

SUPPORTS DE TRANSMISSION

1 GENERALITES 2

1.1 PUISSANCE ET ATTÉNUATION : 2

1.2 VITESSE DE PROPAGATION : 2

1.3 PRINCIPAUX TYPES DE SUPPORTS : 3

2 CARACTERISTIQUES GENERALES DES CABLES METALLIQUES 3

2.1 MODÉLISATION D'UNE LIGNE : 3

2.2 PARAMÈTRES SECONDAIRES : 4

2.3 ONDE STATIONNAIRE : 4

2.4 ADAPTATION D'IMPÉDANCE : 4

2.5 RÉSISTANCE : 5

3 PAIRES SYMETRIQUES BIFILAIRES 6

3.1 PARAMÈTRES PRIMAIRES : 6

3.2 PARAMÈTRES SECONDAIRES : 7

3.3 APPLICATION NUMÉRIQUE : 7

4 PAIRES COAXIALES 9

4.1 PARAMÈTRES PRIMAIRES : 9

4.2 PARAMÈTRES SECONDAIRES : 10

4.3 APPLICATION NUMÉRIQUE : 11

5 FIBRES OPTIQUES 12

5.1 CARACTÉRISTIQUES DE L'OPTIQUE : 12

5.2 TYPES DE FIBRES : 13

5.3 CARACTÉRISTIQUES DES FIBRES : 14

5.4 AVANTAGES DES FIBRES OPTIQUES : 18

5.5 EXEMPLE D'INSTALLATION LONGUE DISTANCE : 18

6 FAISCEAUX HERTZIENS 19

6.1 GÉNÉRALITÉS : 19

6.2 PRINCIPALES FRÉQUENCES : 19

6.3 UTILISATION : 19

7 FORMULAIRE – SUPPORTS MÉTALLIQUES 20

1 GENERALITES

1.1 Puissance et atténuation :

$$G \text{ (dB)} = 10 \text{ Log } P_s/P_e \quad (\text{Gain ou atténuation si négatif})$$

De même qu'en acoustique on a défini comme puissance sonore le dBa (0dBa=10⁻⁵ Pascal), en transmission on utilise le **dBm** pour quantifier la puissance transmise.

0 dBm = 1 mW

Exemple : Un modem émet un signal d'une puissance de -10 dBm sur une ligne qui atténue de 25 dB et d'impédance 600 Ω.

- La puissance émise sera : $P = 10^{(-10/10)} \text{ mW} = 0,1 \text{ mW}$.
- La puissance reçue sera de -35dBm ou de $P_r = 10^{(-35/10)} \text{ mW} = 316 \text{ nW}$.
- La tension reçue sera de $U_r = \sqrt{RP} = 13\text{mV}$

Atténuation en néper :

L'atténuation d'un support sera parfois calculée en néper : $\alpha = \ln \left| \frac{v_s}{v_e} \right|$

Il existe une relation directe entre néper et dB :

$$\alpha = \ln \sqrt{\frac{P_s}{P_e}} = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{P_s}{P_e} \right) = k \left[10 \log \left(\frac{P_s}{P_e} \right) \right] = k \cdot \text{Att}$$

avec $\ln(x) = \log(x) \cdot \ln(10)$ on peut déduire :

$$k = \frac{\frac{1}{2} \ln \left(\frac{P_s}{P_e} \right)}{10 \cdot \log \left(\frac{P_s}{P_e} \right)} = \frac{\ln(10)}{20} = 0,114$$

1 neper = 8,69 dB

1.2 Vitesse de propagation :

Dans l'air ou le vide, la vitesse de propagation d'une onde électromagnétique (célérité) est de **C = 3 10⁸ m/s (299 792 458 m/s)**

Dans un coaxial ou une fibre optique on observe que $v \approx 2 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

Dans une paire torsadée v varie 0,5 à $2 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

La longueur d'onde est définie par $\lambda = v/f$, celle-ci sera souvent inférieure à la longueur du support de transmission et donc, induira éventuellement des phénomènes d'écho...

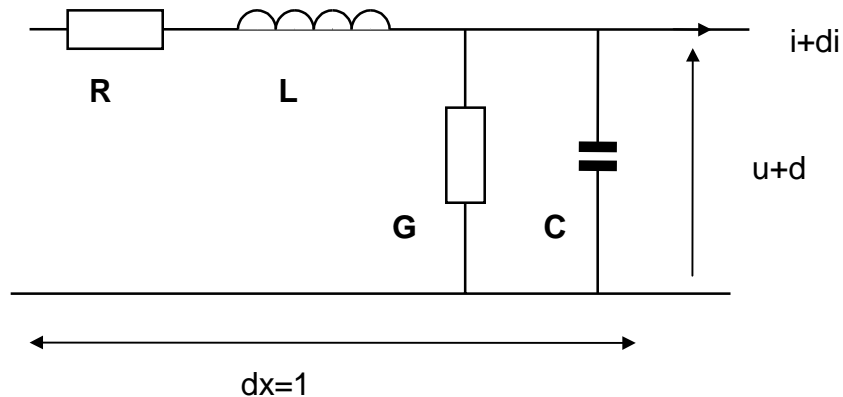
1.3 Principaux types de supports :

- * Paire bifilaire torsadée
 - peu coûteux,
 - pertes élevées, débit limité.
- * Paire coaxiale
 - pertes faibles,
 - bande passante (débit) élevée.
- * Fibre optique
 - pertes faibles à très faibles,
 - immunité au bruits,
 - bande passante (débit) élevée à très élevée,
 - mise en œuvre délicate.
- * Faisceaux hertziens
 - spectre disponible limité,
 - bande passante limitée,
 - propagation linéaire (à vue) en H.F.

2 CARACTERISTIQUES GENERALES DES CABLES METALLIQUES

2.1 Modélisation d'une ligne :

Une ligne peut être assimilée à une succession de tronçons de longueur dx . Le quadripôle équivalent est composé des paramètres r, l, g, c (R, L, G, C pour $dx=1m$).



