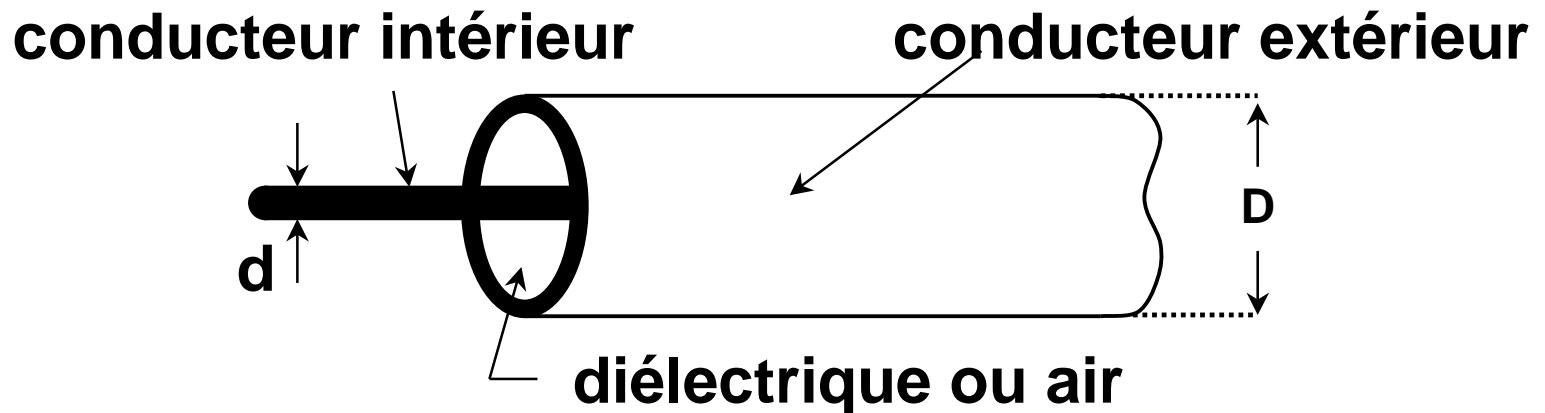


# Le câble coaxial



- Deux conducteurs concentriques
- Diélectrique entre les 2 conducteurs
- Deux impédances  $50 \Omega$  et  $75 \Omega$

# Le câble coaxial

**Les principaux types de câbles utilisés en téléphonie en France :**

- Câble : 2,6/9,5 mm à 4 paires coaxiales, de bande passante maximale 12 MHz (2700 voies)**
- Câble : 1,2/4,4 mm avec de 4 à 28 paires coaxiales, de bande passante maximale 12 MHz (2700 voies)**
- Câble 3,7/13,5 mm avec de 4 à 10 paires coaxiales, de bande passante maximale 60 MHz (10 800 voies)**

**Le rapport des diamètres  $D/d$  est constant et égal à 3,6**

## Le câble coaxial

- Toute la gamme basse des hyperfréquences (1-12 GHz) sous forme de câbles souples
- Au delà de la bande X, câble semi-rigide (jusqu'à 60 GHz)

Le câble coaxial possède des caractéristiques supérieures à celles de la paire torsadée :

⇒ débit plus élevé  
peu sensible aux perturbations électromagnétiques

## Le câble coaxial

En transmission numérique, utilisation de câbles d'impédance  $50 \Omega$  pour les réseaux locaux sur des distances de l'ordre du km, à des débits de 34 à 140 Mbits/s.

En transmission analogique, utilisation de câbles d'impédance  $75 \Omega$ , sur des liaisons longues distances, pour des signaux de 1,3 à 60 MHz.

⇒ Amplification et régénération, des signaux à l'aide de répéteurs espacés régulièrement (2 à 9 km en moyenne).

C'est un support difficile à poser (poids, rigidité) et à raccorder (nombre d'épissures, connectique délicate).

## Le câble coaxial

**Il s'est beaucoup développé dans les années 1970 pour les lignes numériques à grande distance (LGD).**

- Remplacé dans les réseaux à longue distance par la fibre optique (atténuation, encombrement et coût inférieur du fait de sa grande capacité et de la grande distance entre répéteurs)**
- Concurrencé dans les réseaux locaux informatiques haut débit par la paire torsadée (plus souple et moins chère), les équipements d'extrémité compensant l'atténuation.**

**Principale application du câble coaxial : la distribution vidéo.**

# Le câble coaxial

<b>Bande passante</b>	<b>élevée (centaines de MHz)</b>
<b>Atténuation</b>	<b>faible, mais augmente avec la fréquence</b>
<b>Sensibilité à la diaphonie et aux brouillages</b>	<b>faible</b>
<b>Confidentialité</b>	<b>correcte</b>
<b>Coût du support</b>	<b>élevé</b>
<b>Coût des interfaces</b>	<b>faible</b>
<b>Coût des installations</b>	<b>élevé</b>
<b>Applications</b>	<b>Réseaux locaux haut débit, Distribution vidéo, Feeder d'antennes</b>

## Le câble coaxial

Quelques standards en matière de câblage :

