



Ecole d'électronique CNRS-IN2P3

CEM des cartes rapides / Lignes de transmission

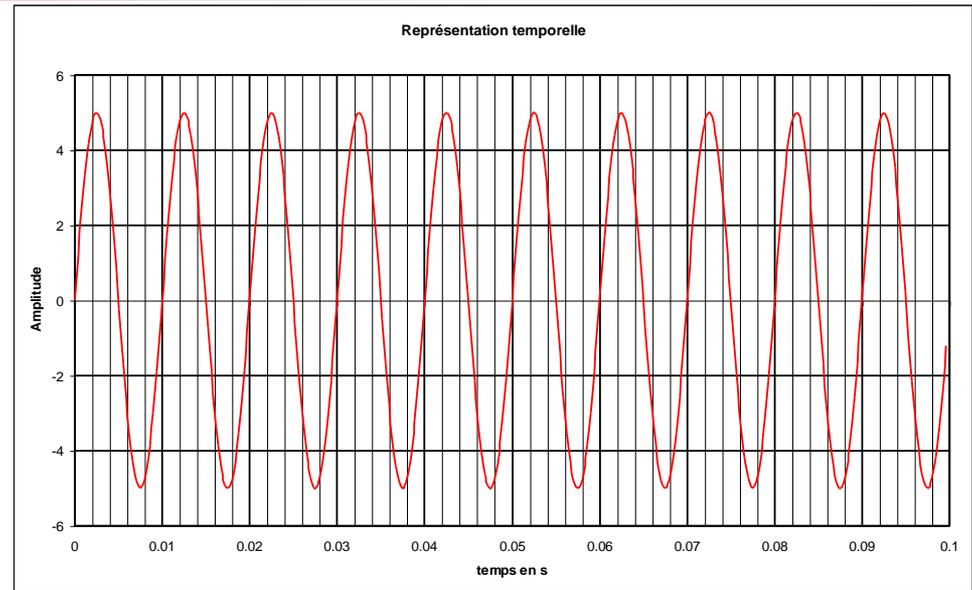
Philippe DUNAND



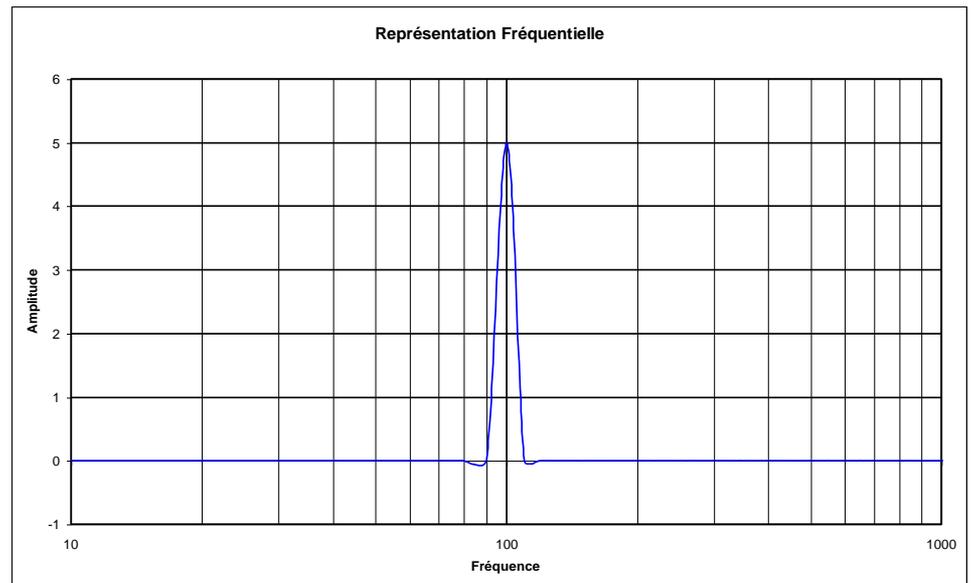
Qu'est ce qu'une électronique rapide ?

Représentation d'un signal sinusoïdal

► Représentation temporelle

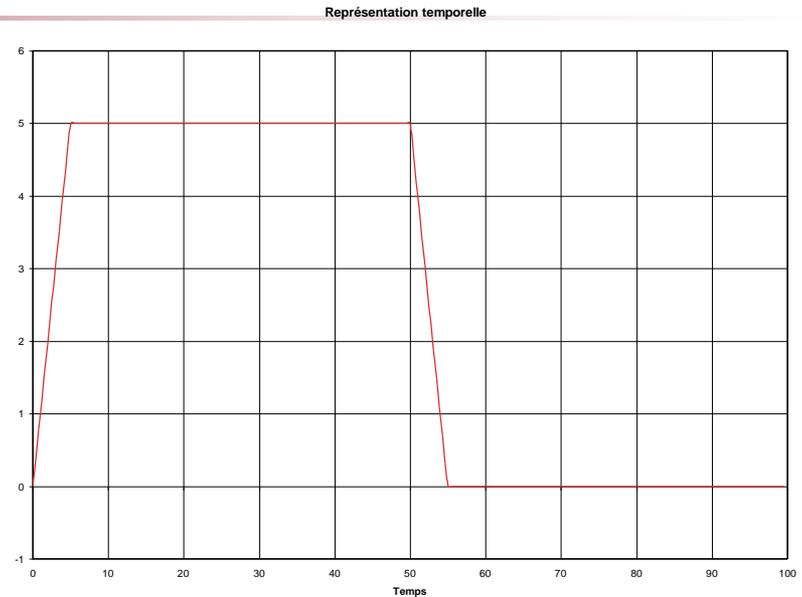


► Représentation Fréquentielle

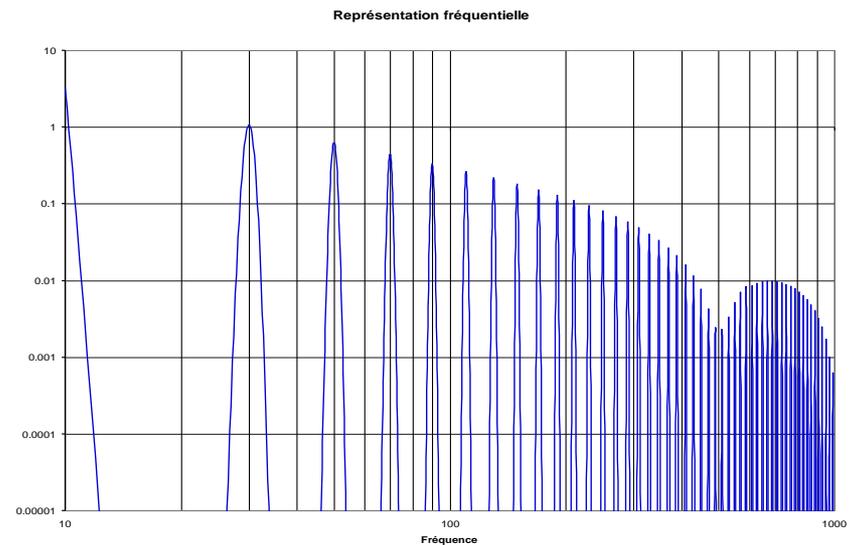


Représentation d'un signal trapézoïdal

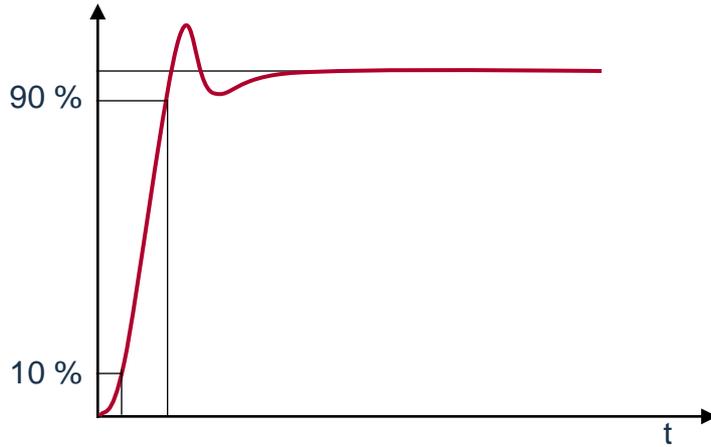
► Représentation temporelle



► Représentation Fréquentielle

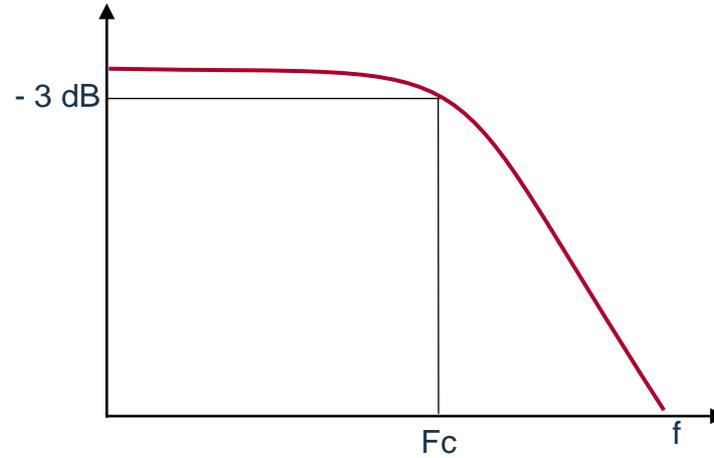


Relation Temps / Fréquence



$$T_m = 2,2 \cdot \tau$$

$$F_c = 0,35 / T_m$$

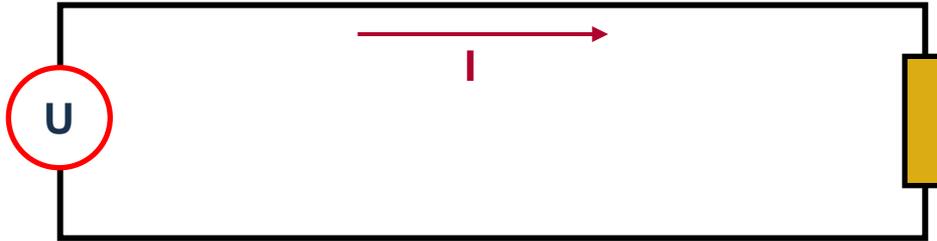


$$F_c = 1 / 2 \cdot \pi \cdot \tau$$

$$T_m = 0,35 / F_c$$

Ligne de transmission - Phénomène

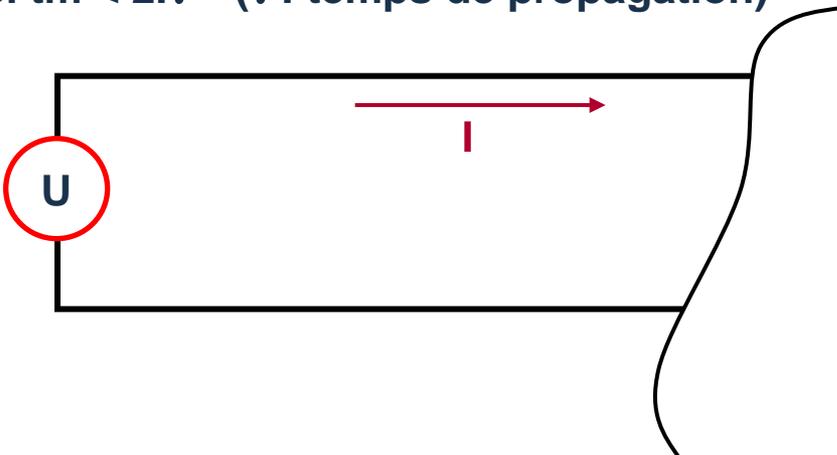
► Régime stationnaire :



$$I = U / R$$

► Régime impulsionnel :

- Si $t_m < 2 \cdot \tau$ (τ : temps de propagation)