R	Résistance des conducteurs (Ω/m)
L	Inductance (H/m)
G	Conductance (fuite des isolants) (Ω^{-1}/m)
C	Capacité (entre les conducteurs) (F/m)

$$\frac{du}{dx} = -(R + jL\omega) \cdot i(x) \quad \text{et} \quad \frac{di}{dx} = -(G + jC\omega) \cdot u(x)$$

$$\frac{d^2u}{dx^2} = -\frac{d[(R + jL\omega) \cdot i(x)]}{dx} = (R + jL\omega) \frac{di}{dx} = (R + jL\omega) \cdot (G + jC\omega) \cdot u(x)$$

c'est une équation différentielle de la forme $u''(x) - \gamma^2(x) \cdot u(x) = 0$

avec $\gamma^2 = (R+jL\omega)(G+jC\omega)$ et dont la solution est :

$$u(x) = u_{(-)} e^{-\gamma x} + u_{(+)} e^{\gamma x} \quad (\text{onde incidente} + \text{onde réfléchie}).$$

2.2 Paramètres secondaires :

2.2.1 Coefficient de propagation :

$$\gamma = \sqrt{(R + jL\omega)(G + jC\omega)} = \alpha + j\beta$$

α : atténuation (neper/m)

β : propagation (rd/m) d'où on peut tirer $v = \omega/\beta$

2.2.2 Impédance caractéristique (indépendant de la longueur) :

$$Z_c = \sqrt{\frac{R + jL\omega}{G + jC\omega}} \quad \text{en } \Omega, \text{ avec } R=G=0 \text{ (pertes nulles) on a } Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

2.3 Onde stationnaire :

Pour un câble d'impédance Z_c fermé sur une impédance Z_t on définit :

$$\text{Le taux d'ondes stationnaires : } TOS = \frac{Z_t}{Z_c}$$

$$\text{Le coefficient de réflexion : } k = \frac{(TOS - 1)}{(TOS + 1)}$$

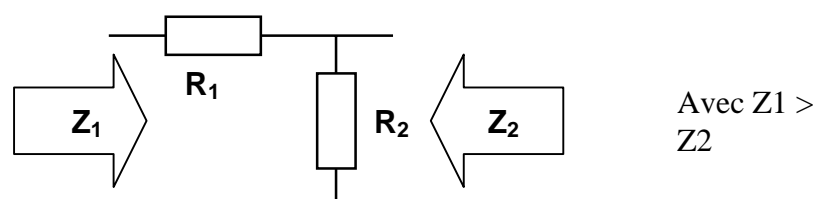
Exemples :

- ◆ $Z_t=0$ (court-circuit), $TOS=0$ et $k=-1$: réflexion totale avec inversion
- ◆ $Z_t=\infty$ (ouvert), $TOS=\infty$ et $k=1$: réflexion totale
- ◆ $Z_t=Z_c$ (adaptation), $TOS=1$ et $k=0$: onde incidente totalement absorbée
- ◆ $Z_c=50\Omega$ $Z_t=75\Omega$, $TOS=1.5$ et $k=0.2$: réflexion de 20% de l'onde incidente.

2.4 Adaptation d'impédance :

En transmission de données, le temps de propagation ne sera pas négligeable devant la longueur d'onde du signal, il sera donc nécessaire d'assurer une adaptation aux extrémités du câble afin d'éviter un écho perturbant.

Si on doit raccorder deux impédances différentes, il faut utiliser un transformateur d'impédance (pertes très faibles). Les impédances étant habituellement purement réelles (ohmiques) il est aussi possible d'utiliser un réseau de 2 résistances comme ci-dessous (il est préférable pour l'équilibre de remplacer R_1 par deux $1/2R_1$ sur chaque ligne).



$$R1 = Z1 \sqrt{1 - \frac{Z2}{Z1}} \quad \text{et} \quad R2 = \frac{Z2}{\sqrt{1 - \frac{Z2}{Z1}}}$$

$$\text{L'atténuation sera de } A = -20 \log \left[\sqrt{\frac{Z1}{Z2} + \left(\frac{Z1}{Z2} - 1 \right)} \right]$$

Pour $Z1=75\Omega$ et $Z2=50\Omega$ on obtient $R1=43.3\Omega$, $R2=86.6\Omega$ et $A=5.7\text{dB}$.

2.5 Résistance :

L'atténuation d'une ligne dépend essentiellement de R (pertes joules), R dépend :

- de la résistivité du matériau (généralement du cuivre dont $\rho = 1.65 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ à $1.85 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ selon la composition, habituellement $1.7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$).
- de la section ($R=\rho/s$).
- de la température.
- de la fréquence (effet pelliculaire).

2.5.1 Effet de la température

$$R = R_0 [1 + a(\theta - \theta_0)] \quad \text{avec } a = 3,93 \cdot 10^{-3} / ^\circ\text{C} \text{ pour le cuivre.}$$

si R à 20°C vaut $1\text{k}\Omega$ à 50°C R devient $1.118 \text{k}\Omega$!

2.5.2 Effet pelliculaire

Dans le cas du courant alternatif, la densité de courant dans la section du conducteur n'est pas constante (phénomène électromagnétique). Le courant se répartit exponentiellement de la surface vers l'intérieur.

Pour une densité de 1 à la surface, celle ci est de $1/e$ à une distance δ . On considère que l'épaisseur utile est définie par δ (si $\delta \ll \text{rayon}$).

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \pi \sigma f}} \quad \text{avec } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ et } \sigma = 1/\rho \quad \boxed{\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}}}$$

exemples (câbles cuivre) :

$$f=50\text{Hz}, \delta = 9.3\text{mm}$$

$$f=10\text{MHz}, \delta = 20 \mu\text{m}$$

Pour un conducteur cylindrique en H.F. ($\delta \ll D$) :

$$\text{section } s = \pi D \delta \quad \text{d'où } R = \frac{\rho}{s} = \frac{\sqrt{\rho f}}{1580 \cdot D}$$

3 PAIRES SYMETRIQUES BIFILAIRES

3.1 Paramètres primaires :

3.1.1 Résistance

R dépend du diamètre des conducteurs et de la fréquence

en B.F. : $R = 2 \frac{\rho}{s} = 2 \frac{\rho}{\pi r^2}$ (2 conducteurs !)

en H.F. : effet de peau, $s \approx 2\pi\delta$ (périmètre x δ) avec $\delta = 503 \sqrt{\rho/f}$

$$R = 2 \frac{\rho}{s} = 2 \frac{\sqrt{\rho f}}{1580 \cdot D}$$

3.1.2 Inductance

L décroît très légèrement avec la fréquence.

