

Support de transmission physique



Mr Ghazi Aziz
Supmanagement



Mr Ghazi Aziz Supmanagement

1

Support de transmission physique Programme

- Support de transmission Physique
- Caractéristiques des supports de transmission
- Bande passante et système de transmission
- Impédance caractéristique
- Coefficient de vélocité
- Les supports guidés
- La paire torsadée
- Le câble coaxial
- Les abaques de Smith
- La fibre optique
- Déploiement de la fibre optique FTTH

Mr Ghazi Aziz Supmanagement

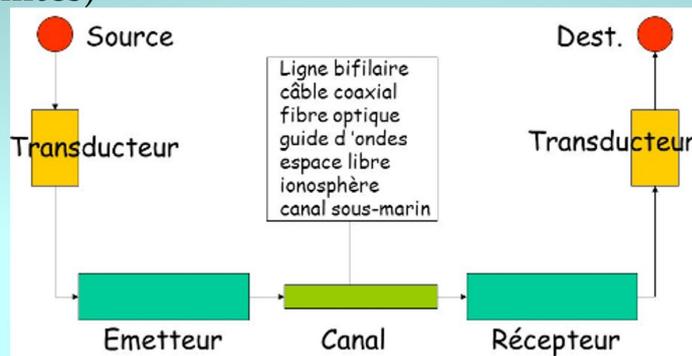
2

GÉNÉRALITÉS



Généralement on classe les supports en deux catégories :

- ❑ **Les supports guidés** (supports cuivre et supports optiques) ;
- ❑ **Les supports libres** (faisceaux hertziens et liaisons satellites)



Mr Ghazi Aziz Supmangement

3

Introduction

Un support de transmission est le chemin physique par lequel un message voyage de l'expéditeur au destinataire. Il constitue la base matérielle des systèmes de communication, reliant les éléments d'un réseau et permettant la propagation de signaux (électriques, optiques ou radioélectriques)

Ces supports sont essentiels pour garantir la fiabilité, la vitesse et la sécurité des échanges d'information dans les réseaux modernes

Mr Ghazi Aziz Supmangement

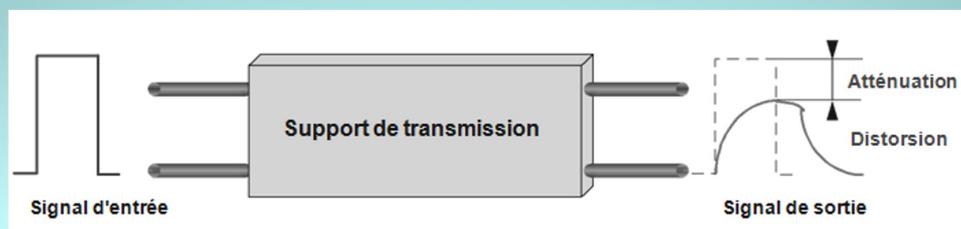
3

Les caractéristiques des supports

- Différentes selon la nature physique du support et du mode de propagation choisi.
- Cependant, certaines caractéristiques sont communes à tous les types de support (**bande passante...**), d'autres sont spécifiques (**impédance caractéristique, coefficient de vélocité...**)
- Les supports sont à l'origine de la plupart des problèmes de transmission, aussi il est important de bien en connaître les caractéristiques pour en comprendre l'utilisation et anticiper les différents problèmes d'exploitation pouvant survenir.

1. La bande passante :

Lors de sa transmission sur un support, l'impulsion électrique représentative d'un élément binaire est affaiblie (**atténuation**) et déformée (**distorsion**) par le système de transmission



Notion d'analyse spectrale

- On se réfère aux travaux du physicien **Fourier** qui a montré que tout signal périodique non sinusoïdal (par assimilation une suite de bits 0101010...) peut être considéré comme la somme d'une composante continue (A_0) et d'une infinité de signaux sinusoïdaux d'amplitude, de fréquence et de phase convenablement choisies. Le théorème de Fourier peut s'exprimer simplement par la relation :

$$u(t) = A_0 + \sum_{i=1}^{i=\infty} U_i \cos(i\omega t + \varphi_i)$$

- La composante de même fréquence ($i = 1$) que le signal d'origine est appelé fondamental. Les autres composantes sont des multiples ($i = 2, 3, \dots, \infty$) de la fréquence du signal fondamental, et sont appelées harmoniques.



$$u(t) = 4U/\pi (\sin \omega t + 1/3 \sin 3\omega t + 1/5 \sin 5\omega t + \dots)$$

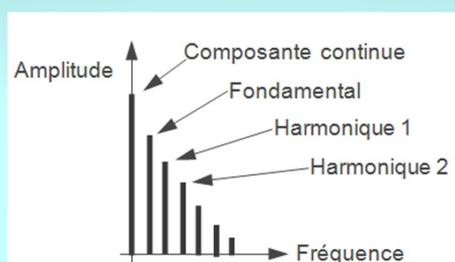
Mr Ghazi Aziz Supmangement

6

Notion d'analyse spectrale

L'espace de fréquences occupé par toutes les composantes se nomme largeur de bande du signal. Chaque composante peut être représentée par l'énergie qu'elle contient.

L'ensemble des raies de fréquence constitue **le spectre du signal**

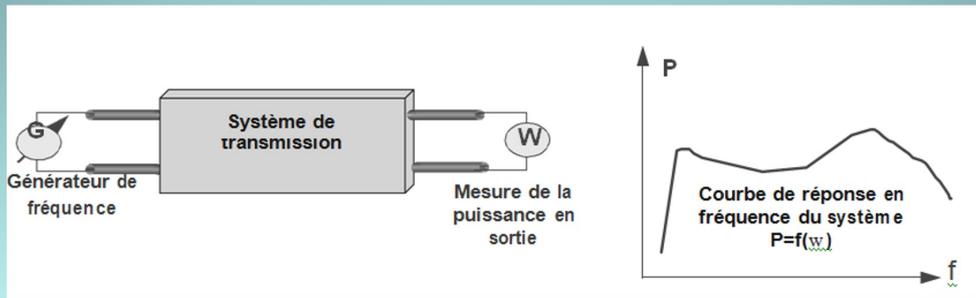


Mr Ghazi Aziz Supmangement

7

Notion de bande passante

- Principe du relevé de la bande passante d'un système



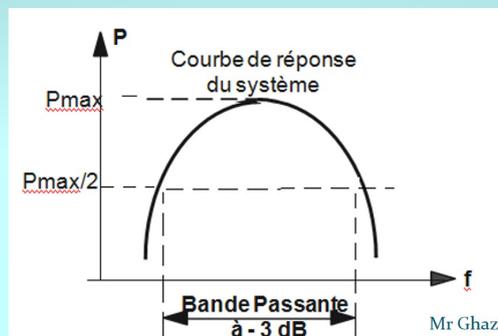
- Les signaux sont transmis avec une distorsion faible jusqu'à une certaine fréquence appelée fréquence de coupure. Au-delà de cette fréquence, toutes les composantes sont fortement atténuées

Mr Ghazi Aziz Supmangement

8

Notion de bande passante

- On appelle bande passante l'espace de fréquences tel que tout signal appartenant à cet intervalle, ne subisse, au plus, qu'un affaiblissement déterminé.
- L'affaiblissement, exprimé en décibel (dB) est donné par la relation :
$$A = 10 \log_{10} (P_1 / P_0)$$
 - où P_1 est la puissance du signal en sortie,
 - P_0 est la puissance du signal de référence
- La bande passante est définie pour une atténuation en puissance de moitié, ce qui correspond à -3 dB



Mr Ghazi Aziz Supmangement

9

2. L'impédance caractéristique

- Une ligne de transmission est constituée de deux conducteurs de cuivre séparés par un isolant.
- Elle présente au courant électrique un effet résistif (R) responsable de l'atténuation du signal, des effets réactifs qui se décomposent en effet selfique (L) et en effet capacitif (C), et enfin la conductance (G) qui exprime la perte par effet résistif entre les deux conducteurs (généralement négligeable).