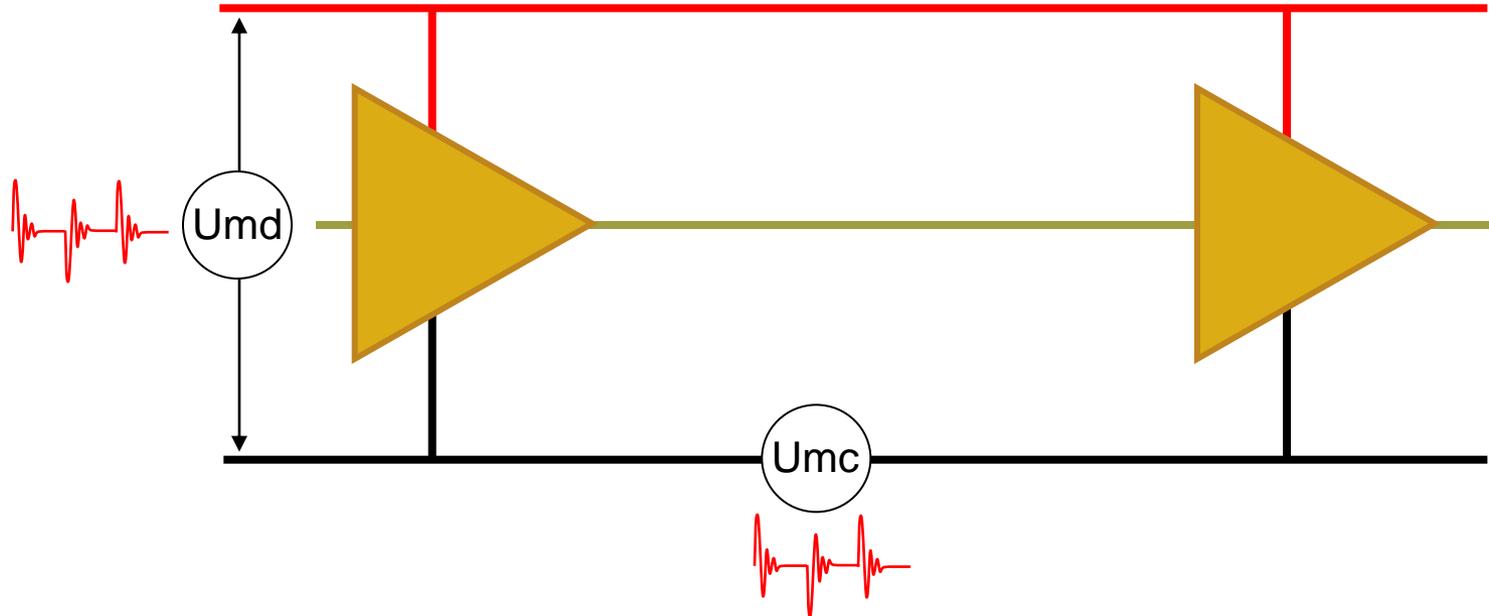


$$I = U / R_c$$



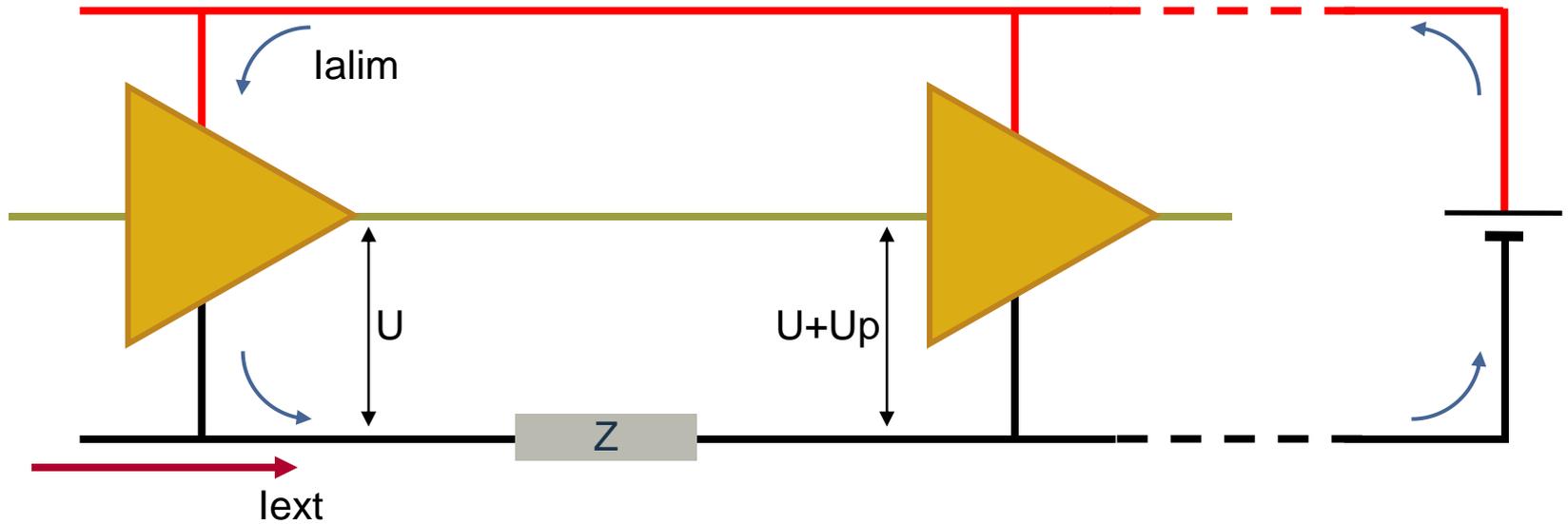
Masses et alimentations d'une carte

Contraintes d'alimentation sur une carte



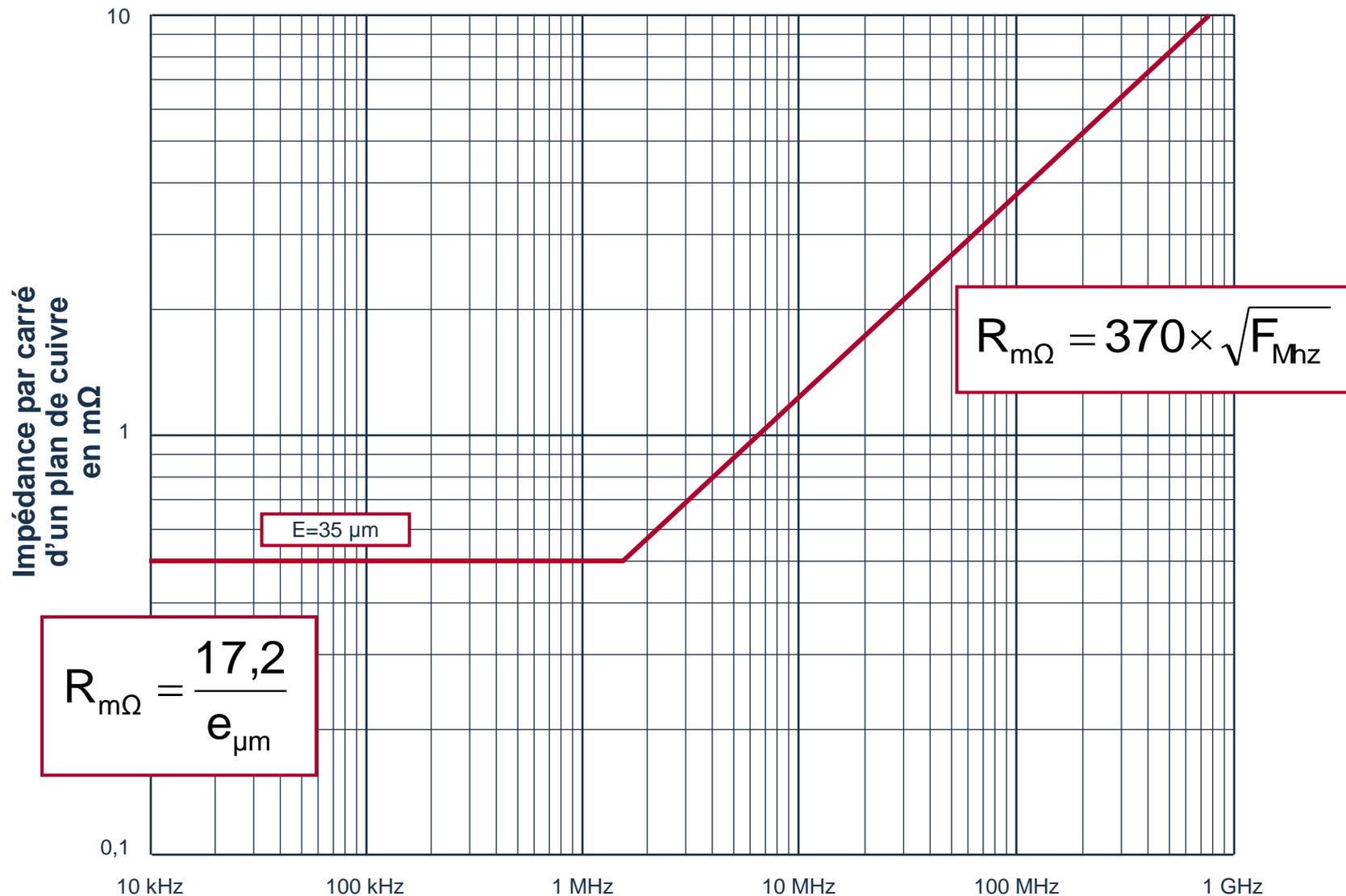
- ▶ U_{md} : Bruit de Mode Différentiel - Bruit d'alimentation
- ▶ U_{mc} : Bruit de Mode Commun - Bruit de masse

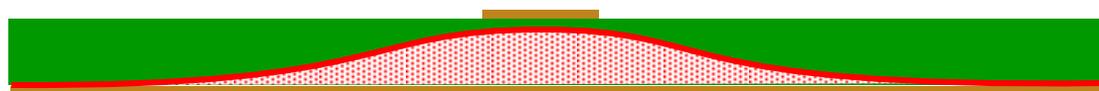
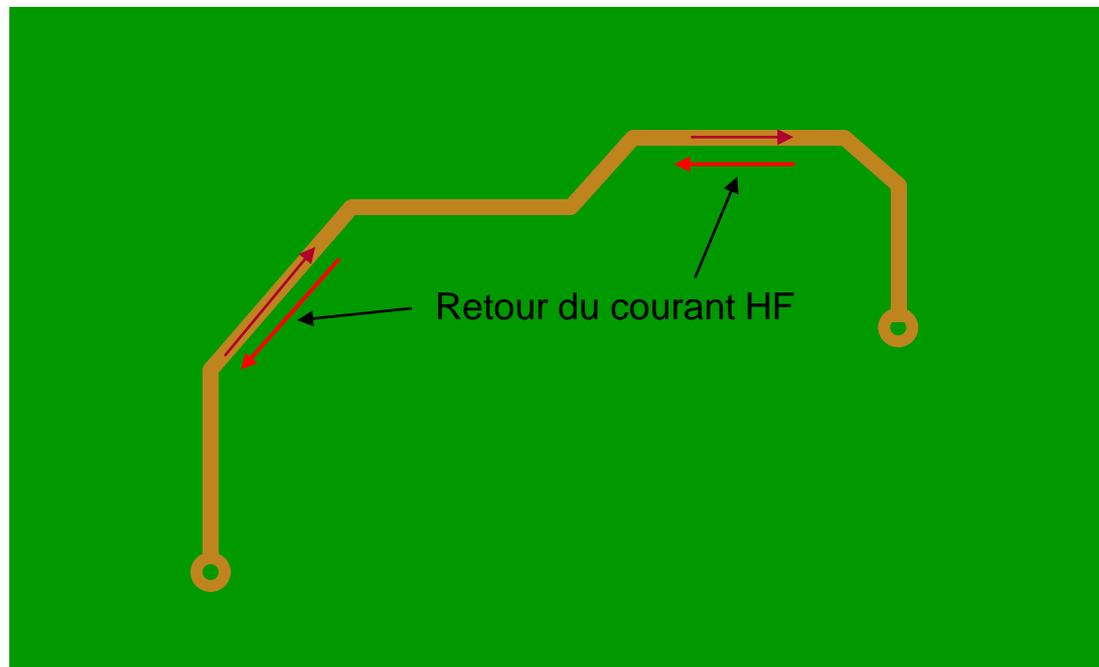
Couplage par impédance commune



$$U_p = Z \cdot (I_{ext} + I_{lim})$$

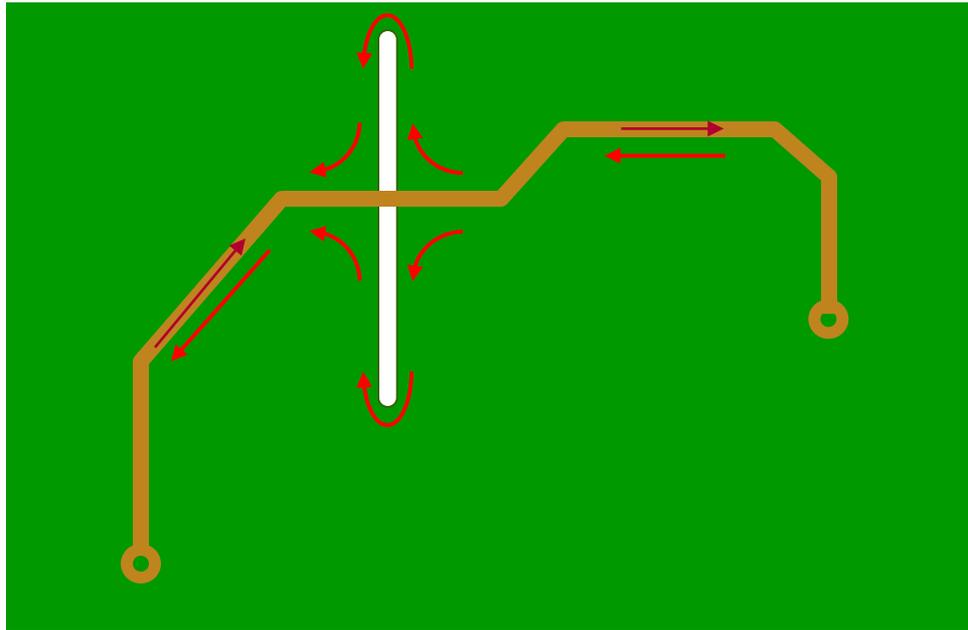
Impédance d'un plan de masse



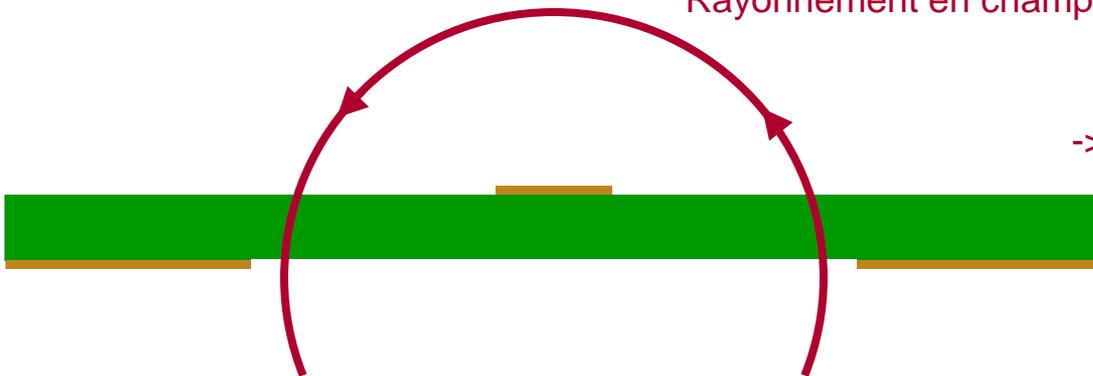


Distribution du courant de retour

Effet d'une fente dans un plan de masse

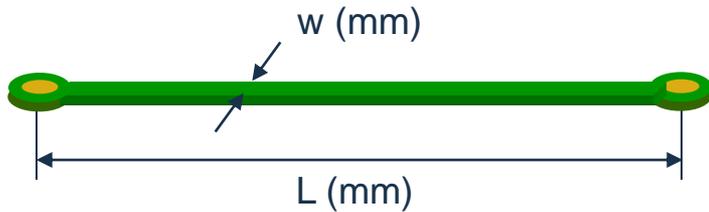


Rayonnement en champ magnétique



-> Self équivalente : 1 nH/cm

Impédance d'une piste de circuit imprimé



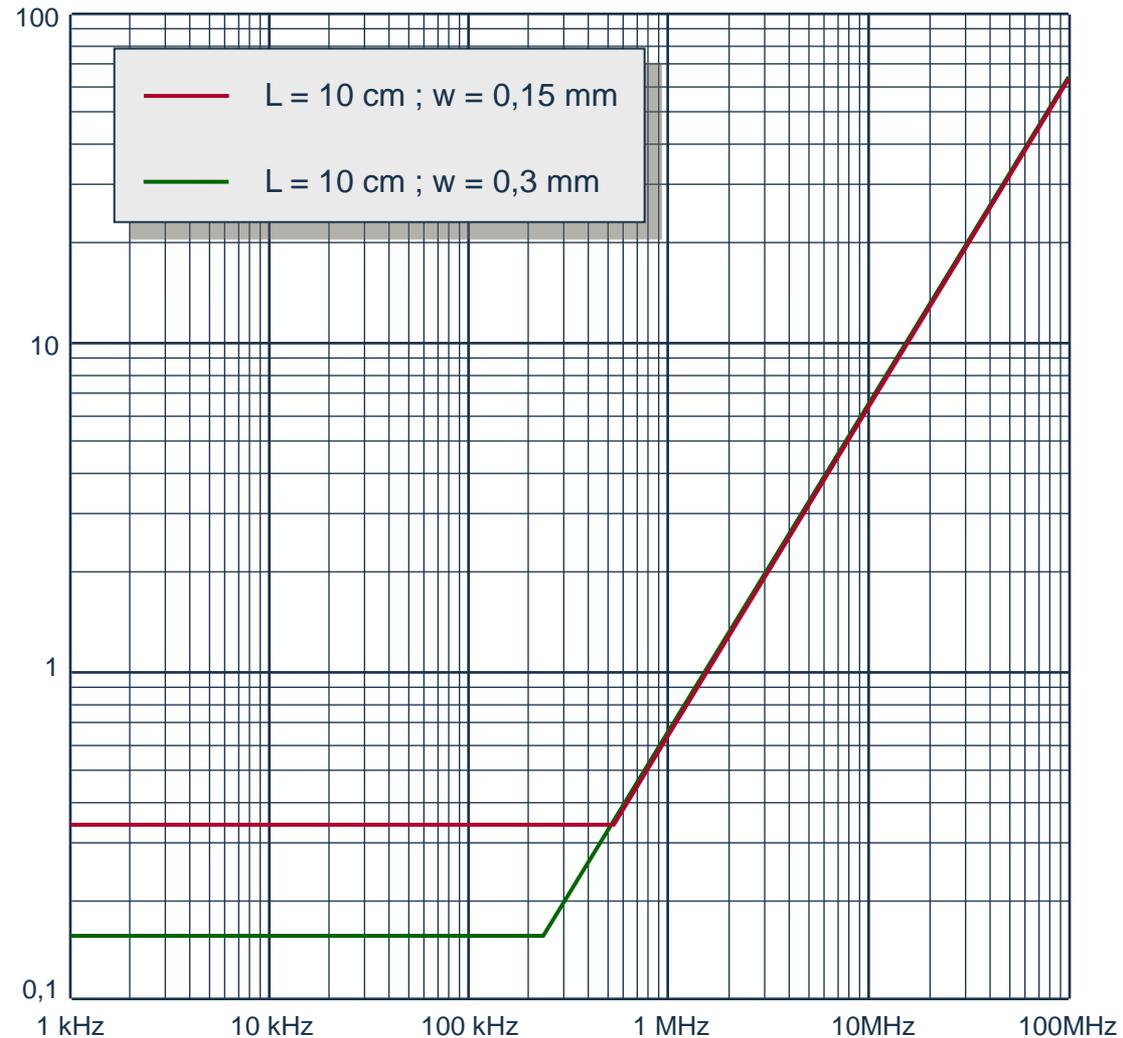
► Résistance ($e = 35 \mu\text{m}$)