A l'aide du théorème d'Ampère on peut calculer :

D = écart entre des axes des conducteurs, r = rayon, $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$

* en continu ou en B.F. :

$$L = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(1 + 4 \cdot \ln \frac{D}{r} \right) \text{ d'ou } \boxed{L = 10^{-7} \left(1 + 4 \cdot \ln \frac{D}{r} \right)}$$

* en H.F., le courant est en surface (flux intérieur nul) :

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} \cdot \ln \left(\frac{D}{r} - 1 \right) \text{ d'ou } \boxed{L = 4 \cdot 10^{-7} \cdot \ln \left(\frac{D}{r} - 1 \right)}$$

3.1.3 Capacité

C dépend des isolants et de l'écartement des conducteurs (qqq pF/m).

A l'aide du théorème de Gauss on calcule :

D = écart entre des axes des conducteurs, r=rayon, $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$, $\epsilon_0 = 1/36\pi 10^9$

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(D/r)^2} = \frac{\pi\epsilon}{\ln(D/r)} \text{ d'ou } \boxed{C = \frac{\epsilon_r}{36 \cdot 10^9 \cdot \ln(D/r)}}$$

3.1.4 Conductance

G sera toujours négligeable.

3.2 Paramètres secondaires :

Les paramètres secondaires peuvent dépendre de la fréquence (voir formulaire en annexe).

3.2.1 Atténuation

Dans les paires bifilaires, les pertes sont élevées et essentiellement par effet joules (dans R).

$$\text{en B.F., } R \gg L\omega \text{ d'où } \alpha = \sqrt{\frac{RC\omega}{2}}$$

$$\text{en H.F., } R \ll L\omega \text{ d'où } \alpha = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}$$

3.2.2 Impédance

L'impédance d'une paire torsadée, d'environ 600 Ω en B.F., descend rapidement vers une constante de l'ordre de 100 Ω lorsque la fréquence augmente.

$$\text{En B.F. : } Z_c = \sqrt{\frac{R}{2C\omega}}(1-j)$$

$$\text{En H.F. : } Z_c \approx \sqrt{\frac{L}{C}} \approx \text{cst}$$

3.2.3 Vitesse de propagation

La vitesse de propagation passe rapidement d'environ 0,5 à 2.10⁸ m/s.

$$\text{En B.F. : } \beta = \sqrt{\frac{RC\omega}{2}} \text{ et } v = \frac{\omega}{\beta} = \sqrt{\frac{2\omega}{RC}}$$

$$\text{En H.F. : } \beta \approx \omega\sqrt{LC} \text{ d'où } v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \text{cst}$$

3.3 Application numérique :

3.3.1 câble téléphonique

Paire de cuivre ($\rho=1,7 \cdot 10^{-8}\Omega\cdot\text{m}$), Diamètre = 0,6mm ($r=0,3\text{mm}$), conducteurs distant de $D=1,2\text{mm}$ par un isolant dont $\epsilon_r=2$.

$$C = \epsilon_r / [36 \cdot 10^9 \cdot \ln(D/r)] \approx \mathbf{40 \text{ pF/m}}$$

Câble utilisé en B.F. ($f=800 \text{ Hz}$) :

$$\alpha = \sqrt{(RC\omega/2)}$$

$R = 2 \rho/s = \mathbf{0,12 \Omega/m}$ (pas d'effet pelliculaire)

$L = 10^{-7} (1 + 4 \ln(D/r)) \approx \mathbf{0,65 \mu H/m}$

$L\omega = 0,65 \cdot 10^{-6} \cdot 2\pi \cdot 800 = 0,0032$ donc $R \gg \omega$

$\alpha = \sqrt{(RC\omega/2)} = 110 \cdot 10^{-6} \text{ np/m}$ d'ou **Att = 0,95 dB/km**

$\beta = \sqrt{(RC\omega/2)} = 110 \cdot 10^{-6} \text{ rd/m}$ d'ou **v = 45 600 km/s**

$Z_c = \sqrt{(R/2C\omega)} \cdot (1-j) = 546 (1-j)$, **|Zc| = 772Ω**

Câble utilisé en H.F. (f=10 MHz) :

$R = 2 \rho/2\pi r\delta = (\sqrt{\rho f / 1580}) (1/r) = \mathbf{0,87 \Omega/m}$ (effet pelliculaire)

$L = 4 \cdot 10^{-7} \ln[(D/r)-1] \approx \mathbf{0,44 \mu H/m}$

$L\omega = 0,44 \cdot 10^{-6} \cdot 2\pi \cdot 10 \cdot 10^6 = 27,6$ donc $R \ll \omega$

$\alpha = (R/2) \sqrt{(C/L)} = 4,15 \cdot 10^{-3} \text{ np/m}$ d'où **Att = 36 dB/km**

$\beta \approx \omega \sqrt{LC} = 0,263 \text{ rd/m}$ d'où $v \approx 1/\sqrt{LC} = \mathbf{238 000 \text{ km/s}}$ (cst)

$Z_c \approx \sqrt{L/C} = \mathbf{104 \Omega}$ (cst)

3.3.2 Exercices

Retrouvez les caractéristiques des câbles suivants :

- Câble téléphonique [$< 3F/m$ en 4 paires] : cuivre monobrin $d=0.5\text{mm}$, isolant PVC, 56pF/m , Atténuation 25.6dB/km à 1MHz .
- CAT5 [$4.8F/m$] : STP 100Ω , cuivre monobrin $d=0.51\text{mm}$, isolant polyoléfine $d=1.04\text{mm}$, 46pF/m , Atténuation $4.2\text{dB}/100\text{m}$ à 4MHz , 6.5dB à 10MHz et 22dB à 100MHz .
- L120 [$6.9F/m$] : $d=0.643\text{mm}$, $Z_c=120\Omega$, $v=75\%$, Atténuation $1.6\text{dB}/100\text{m}$ à 1MHz , 4.45dB à 10MHz et 13.5dB à 100MHz

4 PAIRES COAXIALES

Un câble coaxial est constitué de deux conducteurs cylindriques sur un même axe, séparés par un isolant de qualité (Téflon, polythène, polypropylène, air ..), l'impédance sera faible et aux fréquences élevées il se comporte comme un guide d'onde. Les câbles coaxiaux ne doivent pas être confondus avec les câbles blindés dont le blindage ne sert qu'à protéger le ou les conducteurs centraux des perturbations extérieures.