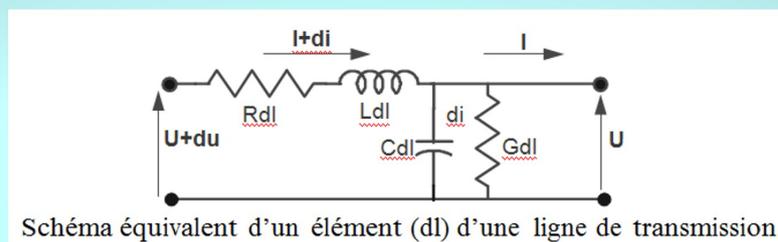


Schéma équivalent d'un élément (dl) d'une ligne de transmission.

Mr Ghazi Aziz Supmangement

10

L'impédance caractéristique

- **Définition:**

On appelle **impédance (Z)** de l'élément de ligne de longueur dl , le rapport du/di .

La notion d'impédance en courant alternatif recouvre une notion similaire à celle de résistance en courant continu, elle s'exprime en ohm (Ω).

Le rapport du/di pour une ligne supposée de longueur infinie s'appelle **impédance caractéristique notée Z_c** :

$$Z_c = \sqrt{\frac{R + jL\omega}{G + jC\omega}} \approx \sqrt{\frac{L}{C}}$$

- avec $\omega = 2\pi \times f$,
- où ω est la pulsation du courant exprimée en radian/s, et f , en hertz (Hz), la fréquence du signal.

Mr Ghazi Aziz Supmangement

11

Notion d'adaptation d'impédance

On montre qu'une ligne de longueur finie refermée sur un récepteur, dont l'impédance Z_r est telle que $Z_r = Z_c$, se comporte comme une ligne de longueur infinie. Le transfert de puissance est alors maximal entre le générateur et le récepteur. **La ligne est dite adaptée** (adaptation d'impédance)

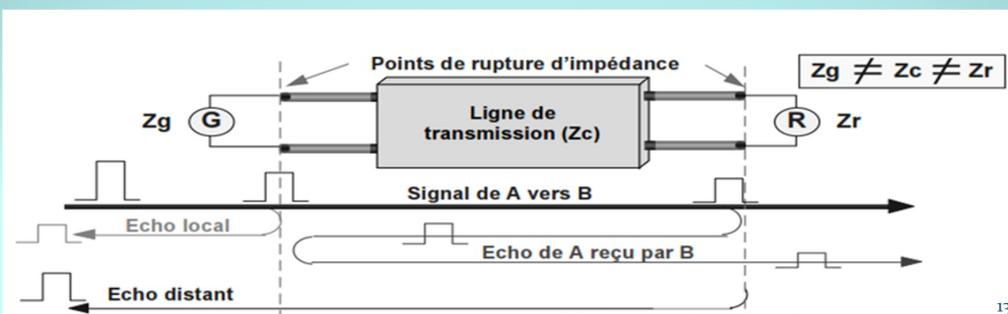


Mr Ghazi Aziz Supmangement

12

Conséquence de la désadaptation d'impédance : l'écho

Lorsque deux systèmes d'impédances différentes sont mis en relation, le transfert de puissance n'est pas optimal, la puissance non absorbée par le système distant est réfléchiée vers la source, ce phénomène s'appelle **l'écho**. L'écho a pour conséquence de générer des « bits fantômes », introduisant ainsi des erreurs de transmission.



Mr Ghazi Aziz Supmangement

13

3. Le coefficient de vélocité

- informe sur la vitesse de propagation du signal dans un support.
- Pour les câbles cuivre, le coefficient de vélocité vaut environ 0,7.
- Notons que la vitesse de propagation dans un support est $V = \alpha c$
 - avec V vitesse de propagation réelle du courant en m/s,
 - α coefficient de vélocité,
 - c célérité ou vitesse de la lumière

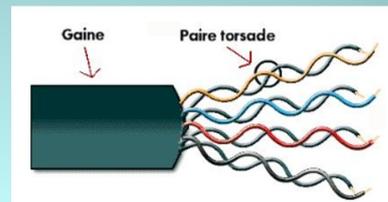
Récapitulatif

1. Quelles sont les catégories d'un support de transmission ? Donnez des exemples ?
2. Donnez le schéma d'une chaîne de transmission filaire ?
3. Donnez la formule de calcul de l'affaiblissement ?
4. Donnez la définition de la bande passante ?
5. Donnez le schéma équivalent d'une ligne de transmission ?
6. Citez la définition de l'impédance caractéristique d'une ligne ?
21/03/2025
7. Quand une ligne de transmission est dite adaptée ?
8. Quelle est la conséquence de la désadaptation d'impédance ?
9. Définir le coefficient de vélocité et donnez sa formule de calcul ?
Quelle est la vitesse de propagation de l'onde électrique dans le fil du cuivre sachant que $\alpha = 0,9$

Ligne de transmission

Une ligne est un ensemble de deux conducteurs, chargés de transmettre un signal d'un point à un autre. Les types de lignes les plus employées sont :

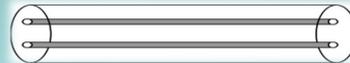
- La ligne bifilaire
- La ligne coaxiale
- La ligne imprimée



La ligne bifilaire

a. Paires droite :

Deux conducteurs filaires parallèles et maintenus à distance constante l'un de l'autre par un isolant (ligne « twin lead »). Pertes importantes. Grande sensibilité au bruit. Bande passante faible.



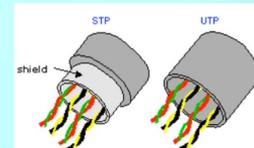
b. Paires torsadées UTP (Unshielded Twisted Pair) :

Deux conducteurs filaires isolés torsadés. Là aussi une atténuation importante. Moins sensible au bruit. Très utilisé pour le câblage téléphonique et informatique au niveau local.



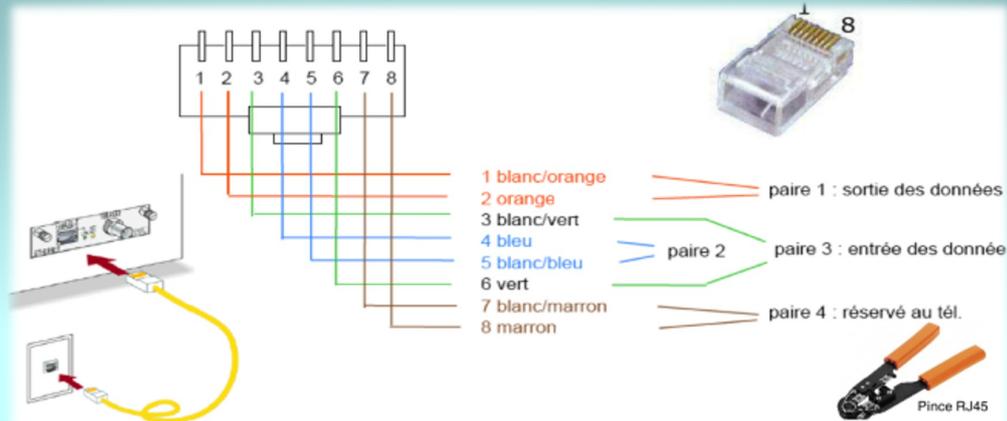
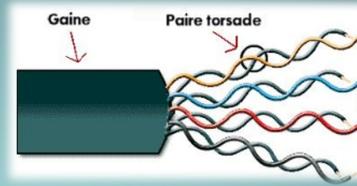
c. Paires torsadées blindées STP (Shielded twisted pair) :

C'est le même câble que la paire torsadée mais entourée d'une feuille conductrice. Meilleure immunité au bruit que la paire torsadée simple. Elles sont très utilisées pour le câblage des réseaux à 10 et 100 Mbits.