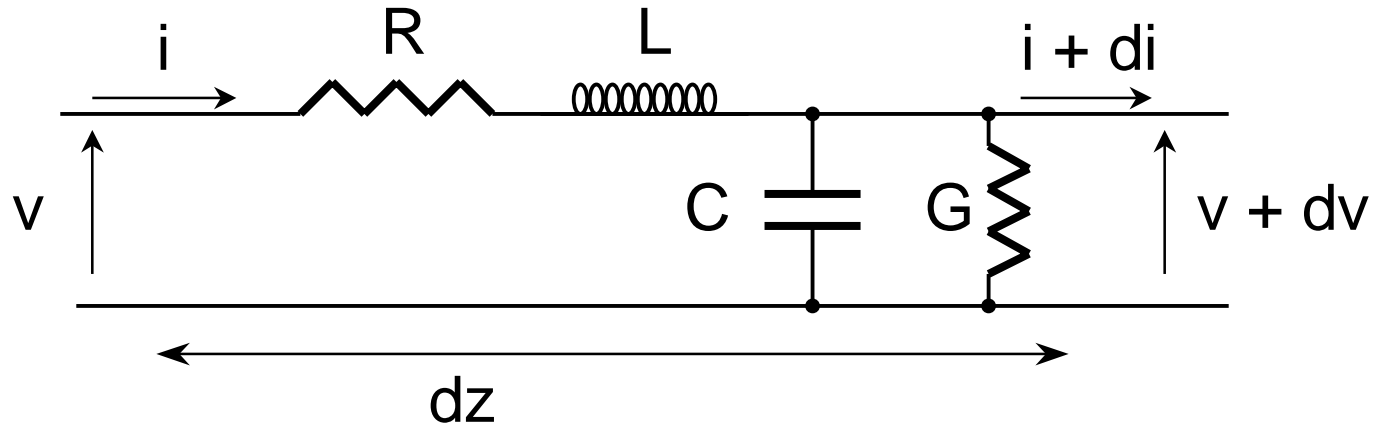
- **10 base 5 - Thick Ethernet** : premier câble Ethernet standardisé appelé aussi «Yellow cable», ou «tuyau d'arrosage».

Câble coaxial blindé de  $50 \Omega$ , terminé par une charge de même impédance, de diamètre de près de 2 cm, utilisable sur des distances de 500 m sans ré-amplification du signal électrique.

- **10 base 2 - Thin Ethernet** : câble coaxial fin de  $50 \Omega$ , appelé aussi «CheaperNet». La longueur maximale sans répéteur est de 185 m.

# Le câble coaxial

Modèle



$R$  : résistance linéique

$L$  : inductance linéique

$C$  : capacité linéique

$G$  : conductance linéique

avec  $G = C\omega \tan\delta$ , avec  $\delta$  l'angle de perte du diélectrique

# Le câble coaxial

L'équation des télégraphistes admet comme résultat :  $V = V_0 e^{-\gamma t}$

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

$\gamma$  : constante de propagation

$\alpha$  : atténuation linéique (Np/m)

→ pertes métalliques (effet de peau)

→ pertes diélectriques

$\beta$  : déphasage linéique (rad/m)

⇒ distorsion ou non suivant leur relation en fonction de la fréquence.

# Le câble coaxial

L'impédance caractéristique  $Z_c$

$$Z_c = \frac{v_1}{i_1} = \frac{v_2}{i_2} = \sqrt{\frac{R + jL\omega}{G + jC\omega}}$$

Les constantes  $v_1, i_1, v_2, i_2$  sont déterminées par les conditions initiales. Elles sont liées par l'impédance caractéristique  $Z_c$ .



Réflexion de l'onde incidente

# Le câble coaxial

$$v_2 = \rho v_1 \quad \text{avec} \quad \rho = \frac{Z - Z_c}{Z + Z_c}$$

Réflexion totale,  $\rho = \pm 1$ ,  
si l'extrémité de la ligne est en court-circuit ou en circuit ouvert.

Pas de réflexion,  $\rho = 0$ ,  
si l'extrémité de la ligne est chargée sur l'impédance caractéristique.

# Coefficient de réflexion

On pose  $\Gamma = \frac{V_{\text{retour}}}{V_{\text{aller}}}$

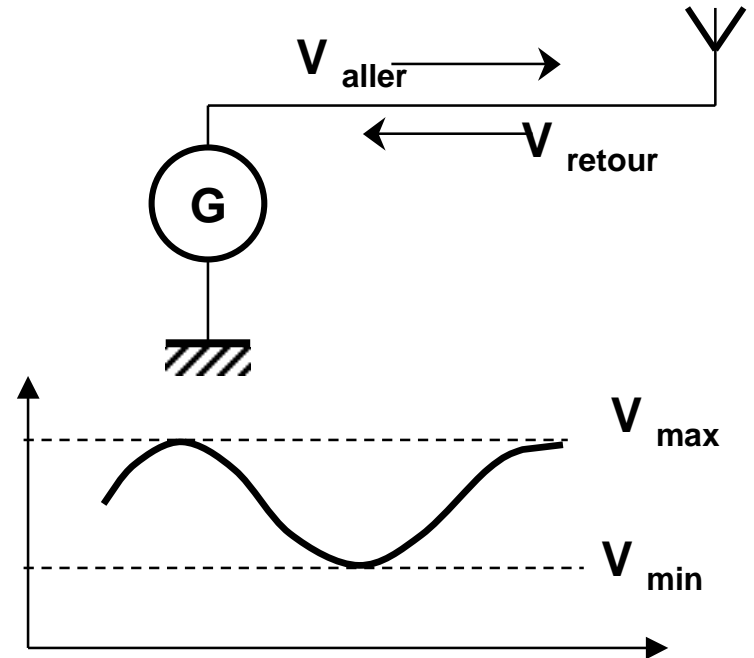
Le taux d'onde stationnaire TOS est égal à

$$\frac{V_{\text{aller}} + V_{\text{retour}}}{V_{\text{aller}} - V_{\text{retour}}} = \frac{V_{\text{aller}}}{V_{\text{aller}}} \frac{1 + V_{\text{retour}}/V_{\text{aller}}}{1 - V_{\text{retour}}/V_{\text{aller}}}$$

