

3 Supports physiques

Après avoir abordé l'aspect général de la transmission, nous allons à présent étudier les différents supports physiques sur lesquels la transmission se base.

Une première différenciation est faite entre systèmes de transmission avec ou sans fils.

Les premiers utilisent des supports physiques métalliques ou des fibres de verre. Les supports métalliques sont généralement des paires torsadées ou des câbles coaxiaux.

La deuxième catégorie de systèmes de transmission se sert de l'atmosphère, respectivement du vide, dans lequel se propagent les ondes électromagnétiques. Selon la longueur d'onde utilisée ou la fréquence, on utilisera des termes différents :

- liaison radio ou liaison hertzienne jusqu'à environ 300MHz
- faisceau hertzien ou faisceau dirigé dans la plage des micro-ondes
- liaison infrarouge dans le domaine des ondes lumineuses.

Les liaisons par satellites fonctionnent également dans le domaine des micro-ondes.

Les principaux supports de transmission seront énumérés et traités dans ce présent chapitre.

3.1 Caractéristiques des lignes métalliques

Les lignes métalliques se subdivisent en paires bifilaires, câbles coaxiaux et guides d'ondes. Les derniers ne se trouvent que dans le domaine des micro-ondes et sur de courtes distances comme, par exemple, pour le branchement des antennes. Les paires bifilaires, pour leur part, ont été largement utilisées par le passé sous la forme de lignes aériennes et sont mises en œuvre, actuellement, comme paires symétriques (twisted pairs). Des lignes aériennes sont encore présentes dans les zones rurales du réseau téléphonique. Les paires symétriques représentent, en raison de leur faible coût, le médium physique le plus répandu.

Un tronçon de longueur dx d'une ligne à paires symétriques ou d'une ligne coaxiale peut être représenté par le schéma équivalent de la Figure 3-1. L'apostrophe signifie que la valeur se réfère à l'unité de longueur de référence (le km).

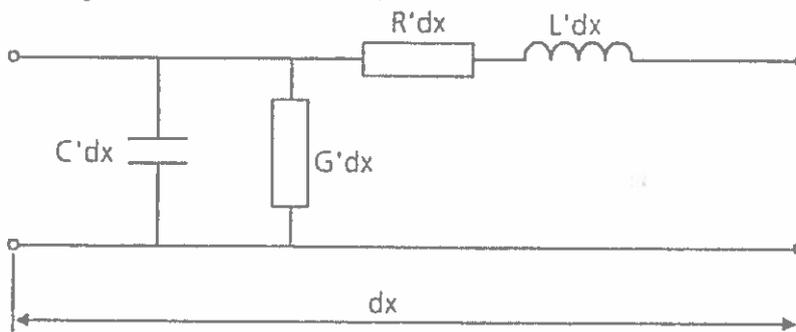


Figure 3-1 : Schéma équivalent d'un tronçon dx de ligne métallique

- R' représente la résistance des deux conducteurs en série, en tenant compte de l'effet pelliculaire;
- L' désigne l'inductance de la ligne par unité de longueur;
- C' correspond à la capacité par unité de longueur;

- G' est la perte de la ligne. Elle est liée aux pertes diélectriques et aux défauts d'isolation. Le paramètre G' peut généralement être négligé.

Impédance caractéristique Z_w : Elle représente l'impédance d'une ligne de longueur infinie, respectivement, la valeur de l'impédance qu'il faudrait raccorder en bout de ligne pour l'adapter (voir Figure 3-2)

$$Z_w = U(0) / I(0) = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} \quad [\Omega]$$

Coefficient linéique de propagation γ Il représente le rapport entre les tensions à la sortie et à l'entrée du tronçon de ligne observé.

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

La partie réelle α correspond à l'atténuation du tronçon de ligne, alors que la partie imaginaire β présente le déphasage. Le paramètre α est exprimé en Np/km (Néper/km). Pour obtenir la valeur en dB, il faut le multiplier par le facteur $20 \log e = 8.68$ dB/Np. Le déphasage β est exprimé en radians/km.