- $R_{m\Omega} = \frac{0,5 \times L}{D}$

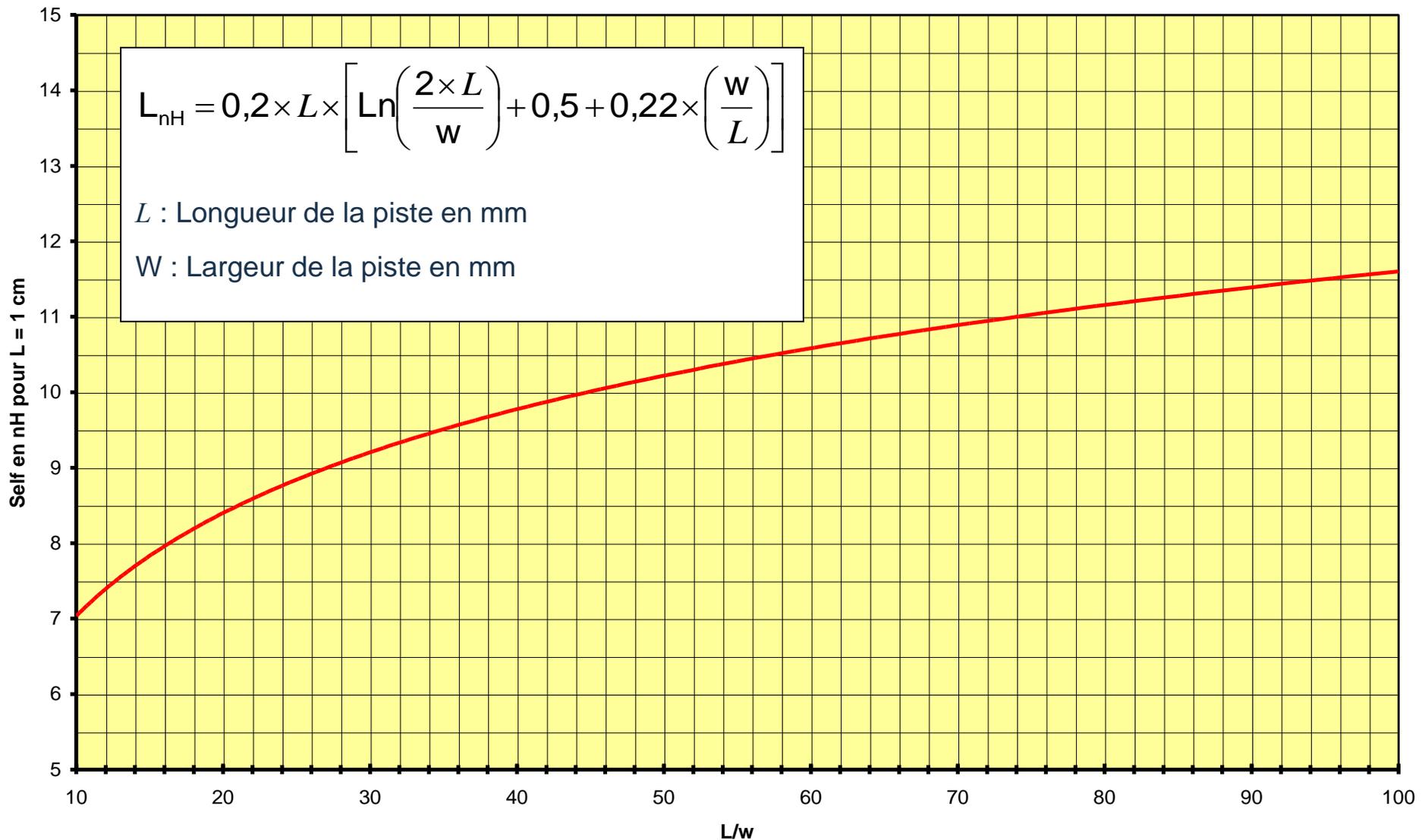
► Self

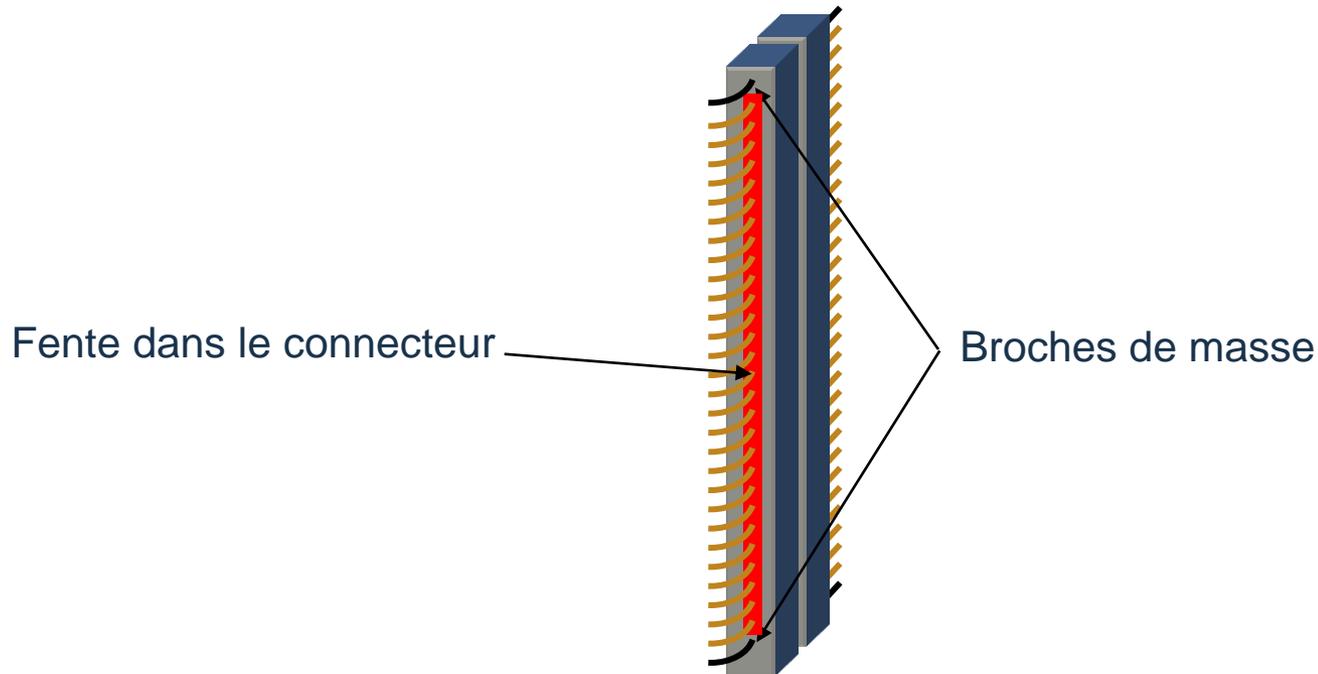
- $L \approx 10 \text{ nH} / \text{cm}$

Impédance en Ω

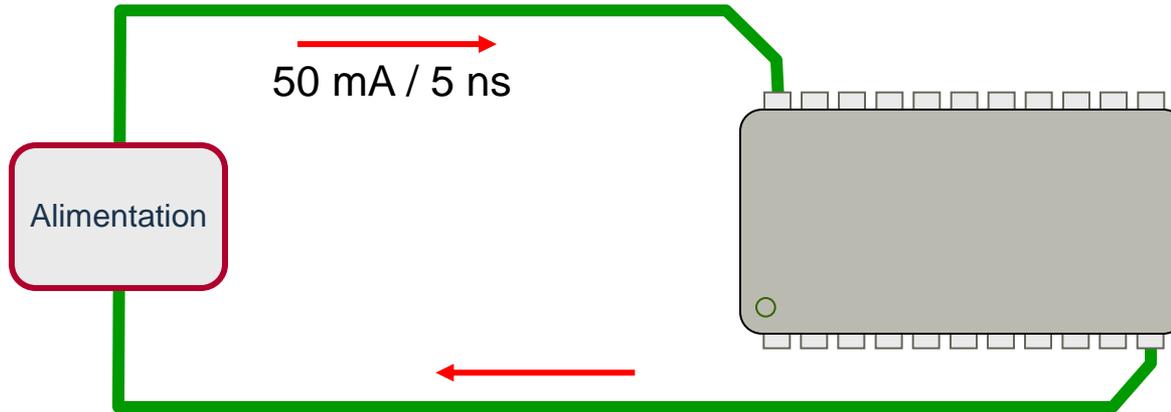


Self Inductance d'une piste de circuit imprimé





- ▶ **L'impédance d'un connecteur est donnée par :**
 - La résistance de chaque broche.
 - La self d'une broche avoisine 20 nH
 - Prendre en compte la self de la fente soit environ 1 nH/cm



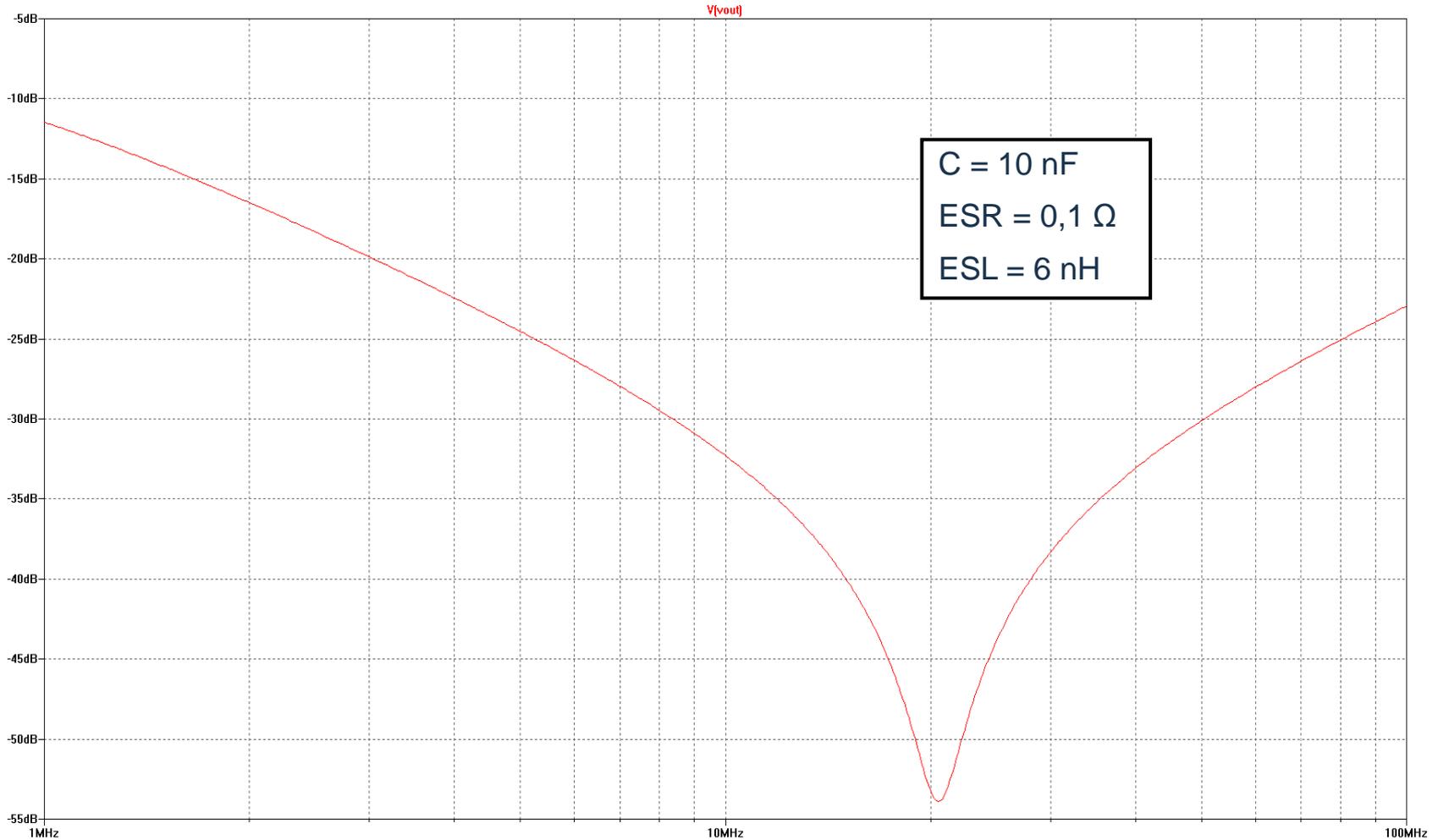
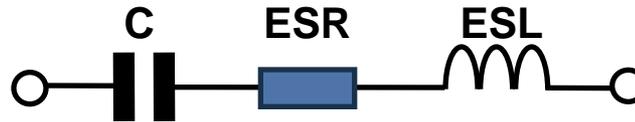
Longueur totale de la piste d'alimentation : 5 cm

$$U_{\text{boitier}} = L \times \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

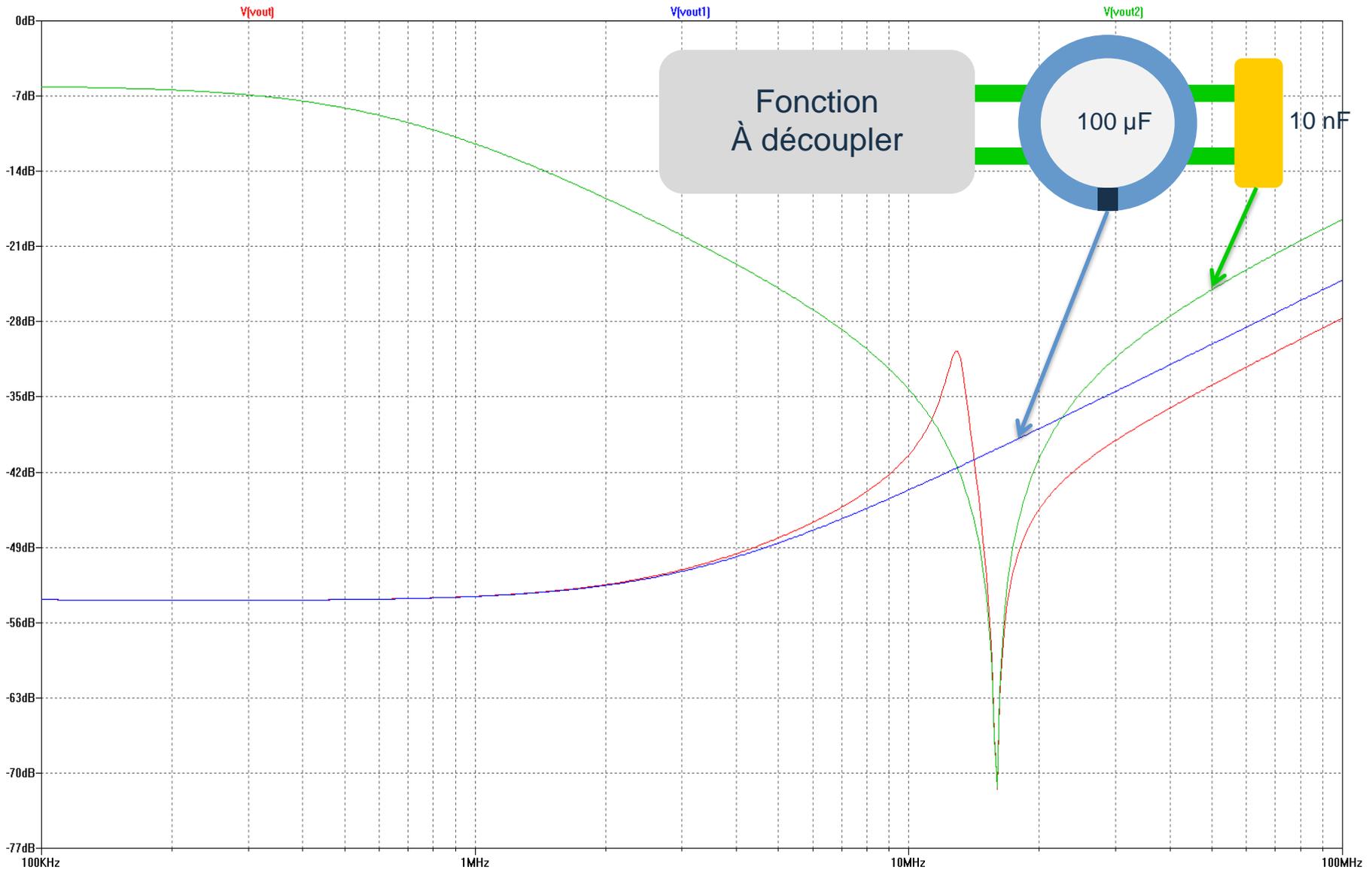
$$U_{\text{boitier}} = 5 \times 10^{-9} \times \frac{50 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-9}}$$