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

En tout endroit, on a  $Z = \frac{V_{\text{aller}} + V_{\text{retour}}}{I_{\text{aller}} - I_{\text{retour}}} = \frac{V_{\text{aller}}}{I_{\text{aller}}} \frac{1 + V_{\text{retour}}/V_{\text{aller}}}{1 - I_{\text{retour}}/I_{\text{aller}}} = Z_c \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma}$

⇒  $\text{TOS} = \frac{Z}{Z_c}$



# Le câble coaxial

**Cas idéal de la ligne sans pertes :**

**Le conducteur est supposé parfait  $R = 0$  et le diélectrique parfait  $G = 0$**

**La constante de propagation devient alors simplement :**

$$\gamma = \sqrt{(jL\omega)(jC\omega)} = j\omega\sqrt{LC}$$

**Soit un affaiblissement nul :  $\alpha = 0$**

# Le câble coaxial

Ligne à faible pertes

Si l'affaiblissement dû à  $R$  et à la conductance  $G$  est faible, alors  $G = 0$  et  $R \ll L\omega$

Dans ce cas :

$$Z_c = \sqrt{\frac{R + jL\omega}{jC\omega}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \sqrt{1 - j\frac{R}{L\omega}}$$

comme  $\sqrt{1-x} \approx 1 - \frac{x}{2}$  quand  $x \ll 1$

$$Z_c \approx \sqrt{\frac{L}{C}} \left( 1 - j\frac{R}{2L\omega} \right) \approx \sqrt{\frac{L}{C}}$$

# Le câble coaxial

Les pertes dans les conducteurs métalliques - Effet de peau.

- En courant continu, la densité de courant dans un conducteur est uniforme.
- En courant alternatif, densité de courant n'est plus uniforme.

Tout se passe comme si le courant se concentrait dans une «peau» située à la surface externe du conducteur.

$\delta$  l'épaisseur de peau :

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi\sigma\mu f}}$$

avec  $\mu = \mu_0 \mu_r$  perméabilité du matériau (H.m<sup>-1</sup>)  
 $\sigma$  : conductivité du matériau conducteur ( $\Omega\text{m}$ )<sup>-1</sup>

# Le câble coaxial

Les pertes dans les conducteurs métalliques - Effet de peau

Si le conducteur est du cuivre,

$$\text{alors } \mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H.m}^{-1} (\mu = \mu_0 \mu_r)$$

$$\sigma = 5.85 \cdot 10^7 (\Omega\text{m})^{-1}$$

f	50 Hz	10 kHz	50 MHz	1 GHz
$\delta$	9,3 mm	0,65 mm	9,3 $\mu\text{m}$	2 $\mu\text{m}$

L'atténuation due aux pertes métalliques augmente avec la fréquence suivant une loi en  $\sqrt{f}$

## Le câble coaxial

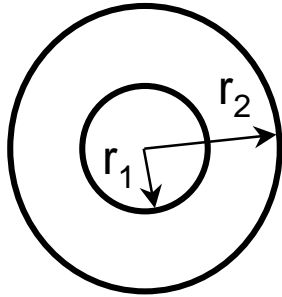
### Les pertes dans les diélectriques

La conductance linéique  $G$  (terme très faible) est due au déplacement des charges dans le diélectrique, non parfait, qui sépare les conducteurs.

- Avec les matériaux du type téflon, on peut considérer ces pertes comme négligeables aux fréquences inférieures à 100 MHz.
- Jusqu'à 1 GHz, leur influence est négligeable devant les pertes par effet de peau.

L'atténuation due aux pertes diélectriques augmente avec la fréquence suivant une loi en  $f$ . Cette atténuation ne devient prépondérante qu'en très haute fréquence, lorsque  $G$  n'est plus négligeable.

# Le câble coaxial



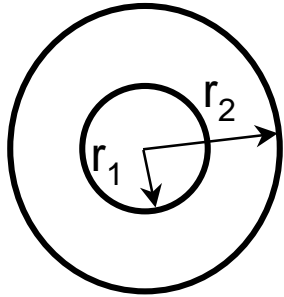
$$r = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{f \mu_0 \mu_r}{\pi}} \left[ \frac{1}{r_1 \sqrt{\sigma_1}} + \frac{1}{r_2 \sqrt{\sigma_2}} \right] (\Omega \cdot m^{-1})$$

$$l = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} \text{Log} \left( \frac{r_2}{r_1} \right)$$

$$c = \frac{2\pi \epsilon_0 \epsilon_r}{\text{Log} \left( \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad \text{avec} \begin{cases} \epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9} \text{F} \cdot \text{m}^{-1} \\ \mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{H} \cdot \text{m}^{-1} \end{cases}$$