4.1 Paramètres primaires :

4.1.1 Résistance

En H.F. : effet de "peau" d'où si $\rho_1 = \rho_2$

$$R = \frac{\sqrt{\rho f}}{1580} \cdot \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)$$

4.1.2 Inductance

D'après le théorème d'Ampère, le flux en un point p intérieur au câble est

$$\Phi = L \cdot I \quad \text{et le flux capté par un élément } dx \text{ est : } d\Phi = \left(\frac{\mu I}{2\pi x} \right) dx$$

$$\text{on intègre de } r_1 \text{ à } r_2 : \Phi = \int_{r_1}^{r_2} d\Phi = \left(\frac{\mu I}{2\pi} \right) \cdot \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)$$

$$\text{d'ou on tire } L = \frac{\Phi}{I} = \frac{\mu}{2\pi} \cdot \ln \left(\frac{d_2}{d_1} \right)$$

le milieu est non ferromagnétique donc $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln \left(\frac{d_2}{d_1} \right)$$

4.1.3 Capacité

D'après le théorème de Gauss, le champ électrique en un point p intérieur au câble

$$\text{est } E = \frac{q}{2\pi x \epsilon} \quad \text{on intègre de } r_1 \text{ à } r_2 : U = \int_{r_1}^{r_2} E dx = \left(\frac{q}{2\pi \epsilon} \right) \cdot \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)$$

$$\text{d'ou on tire } C = \frac{q}{U} = \frac{2\pi \epsilon}{\ln(d_2/d_1)}$$

Dans l'isolant on a $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$ avec $\epsilon_0 = 1/(36\pi \cdot 10^9)$

$$C = \frac{\epsilon_r}{18 \cdot 10^9 \cdot \ln(d_2/d_1)}$$

4.1.4 Conductance

En général on mesure $\text{tg } \delta = G/C\omega$ d'où on peut tirer $G = C\omega \text{tg } \delta$

4.2 Paramètres secondaires :

4.2.1 Impédance

Les pertes sont très faibles, on a donc : $Z_c = \sqrt{L/C}$

$$\text{d'où } Z_c = \frac{\ln(d_2/d_1)}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$$

$$\boxed{Z_c = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}$$

On a souvent $\epsilon_r \approx 2$ et $d_2/d_1 \approx 3.6$ donc $Z_c \approx 50 \Omega$.

4.2.2 Vitesse de propagation

$$\beta = \omega\sqrt{LC} \quad \text{d'où } v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$$

$$\boxed{v = \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{\epsilon_r}}}$$

avec $\epsilon_r = 2$ on a $v \approx 2,1 \cdot 10^8$ m/s

4.2.3 Atténuation

Avec de faibles pertes on a :

$$\alpha = \omega\sqrt{LC} \cdot \frac{\delta + \varphi}{2} = \omega\sqrt{LC} \cdot \left(\frac{R}{2L\omega} + \frac{G}{2C\omega} \right) = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$\boxed{\alpha = \frac{R}{2Z_c} + \frac{GZ_c}{2}}$$

$R/2Z_c$ sont les pertes métal, R est proportionnel à \sqrt{f}

$GZ_c/2$ sont les pertes diélectriques, G est proportionnel à f .

$$\boxed{\alpha = A \sqrt{f} + B f}$$

$B \ll A$ donc l'atténuation varie essentiellement avec \sqrt{f}

$$B = \frac{1}{2} \cdot \frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \cdot 2\pi \cdot \text{tg} \delta \cdot \left(\frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}}\right) \cdot \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) = \frac{10}{3} \cdot \pi \cdot 10^{-9} \cdot \text{tg} \delta \cdot \sqrt{\epsilon_r}$$

$$A\sqrt{f} = \frac{\sqrt{\rho f}}{1580} \cdot \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}\right) \cdot \frac{1}{2\left(\frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}}\right) \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}$$

$$A = \frac{\sqrt{\rho\epsilon_r}}{19 \cdot 10^4} \cdot \frac{1}{d_2} \cdot \frac{1 + \frac{d_2}{d_1}}{\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}$$

La fonction $y=(1+x)/\ln x$ possède un minimum pour $x=3,6$ ($y=3,59$) ($3,64$ pour $x=3$ et $3,61$ pour $x=4$)

On constate donc que l'atténuation dépend de ρ (on utilise quasi exclusivement du cuivre), de ϵ_r (plus faible si le diélectrique comporte de l'air), est inversement proportionnelle au diamètre global du câble (d_2) et que le rapport des diamètres des conducteur doit être proche de 3,6.

4.3 Application numérique :

4.3.1 câble RG58

Le Coaxial de type RG58 [$\approx 3 \text{ F/m}$] est utilisé, entre autres, dans les réseaux Ethernet 10BAS2 ($\rho=1,6 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$), $D_1=0,82$, $D_2=2,95 \text{ mm}$, diélectrique polyéthylène dont $\epsilon_r \approx 2,3$.

Paramètres constants :

$$d_2/d_1 = \mathbf{3,6}$$
 (idéal)

$$C = \epsilon_r / [18 \cdot 10^9 \cdot \ln(d_2/d_1)] \approx \mathbf{99,7 \text{ pF/m}}$$

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \ln(d_2/d_1) \approx \mathbf{0,256 \text{ } \mu\text{H/m}}$$

$$Z_c = (60/\sqrt{\epsilon_r}) \ln(d_2/d_1) \approx \mathbf{50,6 \text{ } \Omega}$$

$$v = C/\sqrt{\epsilon_r} = 3 \cdot 10^8 / \sqrt{2,3} \approx \mathbf{2 \cdot 10^8 \text{ m/s}}$$

Câble utilisé à $f=10 \text{ MHz}$:

$$R = (\sqrt{\rho f}/1580) (1/d_1 + 1/d_2) = \mathbf{0,38 \text{ } \Omega/\text{m}}$$

$$\alpha = R/2Z_c = 3,79 \cdot 10^{-3} \text{ np/m} \quad \text{d'ou} \quad \mathbf{Att = 0,033 \text{ dB/m}}$$

Câble utilisé à $f=200 \text{ MHz}$:

$$R = (\sqrt{\rho f}/1580) (1/d_1 + 1/d_2) = \mathbf{1,76 \text{ } \Omega/\text{m}}$$

$$\alpha = R/2Z_c = 17,4 \cdot 10^{-3} \text{ np/m} \quad \text{d'ou} \quad \mathbf{Att = 0,15 \text{ dB/m}}$$

5 FIBRES OPTIQUES

5.1 Caractéristiques de l'optique :

5.1.1 Propagation

La lumière est une onde électromagnétique que l'on définit habituellement par sa longueur d'onde dans le vide.

$$\lambda = v \cdot T = v/f, \text{ dans le vide } v = \text{Célérité} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

La lumière visible va de $0,4\mu\text{m}$ (violet) à $0,7\mu\text{m}$ (rouge). Les infrarouges sont utilisés dans les fibres optiques ($0,85\mu$; $1,3\mu$ et $1,5\mu\text{m}$ principalement). La fréquence de la porteuse est donc très élevée ($f=c/\lambda$) et une modulation de plusieurs GHz est donc négligeable, l'atténuation d'une fibre optique sera donc indépendante de cette modulation.