$$U_{\text{boitier}} = 500 \text{ mV}$$

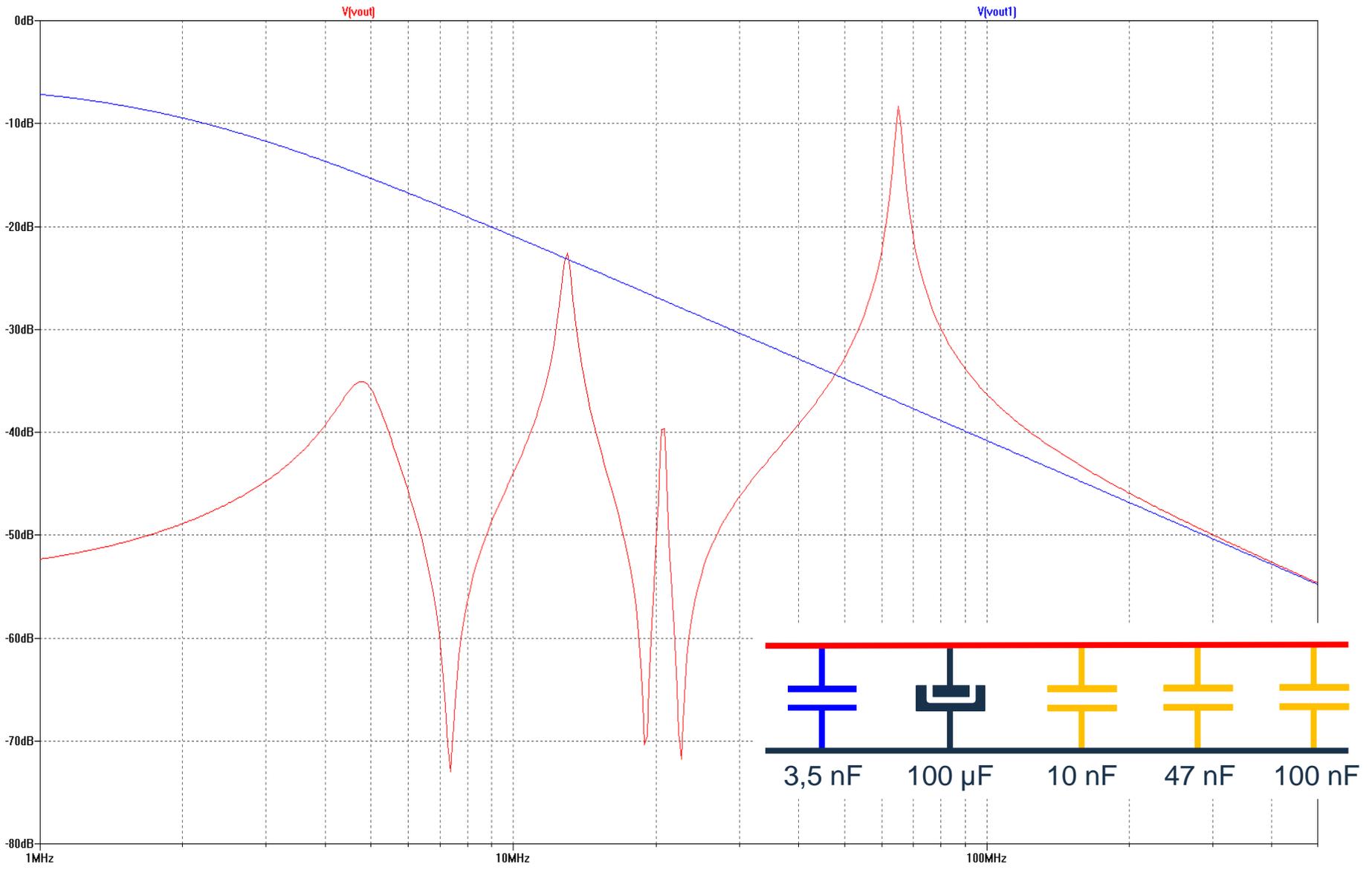
Impédance d'un condensateur



Mise en parallèle de condensateurs de découplage



Découplage d'une carte multicouche

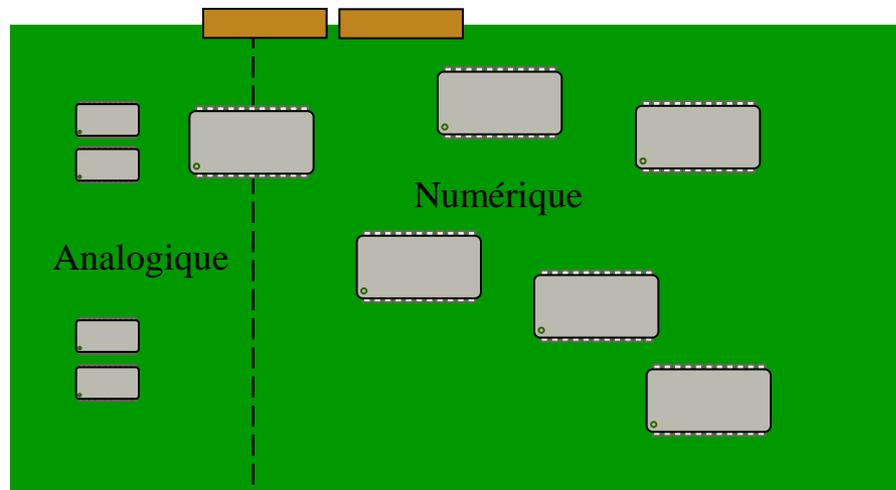


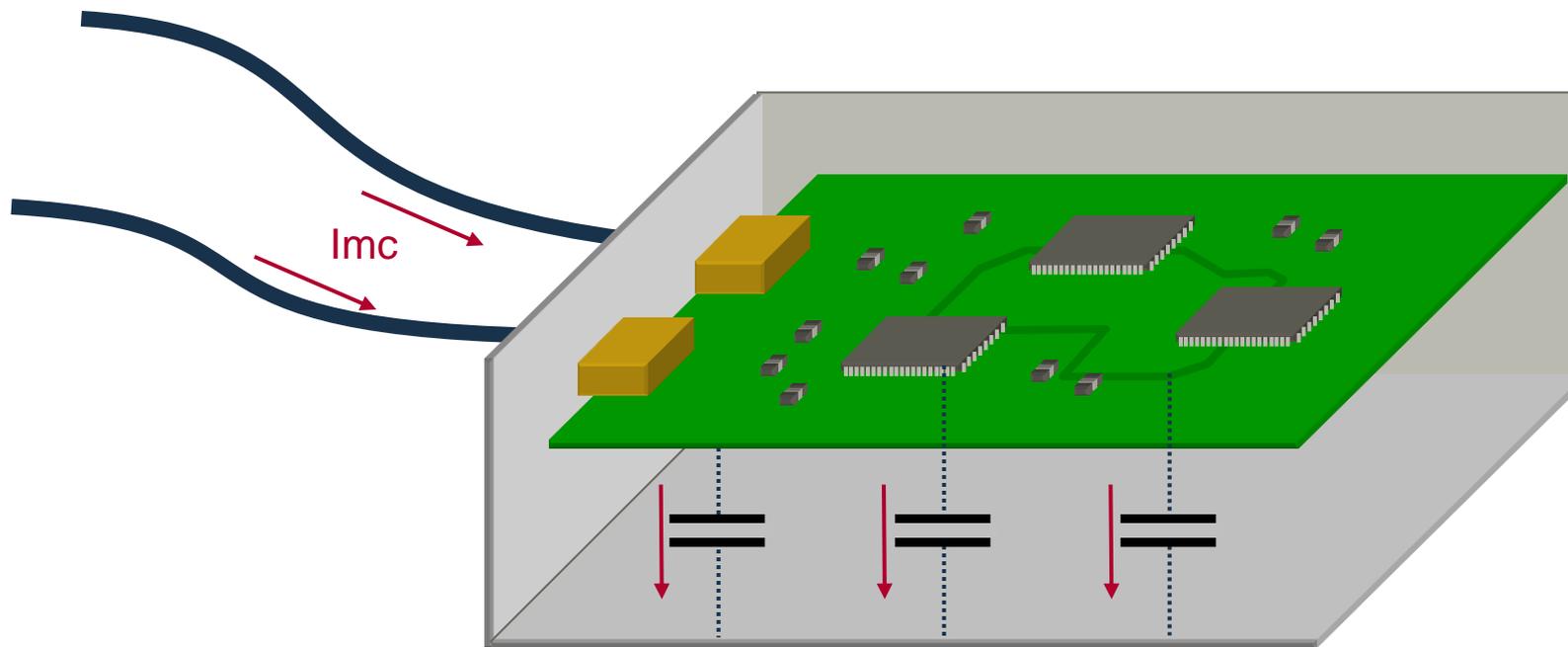
► Placement des composants

- Séparation des parties analogiques et numériques
- Placer si possible la zone analogique sur un côté de la carte
- Placer les connecteurs d'alimentation dans la zone « sale »

► Gestion des masses

- Utiliser un plan de masse **UNIQUE** analogique / numérique
- Eviter toute mise en œuvre introduisant une séparation des masses ou des fentes dans la plan de masse





► Effet :

- Immunité
- Rayonnement

► Capacité parasite d'une carte :

- Capacité d'un condensateur plan lorsque la carte est proche de son environnement

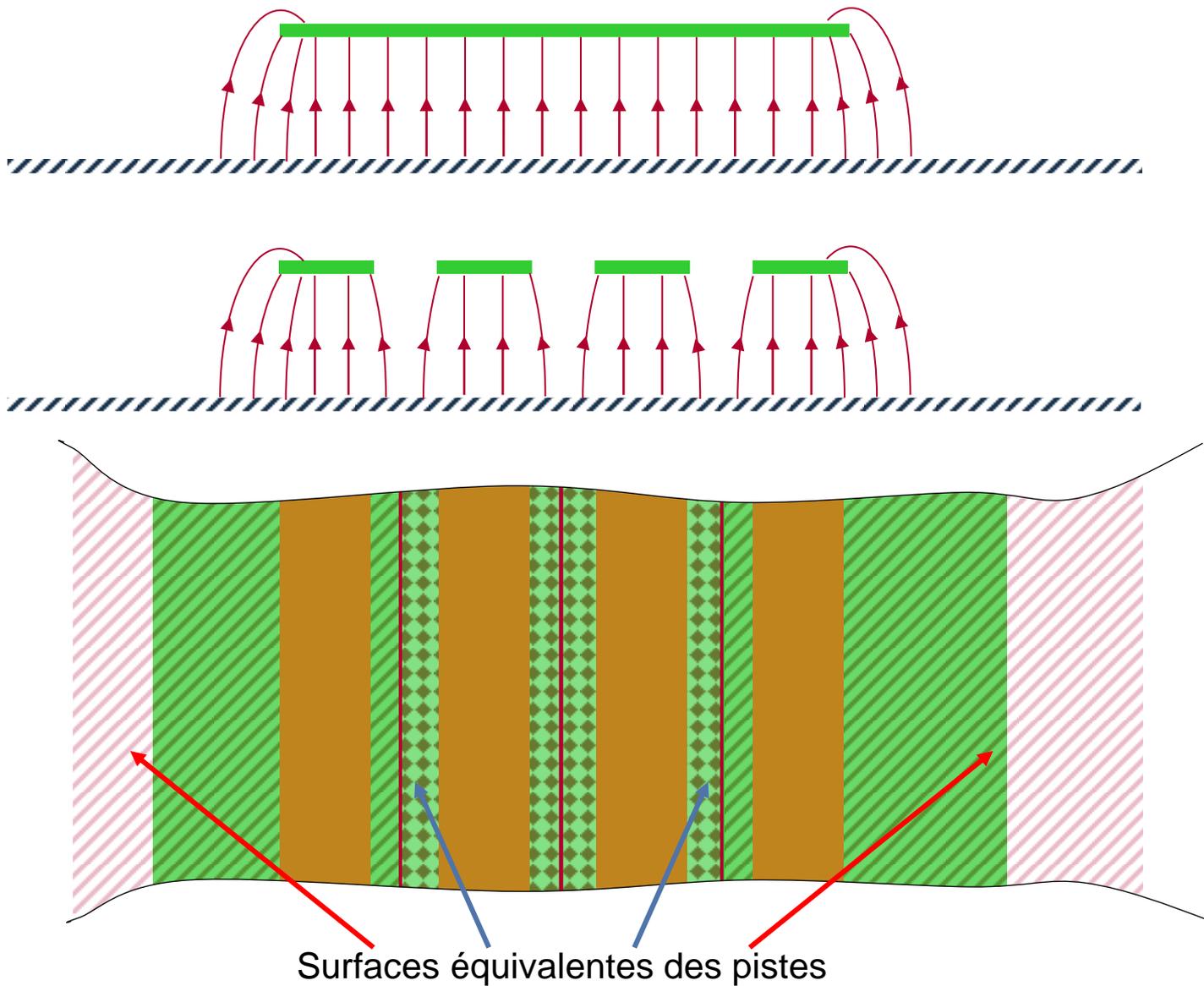
$$C_{pF} = 8,85 \cdot 10^{-2} \times \frac{S_{\text{cm}^2}}{h_{\text{cm}}}$$

- Capacité intrinsèque du disque équivalent lorsque la carte est éloigné des structures conductrices environnantes

$$C_{pF} = 0,35 \times D_{\text{cm}}$$

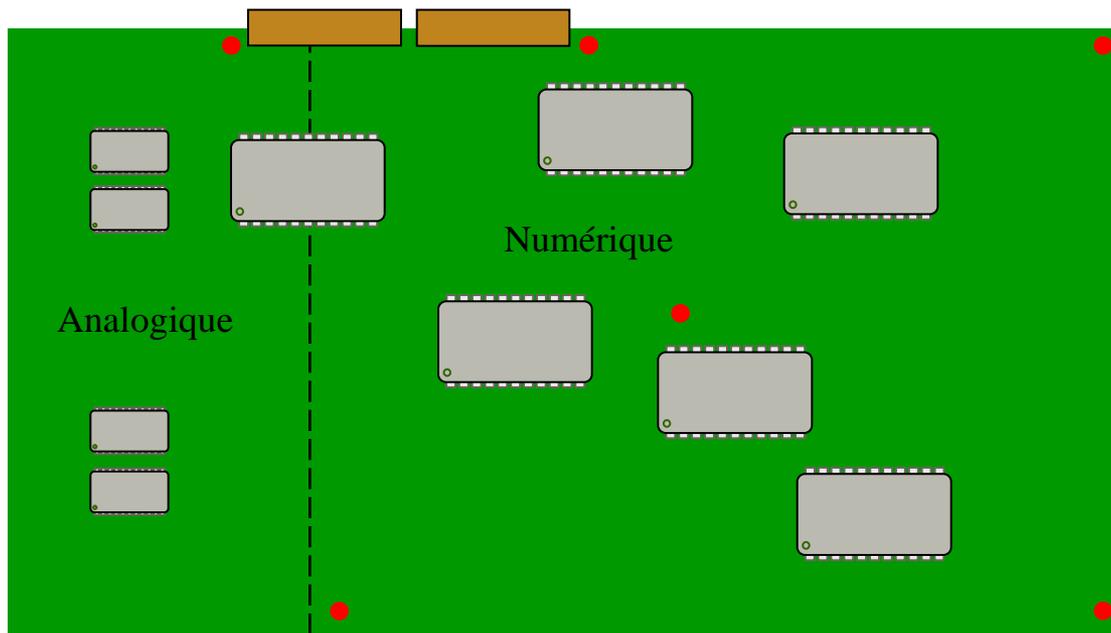
S : surface de la carte - h : hauteur entre la carte et l'environnement - D : Diamètre équivalent de la carte