$r$ ,  $l$ ,  $c$ , résistance, inductance et capacité linéiques

# Le câble coaxial



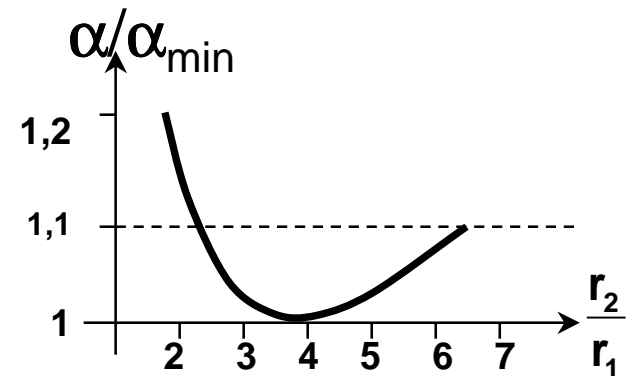
$$r = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu f}{\pi}} \left[ \frac{1}{r_1 \sqrt{\sigma_1}} + \frac{1}{r_2 \sqrt{\sigma_2}} \right] (\Omega \cdot m^{-1})$$

Si  $r_2$  est constant,  $\alpha$  est minimum pour

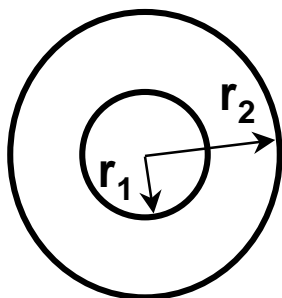
$$\frac{d\alpha}{dr_1} = 0$$

Si  $\epsilon_r = 1$  (air), alors  $\frac{r_2}{r_1} = 3.6$

Pendant, cette condition n'est pas critique.



# Le câble coaxial



Si  $r_1 = 0.05$  cm,  $r_2 = 1$  cm,  $\epsilon_r = 2.3$  et  $\tan\delta = 5.10^{-4}$   
alors

f(Hz)	Atténuation totale (dB/m)	Pourcentage des pertes		
		fil central	tube extérieur	isolant
$10^6$	$5,3.10^{-3}$	73%	26%	1%
$10^7$	$1,75.10^{-2}$	71%	25%	4%
$10^8$	$6.10^{-2}$	65%	23%	12%
$10^9$	$2,35.10^{-1}$	52%	19%	29%
$10^{10}$	1,23	31%	12%	57%

# Le câble coaxial

Matériaux utilisés comme isolant	polyéthylène	polystyrène	téflon
$\epsilon_r$	2,26	2,56	2,1
$\sigma (\Omega m)^{-1}$	$10^{-15}$	$10^{-16}$	$10^{-15}$
<b>facteur de perte</b>			
pour $f = 1$ MHz	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
pour $f = 100$ MHz	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
pour $f = 1$ GHz	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$

# Le câble coaxial

Une ligne de transmission est un guide propageant au moins un mode de type TEM.

Le spectre de fréquences est discret pour les guides fermés

Notion de mode :

Il existe 4 familles de mode :

- Les modes TE (transverse electric)
- Les modes TM (transverse magnetic)
- Les modes TEM (transverse electric-magnetic)
- Les modes hybrides HE

## Le câble coaxial

**Si l'énergie n'a qu'une seule possibilité (mode de propagation) de se propager dans la bande de fréquence utilisée, alors le guide est monomode, sinon le fonctionnement est multi-modal.**



**L'énergie de la source est répartie sur un nombre important de modes qui se propagent indépendamment les uns des autres.**

**Rq : Un guide n'est pas naturellement monomode ou multimode, mais son fonctionnement dépend du rapport entre ses dimensions physiques et la longueur d'onde utilisée.**

**Ex : Un guide monomode dans la bande X (8,3;12,4 GHz) est multimode au-dessus de 12,4 GHz, et très fortement multimode dans les bandes millimétriques.**

# Les réseaux coaxiaux de distribution TV

**Objectif : Permettre de recevoir la TV dans des zones non couvertes par la diffusion hertzienne (vallées de l'est des USA, en France dans les Vosges)**