Paired twisted

- The most common use for local computer networks, where distances are limited to a few meters, use the RJ45 standard using cables containing 4 twisted pairs
- The connection of RJ45 cables is made through RJ45 connectors allowing to connect the wires according to the following scheme :



Mr Ghazi Aziz Supmangement

18

Paired twisted

Twisted pair cables are standardized in categories from Cat1 to Cat7, the most used currently are :

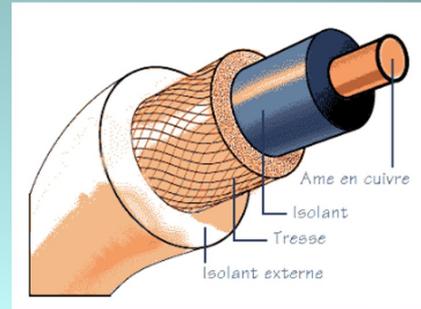
- **Catégorie 3** : Bande passante 16MHz, utilisée pour la téléphonie.
- **Catégorie 5** : Bande passante 100MHz, Débit 100MB/s sur 100m utilisée pour la téléphonie et les réseaux
- **Catégorie 6** : Bande passante 250MHz, Débit 1 GB/s sur 100m utilisée pour les réseaux
- **Catégorie 6a** : Bande passante 500MHz, Débit 10GB/s sur 100m
- **Catégorie 7** : Bande passante 600Mhz, Débit 10GB/s

Mr Ghazi Aziz Supmangement

19

Câble coaxial

- Le conducteur cylindrique extérieur sert de blindage.
- L'immunité au bruit est donc importante. Les pertes restent grandes et dépendent fortement de la qualité du diélectrique utilisé.
- La bande passante est importante. Ce type de ligne est utilisé dans le domaine du câblage vidéo, informatique, de l'électronique basse fréquence, mais aussi dans le domaine des hyperfréquences jusqu'à plusieurs dizaines de GigaHertz.
- Pour éviter une atténuation trop importante en hyperfréquence (par exemple à 40 GHz) on utilise des diélectriques spéciaux très onéreux.



Mr Ghazi Aziz Supmangement

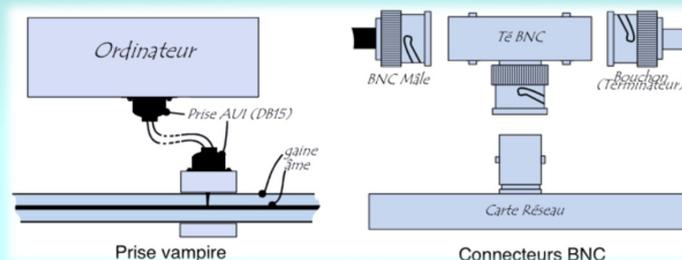
20

Câble coaxial

Il existe deux types de câble coaxial :

- Le câble 75Ω , dit "large bande" (broadband) utilisé pour la transmission analogique : c'est le câble de télévision !
- le câble 50Ω , dit "bande de base" (baseband) généralement utilisé pour transmettre des signaux numériques. Il permet une bande passante de quelques centaines de MHz et des débits allant jusqu'à 2Gbit/s.

Le câble coaxial est raccordé par des prises vampire pour les gros câbles et les fiches BNC (British Naval Connector) pour les câbles fins.



Mr Ghazi Aziz Supmangement

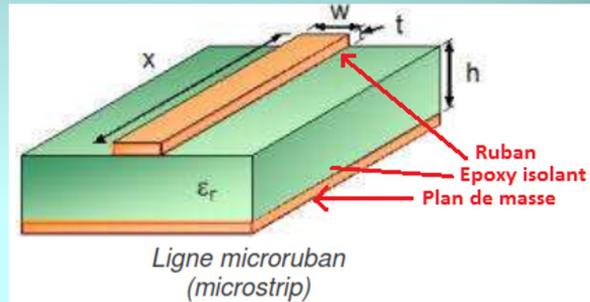
21

La ligne imprimée

- Cette ligne est imprimée sur de l'époxy double face : Elle comprend, sur une face, un conducteur formé par une piste (ruban) et , sur l'autre face, un plan de masse.
 - Ce type de ligne se rencontre notamment en hyperfréquences (des ondes électromagnétiques dont la longueur d'onde est de l'ordre du centimètre, et que l'on utilise notamment en technique radar et en transmission hertzienne).

Applications :

Les lignes imprimées sont essentielles pour les télécommunications, l'électronique haute fréquence et les systèmes radar. Elles permettent une transmission efficace des signaux électriques et radiofréquences **21/03/2025**

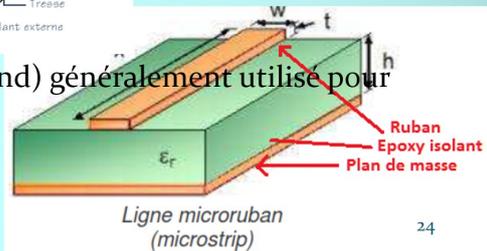
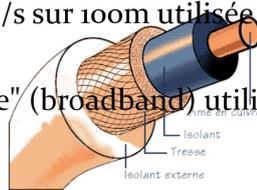


Récapitulatif

1. Donnez la définition d'une ligne de transmission ?
2. Quels sont les types d'une ligne de transmission ?
3. Donnez la succession des couleurs pour le branchement du câble à paires torsadées RJ45 ?
4. Quelles sont les fréquences et les applications d'utilisation des câbles RJ45 catégories 5 et 6 ?
5. Donnez la structure physique du câble coaxiale ?
6. Quelles sont les types du câble coaxial et leurs applications ?
7. Donnez la structure physique d'une ligne MicroRuban ?

Solution

1. Une ligne est un ensemble de deux conducteurs, chargés de transmettre un signal d'un point à un autre.
2. Les types de lignes les plus employées sont :
 - La ligne bifilaire-La ligne coaxiale-La ligne imprimée
3. Blanc/orange, orange, blanc/vert, bleu...
4. **Catégorie 5** : Bande passante 100MHz, Débit 100MB/s sur 100m utilisée pour la téléphonie et les réseaux - **Catégorie 6** : Bande passante 250MHz, Débit 1 GB/s sur 100m utilisée pour les réseaux
5. Structure du câble coaxiale :
6. **Le câble 75 Ω**, dit "large bande" (broadband) utilisé pour la transmission analogique :
c'est le câble de télévision !
 - **le câble 50 Ω**, dit "bande de base" (baseband) généralement utilisé pour transmettre des signaux numériques
- 7.



Mr Ghazi Aziz Supmangement

24

Description électrique d'une ligne

1 Résistance:

- Chacun des conducteurs de la ligne est caractérisé par une résistance, qui dépend essentiellement du métal dont il est fait, et de sa forme.
- Pour un fil métallique cylindrique, de section S et de longueur l, on rappelle la formule : $R = \rho \cdot \frac{l}{S}$
- ρ désigne la *résistivité* (en Ωm) du métal.
- Quelques valeurs de résistivités :

Argent	Cuivre	Aluminium	Fer	Plomb
$1,6 \times 10^{-8} \Omega m$	$1,7 \times 10^{-8} \Omega m$	$2,7 \times 10^{-8} \Omega m$	$9,8 \times 10^{-8} \Omega m$	$20 \times 10^{-8} \Omega m$

Mr Ghazi Aziz Supmangement

25

EXERCICE

- Une ligne de transmission en cuivre de **longueur totale $L=500\text{ m}$** a un **diamètre de 2 mm** . La résistivité du cuivre est $\rho=1.72 \times 10^{-8}\ \Omega \cdot \text{m}$.
1. **Calculez la résistance électrique de cette ligne.**
 2. **Quelle serait la résistance si la ligne était composée de deux fils en parallèle ?**

Mr Ghazi Aziz Supmangement

26

Corrigé :

1- Calcul de la résistance d'un seul fil

La résistance d'un conducteur est donnée par la formule : $R = \rho \frac{L}{A}$

Où :

- R est la résistance en ohms (Ω)
- $\rho = 1.72 \times 10^{-8}\ \Omega \cdot \text{m}$ est la résistivité du cuivre
- $L = 500\text{ m}$ est la longueur du conducteur
- A est la section du fil en m^2

Le fil a un diamètre de 2 mm , donc le rayon est : $r = \frac{2}{2} = 1\text{ mm} = 1 \times 10^{-3}\text{ m}$

La section du fil est donnée par : $A = \pi r^2 = \pi(1 \times 10^{-3})^2$

$$A = \pi \times 10^{-6} \approx 3.14 \times 10^{-6}\ \text{m}^2$$

$$\text{Calcul de la résistance} \quad R = \frac{(1.72 \times 10^{-8}) \times 500}{3.14 \times 10^{-6}} \quad R \approx 2.74\ \Omega$$

2- Cas de deux fils en parallèle

Quand deux fils de résistance R_1 sont connectés en parallèle, la résistance équivalente est donnée par :