Capacité parasite des pistes



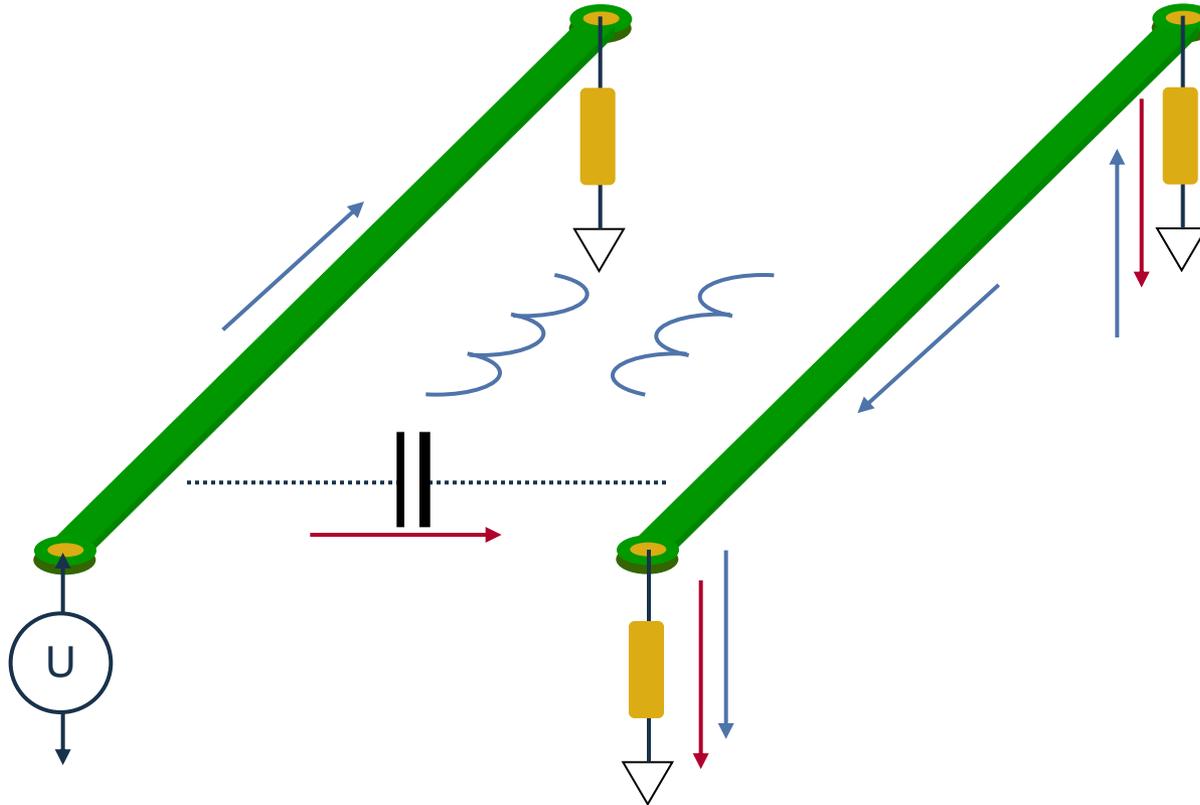
► Réduction des capacités parasites :

- Identification des pistes sensibles
- Maîtrise du placement et routage des zones sensibles
- Raccordement du 0 V au châssis

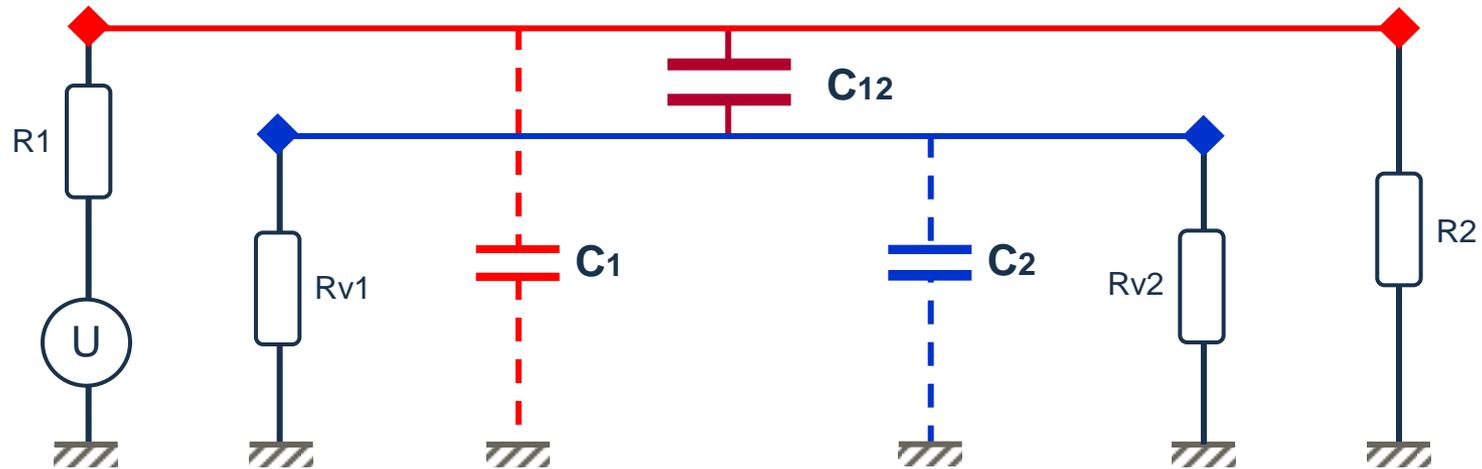


- Raccordement aux coins de la carte
- Raccordement intermédiaire si la distance entre points > 10 cm
- Raccordement de part et d'autre des connecteurs
- Raccordement au niveau de la zone chaude (émission)
- Attention aux raccordements côté analogique

Diaphonie piste à piste



Diaphonie capacitive : Principe de calcul

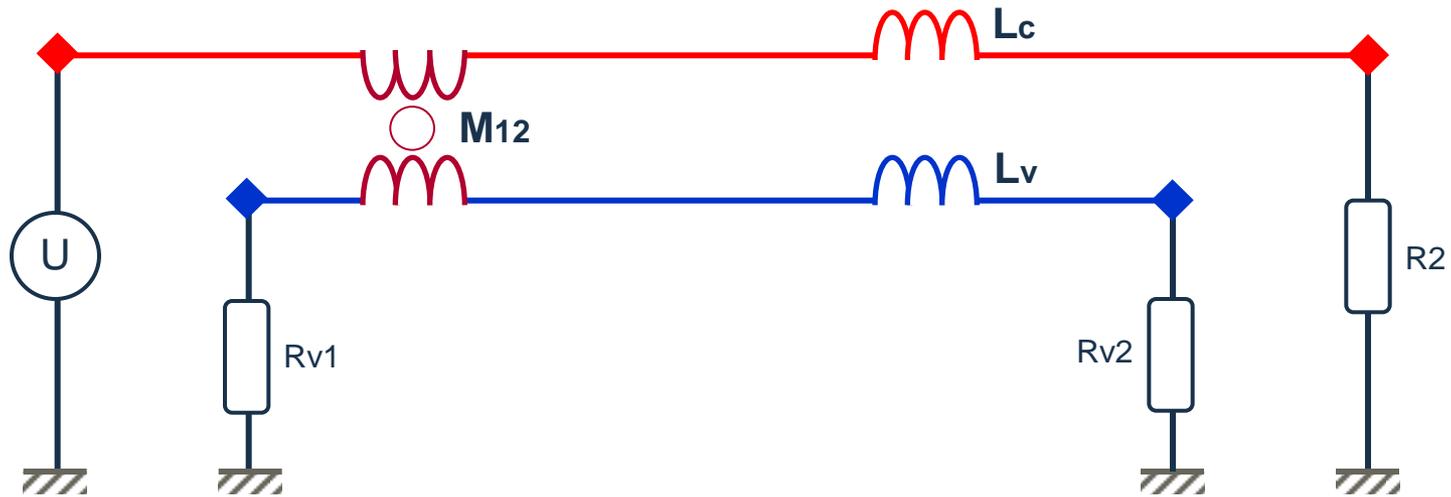


$$D(\text{dB}) \approx 20 \times \log(2 \times \pi \times f \times R_v \times C_{12})$$

$$R_v \approx \frac{R_{v1} \times R_{v2}}{R_{v1} + R_{v2}}$$

$$D_{\text{max}}(\text{dB}) \approx 20 \times \log\left(\frac{C_2}{C_{12} + C_2}\right)$$

Diaphonie inductive : Principe de calcul



Côté Rv1

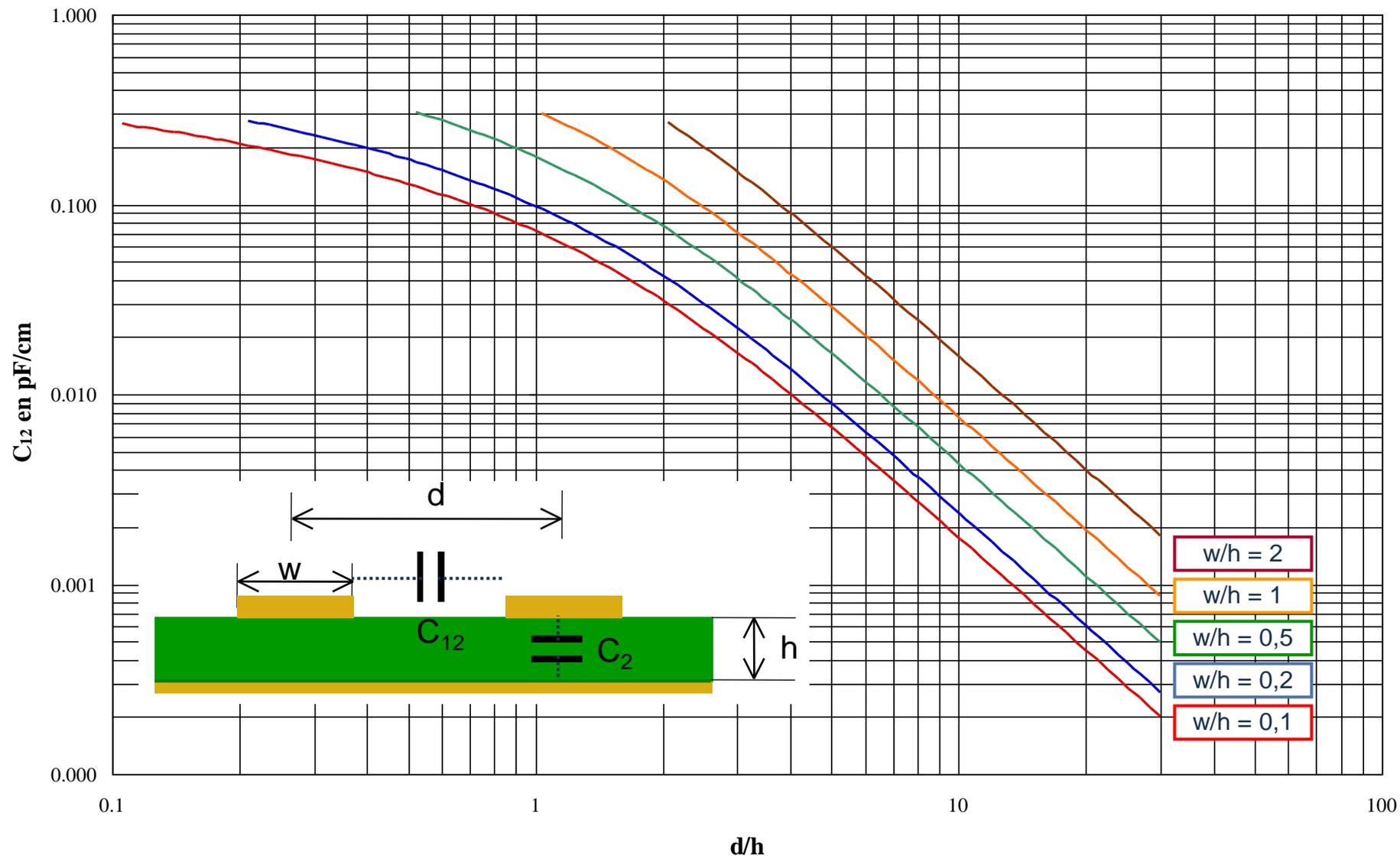
$$D(\text{dB}) \approx 20 \times \log \left(\frac{M_{12} \times 2 \times \pi \times f}{R_c} \times \left(\frac{R_{v1}}{R_{v1} + R_{v2}} \right) \right)$$

Côté Rv2

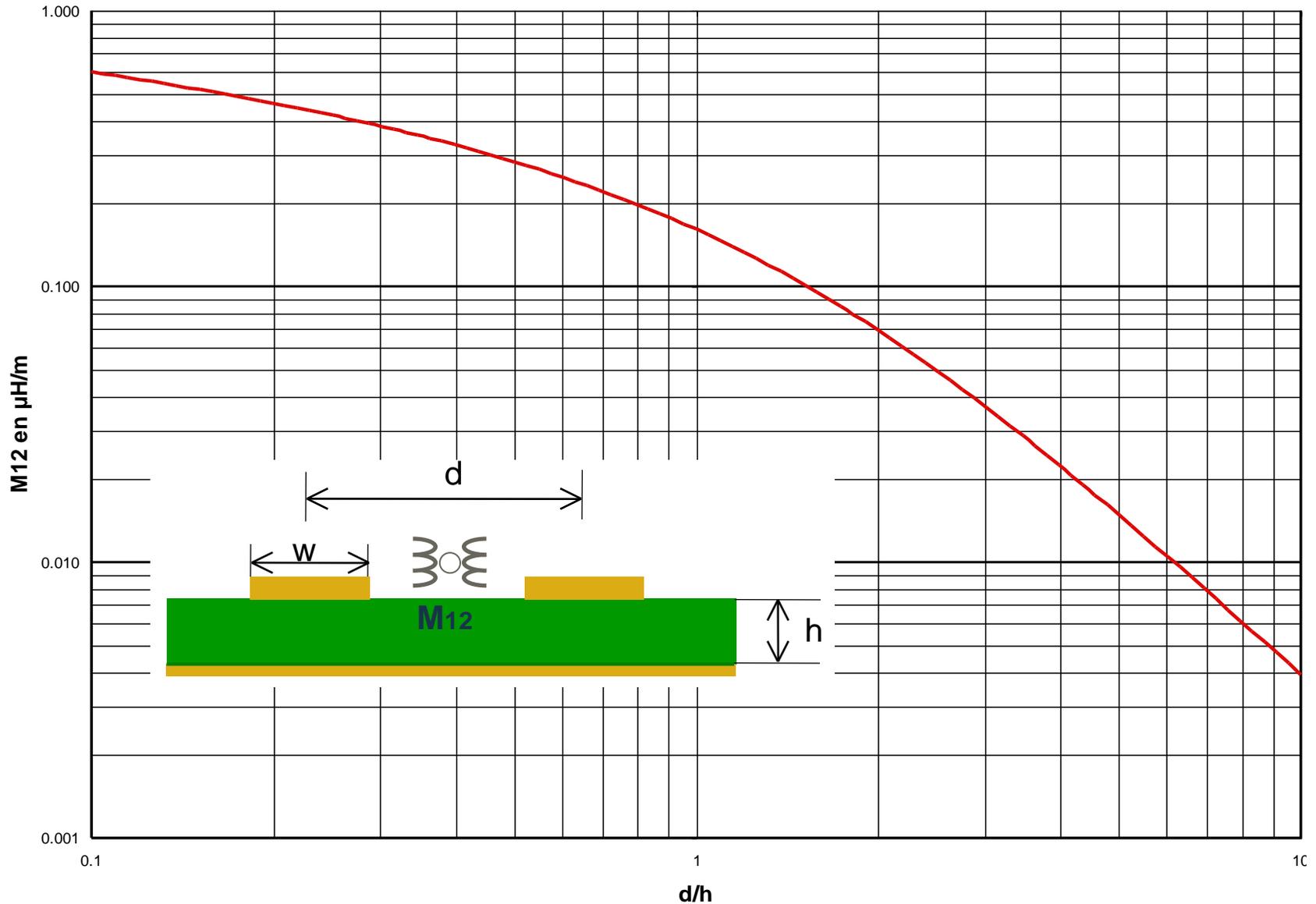
$$D(\text{dB}) \approx 20 \times \log \left(\frac{M_{12} \times 2 \times \pi \times f}{R_c} \times \left(\frac{R_{v2}}{R_{v1} + R_{v2}} \right) \right)$$

$$D_{\text{max}}(\text{dB}) \approx 20 \times \log \left(\frac{M_{12}}{L_c} \right)$$

