une ligne de transmission en considérant que les valeurs de résistance sont négligeables, elles ne sont pas inexistantes. **La résistance d'un conducteur n'est jamais égale à zéro.** Lorsque le courant circule dans la ligne, une partie de l'énergie sera dissipée par effet joules (I^2R).



MODULE #1 – Pertes de ligne de transmission

Pour les hautes fréquences, ces pertes sont en grande partie dues à ce que l'on appelle l'effet de peau. L'effet de peau résulte du fait que pour les hautes fréquences la conduction ne se fait qu'à la surface du conducteur.



MODULE #1 – Pertes de ligne de transmission

Il convient donc que pour limiter les pertes dans une ligne de transmission il est requis d' :

- **augmenter** le diamètre des conducteurs
- utiliser une longueur de ligne la **plus courte possible**

Il faut également considérer les pertes dans le diélectrique (G) qui sont proportionnelles à la valeur de la tension. Des pertes peuvent également résulter de l'interaction des champs électriques et magnétiques dans le milieu diélectrique.

L'ensemble des pertes est défini par les manufacturiers en dB/km pour une fréquence donnée, de dB/km à MHz.

MODULE #1 – Pertes de ligne de transmission

L'ensemble des pertes est défini par les manufacturiers en dB/km pour une fréquence donnée, de dB/km à MHz.

Exemple :

	dB/km	MHz
RG-19/u	- 40 dB/km	200 MHz
	- 60 dB/km	400 MHz
	- 80 dB/km	600 MHz

MODULE #1 – Vitesse de propagation

Si nous appliquons une tension continue à l'entrée d'une ligne de transmission, nous pouvons déterminer la vitesse à laquelle se propage la tension dans la ligne en fonction du taux de charge de la capacité de la ligne et de l'opposition aux variations de courant de l'inductance de cette même ligne.

Le temps de propagation sera alors égal à :