La vitesse de propagation de la lumière dans un milieu dépend de l'indice de réfraction de ce milieu.

$$v = \frac{\text{Célérité}}{n}$$

Quelques indices absolus :

vide	: $n_0 = 1$
air	: $n = 1,000293$
verre	: $n = 1,5 \text{ à } 1,8$
PMMA	: $n = 1,50$ (Polyméthylmétacrylate = plastique)
eau	: $n = 1,33$

5.1.2 Fréquence de coupure

Lorsque la lumière pénètre dans une fibre, il faut que la fréquence de celle-ci soit supérieure à une fréquence de coupure déterminée par le diamètre de la fibre. En pratique, le diamètre de la fibre ne doit pas être inférieur à la longueur d'onde à transmettre.

$$F_c = \frac{0,23 \cdot 10^9}{d \sqrt{\epsilon_2 - \epsilon_1}} \text{ d'où on déduit } \lambda_c = \frac{C}{F_c} = 1,3 \cdot d \sqrt{\epsilon_2 - \epsilon_1}$$

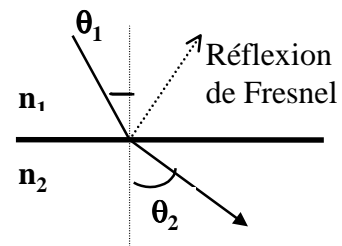
exemple : fibre de silice ($d=50\mu\text{m}$ et $\epsilon_2=2.25$)

$$\lambda_c = 1,3 \cdot 50 \cdot 10^{-6} \sqrt{(2.25-1)} = 73\mu\text{m}$$

5.1.3 Loi de Descartes

Quand un rayon lumineux passe d'un milieu à un autre il y a **réfraction** tel que :

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$



si $n_2 < n_1$ on a $\theta_2 > \theta_1$, il existe alors un angle θ_1 limite au-delà duquel on passe de la réfraction à la **réflexion totale**.

$$\theta_{2\max} = 90^\circ \quad \text{d'où} \quad \theta_{1\text{limite}} = \text{Arc sin } n_2/n_1$$

5.1.4 Réflexion de Fresnel

Lorsqu'un rayon doit passer d'un milieu à un autre (réfraction), une partie du rayon est réfléchié proportionnellement à la différence des indices. Cette réflexion est faible lorsque le rayon est perpendiculaire à la surface mais peut être presque totale lorsque le rayon tangente la surface. Lorsque le rayon est proche de la normale à la surface de séparation on peut calculer la perte de Fresnel induite par :

$$Pf(dB) = 10 \cdot \text{Log} \left(\frac{2 + \frac{n_1}{n_2} + \frac{n_2}{n_1}}{4} \right)$$

AN : $n_1=1$ (air) et $n_2=1.5$ (verre) on obtient $Pf = 0.18\text{dB}$

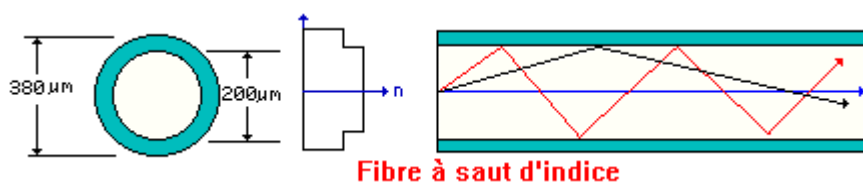
5.2 Types de fibres :

Pour la transmission de données, seule la silice (forme cristalline la plus pure du verre) est utilisée. La silice est dopée par du germanium (GeO_2) ou du phosphore (P_2O_5) qui augmentent l'indice du cœur ou bien du fluor ou du bore (B_2O_3) pour réduire l'indice de la gaine. On obtient ainsi des fibres ayant une très faible atténuation (5..10dB/km à 0.85 μm et 1..3dB/km à 1.3 μm) et une ouverture numérique réduite.

D'autres matériaux à l'étude (Béryllium fluoré par exemple) permettraient une atténuation de 0.005dB/km et autoriseraient des liaisons >2000 km sans répéteur !

Le verre est utilisé pour construire des conducteurs de lumière regroupant plusieurs centaines de fibres et le PMMA pour construire des fibres épaisses et économiques (1..3mm).

5.2.1 Multimode à saut d'indice



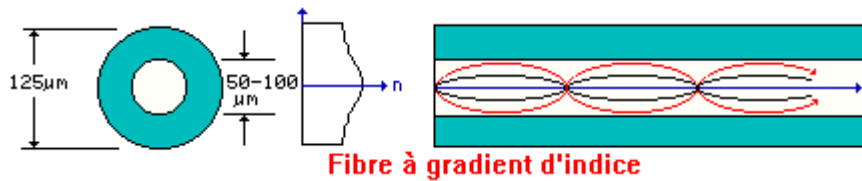
Diamètre du cœur 50 μm ou 62.5 μm le plus souvent, gaine 125 μm

Ouverture numérique $\approx 12^\circ$

Bande passante limitée : <60 MHz.km.

Atténuation faible : 3dB/km à 0.85 μm .

5.2.2 Multimode à gradient d'indice



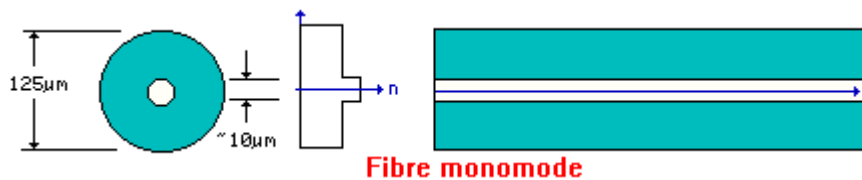
Caractéristiques similaires à la fibre multimode à saut d'indice (sauf bande passante), elle remplace actuellement celle-ci car les coûts sont similaires. La vitesse de propagation étant plus faible au centre de la fibre, les écarts de temps de propagation entre les rayons sont nettement réduits et donc la bande passante augmentée.