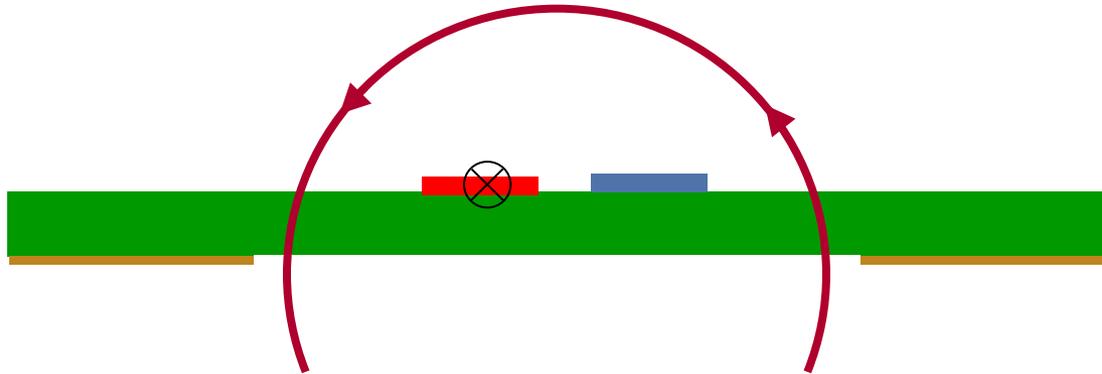
Capacité de couplage – Configuration microstrip



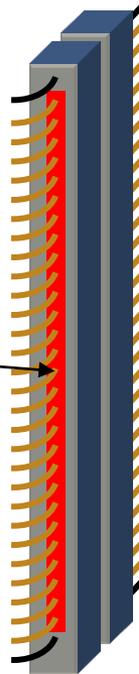
Mutuelle Inductance – Configuration microstrip



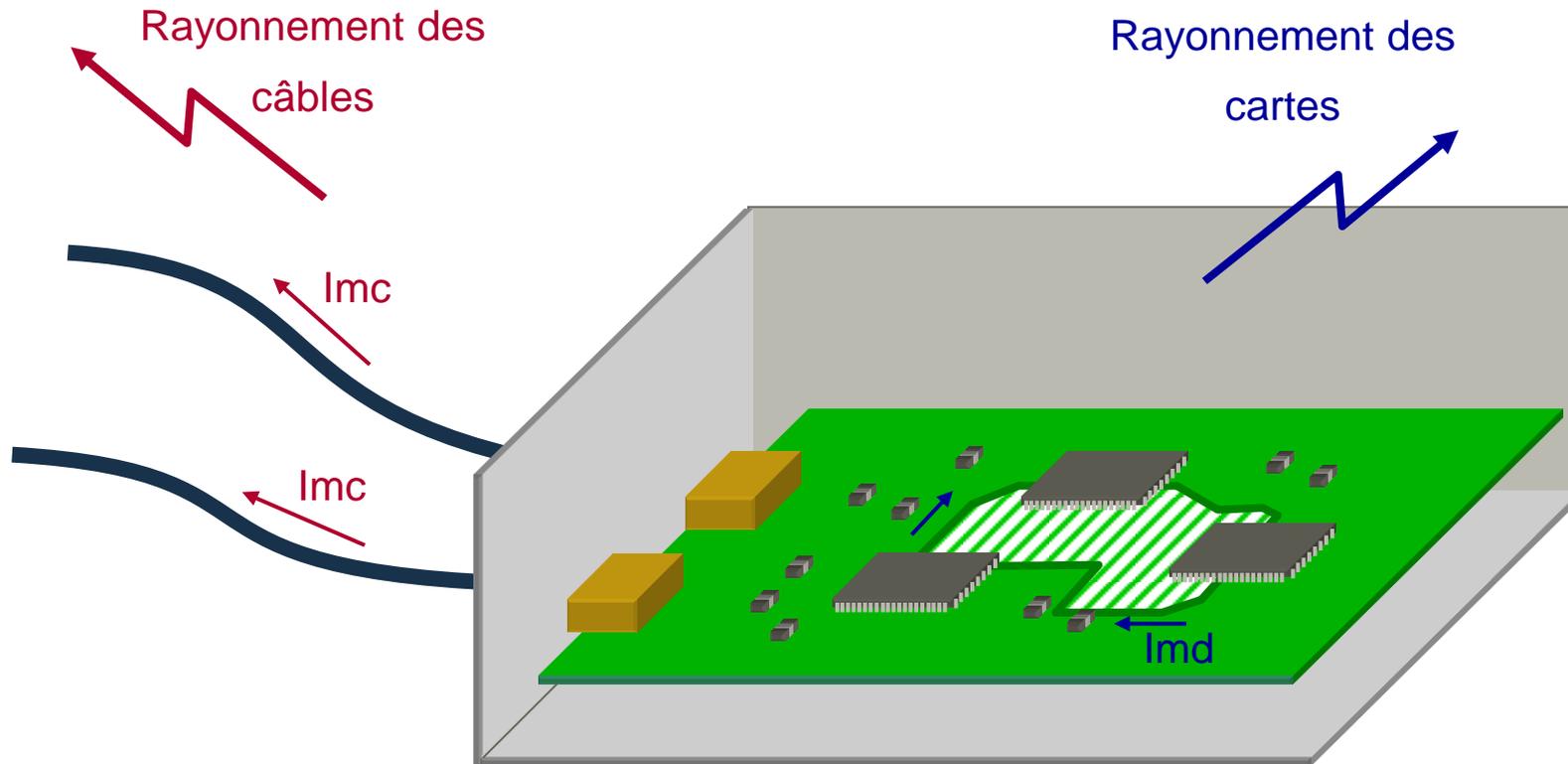
Diaphonie au dessus d'une fente



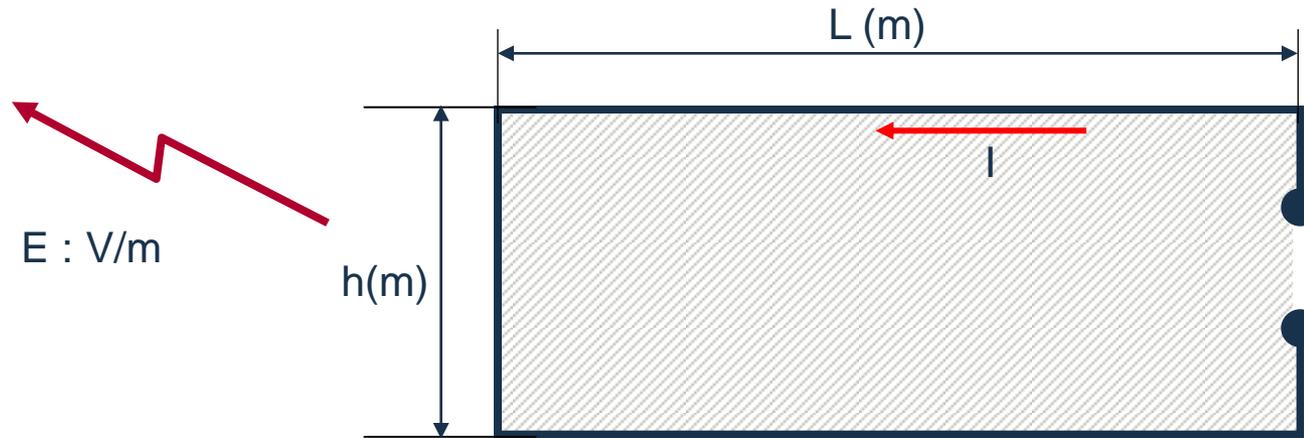
Fente dans le connecteur



Sources d'émission en rayonnement



Calcul du rayonnement d'une boucle



- Si $L < \lambda/4$ et $h < \lambda/4$

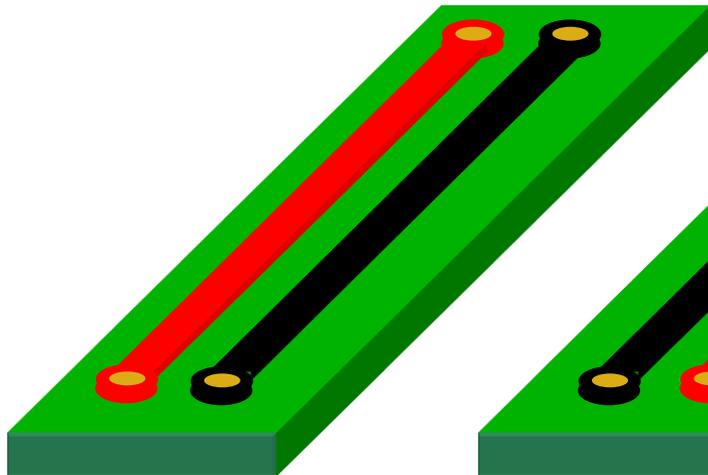
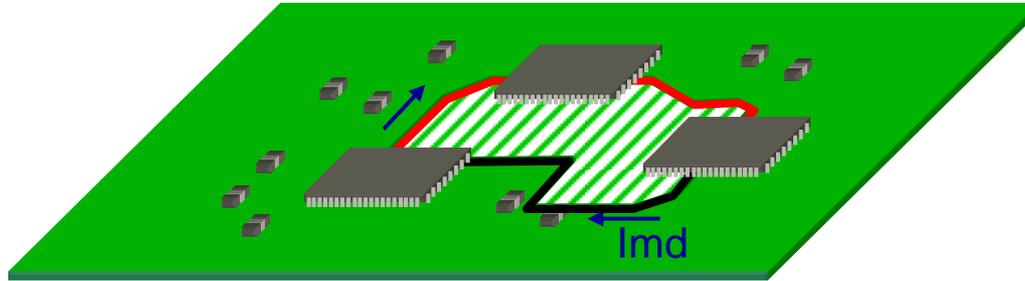
$$E_{v/m} = \frac{0,013 \times L \times h \times I_A \times F_{\text{MHz}}^2}{D_m}$$

- Si $L > \lambda/4$

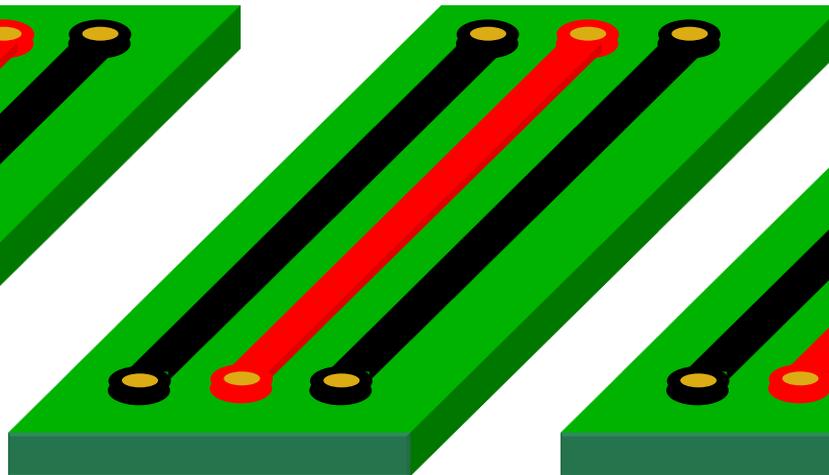
$$E_{v/m} = \frac{3,9 \times h \times I_A \times F_{\text{MHz}}}{D_m}$$

Formule applicable en champ lointain : $D > \lambda/2.\pi$ soit $D > 48/F_{\text{MHz}}$

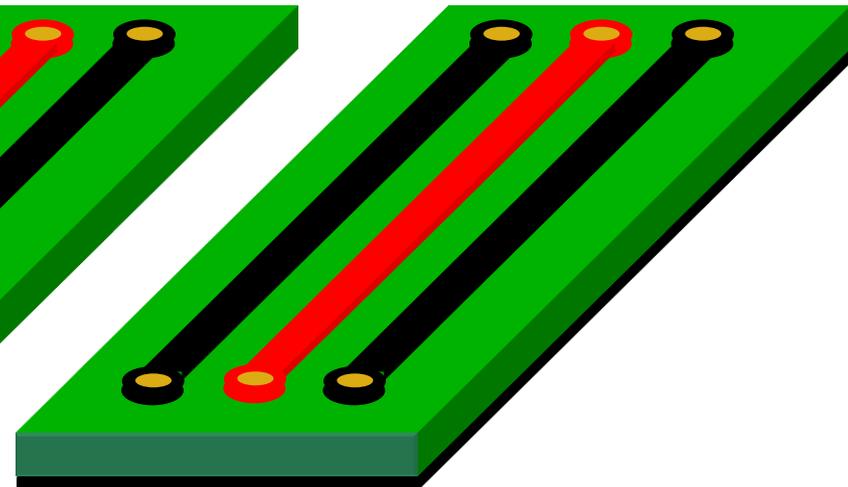
Distribution et routages des horloges



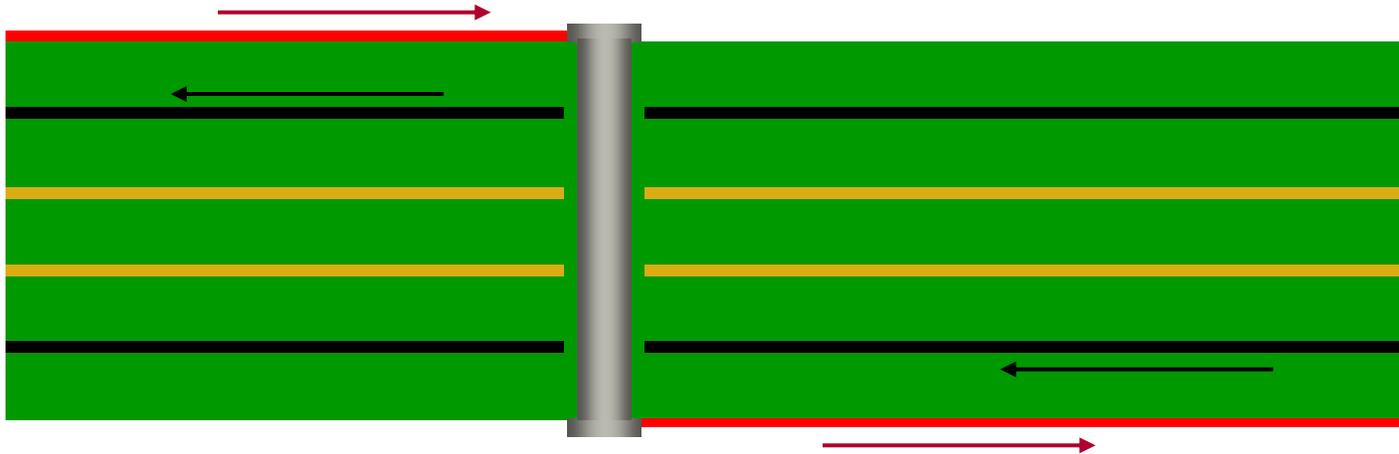
Moyen



Bon



Préférable



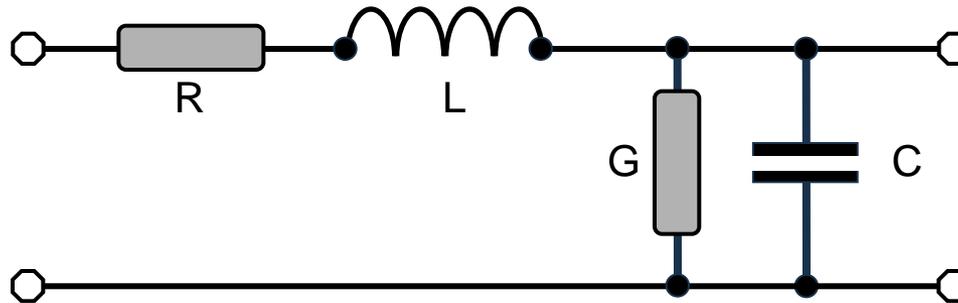
► Routage des pistes d'horloge :