**Très rapidement, la bande transmise (VHF soit 120 - 330 MHz) va devenir VHF + UHF soit 120 MHz - 860 MHz.**

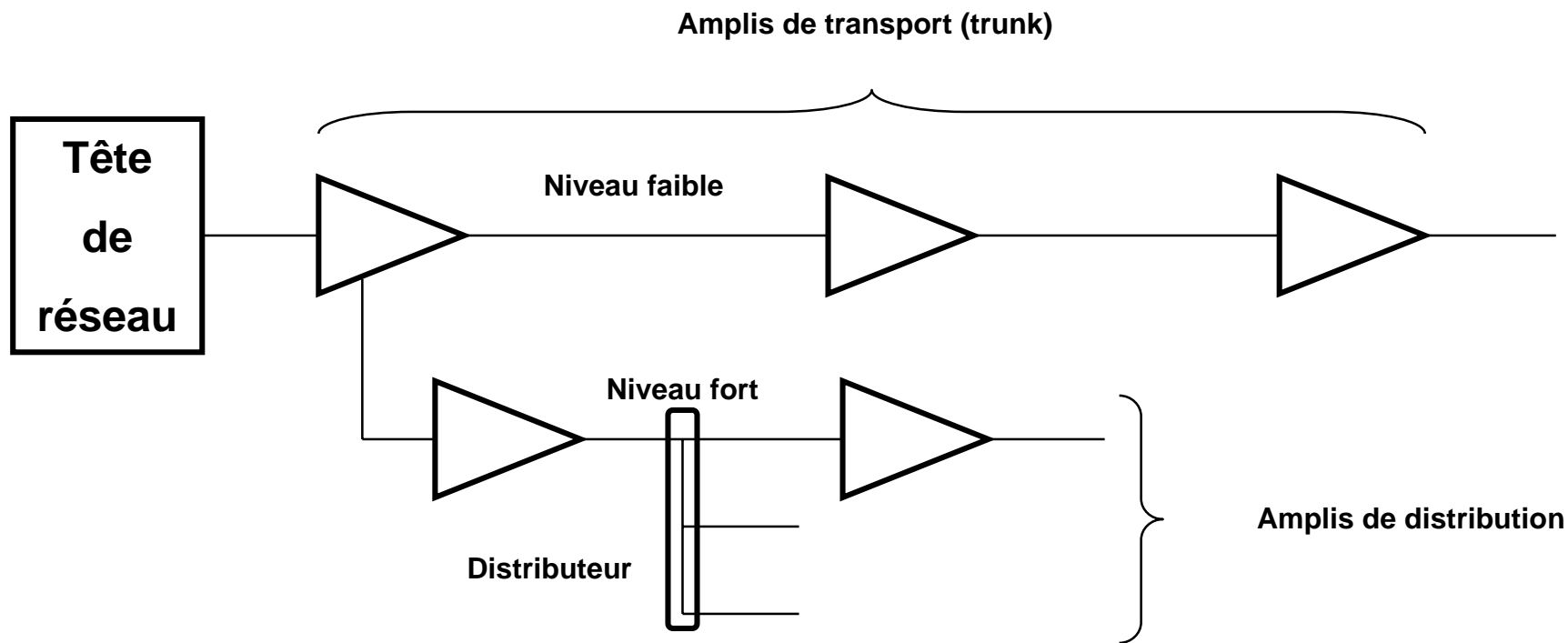
**Les matériels utilisés sont principalement les suivants (hors câbles) :**

- amplificateurs régulés ou non**
- répartiteurs**
- points de branchement**
- téléalimentations avec injecteur et stop-courant.**

**Plusieurs structures de réseau peuvent être imaginées.**

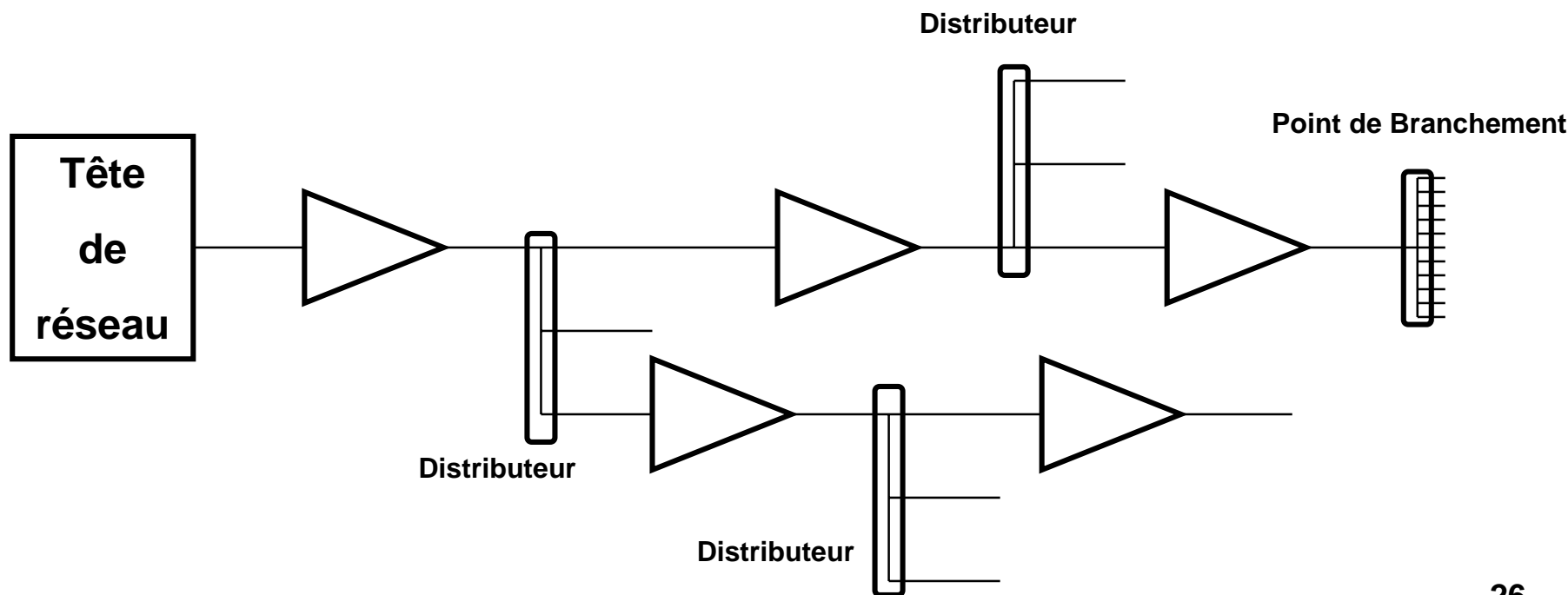
# Les réseaux coaxiaux de distribution TV

Structure type Amérique du Nord : longue chaîne en transport, 2 à 3 amplis en distribution.