Diamètre du cœur 50 μm ou 62.5 μm, gaine 125 μm

Bande passante : plusieurs GHz.km .

Atténuation : 3dB/km à 0.85 μm et 1.5dB/km à 1.3 μm.

5.2.3 Monomode



Il n'y a qu'un seul mode de propagation car les dimensions du cœur sont du même ordre que la longueur d'onde du signal et l'ouverture numérique très faible.

Diamètre du cœur 5 à 10 μm , gaine 125 μm

Bande passante très élevée : de l'ordre du THz.km.

Atténuation très faible : 0.5dB/km à 1.3 μm et 0.2dB/km à 1.5 μm.

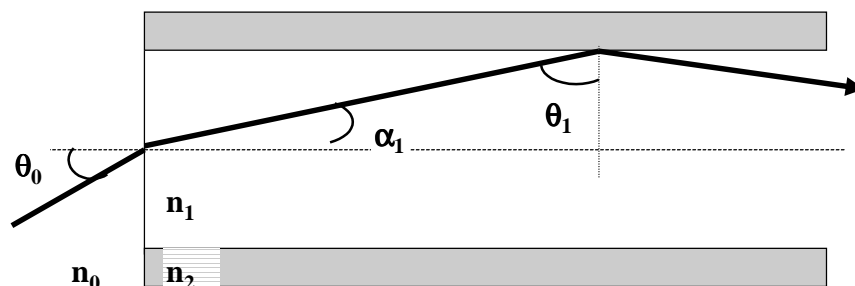
Raccordements très délicats.

Utilisée essentiellement par les opérateurs de télécommunication. Actuellement des liaisons de 100 à 300km sans répéteurs sont possibles. La tendance est de réduire encore le cœur (vers 2 μm), de travailler dans la bande des 1,5 μm avec plusieurs longueurs d'ondes (256 pour le SWDM). La silice est dopée à l'ytterbium.

5.3 Caractéristiques des fibres :

5.3.1 Angle d'ouverture

A l'extrémité d'une fibre (n_0), un rayon est réfracté dans le cœur (n_1) puis indéfiniment réfléchi sur la gaine (n_2). On a $n_0 < n_2 < n_1$.



On appelle ouverture numérique (ON) d'une fibre l'angle maximum θ_0 du rayon incident.

$$n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \alpha_1 \quad (\text{loi de Descartes})$$

$$\sin \alpha_1 = \cos \theta_1 \quad (\text{triangle rectangle})$$

$$n_0 \cdot \sin \theta_0 = n_1 \cdot \cos \theta_1 = n_1 \sqrt{\cos^2 \theta_1} = n_1 \sqrt{1 - \sin^2 \theta_1}$$

$$n_0 \cdot \sin \theta_0 = n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} = n_1 \sqrt{\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2}} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

on considère $n_0 = 1$ (air) donc :
$$ON = \sin \theta_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

A.N.: avec $n_1=1.485$ et $n_2=1.47$ on obtient $\sin \theta_0 = 0.21$ ou $2\theta_0=24^\circ$

Gradient d'indice : dans ce type de fibre, l'indice du cœur rejoint progressivement celui de la gaine selon un coefficient α ($\alpha=2$ pour un gradient parabolique et $\alpha=\infty$ pour un saut d'indice). L'ouverture numérique sera maximum au centre de la fibre et nulle près de la gaine.

$$ON \text{ max} = n_1 \sqrt{2 \cdot (n_1 - n_2)}$$

5.3.2 Modes de propagation

Un mode est un angle du rayon lumineux par rapport à l'axe de propagation de la fibre. Le nombre de modes est le nombre d'angles admissibles.

$$M = \frac{V^2}{2} \cdot \frac{\alpha}{\alpha + 2} \quad \text{avec} \quad V = ON \cdot 2\pi d / \lambda$$

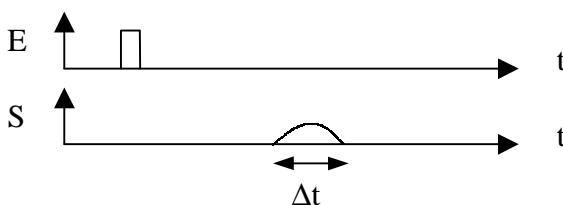
AN : $d=50\mu\text{m}$, $\lambda=820\text{nm}$, $ON=0.22$

avec $\alpha=\infty$ (saut indice) on obtient $M=3552$

avec $\alpha=2$ (gradient indice) on obtient $M=1776$

5.3.3 Dispersion dans une fibre

Dispersion modale : Dans une fibre, un rayon à la limite de réflexion va parcourir une distance plus grande qu'un signal dans l'axe. Une impulsion à l'entrée de la fibre génère une multitude de rayons (modes) qui partent ensemble mais n'arrivent pas tous en même temps.



- En **saut d'indice** on a pour l'angle limite $\sin \theta_1 = n_2 / n_1$

Quand le rayon à la limite de réflexion parcourt une distance D2, le rayon dans l'axe parcourt une distance D1.

$$D1 = D2 \sin \theta_1 \quad (\text{triangle rectangle})$$

$$D1 = D2 \frac{n_2}{n_1}$$

Dans une fibre de longueur L et de vitesse $v=C/n_1$ on a

$$t_1 = \frac{L}{v} \quad \text{et} \quad t_2 = \frac{L(n_1/n_2)}{v}$$

la rapidité de modulation maximum sera $R = t_2 - t_1 = \frac{Ln_1}{C} \cdot \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right)$

A.N. : $n_1=1.485$, $n_2=1.47$, $L = 1\text{km}$ on a $R=50\text{ns}$ et $B_{\max} = 1/R = 19,8 \text{ MHz}$
(9,9 MHz pour 2km !!)

- En **gradient d'indice**, la vitesse du rayon dans l'axe étant plus faible la dispersion modale est réduite, elle sera minimum pour $\alpha=2$. La bande passante de l'ordre de plusieurs GHz.km !

$$\text{Pour } \alpha=2 \text{ on a : } R = \frac{Ln_1}{8C} \cdot \left(1 - \frac{n_2}{n_1} \right)^2$$

A.N. : $n_1=1.485$, $n_2=1.47$, $L = 1\text{km}$ on a $R=63\text{ps}$ et $B_{\max} = 1/R = 15,8 \text{ GHz}$

- En **monomode**, pas de dispersion modale mais il reste une dispersion de vitesse de groupe intra-modale de l'ordre de $1\text{ps.nm}^{-1}.\text{km}^{-1}$ et donc pour $\Delta\lambda=1\text{nm}$ on obtient une bande passante de 1THz.km .