- Placer systématiquement une piste de masse à proximité de la piste d'horloge
- Préférer encadrer la piste d'horloge par des pistes de masse, même dans le cas avec plan de masse
- Ne jamais enjamber une fente avec la piste d'horloge
- Attention au retour du courant dans le cas d'un changement de couche avec une piste d'horloge
- Ne jamais mettre de piste en bord de carte



Intégrité du signal

Lignes de transmission - Définitions



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

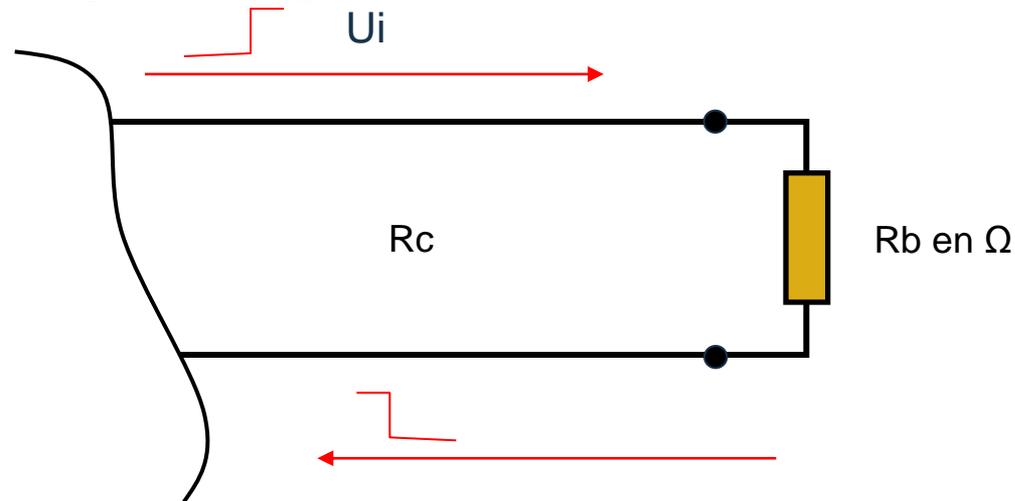
► Propagation dans une ligne sans perte :

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

$$v = \sqrt{\frac{1}{L.C}}$$

Ligne de transmission – Réflexion

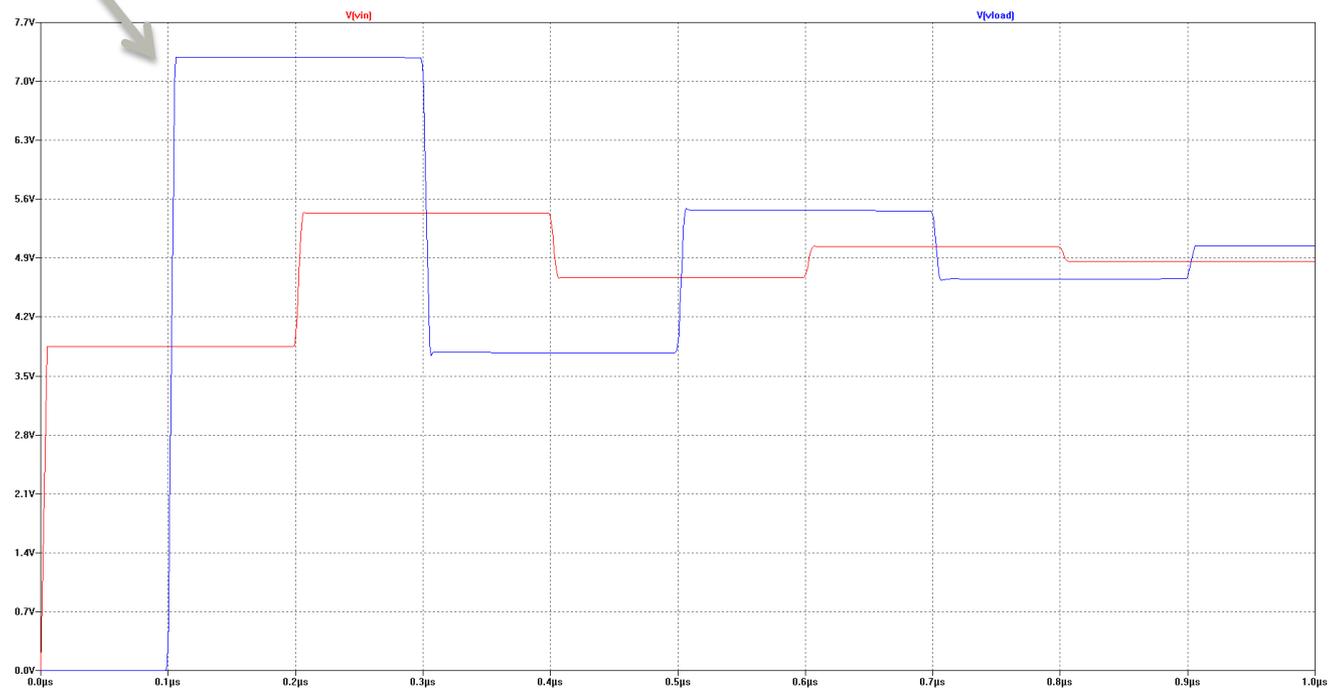
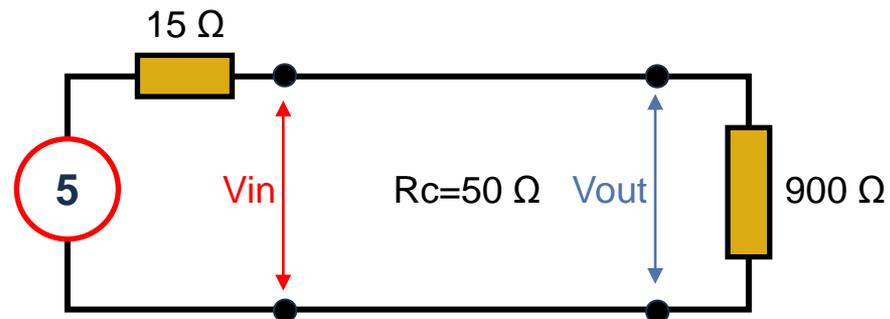
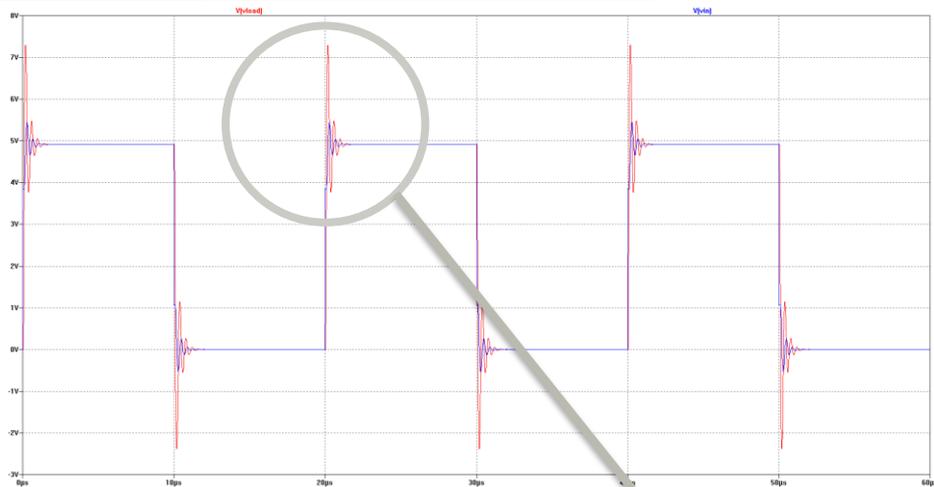
- Propagation le long d'une ligne non adaptée :



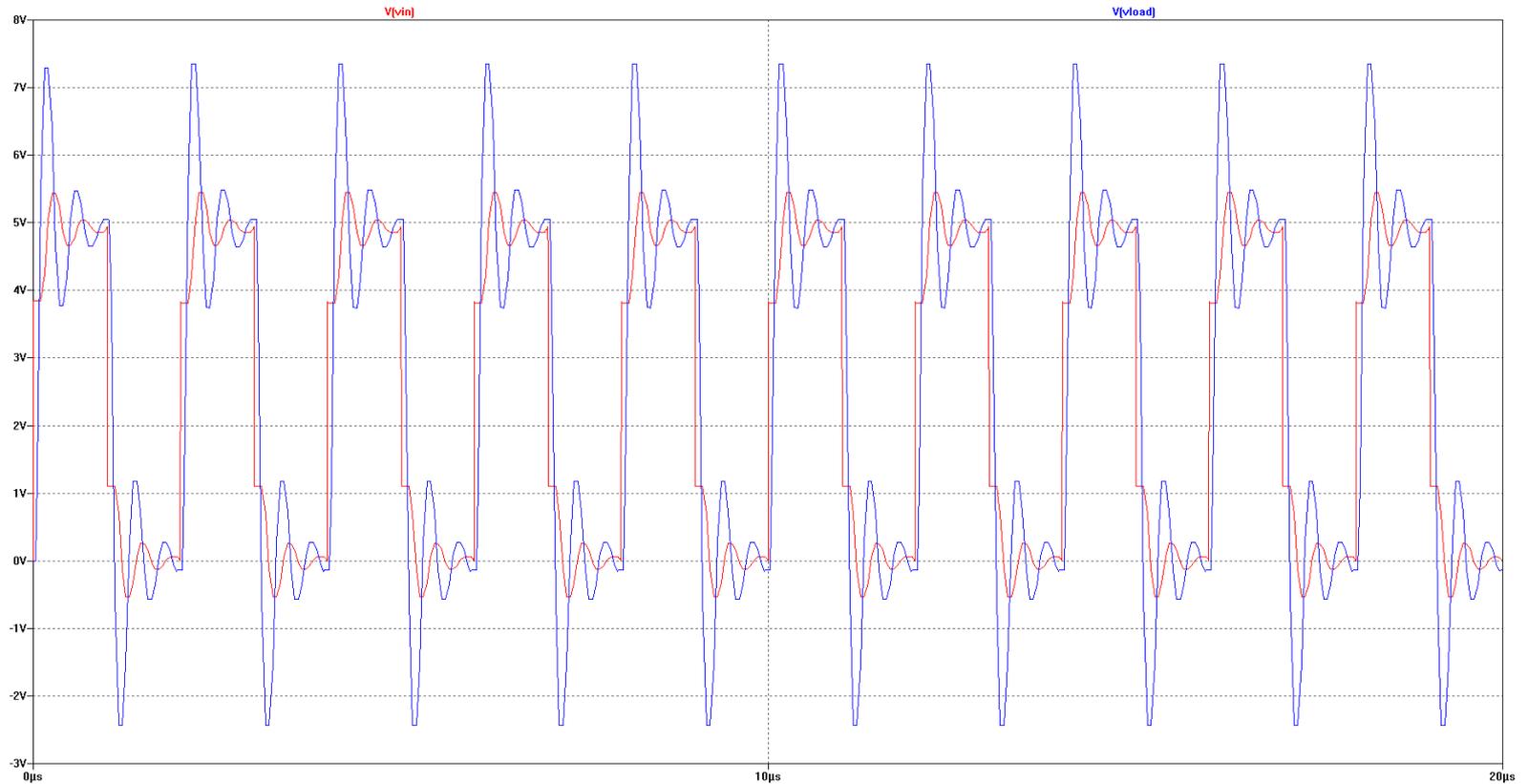
$$R = \frac{R_b - R_c}{R_b + R_c}$$

$$U_r = U_i \times R$$

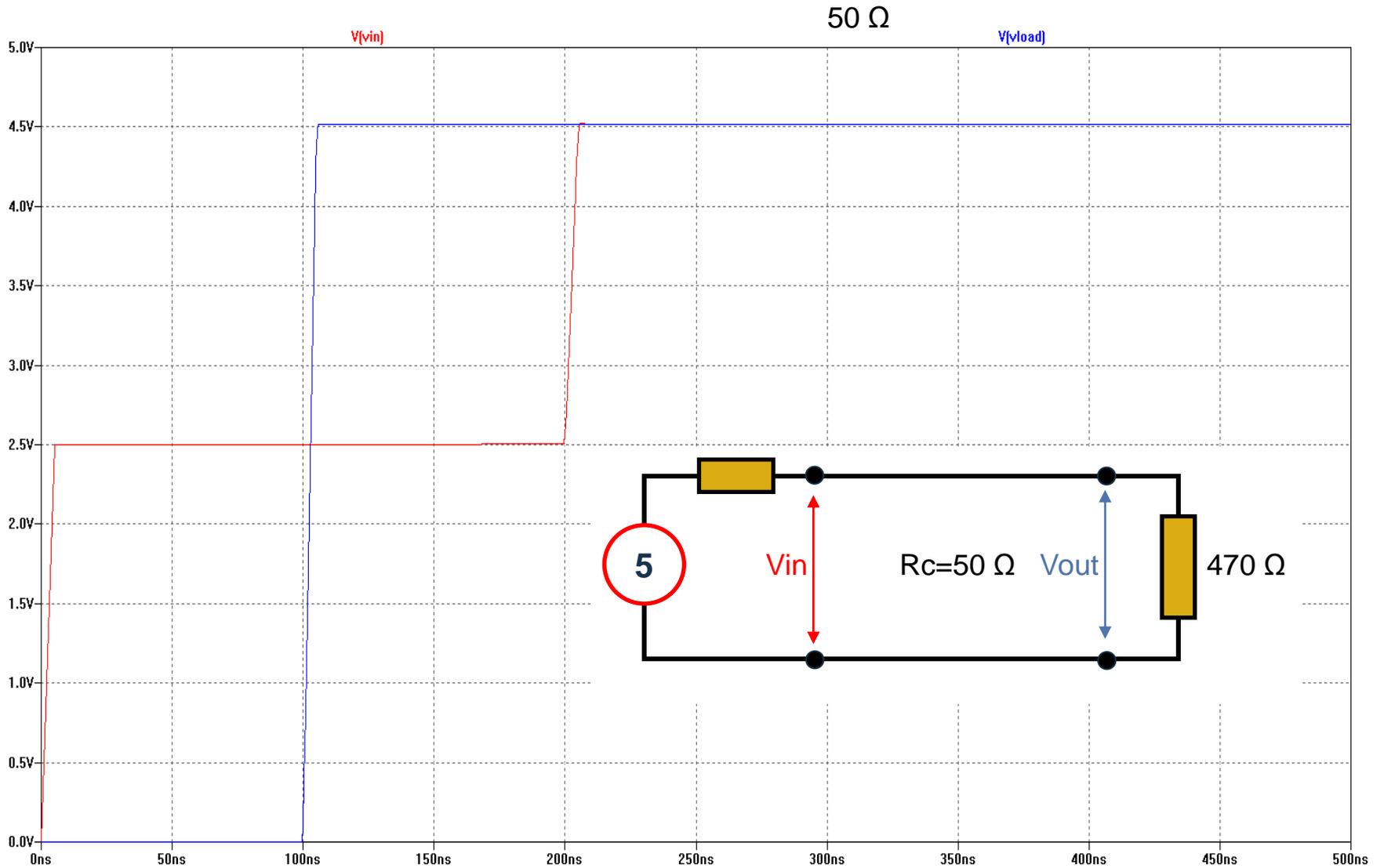
Ligne de transmission – Forme des signaux