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

$$R_{eq} = \frac{R}{2} = \frac{2.74}{2} = 1.37\ \Omega$$

Mr Ghazi Aziz Supmangement 11/04/2025

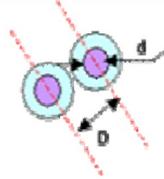
27

2. Capacité:

- Une ligne est formée de 2 conducteurs, séparés par un isolant. Ceci correspond à une capacité, *répartie tout au long de la ligne*.
- On appelle C la *capacité linéique* de la ligne (capacité par unité de longueur, exprimée en pF/m) C peut être calculée grâce au *Théorème de Gauss*

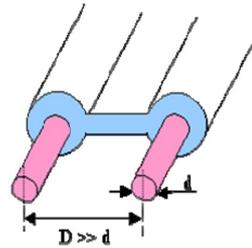
Pour une paire torsadée :

$$C = \frac{\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{\text{Ln} \left(\frac{D}{d} + \sqrt{\left(\frac{D}{d} \right)^2 - 1} \right)}$$



Pour une ligne twin lead :

$$C = \frac{\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{\text{Ln} \left(\frac{2D}{d} \right)}$$

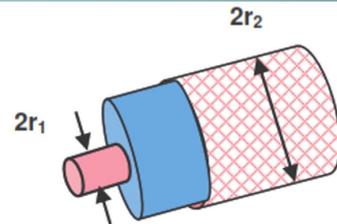


$\epsilon_0 \approx 8,84 \times 10^{-12}$ F/m, permittivité diélectrique du vide ; ϵ_r , permittivité relative de l'isolant séparant les 2 conducteurs.

2. Capacité:

Pour un câble coaxial :

$$C = \frac{2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{\text{Ln} \left(\frac{r_2}{r_1} \right)}$$



Ordres de grandeur :

Pour les diélectriques courants (polyéthylène), on peut prendre $\epsilon_r \approx 2$

Paire torsadée ($d \approx 0,4\text{mm}$; $D \approx 1,2\text{mm}$) $\rightarrow C \approx 32\text{pF/m}$?

Ligne twin-lead ($d \approx 0,4\text{mm}$; $D \approx 9\text{mm}$) $\rightarrow C \approx 15\text{pF/m}$?

Ligne coaxiale « 50Ω » ($r_1 \approx 1,6\text{mm}$; $r_2 \approx 5\text{mm}$) $\rightarrow C \approx 97\text{pF/m}$?

Exercice calcul de la capacité d'une ligne

- Un câble coaxial est constitué d'un conducteur intérieur cylindrique de rayon $a=1,5$ mm et d'un conducteur extérieur cylindrique (la gaine) de rayon intérieur $b=5,0$ mm. L'espace entre les deux conducteurs est rempli d'un matériau diélectrique isolant ayant une permittivité relative $\epsilon_r=2,25$. La longueur du câble est $L=50$ mètre .

On rappelle la permittivité du vide : $\epsilon_0 \approx 8,854 \times 10^{-12}$ F/m.

- Calculer la capacité par unité de longueur C' de ce câble coaxial. Exprimer le résultat en pF/m.
- Calculer la capacité totale C du câble pour la longueur donnée L . Exprimer le résultat en nF.

Mr Ghazi Aziz Supmangement

30

Solution

1. Calcul de la capacité par unité de longueur C'

La formule de la capacité par unité de longueur C' pour un câble coaxial est donnée par :

$$C' = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(b/a)}$$

- où :
- ϵ est la permittivité absolue du diélectrique entre les conducteurs.
 - a est le rayon du conducteur intérieur.
 - b est le rayon intérieur du conducteur extérieur.
 - \ln est le logarithme népérien.

La permittivité absolue ϵ est liée à la permittivité relative ϵ_r et à la permittivité du vide ϵ_0 par la relation : $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$

a) Calcul de la permittivité absolue ϵ : $\epsilon = 2,25 \times (8,854 \times 10^{-12} \text{ F/m}) \approx 1,992 \times 10^{-11} \text{ F/m}$

b) Calcul du rapport des rayons b/a

Il est important d'utiliser les mêmes unités pour a et b lors du calcul du rapport. Le rapport est sans

dimension. $\frac{b}{a} = \frac{5,0 \text{ mm}}{1,5 \text{ mm}} = \frac{5}{1,5} \approx 3,333$

c) Calcul du logarithme népérien $\ln(b/a)$: $\ln(b/a) = \ln(3,333) \approx 1,204$

d) Calcul de C'

Maintenant, nous pouvons insérer les valeurs dans la formule de C' :

$$C' \approx \frac{1,2516 \times 10^{-10} \text{ F/m}}{1,204} \approx 1,0395 \times 10^{-10} \text{ F/m}$$

Pour exprimer ce résultat en picofarads par mètre (pF/m), on multiplie par 10^{12} :

$$C' \approx (1,0395 \times 10^{-10}) \times 10^{12} \text{ pF/m} \approx 103,95 \text{ pF/m}$$

Donc, la capacité par unité de longueur est d'environ **104 pF/m**.

2. Calcul de la capacité totale C

La capacité totale C du câble est obtenue en multipliant la capacité par unité de longueur C' par la longueur totale L du câble : $C = C' \cdot L$

En utilisant la valeur de C' en F/m et $L = 50$ m :

$$C = (1,0395 \times 10^{-10} \text{ F/m}) \times (50 \text{ m})$$

$$C \approx 5,1975 \times 10^{-9} \text{ F}$$

Pour exprimer ce résultat en nanofarads (nF), on multiplie par 10^9 :

$$C \approx (5,1975 \times 10^{-9}) \times 10^9 \text{ nF} \approx 5,1975 \text{ nF}$$

Donc, la capacité totale du câble de 50 m est d'environ **5,20 nF**.

Mr Ghazi Aziz Supmangement

3 Inductance:

- Lorsque les 2 conducteurs de la ligne sont parcourus par un courant *variable dans le temps*, ils s'influencent mutuellement par effet inductif.
- On appelle L *l'inductance linéique* de la ligne (inductance par unité de longueur, exprimée en $\mu\text{H/m}$) L peut être calculée à l'aide du *théorème d'Ampère*.

$$\text{Pour une paire torsadée : } L = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{\pi} \cdot \text{Ln} \left(\frac{D}{d} + \sqrt{\left(\frac{D}{d}\right)^2 - 1} \right)$$

$$\text{Pour une ligne twin lead : } L \approx \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{\pi} \cdot \text{Ln} \left(\frac{2D}{d} \right)$$

$$\text{Pour une ligne coaxiale : } L = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{2\pi} \cdot \text{Ln} \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \quad \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$$

Ordres de grandeur. Pour les mêmes lignes que plus haut, on obtient :

Paire torsadée : $L \approx 0,7\mu\text{H/m}$

Ligne twin-lead : $L \approx 1,5\mu\text{H/m}$

Ligne coaxiale : $L \approx 0,23\mu\text{H/m}$

?

?

Constante de propagation d'un support de transmission (γ)

La constante de propagation, souvent désignée par le symbole gamma (γ), est une grandeur complexe qui caractérise la manière dont une onde (par exemple, une onde électromagnétique ou un signal électrique) se propage à travers un support de transmission (comme un câble coaxial, une fibre optique, ou même l'espace libre).

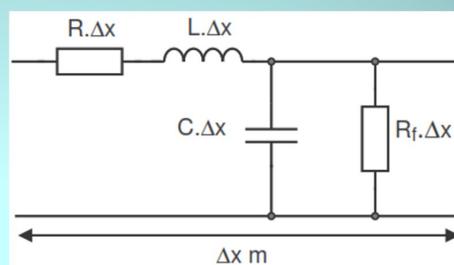
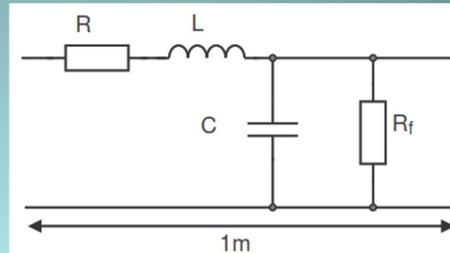
Elle décrit à la fois l'atténuation (diminution de l'amplitude) et le déphasage (changement de phase) de l'onde par unité de distance parcourue dans le milieu. La constante de propagation est généralement

exprimée sous la forme : $\gamma = \alpha + j\beta$ $\beta = \text{Racine}[(R+jL\omega)(G+jC\omega)]$

- α (alpha) est la **constante d'atténuation**. Elle représente la diminution de l'amplitude de l'onde par unité de distance. Elle est exprimée en (dB/m)
- β (bêta) est la **constante de phase** (ou nombre d'onde). Elle représente le changement de phase de l'onde par unité de distance. Elle est exprimée (rad/m). Elle est liée à la longueur d'onde (λ) dans le milieu par la relation $\beta = 2\pi/\lambda$.