# Les réseaux coaxiaux de distribution TV

Structure 0G : 6 amplis en cascade entre la TdR et l'abonné au maximum.



## Ingénierie des réseaux de distribution TV

### Plan de fréquences

Voie numérique Ab $\rightarrow$ PB	10 - 30 MHz
Voie numérique PB $\rightarrow$ Ab	47 - 85 MHz
FM	88 - 107 MHz
VHF	120 - 340 MHz
VHF super bande	217 - 300 MHz
VHF hyper bande	300 - 470 MHz
UHF	470 - 860 MHz

## Ingénierie des réseaux de distribution TV

**Cumul des rapports S/B**       $-10 \log \sum \left( 10^{-\frac{1 \text{ S}}{10 \text{ B}}} \right)$

**Cumul des IM2**       $-10 \log \sum \left( 10^{-\frac{\text{IM}_2}{10}} \right)$

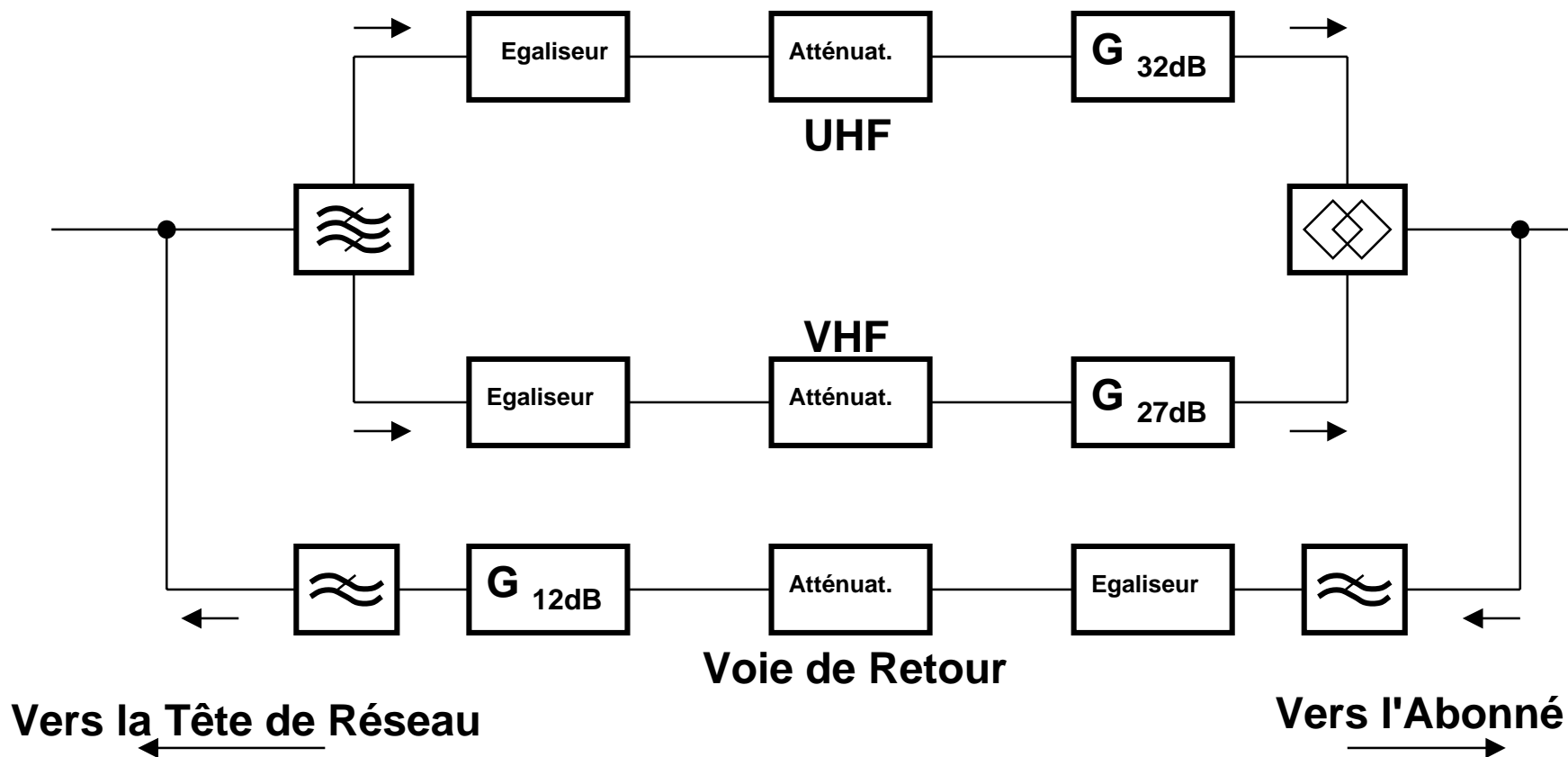
**Cumul des IM3**       $-20 \log \sum \left( 10^{-\frac{\text{IM}_3}{20}} \right)$