Le coefficient linéique de propagation décrit la fonction de transfert d'une ligne terminée sur son impédance caractéristique (voir Figure 3-3).

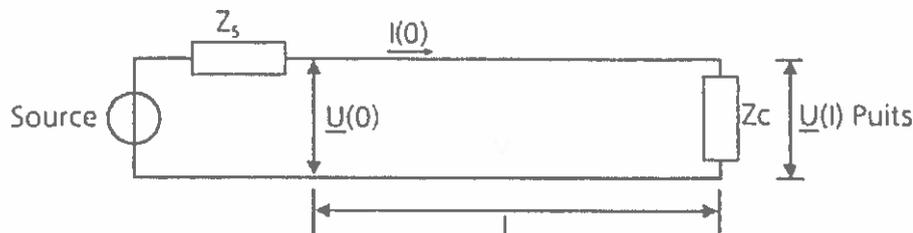


Figure 3-2 : Schéma pour la détermination de l'impédance caractéristique et du coefficient linéique de propagation

Dans le schéma de la Figure 3-2, Z_s représente l'impédance de la source et Z_c l'impédance de terminaison de la ligne.

En pratique, l'un des termes R' ou $j\omega L'$ est souvent dominant. L'autre peut alors être négligé. De même, le terme G' peut généralement être négligé.

En outre, l'effet pelliculaire, dans les câbles coaxiaux, rend le terme R' dépendant de la fréquence.

Dans les paires torsadées, c'est l'effet de proximité qui rend le terme R' s dépendant de la fréquence. Toutefois, le calcul étant ardu, on utilise des valeurs expérimentales.

La Figure 3-3 présente l'évolution des impédances en fonction de la fréquence. Dans les diagrammes, G' est considéré comme négligeable.

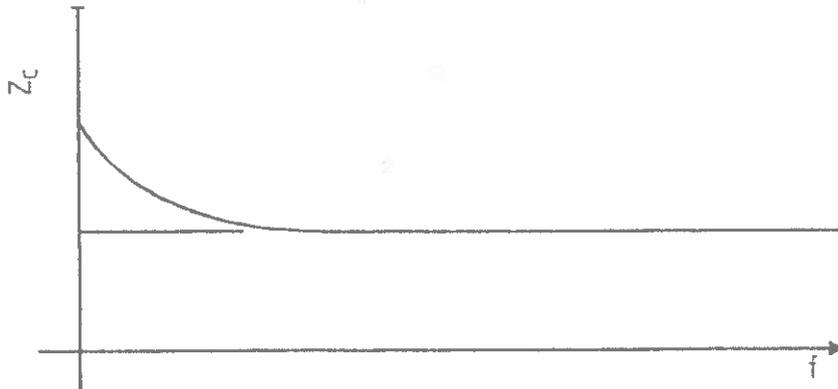


Figure 3-3 Valeur absolue de l'impédance caractéristique Z_c en fonction de la fréquence

Pour les fréquences élevées, Z_c devient indépendant de la fréquence car R' peut être négligé par rapport à $\omega L'$.

3.1.1 Les constantes de lignes

Dans la technique de transmission, les caractéristiques d'une ligne sont déterminées à l'aide des quatre grandeurs électriques suivantes:

	Symbole	Unité	
Résistance ohmique	R	Ohm	Ω
Inductance	L	Henry	H
Capacité	C	Farad	F
Conductance	G	Siemens	S

Ces quatre grandeurs (voir Figure 3-1) augmentent proportionnellement avec la longueur des lignes, en raison de la structure régulière (homogène) de la ligne. Leurs valeurs sont, en règle générale, indiquées pour une longueur de ligne en km; elles sont généralement appelées constantes de ligne.