Modèle électrique d'une ligne

- Compte tenu de ce qui précède, une longueur unitaire (1m) de ligne peut être représenté par le modèle électrique de droite.
- La résistance R_f correspond aux fuites inévitables dans l'isolant entre les 2 conducteurs ; de très forte valeur (10^7 à $10^{10} \Omega/m$)
- Pour une longueur Δx quelconque, ce modèle devient



NB: Il est important de noter que les paramètres de description (résistances, inductance et capacité) sont répartis tout au long de la ligne et ne sont pas localisés

Exercice sur le Modèle électrique d'une ligne de transmission cuivre

Une ligne de transmission en cuivre a les caractéristiques suivantes par unité de longueur :

$$R = 10 \Omega/k m$$

$$L = 2 mH /k m$$

$$C = 100 n F /k m$$

$$G = 0 S /k m \text{ (négligée)}$$

La longueur de la ligne est de 5 km.

- Déterminer les valeurs globales des paramètres R , L , C de la ligne.
- Donner l'équivalent du modèle en π de cette ligne.
- Calculer l'impédance caractéristique Z_c et la constante de propagation γ à la fréquence $f = 10 k H z$.
- Déduire l'atténuation de la ligne (en Np et en dB).
- Calculer le déphasage dû à la ligne.

1. Valeurs globales sur 5 km

- $R_{tot} = 10 \Omega/km \times 5 = 50 \Omega$
- $L_{tot} = 2 \times 10^{-3} H/km \times 5 = 10 \times 10^{-3} H = 10 mH$
- $C_{tot} = 100 \times 10^{-9} F/km \times 5 = 500 \times 10^{-9} F = 500 nF$

3. Impédance caractéristique et constante de propagation

Formules :

- $Z_c = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}}$
- $\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R+j\omega L)(G+j\omega C)}$

À $f = 10 kHz$, $\omega = 2\pi f = 2\pi \times 10^4 = 62831.85 rad/s$

Calcul de Z_c :

- $R = 10 \Omega/km$, $L = 2 mH/km$, $C = 100 nF/km$, $G = 0$

On a :

$$Z_c = \sqrt{\frac{10 + j(62831.85 \times 0.002)}{j(62831.85 \times 100 \times 10^{-9})}} = \sqrt{\frac{10 + j125.66}{j6.283}} \approx 61.2 - j6.8 \Omega$$

Calcul de γ : $\gamma = \sqrt{(10 + j125.66)(j6.283)} \approx \alpha + j\beta$

Ce calcul donne typiquement un résultat complexe. Approximativement, on trouve :

$$\gamma \approx 1.05 + j7.9 \text{ (Nd/km)}$$

Gamma=Racine[(R+jLw)(jCw)]

25/04/2025

Mr Ghazi Aziz Supmangement

4. Atténuation de la ligne

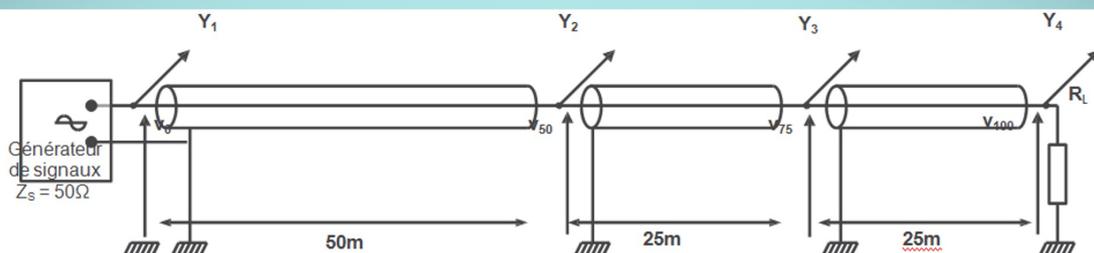
- Sur 5 km :
- $\alpha_{tot} = 1.05 \times 5 = 5.25 \text{ Np}$
- En dB : $A_{dB} = 8.686 \times 5.25 \approx 45.6 \text{ dB}$

5. Déphasage (en radians)

- $\beta_{tot} = 7.9 \times 5 = 39.5 \text{ rad}$
- En degrés :
- $\theta = 39.5 \times 180 \approx 7162^\circ$

Le phénomène de propagation

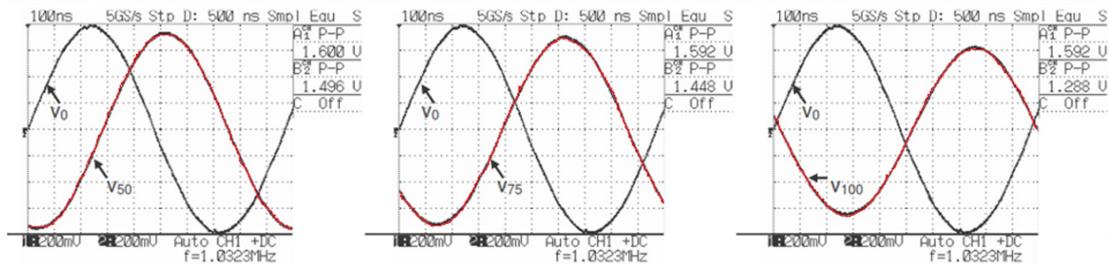
- Jusqu'à présent, nous avons considéré que 2 points quelconques d'un conducteur sont au même potentiel instantané. Ceci peut ne plus être vrai, si la longueur de ce conducteur est « grande », ou si la fréquence des signaux traités devient « trop » élevée.
- **1 Mise en évidence d'une propagation**
- Nous réalisons simplement l'expérience suivante : On dispose d'un câble coaxial de longueur totale 100m, formé par l'assemblage d'un tronçon de 50m et de 2 tronçons de 25m, comme représenté sur la figure ci-dessous :



Mr Ghazi Aziz Supmangement

Le phénomène de propagation

- Il s'agit de câble coaxial « 50Ω » ; le générateur délivre une tension sinusoïdale, de fréquence 1MHz et d'amplitude 0,8V ; la ligne est fermée sur une résistance de 50Ω.
- On obtient les relevés suivants pour les tensions v_0 , v_{50} , v_{75} et v_{100} .



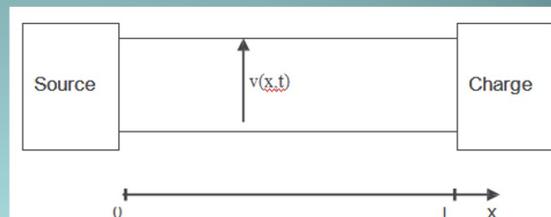
On peut constater un retard t croissant sur v_0 , de v_{50} (≈ 280 ns) à v_{75} (≈ 380 ns) puis à v_{100} (≈ 520 ns). Ces retards correspondent à une *vitesse de propagation du signal* sur la ligne proche de 200000km/s.

Mr Ghazi Aziz Supmangement

38

2 Vitesse de propagation – Longueur d'onde.

- Considérons la tension v , transmise sur la ligne, de la source vers la charge R_L .
- Au niveau de la source ($x = 0$), on écrit : $v(0, t) = V \cos \omega t$



v se propageant à la vitesse c sur la ligne, elle arrive à l'abscisse x avec un retard δt soit :

$$\delta t = \frac{x}{c}$$

$v(x, t) = V \times \cos \omega(t - \delta t) = V \times \cos(\omega t - \frac{\omega x}{c})$ (en admettant une conservation de l'amplitude)

La propagation sur une distance x entraîne un retard de phase $\delta \phi = \frac{\omega x}{c}$

Si $\delta \phi = 2\pi$, x correspond à la **longueur d'onde associée au signal**. (on rappelle la relation $\lambda = cT = c/f$) La longueur d'onde est la distance parcourue à la vitesse c par un signal de fréquence f durant la période T .