$$t = \sqrt{LC}$$

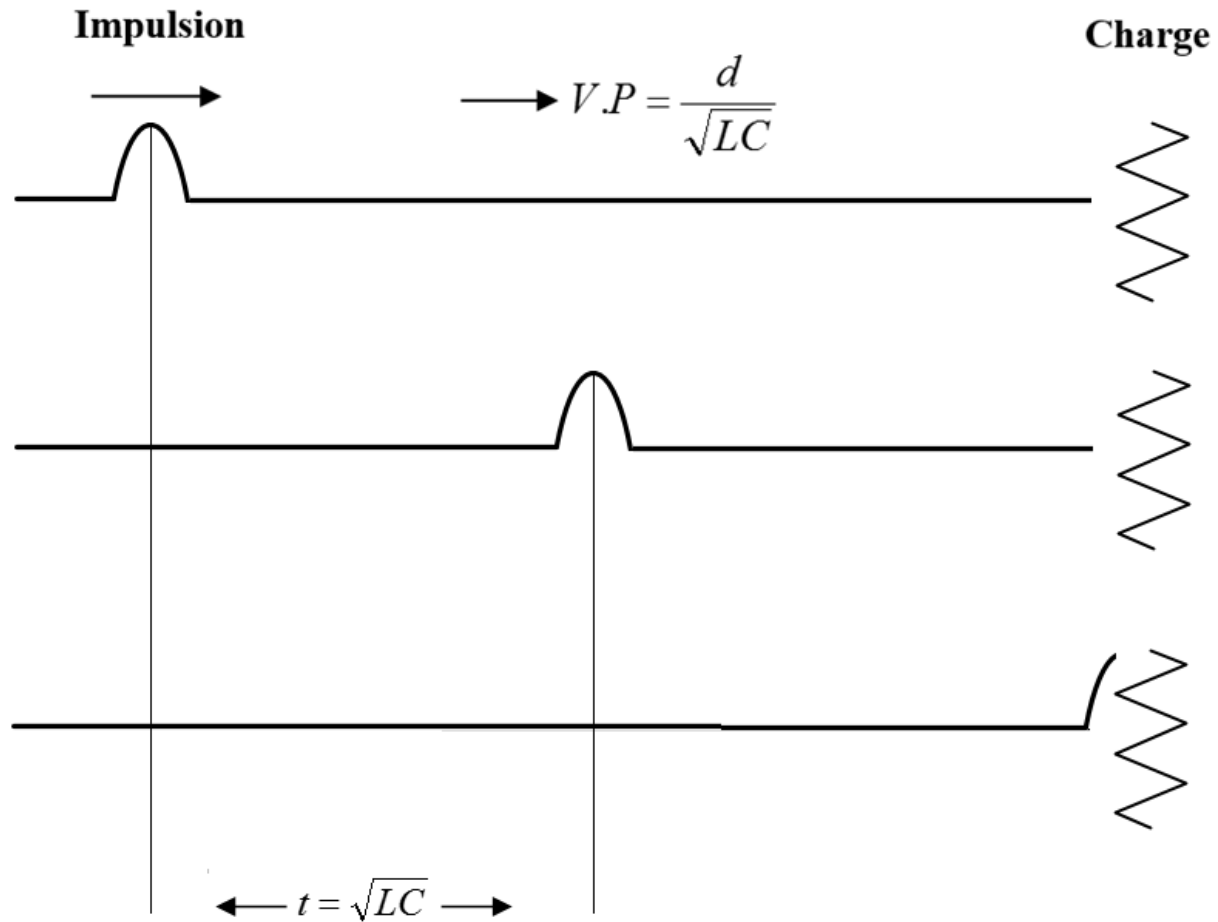
t : délais de propagation

L : inductance caractéristique

C : capacitance caractéristique

À partir de cette équation, nous pourrions donc déterminer le délai de propagation pour une longueur de ligne donnée à partir des caractéristiques de cette ligne.

MODULE #1 – Vitesse de propagation



MODULE #1 – Vitesse de propagation

Exemple : Une section de ligne RG-8A10 de un pied, ayant 29,5 pF/pi. et 73,75 nH/pi. Déterminer son impédance et le délai produit par cette ligne.

$$Z_o = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{73,75 \times 10^{-9}}{29,5 \times 10^{-12}}} = 50 \Omega$$

$$t = \sqrt{LC} = \sqrt{73,75 \times 10^{-9} \times 29,5 \times 10^{-12}} = 1,475 \times 10^{-9} \text{ s} \\ = 1,475 \text{ nS}$$

MODULE #1 – Vitesse de propagation

Connaissant le temps que prend un signal à se propager dans une ligne, il est alors possible de connaître la vitesse de propagation d'une onde dans cette ligne, soit :

$$V_p = \frac{d}{\sqrt{LC}}$$

VP : vitesse de propagation

d : distance parcourue

L : inductance caractéristique

C : capacitance caractéristique

MODULE #1 – Vitesse de propagation

Exemple :

Pour la section de ligne précédente, déterminer la vitesse de propagation (Une section de ligne RG-8A10 de un pied, ayant 29,5 pF/pi. et 73,75 nH/pi).

$$V_p = \frac{d}{\sqrt{LC}} = \frac{1 \text{ pi}}{\sqrt{73,75 \times 10^{-9} \times 29,5 \times 10^{-12}}} = 6,78 \times 10^8 \text{ pi/s}$$

MODULE #1 – Vitesse de propagation

Exercice #20: :

Une section de câble ayant les caractéristiques suivantes :

Nom. Inductance:

Inductance ($\mu\text{H}/\text{m}$)

0.262808

Nom. Capacitance Conductor to Shield:

Capacitance (pF/m)

93.5085

Calculez l'impédance caractéristique, et déterminer le délai produit par cette section de ligne (3m).

Trouvez aussi la constante de propagation (V.F.) la vitesse de propagation dans le câble.