**$(\text{C/N})_{5,58 \text{ MHz}} = (\text{C/N})_{1\text{MHz}} - 7,5 \text{ dB}$  ( soit  $10 \log 5,58$ )**

**$(\text{S/B})_{5,58 \text{ MHz}} = (\text{C/N})_{5,58 \text{ MHz}} + 2,8 \text{ dB}$  (gain de modulation)**

**La pondération ajoute 9 dB au S/B :  $(\text{S/B})_W = (\text{C/N})_{1\text{MHz}} - 4,2 \text{ dB}$**

# Ingénierie des réseaux de distribution TV



Amplificateur à deux bandes + voie de retour

## Ingénierie des réseaux de distribution TV

Modèle	Utilisation	Type	Affaiblissement
Câble A0	Répartition	7,3/28,8	3,4 dB/100m à 860 MHz
Câble A1	Répartition	4,9/19,4	4,2 dB/100m à 860 MHz
Câble A2	Répartition	4,1/16	4,9 dB/100m à 860 MHz
Câble B4	Distribution	1,7/6,9	10,9 dB/100m à 860 MHz
Câble C6	Raccordement	0,75/4,8	26 dB/100m à 860 MHz
1/2	Distribution	3,5/12	5 dB à 860 MHz
1/2 disym.	Distribution	3,5/12	5,5 - 10,5 dB à 860 MHz
1/4	Distribution	3,5/12	9 dB à 860 MHz
1/2	Raccordement	E	4 dB à 860 MHz
1/2 disym.	Raccordement	E	5,5 - 10,5 dB à 860 MHz
1/4	Raccordement	E	8 dB à 860 MHz
Injecteur	Distribution	3,5/12	1,5 dB à 860 MHz
1/2	Raccordement	E	4 dB à 860 MHz
1/4	Raccordement	E	8 dB à 860 MHz
1/16	Raccordement	E	16 dB à 860 MHz (typ : 25m)

## Ingénierie des réseaux de distribution TV

Le premier et le dernier amplis ne sont jamais réglés. Le dernier est terminé en connectique E. Cette connectique est incompatible avec le courant de téléalimentation : il faut utiliser du 3,5/12 en distribution.

Tous les amplis sont réglés au même niveau de sortie (maintenance plus aisée) et sans penchette. Seul l'ampli terminal est compensé afin que le niveau soit constant dans la bande à l'arrivée chez l'abonné.

Le nombre d'amplis en cascade est généralement limité par l'IM3.

On limite à 5 le nombre de passifs derrière l'ampli terminal. Dans ces conditions, l'ondulation n'est pas prise en compte dans les calculs.

La régulation des amplis est assurée par deux fréquences pilote.

Nota :  $0\text{dB}\mu\text{V} = -108,7\text{ dBm} = \text{puissance d'une tension de } 1\mu\text{V} \text{ sur } 75\ \Omega$

## Ingénierie des réseaux de distribution TV

### Performances à la tête de réseau :

- Niveau : 69 dB $\mu$ V
- (C/N)<sub>5,58</sub> = 64 dB
- IM2 = 70 dB pour 54 canaux
- IM3 = 85 dB pour 54 canaux

### Performances à la prise d'abonné :

- Niveau : 60 dB $\mu$ V
- (C/N)<sub>5,58</sub> = 47 dB
- IM2 = 52 dB pour 54 canaux
- IM3 = 52 dB pour 54 canaux

## Ingénierie des réseaux de distribution TV

### Pour un amplificateur

$$C/N = N_S - (F+G+B_{th})$$

$$IM2 = 60 + (N'_{s0}-N_S-C') - E$$

$$IM3 = 52 + 2 (N_{s0}-N_S-C)$$

F est le facteur de bruit (10 dB)

G est le gain (32 dB à 860 MHz)

$B_{th}$  est le bruit thermique (2,4 dB $\mu$ V)

$N_S$  est le niveau de sortie (110 dB $\mu$ V)