Résistance ohmique R

La résistance ohmique d'une boucle de ligne est en fonction de la section du fil, de la longueur de la ligne et du matériau utilisé pour le conducteur.

$$R = \frac{\rho \cdot 2l}{A}$$

ρ = résistance spécifique en $\frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}}$
 l = longueur de la ligne en m
 A = section du conducteur en mm^2

Exemple : ρ pour cuivre à 20°C = $0,0178 \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}}$

La résistance ne peut être évaluée, à l'aide de cette valeur, que si le courant est continu. Dans le cas d'un courant alternatif, l'augmentation de la fréquence due à l'effet pelliculaire (effet Kelvin) ou

« skin effect » s'accompagne d'une augmentation de la résistance ohmique. Le champ alternatif magnétique du courant alternatif qui traverse le conducteur induit dans ce conducteur des courants de Foucault. Ces courants parasites affaiblissent le courant à l'intérieur du conducteur tout en le chassant à l'extérieur. Plus la section du fil est grande, plus l'effet pelliculaire est important. Il est possible de pallier à cet inconvénient, en divisant la section en plusieurs conducteurs unifilaires (fils torsadés HF). C'est ce qui explique la raison pour laquelle les guides d'onde sont vides à l'intérieur.

Inductance L

Lorsqu'un courant circule dans un conducteur, il crée autour de ce dernier un champ magnétique. Si le courant circule dans une ligne à double fil, dans une paire de conducteurs ou dans la boucle d'une ligne aérienne, il se crée un champ magnétique entre les 2 conducteurs.

Dans le large espace séparant les conducteurs d'une ligne aérienne, il peut se former un nombre plus important de lignes de force que dans l'espace très réduit entre les fils d'une paire de conducteurs de câble. Le flux magnétique résultant produit dans la ligne aérienne une inductance plus élevée que dans le câble.

L des lignes aériennes $\cong 1,9 \dots 2,4$ mH/km

L des conducteurs de câbles $\cong 0,7$ mH/km

Capacité C

La capacité d'une ligne à double fil est comparable à celle d'un condensateur plan : elle est inversement proportionnelle à l'écartement des deux conducteurs. La capacité d'une boucle de ligne aérienne est par conséquent inférieure à celle d'une paire de conducteurs de câble. Dans le cas du câble, l'air est toutefois remplacé par un matériau isolant qui se comporte comme un diélectrique.

Conductance G

La résistance d'isolement des câbles est contrôlée par une tension continue (généralement comprise entre 180V et 300V). Pour un câble d'un km de longueur, cette résistance est au moins égale à 10'000 M Ω . L'unité de conductance électrique est le Siemens; la conductance est l'inverse de la résistance ohmique d'un conducteur:

$$1 \text{ S (Siemens)} = \frac{1}{\Omega \text{ (Ohm)}}$$

3.1.2 La vitesse de propagation

Les signaux de courant alternatif se propagent dans les lignes téléphoniques à une vitesse relativement élevée, comprise entre 10'000 et 300'000 km/s environ, suivant le type de ligne.

La tension et le courant sont transmis dans la ligne sous la forme d'ondulations. On a représenté à la Figure 3-4 la courbe de la tension instantanée d'une ligne, obtenue en envoyant sur la ligne une tension à une fréquence constante.