Mr Ghazi Aziz Supmangement

39

Expression de la vitesse de propagation

- Pour une ligne de constantes réparties L et C, supposée sans pertes, la résolution de l'équation de propagation amène à :

$$c = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

- En reprenant les expressions trouvées pour l'inductance et la capacité linéiques de diverses lignes, on arrive à :

$$c = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}}$$

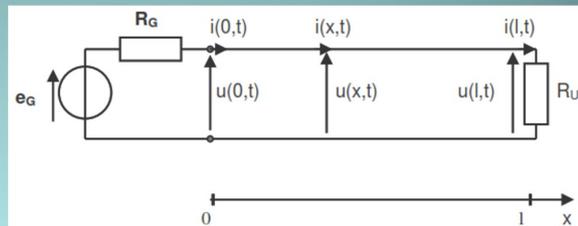
- Or, $\frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} \approx 300000 \text{ km/s} = c_0$, vitesse de la lumière dans le vide ; pour la plupart des lignes, $\mu_r = 1$; dans ces conditions, la vitesse d'un signal sur une ligne sans pertes peut s'écrire

$$c = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

Pour les lignes habituelles, à isolant plastique, $2 < \epsilon_r < 3$, d'où $200000 \text{ km/s} > c > 175000 \text{ km/s}$.

La ligne désadaptée. Coefficient de réflexion

- Considérons toujours une ligne, dont on néglige les pertes, de longueur l, d'impédance caractéristique Z_C (résistive).
- Cette ligne est attaquée par un générateur de résistance de sortie R_G , et fermée à l'autre extrémité sur une résistance $R_U \neq R_C$



- On aura cette fois l'existence simultanée d'un signal incident et d'un signal réfléchi :

$$u(x, t) = \hat{U}_1 \cdot \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) + \hat{U}_2 \cdot \cos \omega \left(t + \frac{x}{c} \right)$$

$$i(x, t) = \hat{I}_1 \cdot \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) + \hat{I}_2 \cdot \cos \omega \left(t + \frac{x}{c} \right)$$

- Une partie de la puissance injectée par le générateur sur cette ligne lui revient donc en retour.

On définit un coefficient de réflexion qui mesure l'importance de l'onde réfléchie

$$\rho = \frac{\hat{U}_2}{\hat{U}_1}$$

Si R_C est la résistance caractéristique de la ligne et R_U la résistance terminale, on peut montrer :

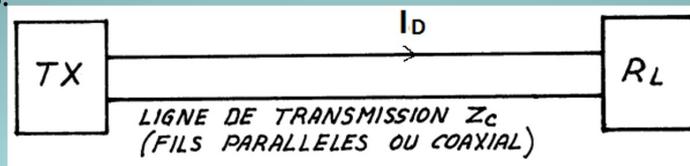
$$\rho = \frac{R_U - R_C}{R_U + R_C}$$

$\rho = 1$ si R_U est infinie (ligne ouverte)

$\rho = 0$ si $R_U = R_C$ (ligne adaptée)

Coefficient de réflexion-ROS-TOS

Le but de la ligne de transmission est de transmettre la puissance de sortie P_{out} du transmetteur TX vers la charge R_L avec un minimum de pertes.

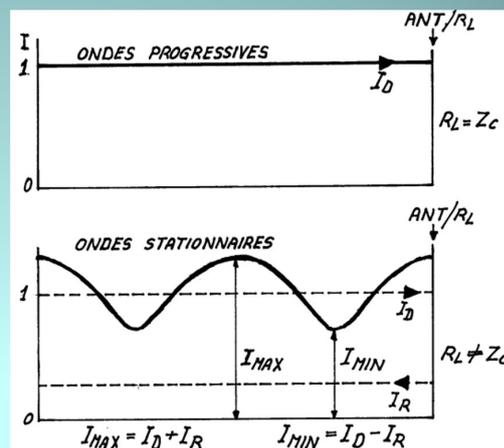


Si $R_L = Z_c$, toute la puissance sera absorbée par la charge R_L , et l'amplitude du courant I_D sera constante sur toute la longueur de la ligne, d'où le nom d'**ONDES PROGRESSIVES**.

Si $R_L \neq Z_c$, seule une partie de la puissance est absorbée par la charge R_L . L'autre partie est réfléchi de la charge R_L vers le TX et crée dans la ligne un courant réfléchi (I_R).

Coefficient de réflexion-ROS-TOS

La somme vectorielle de I_D + I_R montre qu'il y a sur la ligne un courant variable en amplitude, d'où le nom "**ONDES STATIONNAIRES**".



Rapport d'Ondes Stationnaires (ROS)

- $ROS = I_{MAX} / I_{MIN} = (I_D + I_R) / (I_D - I_R)$ (SWR Standing Wave Ratio).
- varie de 1 à l'infini
- Si le ROS = 1, l'adaptation est parfaite et un régime uniquement d'ondes progressives existe dans la ligne.
- Si le ROS $\neq 1$, l'adaptation est imparfaite et un régime d'ondes stationnaires existe dans la ligne.

- On montre également que :
- La valeur de la ROS évolue entre 1 et ∞

$$ROS = \frac{1 + \sqrt{\frac{P_R}{P_D}}}{1 - \sqrt{\frac{P_R}{P_D}}} = \frac{1 + \rho}{1 - \rho}$$

NB: Le ROS est aussi la relation entre l'impédance de la charge (ou de l'antenne) Z_c et l'impédance caractéristique de la ligne Z_o . Mathématiquement, cela devient assez compliqué. Mais si la charge est résistive, le ROS est le rapport Z_o/Z_c ou Z_c/Z_o (prendre la valeur supérieure à 1).

Coefficient de réflexion (ρ)

- (1) $\rho = I_R / I_D = U_R / U_D = (Z_L - Z_C) / (Z_L + Z_C)$
- ρ varie de 0 à 1.
 - Si $\rho = 0$, l'adaptation est parfaite.
 - Si $\rho \neq 0$, l'adaptation est imparfaite
- On montre également que :

$$(2) \quad \rho = \sqrt{\frac{P_R}{P_D}}$$

$$(3) \quad \rho = \frac{ROS - 1}{ROS + 1}$$

Intérêt du ROS

- En présence d'un ROS supérieur à 1, il y a donc de la puissance réfléchi par la charge (l'antenne) et qui de ce fait retourne vers le générateur; plus le ROS est élevé, plus la puissance réfléchi est grande. Ceci résulte de la désadaptation entre le générateur et la charge.
- Dans la réalité, un ROS jusqu'à 3 est acceptable: en effet 25 % de puissance correspondent à -1,25 dB environ, ce qui est négligeable sur un bilan de liaison; un ROS de 2 correspond à 11 % et à -0,5 dB.

Taux d'ondes stationnaires (TOS)

- $TOS = \sqrt{P_R / P_D} \cdot 100$
- varie de 0 à 100 %.
- Si le TOS = 0, l'adaptation est parfaite et un régime uniquement d'ondes progressives existe dans la ligne.
- Si le TOS \neq 0, l'adaptation est imparfaite et un régime d'ondes stationnaires existe dans la ligne.
- On montre également que :

$$TOS = \rho \times 100 = \left(\frac{ROS - 1}{ROS + 1} \right) \times 100$$

NB: Certaines littératures indiquent le TOS comme étant le carré de la part de tension ou courant réfléchi exprimé en % et est donc égal à : $\rho^2 \cdot 100$

Exercice

- 1- Calculer le ROS et le TOS sur une ligne coaxiale de 75 (Z_c) associée à une antenne de 50 (Z_a) ?
- 2- calculer le ROS et le TOS pour une puissance émise de 150W(P_e) et une puissance réfléchie de 25W(P_r) ?
- 3- Calculer le TOS en partant du ROS des deux questions précédentes ?