Dispersion chromatique : Cette dispersion est la somme de la dispersion du matériau et de la dispersion du guide, celle ci est naturellement nulle pour $1,3\mu\text{m}$ mais les progrès de fabrication des fibres monomode (fibre à décalage du zéro de dispersion) permettent une annulation de la dispersion dans la fenêtre $1,5\mu\text{m}$.

Dispersion du matériau : Cette dispersion varie avec la longueur d'onde utilisée. Elle est faible et souvent négligeable devant la dispersion modale. Il est possible de construire des fibres pour lesquelles la dispersion du matériau s'annule pour une longueur d'onde particulière.

Dispersion du guide d'onde : Les constantes de propagation du guide d'onde sont légèrement dépendante de la longueur d'onde. La dispersion engendrée est très faible (quelques ps/km)..

5.3.4 Bande passante

La fibre optique est un passe bas, la bande passante (à -3dB) est égale à la fréquence de coupure haute et dépend de la dispersion totale. La dispersion étant proportionnelle à la longueur de la fibre, la bande passante diminuera donc avec cette longueur.

$$F_{\text{WB}}=0.44/\sigma_{\text{tot}}$$

avec $\sigma_{tot} = \sqrt{\sigma_c^2 + \sigma_m^2}$ σ_c dispersion chromatique, σ_m dispersion modale

Le temps de montée est défini par

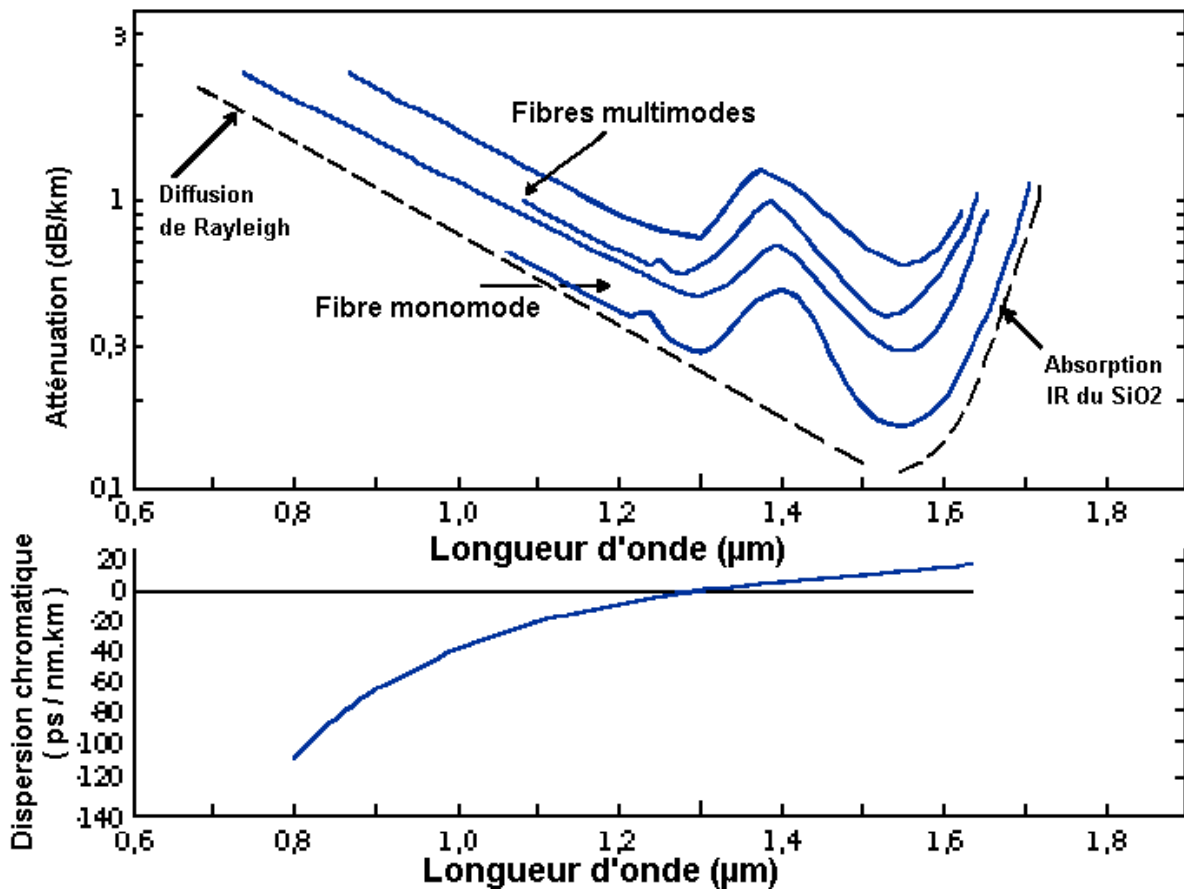
$$T_r = 0.35/F_{WB}$$

A.N. : $\sigma_{tot} = 500ps \Rightarrow F_{WB} = 880MHz$ et $t_r = 398ps$

A.N. : $\sigma_c = 50ps$ et $\sigma_m = 2ns \Rightarrow F_{WB} = \dots\dots\dots$ et $t_r = \dots\dots\dots$

5.3.5 Pertes dans une fibre

- Diffusion de Rayleigh : L'onde incidente est dispersée par des particules ou des défauts d'une taille inférieure à la longueur d'onde. Cette diffusion sera donc plus faible pour les longueur d'ondes élevées. L'atténuation induite est inversement proportionnelle à λ^4 .
- Absorption : L'énergie d'un photon est communiquée à l'électron d'une impureté : eau (ion OH⁻) ou métal (Fe, Cu, Mn, Cr...). Cette absorption peut être élevée à certaines longueur d'ondes (pour l'eau à 0,95µm, 1,2µm et surtout 1,4µm).
- Absorption due aux résonances moléculaires du SiO₂ pour $\lambda > 1.7\mu m$.
- Pertes de couplage (Fresnel, planimétrie, désalignement, désadaptation).