Générateur de tonalité

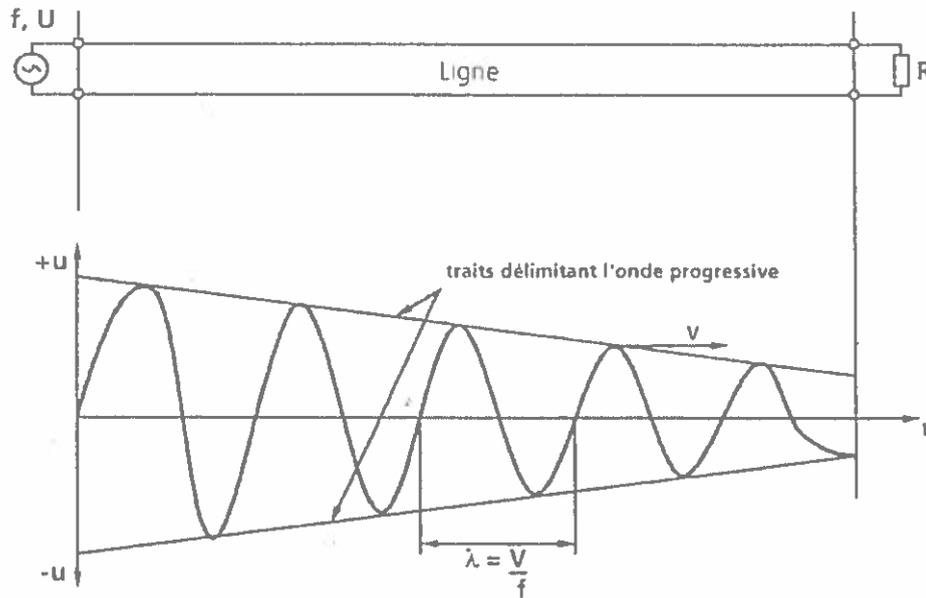


Figure 3-4 : Allure de la tension instantanée le long de la ligne

En raison des pertes de ligne, l'amplitude de l'onde diminue en direction de la terminaison de ligne. La longueur d'onde est donnée par la relation

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

avec λ = longueur d'onde
 v = vitesse de propagation
 f = fréquence du signal appliqué

3.1.3 La réflexion

Lorsqu'une ligne est terminée par une impédance Z_w , c'est-à-dire son impédance caractéristique, l'énergie qui parvient à la terminaison de ligne est totalement absorbée par l'impédance terminale. Dans ce cas, la ligne est dite « adaptée ».

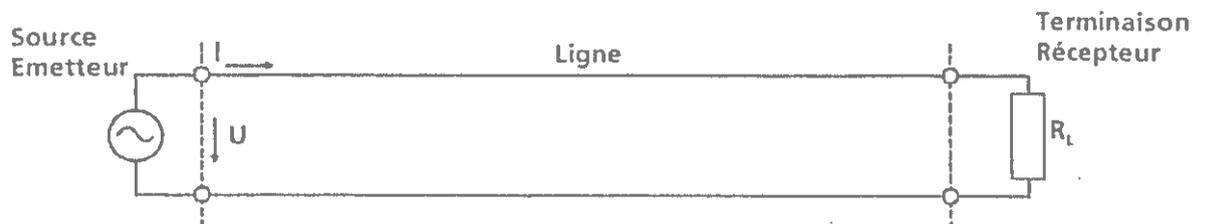


Figure 3-5 : Ligne terminée par une résistance R_L

Lorsque la ligne est terminée par une impédance $R_t \neq Z_w$, une partie seulement de l'énergie incidente est absorbée dans R_t , le reste étant renvoyé en début de ligne sous forme d'ondes de tension et de courant. Cette réflexion a lieu à la fois lorsque $R_t > Z_w$, et lorsque $R_t < Z_w$. Dans les deux cas, les ondes incidentes et réfléchies se superposent dans la ligne, pour donner naissance à une onde stationnaire, caractérisée par des minima et des maxima de tension.

Les deux cas extrêmes $R_t = \infty$ et $R_t = 0$ seront développés ci-dessous.

$R_t = \infty$: Lignes ouvertes à leur extrémité, marche à vide. Le courant délivré par la ligne à R_t et la puissance $P = U \cdot I$ sont nuls. La tension appliquée à la terminaison de ligne est deux fois plus élevée que dans le cas où la ligne est fermée par Z_w . Il se produit une onde stationnaire ayant à l'extrémité de la ligne un ventre de tension qui réapparaît périodiquement à la distance $\frac{\lambda}{2}$ dans la direction du début de ligne.

$R_t = 0$: Lignes court-circuitées à leur extrémité. La tension résultant de R_t et, par conséquent la puissance $P = U \cdot I$ sont égales à 0. Dans ce cas également, la réflexion est totale; toutefois, l'onde stationnaire est cette fois déphasée de $\frac{\lambda}{4}$ par rapport au cas précédent, car il existe un nœud de tension à l'extrémité de ligne.