Corrigé:

- 1- Z_c étant plus grand que Z_a nous choisisons la formule :

$$ROS = \frac{Z_c}{Z_a} = \frac{75}{50} = 1.5$$

$$TOS = \frac{Z_c - Z_a}{Z_c + Z_a} \times 100 = \frac{75 - 50}{75 + 50} \times 100 = 20\%$$

- 2- Appliquons la formule:

$$ROS = \frac{1 + \sqrt{\frac{P_r}{P_e}}}{1 - \sqrt{\frac{P_r}{P_e}}} = \frac{1 + \sqrt{\frac{25}{150}}}{1 - \sqrt{\frac{25}{150}}} = 2.38$$

$$TOS = \sqrt{\frac{P_r}{P_e}} \times 100 = \sqrt{\frac{25}{150}} \times 100 = 40,82\%$$

- 3- Pour la première question le ROS était de 1,5 donc:

$$TOS = \frac{ROS - 1}{ROS + 1} \times 100 = \frac{1,5 - 1}{1,5 + 1} \times 100 = 20\%$$

- Pour la deuxième question le ROS était de 2,38 donc:

$$TOS = \frac{ROS - 1}{ROS + 1} \times 100 = \frac{2,38 - 1}{2,38 + 1} \times 100 = 40,82\%$$

Récapitulatif

1. Donnez la formule de calcul de la résistance R d'une ligne métallique ? Calculer R pour un fil de cuivre de 1m de long et de diamètre 0,4mm ? $R \approx 0,14\Omega$
2. Donnez la formule de calcul de la capacité C et l'inductance d'une ligne métallique à paire torsadée calculer C pour $d=0,4 \text{ mm}$ et $D=1,2\text{mm}$ ($\epsilon_r=2$ $\epsilon_0=8.84 \times 10^{-12}$) ? ?
3. Donnez la formule de calcul de la capacité C et l'inductance L d'une ligne métallique coaxial, calculer C pour $r_1=1,6 \text{ mm}$ et $r_2=5 \text{ mm}$?
4. Dessinez le modèle électrique d'une ligne métallique?
5. Donnez la vitesse de propagation dans une ligne métallique?
6. Montrez que $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}}$ pour les différentes lignes ?
7. Quelle est la formule de calcul du coefficient de réflexion dans une ligne ? Que signifie ce coefficient?
8. Donnez la définition du ROS et sa relation avec le coefficient de réflexion ?
9. Donnez la définition du TOS et sa relation avec le coefficient de réflexion ?

Exercice 1

- Pour communiquer, deux machines utilisent un canal de communication offrant un débit théorique de **100 Mbps**, d'une longueur de 100 mètres et une vitesse de propagation de **0,67 × c** m/s (avec $c \approx 300000000 \text{ m/s}$ et un coefficient de vélocité de 67%).
- Quel est le délai de propagation?
- Sachant que le délai de transmission effectif d'un fichier de **200 Mo** est de **17,30** secondes, calculer l'efficacité du canal de communication.
(efficacité = quantité d'information / délai effectif × débit théorique)

Correction

• On sait que la vitesse de propagation est $v = l/t$ avec v en m/s, l en mètre(s), et t en seconde(s). D'où :

délat de propagation = $l/v = 100 / 0,67 \times c \approx 0,4975 \mu s$

• Calcul de l'efficacité

délat effectif = quantité d'information / débit utile

= quantité d'information / efficacité \times débit théorique

On en déduit :

efficacité = quantité d'information / délat effectif \times débit théorique

= $200 \times 10^6 \times 8 / 17,30 \times 100 \times 10^6 \approx 92,5 \%$

Exercice 2

1. Calculer le délat de transmission théorique d'un fichier de **32 MiB** (Un mébioctet est égal à 2^{20} , soit $1024 \times 1024 = 1\,048\,576$ octets), dans le cas d'une liaison sans fil IEEE 802.11g avec un débit théorique de **54 Mbps** (ou Mbit/s).

2. Calculer le délat de transmission effectif (ou en pratique) du fichier sachant que pour un débit théorique de 54 Mbps l'efficacité est en moyenne de **41,4%** (sans perturbations et avec le chiffrement WiFi Protected Access- WPA).

Correction

1. Calcul du délai de transmission théorique

- Un délai (ou temps) de transmission se calcule comme suit :

$$\text{débit (bps)} = \text{quantité d'information (bits)} / \text{délai (s)}$$

$$\Rightarrow \text{délai (s)} = \text{quantité d'information (bits)} / \text{débit (bps)}$$

- Délai de transmission théorique de la liaison sans fil
délai théorique = $(32 \times 1024 \times 1024 \times 8) / (54 \times 1000000) = 4,971 \text{ s} \approx 5 \text{ s}$

2. Calcul du délai de transmission effectif

Le calcul se fait de la même manière, mais avec le débit utile, soit en divisant le résultat précédent par l'efficacité ($41,4\% = 0,414$).

$$\text{délai effectif} = \text{quantité d'information} / \text{débit utile}$$

$$\text{délai effectif} = \text{quantité d'information} / \text{efficacité} \times \text{débit théorique}$$

$$= (1 / \text{efficacité}) \times (\text{quantité d'information} / \text{débit}$$

$$\text{théorique}) = 4,971 / 0,414$$

$$= 12,007 \text{ s} \approx 12 \text{ s}$$

EXERCICE3

1- Le rapport signal sur bruit d'une voie de transmission est de 30dB; sa longueur de bande passante est de 2MHz, Quelle est la capacité théorique de cette voie ?

NB : $C = BP \cdot \log_2[1 + (S/B)]$ la capacité en bits/s représente le débit maximal qu'on peut utiliser par la transmission de l'information sur le canal de transmission

2- Si l'affaiblissement de la ligne de transmission est de 30 dB, quel est le rapport $|V_e/V_s|$ des ondes sinusoïdales d'entrée et de sortie d'une portion de voie de transmission ?

Exercice 4 ROS et TOS

1- $Z_a = 300 \text{ W}$, $Z_c = 50 \text{ W}$

Quel est le TOS?

2- Quel est le TOS si $\text{ROS} = 1,3$?

3- $P_r = 25 \text{ W}$, $P_e = 130 \text{ W}$

Quel est le TOS?

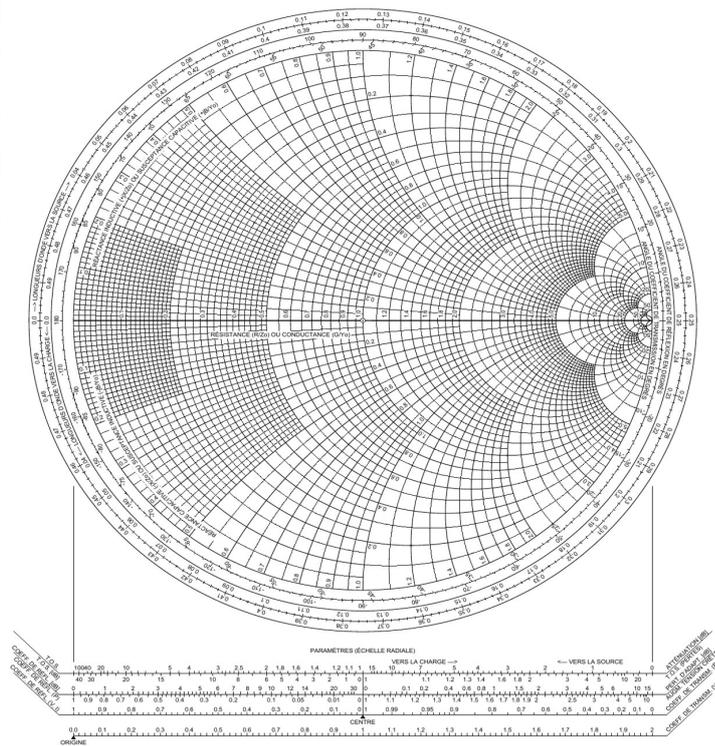
4- $P_e = 150 \text{ W}$, $P_r = 80 \text{ W}$

Quel est le ROS?

Les abaques de Smith

- Les abaques de Smith, également connus sous le nom de diagrammes de Smith, sont des outils graphiques utilisés principalement en génie électrique et en électronique pour résoudre des problèmes relatifs aux lignes de transmission et aux impédances. Ils permettent de visualiser et de manipuler des impédances et des coefficients de réflexion de manière graphique.

Abaque de Smith
COORDONNÉES EN IMPÉDANCE OU ADMITTANCE NORMALISÉES



58

Avantages des abaques de Smith

Lignes de transmission

Les abaques de Smith sont souvent utilisées pour analyser le comportement des lignes de transmission. Elles permettent de déterminer les points où l'impédance est adaptée le long de la ligne et où des réflexions peuvent se produire.