5.4 Avantages des fibres optiques :

- **Performances** (atténuation faible, bande passante élevée) permettant des liaisons longues sans répéteurs.
- **Immunité électromagnétique** : insensibilité aux parasites, aux orages, aux courants telluriques ...
- **Isolation galvanique** : Pas de problème de terre dans le raccordement entre deux bâtiments, pas de danger en milieu explosif ...
- **Confidentialité** : piratage très difficile.
- **Légèreté** : une fibre pèse quelques grammes /km, un câble peut peser de 20 à 100kg/km (selon nombre de fibres et protections) contre plus de 200kg/km pour un coaxial.

Le seul inconvénient des fibres optique concerne essentiellement la difficulté et le coût des raccordements : un cordon jarretière coûte ≈60€, une valise de raccordements (polisseur, microscope, outils...) ≈2 000€..

5.5 Exemple d'installation longue distance :

Une ligne doit être installée entre San Diego et Eurika le long d'une voie ferrée de 1515km. Les éléments utilisés sont :

- Fibre monomode , $\lambda=1.33\mu\text{m}$, Pertes=0.4dB/km, $L_{\text{max}} = 6.4\text{km}$
 - Epissure : perte = 0.2dB
 - Emetteur optique : $P_{\text{max}}=3\text{mW}$
 - Récepteur optique : Sensibilité=-33dBm, saturation=-10dBm, BER de 10^{-10} à -31dBm et de 10^{-14} à -27dBm.
 - Connecteur : perte maximum (avec marge) de 2,7dB.
-
- Nombre de tronçons de fibre :
 - Puissance d'un émetteur en dBm :
 - Portée d'un émetteur (en dB) pour un BER de 10^{-14} :
 - Nombre de tronçons entre deux répéteurs :
 - Espacement réel des répéteurs et nombre de répéteurs installés :

6 FAISCEAUX HERTZIENS

6.1 Généralités :

Un faisceaux hertzien est une onde électromagnétique qui se propage dans l'air ou le vide. L'onde peut être polarisée : horizontale, verticale ou circulaire.

En transmission de donnée il faut souvent des débits d'information élevés, donc des canaux assez larges et par conséquent des porteuses élevées (800MHz..40GHz). Au delà de 100MHz la propagation est linéaire et impose de placer des réémetteurs tous les 100km environ (tours télécom).

6.2 Principales fréquences :

10k	160k	Radiotélégraphie
160k	1.6M	Radio Grandes Ondes, Petites ondes
1.6M	6M	Bande marine, radiotéléphone
6M	18M	Radio ondes courtes
27M		Radio-commande, C.B.
30M	41M	Radiotéléphone
72M		Radio-commande
156M	162M	VHF marine (bande A)
162M	216M	VHF télévision (bande III)
216M	470M	Radiotéléphone ...
470M	800M	UHF télévision (bande IV)
860M	900M	Faisceaux télécom
890M	960M	Téléphone GSM
1.37G	1.45G	Liaisons faibles débits privées
1.71G	1.88G	Téléphone DCS1800
1.88G	1.9G	Téléphone DECT
2.4G	2.5G	Réseaux locaux (RLAN)
3.5G		Boucle locale radio (télécom)
3.4G	8.4G	Satellites télécom
11G	12.6G	Satellites Télévision directe
23G		Faisceaux privés (maxi 12km)
26G		Boucle locale radio (télécom)
38G		Faisceaux privés (maxi 6km)

6.3 Utilisation :

En transmission de données, quelques faisceaux télécom sont encore utilisés en liaison de secours ou pour relier des sites difficiles à raccorder.

Quelques fréquences ont été libérées pour un usage privé et on voit fleurir des liaisons de quelques km pour relier des sites d'entreprises ou des bâtiments (raccordement rapide, pas de travaux de génie civil...).

7 FORMULAIRE – Supports métalliques

Résistance :

Effet de la température : $R = R_0[1 + a(\theta - \theta_0)]$ $a = 3,93 \cdot 10^{-3} / ^\circ\text{C}$ (cuivre).

Effet pelliculaire : $\delta = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \pi \sigma f}}$ avec $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ et $\sigma = 1/\rho$ $\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}}$

Paramètre secondaires :

$$\gamma = \sqrt{(R + jL\omega)(G + jC\omega)} = \alpha + j\beta \quad \text{et} \quad Z_c = \sqrt{\frac{R + jL\omega}{G + jC\omega}}$$

Paires torsadées :	B.F.	H.F.
R (Ω/m)	$R = 2 \frac{\rho}{s} = 2 \frac{\rho}{\pi r^2}$	$R = 2 \frac{\rho}{s} = 2 \frac{\sqrt{\rho f}}{1580 \cdot D}$
L (H/m) (E=écart, r=rayon)	$L = 10^{-7} \left(1 + 4 \cdot \ln \frac{E}{r} \right)$	$L = 4 \cdot 10^{-7} \cdot \ln \left(\frac{E}{r} - 1 \right)$
C (F/m) (E=écart, r=rayon)	$C = \frac{\epsilon_r}{36 \cdot 10^9 \cdot \ln(E/r)}$	$C = \frac{\epsilon_r}{36 \cdot 10^9 \cdot \ln(E/r)}$
α (np/m)	$\alpha = \sqrt{\frac{RC\omega}{2}}$	$\alpha = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}$
β (Rd/m)	$\beta = \sqrt{\frac{RC\omega}{2}}$	$\beta \approx \omega \sqrt{LC}$
Zc (Ω)	$Z_c = \sqrt{\frac{R}{2C\omega}} (1 - j)$	$Z_c \approx \sqrt{\frac{L}{C}} \approx \text{cst}$
v (m/s)	$v = \frac{\omega}{\beta} = \sqrt{\frac{2\omega}{RC}}$	$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \text{cst}$

Coaxial :	(en H.F.)	α (np/m)	$\alpha = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}$
R (Ω/m)	$R = \frac{\sqrt{\rho f}}{1580} \cdot \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)$	β (Rd/m)	$\beta \approx \omega \sqrt{LC}$
L (H/m)	$L = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln \left(\frac{d_2}{d_1} \right)$	Zc (Ω)	$Z_c \approx \sqrt{\frac{L}{C}} \approx \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln \left(\frac{d_2}{d_1} \right)$
C (F/m)	$C = \frac{\epsilon_r}{18 \cdot 10^9 \cdot \ln(d_2/d_1)}$	v (m/s)	$v = \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{\epsilon_r}}$