3.1.4 Mesures de l'affaiblissement

Lorsqu'il s'agit d'étalonner de nouvelles lignes, de localiser des perturbations et de procéder à des mesures de contrôle, il est particulièrement utile de connaître avec précision la valeur de l'affaiblissement. Mesurer l'affaiblissement consiste toujours à comparer deux puissances; il faut par conséquent dans tous les cas, disposer d'une source de tension alternative et d'un voltmètre. La source de tension alternative - émetteur milliwatts ou générateur standard - envoie, des fréquences quelconques sur le quadripôle à mesurer, avec une puissance définie. L'appareil de mesure sert quant à lui à mesurer la tension à la sortie du quadripôle; lorsque l'on connaît l'impédance, on peut alors calculer la puissance résultante en ce point.

3.1.4.1 L'émetteur milliwatts

L'émetteur milliwatts ou générateur standard, se compose d'une source de tension alternative qui, à tension constante, délivre une puissance de 1 mW en utilisant la résistance interne $R_i = 600 \Omega$ à une ligne également caractérisée par une impédance R_t de 600Ω .

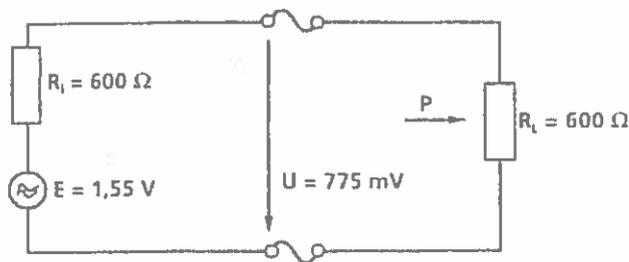


Figure 3.6 : Générateur standard

$$R_1 = R_2 = 600\Omega = R$$

$$P_1 = \frac{U^2}{R} = \frac{\left(\frac{E}{2}\right)^2}{R} = \frac{E^2}{4.R}$$

Pour pouvoir fournir 1 mW à R_1 , il faut une f.é.m. de:

$$E = \sqrt{4RP} = \sqrt{4.600.0,001}$$

$$E = 1,55V$$

La tension aux bornes U est alors de

$$U = \frac{E}{2} = 0,775V$$

Cette tension U de 0,775 V, qui apparaît aux bornes de sortie de l'émetteur milliwatt lorsque la charge est de 600 Ω , est appelée tension normale ou **tension de référence**. Elle sert de référence à toutes les tensions mesurées lors des contrôles d'affaiblissement ou de niveau.

0,775 V = Niveau 0

La fréquence des générateurs simples est de 800 Hz. Il s'agit de la fréquence de mesure habituellement utilisée sur les lignes téléphoniques. En règle générale, l'émetteur est toutefois conçu de manière à pouvoir moduler continuellement une fréquence quelconque, à l'intérieur d'un domaine déterminé (entre 30 et 20'000 Hz par ex.).

Les générateurs universels modernes sont capables de délivrer la tension requise dans une gamme plus étendue encore. On procède pour ce faire à un réglage tous les 10 dB, éventuellement tous les 1 dB; le réglage précis est effectué en continu. Un instrument intégré affiche alors en permanence la tension délivrée. La résistance interne peut être choisie égale à 600 Ω , 150 Ω , 75 Ω et = 0 Ω .