Adaptation d'impédance

L'un des objectifs principaux de l'utilisation des abaques de Smith est d'obtenir une adaptation maximale de l'impédance entre différents éléments d'un circuit ou d'un système. Cela garantit le transfert optimal de puissance et réduit les réflexions indésirables.

Représentation graphique des impédances complexes

L'abaque de Smith permet de représenter graphiquement les impédances complexes en fonction des coordonnées polaires définies par le coefficient de réflexion dans un plan complexe.

Il affiche les valeurs d'impédance, d'admittance, de coefficient de réflexion, etc.

59

Comment les utiliser le diagramme de Smith:

1. Comprendre la structure du diagramme de Smith

Le diagramme de Smith est une représentation polaire des impédances complexes. Il se compose de deux types de cercles :

Cercles de résistance constante : Ces cercles sont centrés sur l'axe horizontal du diagramme et passent par le point central (1,0).

Cercles de réactance constante : Ces cercles sont centrés sur des points situés sur l'axe vertical et sont tangents à l'axe horizontal.

2. Normalisation de l'impédance

Avant de tracer une impédance sur le diagramme de Smith, il est important de normaliser l'impédance par rapport à l'impédance caractéristique

$$z = Z/Z_0$$

où Z est l'impédance à normaliser et z est l'impédance normalisée.

3. Tracer l'impédance ou l'admittance

Impédance : Localisez la résistance R

R sur l'axe horizontal et trouvez le cercle de résistance constante correspondant. Ensuite, localisez la réactance X

X sur l'axe vertical et trouvez le cercle de réactance constante correspondant.

L'intersection de ces deux cercles donne le point représentant l'impédance Z

Admittance : Parfois, il peut être nécessaire de travailler avec l'admittance

$Y=1/Z$. Vous pouvez utiliser une version du diagramme de Smith pour l'admittance ou convertir les valeurs d'impédance en admittance.

4. Coefficient de réflexion

Le diagramme de Smith est souvent utilisé pour déterminer le coefficient de réflexion Γ

Γ . Une impédance normalisée z

z peut être convertie en coefficient de réflexion par la formule :

$$\Gamma = \frac{z - 1}{z + 1}$$

Sur le diagramme, l'origine représente $\Gamma=0$

$\Gamma=0$ (adaptation parfaite), et le bord du cercle unité représente $|\Gamma|=1$ (réflexion totale).

5. Utiliser le diagramme pour la correspondance d'impédance

Le diagramme de Smith peut aider à concevoir des réseaux d'adaptation d'impédance :

Stubs : On peut utiliser des stubs en parallèle ou en série pour déplacer le point représentant l'impédance jusqu'au centre du diagramme, correspondant à une adaptation parfaite.

Transformateurs : En utilisant des transformateurs ou d'autres éléments réactifs, on peut également atteindre une correspondance d'impédance.

Impédance caractéristique

Impédance et admittance

Les abaques de Smith sont basées sur la représentation des impédances et des admittances complexes sous forme de points sur un diagramme. En général, une impédance est représentée sous la forme $Z = R + jX$, où R est la partie réelle (résistance) et X est la partie imaginaire (réactance). De même, une admittance est représentée sous la forme $Y = G + jB$, où G est la partie réelle (conductance) et B est la partie imaginaire (susceptance).

[1 screenshot]

62

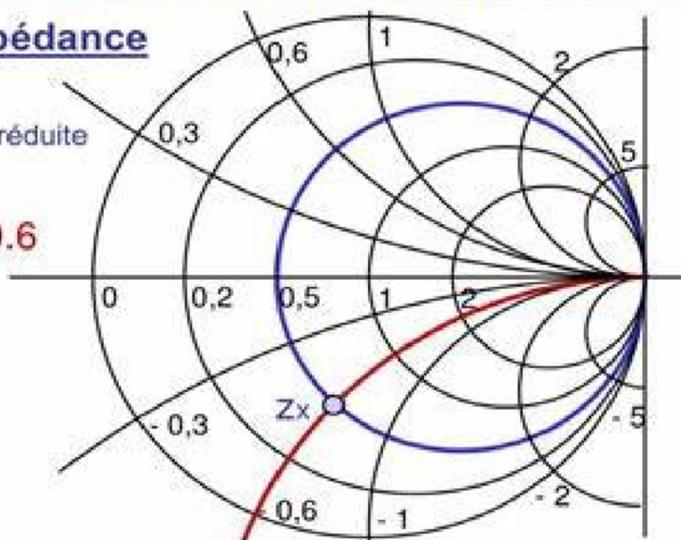
L'abaque de Smith

Utilisation de l'abaque

Si on connaît l'impédance

↪ Calcul de l'impédance réduite

Exemple : $z_x = 0.5 - j0.6$



63

Calcul formel du coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion Γ peut aussi être calculé directement à partir de l'impédance normalisée z_L :

$$\Gamma = \frac{z_L - 1}{z_L + 1}$$

Exemple pratique

Reprenons notre exemple avec $Z_L = 75 + j50$ ohms et $Z_0 = 50$ ohms :

1. Normalisation :

$$z_L = 1.5 + j1$$

2. Repérage sur le diagramme :

- Localisez $r = 1.5$ et $x = 1$ sur le diagramme de Smith. L'intersection de ces valeurs est le point P .

Calculer le TOS :

- Le TOS est calculé à partir de la magnitude du coefficient de réflexion $|\Gamma|$:

$$TOS = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

Diagramme de Smith visuel

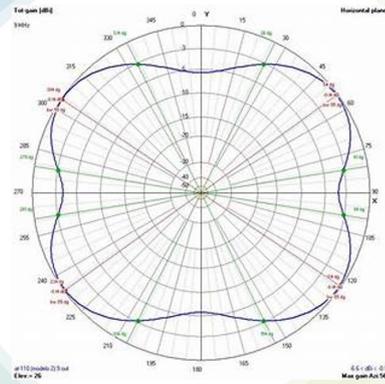
- Normalisez l'impédance et placez-la sur le diagramme.
- Tracez une ligne centrale depuis (1,0) jusqu'à votre point d'impédance.
- Lisez la valeur de $|\Gamma|$ en utilisant les cercles concentriques.
- Calculez le TOS en utilisant la valeur de $|\Gamma|$ lue sur le diagramme.

Cas d'étude : Conception d'antennes

Les abaques de Smith sont extrêmement utiles dans la conception et l'optimisation d'antennes, en particulier pour garantir une adaptation d'impédance maximale entre l'antenne et le système d'alimentation. Voici comment les abaques de Smith sont appliquées dans le contexte de la conception d'antennes :

1. Analyse de l'impédance de l'antenne
2. Optimisation de l'adaptation d'impédance
3. Analyse des réflexions d'impédance
4. Conception d'antennes multi-bandes

les abaques de Smith jouent un rôle crucial dans la conception d'antennes en permettant une analyse approfondie de l'impédance, une optimisation de l'adaptation d'impédance et une amélioration des performances globales de l'antenne. Elles sont un outil essentiel pour les ingénieurs travaillant dans le domaine des communications sans fil, de la radiofréquence et des micro-ondes.



[1 antenne Abaques internet]

66

1. **Adaptation d'impédance** : Lorsque nous connectons une source à une charge, il est crucial d'assurer une adaptation d'impédance optimale pour maximiser le transfert de puissance. L'abaque de Smith permet de visualiser graphiquement les relations entre l'impédance complexe de la source et celle de la charge, facilitant ainsi la conception d'un réseau d'adaptation.
2. **Réflexion des ondes stationnaires** : L'abaque de Smith aide à comprendre les phénomènes de réflexion des ondes électromagnétiques. Il permet de déterminer le coefficient de réflexion et d'optimiser les performances du système.
3. **Longueur d'onde et lignes de transmission** : Les notions de longueur d'onde et de vitesse de propagation des ondes sont étroitement liées à l'abaque de Smith. Il permet de visualiser comment les propriétés des lignes de transmission (comme les câbles coaxiaux) affectent les signaux haute fréquence.
4. **Analyseur de réseau vectoriel** : Comprendre l'abaque de Smith est essentiel pour utiliser efficacement un analyseur de réseau vectoriel (VNA). Les VNAs modernes affichent souvent l'abaque de Smith pour mesurer le coefficient de réflexion et l'impédance complexe.

Importance des abaques de Smith dans les réseaux sans fil

67