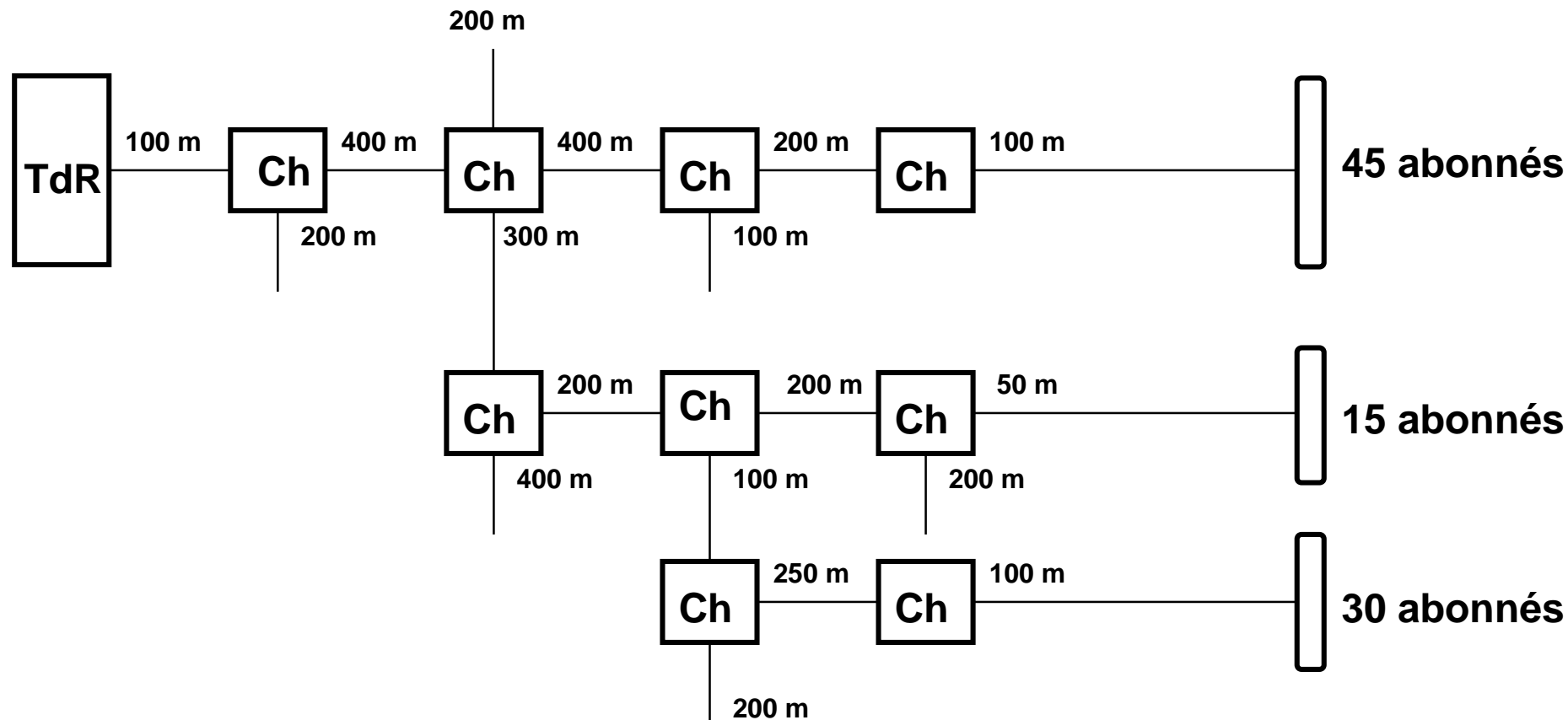
$N_{s0}$  est le niveau de sortie à  $n_1 = 15$  porteuses pour IM3 = 52 dB (122 dB $\mu$ V)

$N'_{s0}$  est le niveau de sortie à  $n_1 = 15$  porteuses pour IM2 = 60 dB (120 dB $\mu$ V)

$C = C' = 10 \log (n_2/n_1)$   $n_2$  étant le nombre de canaux réellement utilisés

$E = N_{S860} - N_{S120} = 5$  dB pour le seul dernier ampli

## Ingénierie d'un réseaux de distribution TV à 54 canaux



# Modem câble

Comparaison des performances du service DSL de SBC ,avec celles d'un modem câble de Excite@homesuite à des tests faits dans la région de la baie de San Francisco.

Téléchargement de 150 000 pages à partir de 40 sites Web populaires : le modem câble est plus rapide dans la journée, mais plus lent aux heures de pointe que le DSL.

	Jou rn ěe	Soi r ěe
DS L	4.30s	3.55s
Mode m c %oble	3.68s	3.97s

## Modem câble

**Flux descendant d'un modem câble de type DOCSIS (Data Over Cable Service Interface Specification) transmet un débit de 36 Mbit/s avec une capacité utilisable de 27 Mbit/s**

**Le circuit à 27 Mbit/s est partagé vers tout le groupe d'utilisateurs : en général inférieur à 500, en moyenne 125 utilisateurs dont un tiers sont en activité, soit environ 40.**

**Cela fait 675 kbit/s par abonné.**

## Modem câble

En technique numérique, l'exploitant capte plusieurs chaînes de télévision, compresse les signaux et les émet ensuite sur un canal de 8 MHz.

Chez l'abonné, un boîtier décodeur permet de décrypter les transmissions numériques et de les retransmettre en télévision analogique.

Les systèmes numériques pouvant compresser 6 à 10 chaînes sur une bande de fréquence de 8 MHz, il y a donc un total potentiel d'environ 1000 chaînes de télévision sur un système de 750 MHz.

## Modem câble

### **Sécurité :**

**Le modem câble a accès à toutes les trames sur le canal en aval, mais il filtre toutes celles qui ne lui sont pas destinées.**

**Visionner les images de quelqu'un d'autre impliquerait de désassembler le modem câble et d'isoler le signal après qu'il a été démodulé, mais avant qu'il ne passe par le système de reconnaissance d'adresse.**

- matériel perfectionné**
- compréhension poussée de la structure physique du modem**

## Modem câble

### **Sécurité :**

**Le modem DSL ne fournit en général pas de cryptage. Il "suffit" d'obtenir l'accès physique d'une ligne extérieure.**

**Aussi, dans tous les cas, l'abonné devra utiliser un tunnel protégé assurant la sécurité depuis la source jusqu'au destinataire.**

# **Bibliographie**

- « **Démystification des modems câble** » par M. Finneran  
**Digital Communications and Services, n°6, octobre 2000, pp. 47-50**
- « **Propagation, Rayonnement, Electromagnétisme** » - Cours B8  
**Electronique CNAM, J. Salset, M. Terré**