Pour effectuer des mesures sur des câbles à courants porteurs à paires symétriques, câbles coaxiaux par ex., les résistances doivent être choisies égales à 150 Ω ou 75 Ω . Les tensions de référence associées s'élèvent, dans ce cas, à

$$R_L = 150\Omega : U = \sqrt{R_L \cdot P} = \sqrt{150.0,001}$$

$$U = 0,387V$$

$$R_L = 75\Omega : U = \sqrt{R_L \cdot P} = \sqrt{75.0,001}$$

$$U = 0,274V$$

3.1.4.2 Le décibelmètre

Le décibelmètre fonctionne, par principe comme un voltmètre; à la différence du voltmètre, étalonné en volt, le décibelmètre fournit toutefois des mesures en décibel. La tension de référence 0,775 V correspond, sur l'échelle des décibels, au point 0, pour une mesure à 600 Ω . Pour une puissance

émission de 1 mW, des valeurs en décibel négatives indiquent un affaiblissement tandis que des valeurs positives indiquent une amplification.

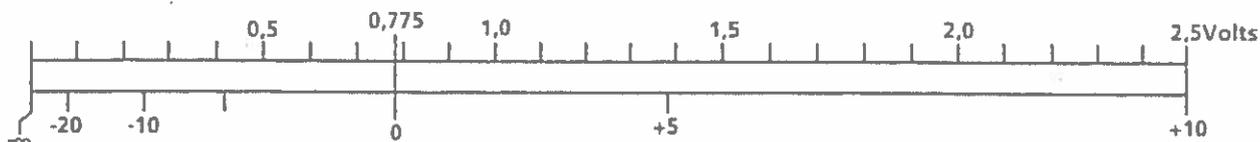


Figure 3-7 Echelle des volts et des décibels

Pour que la ligne soit adaptée, la résistance interne du décibelmètre devra être de 600Ω . Si un autre récepteur de 600Ω est déjà raccordé en bout de ligne et que vous ne pouvez pas le déconnecter, vous devrez mesurer avec le décibelmètre en haute impédance $> 10k \Omega$.

Mesure ligne ouverte

Aucun récepteur n'est branché en bout de ligne. Le décibelmètre fait office de terminaison.

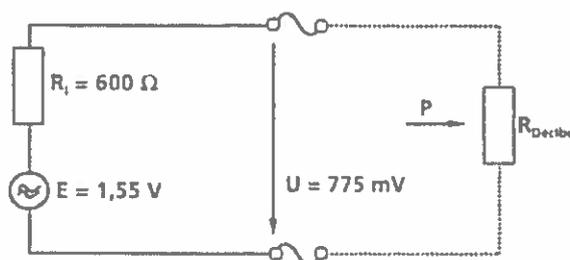


Figure 3-8 Mesure ligne ouverte, $R_{\text{recepteur}} = 600 \Omega$

Mesure ligne en charge

Un récepteur est branché en bout de ligne. Si le décibelmètre est branché avec une résistance de 600Ω , nous pourrions mesurer une résistance équivalente de 300Ω ($2 \times 600 \Omega$ en parallèle). La solution est de mesurer en haute impédance (600Ω et $> 10k \Omega$ en parallèle) donne une résistance équivalente de $\approx 600 \Omega$.

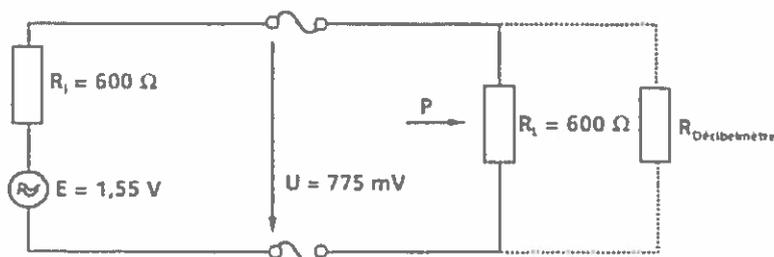


Figure 3-9 Mesure ligne en charge, $R_{\text{recepteur}} > 10k \Omega$

Les instruments susceptibles d'être utilisés pour effectuer des mesures sur des systèmes avec des impédances différentes, peuvent, selon les besoins, être équipés de résistances d'entrée différentes (par exemple 150Ω ou 75Ω). Ces instruments sont non seulement étalonnés pour 600Ω , mais également pour 150Ω et 75Ω (point 0 respectivement à $0,387V$ et $0,274V$).