Ligne de transmission – Forme des signaux



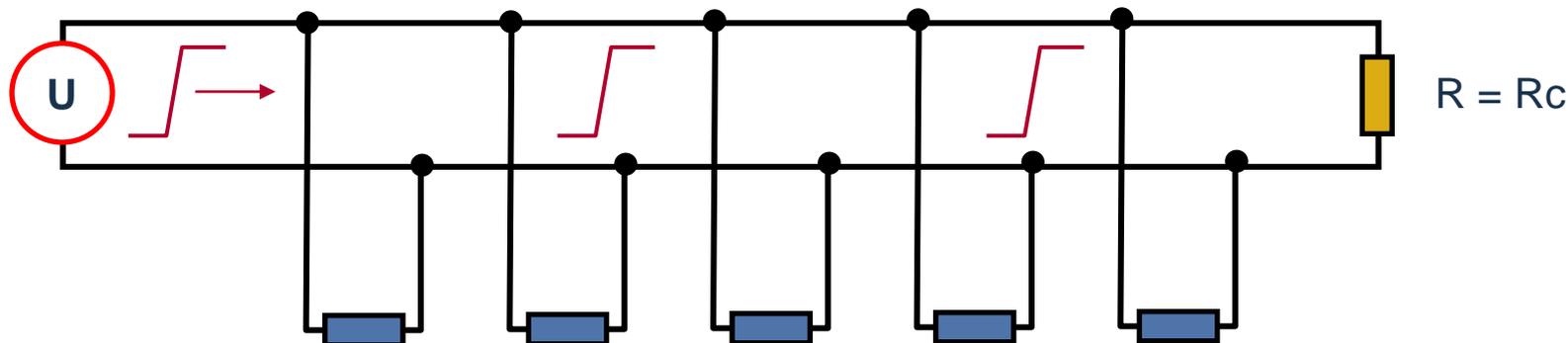
Ligne de transmission – Adaptation série



Différents de type de transmission

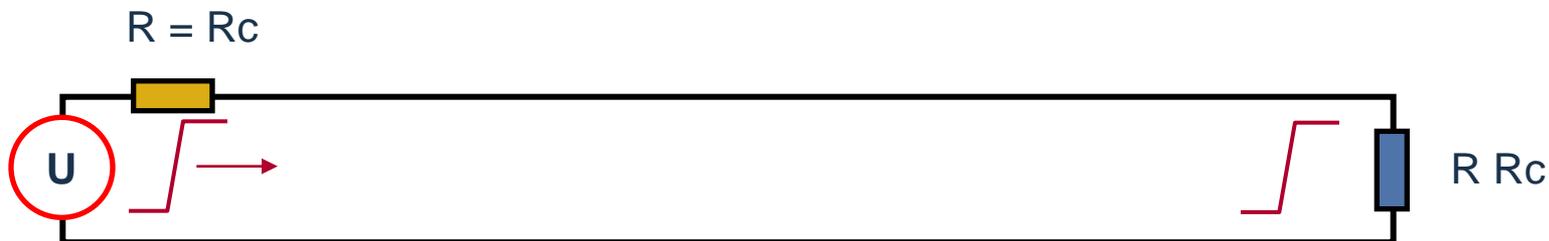
► Liaison multipoints :

- Adaptation parallèle



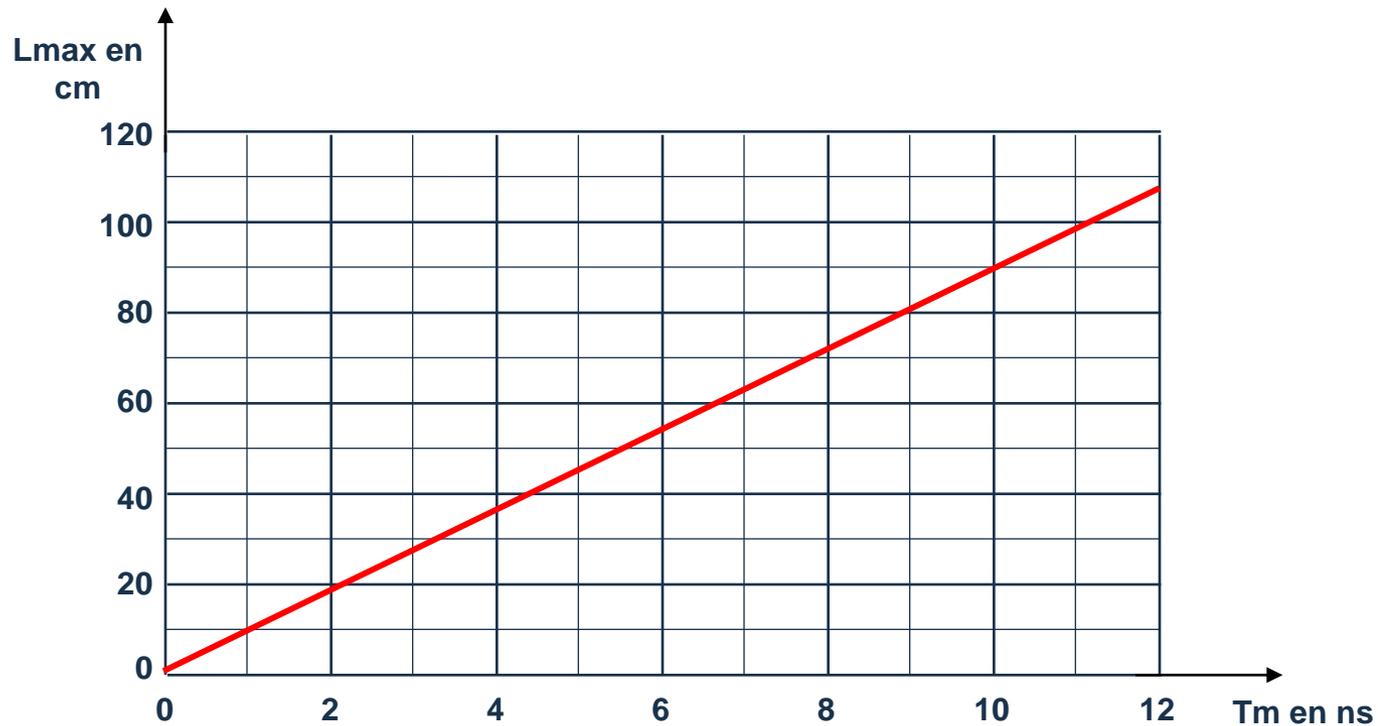
► Liaison point à point :

- Adaptation série



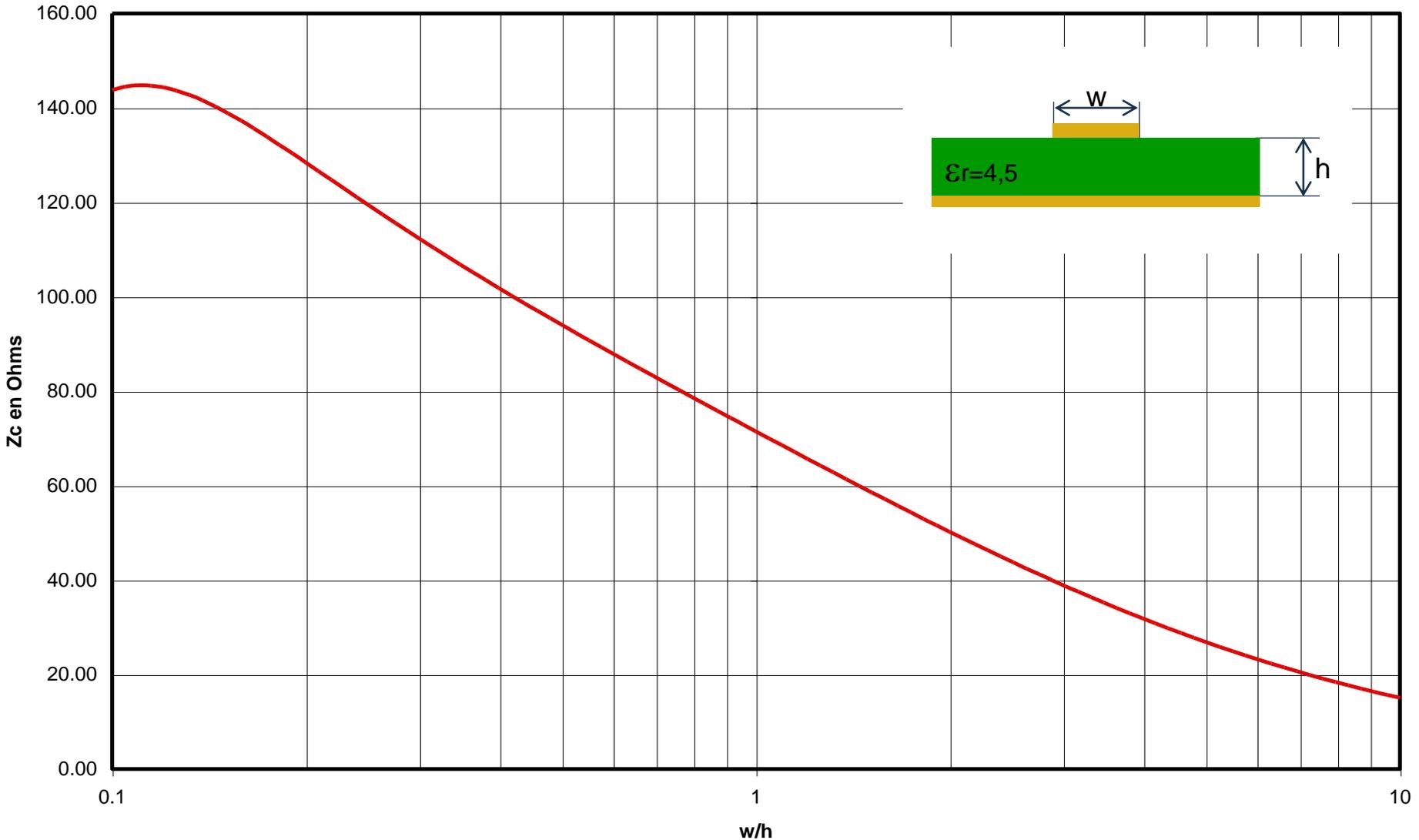
Longueur maximale sans adaptation

- En supposant une vitesse de propagation de $0.6 \cdot c$, la longueur maximale permise pour une ligne non-adaptée est celle pour laquelle le temps de propagation aller-retour est égal au temps de montée du signal.



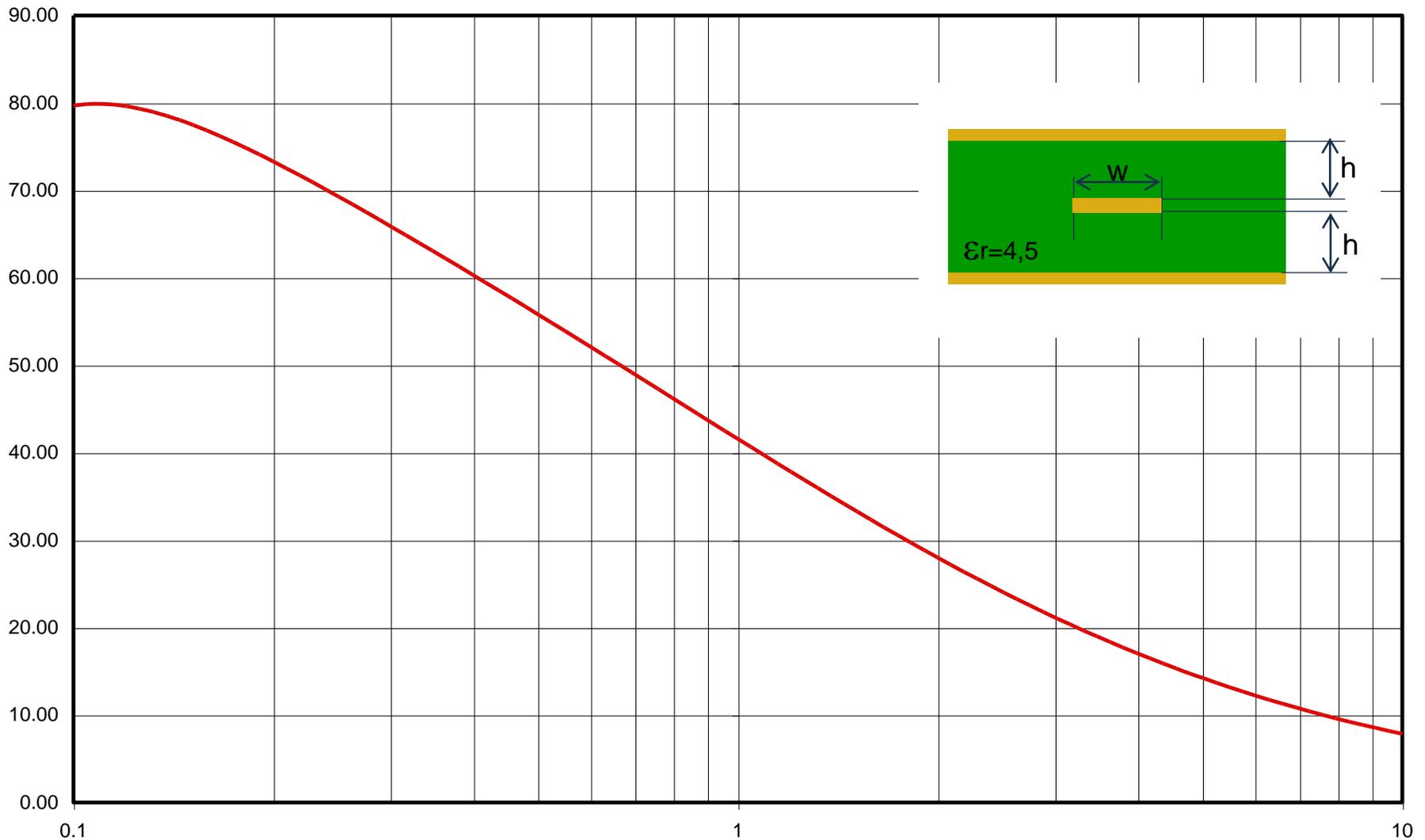
Longueur maximale d'une ligne non-adaptée en fonction du temps de montée des signaux

Impédance caractéristique d'une ligne microstrip



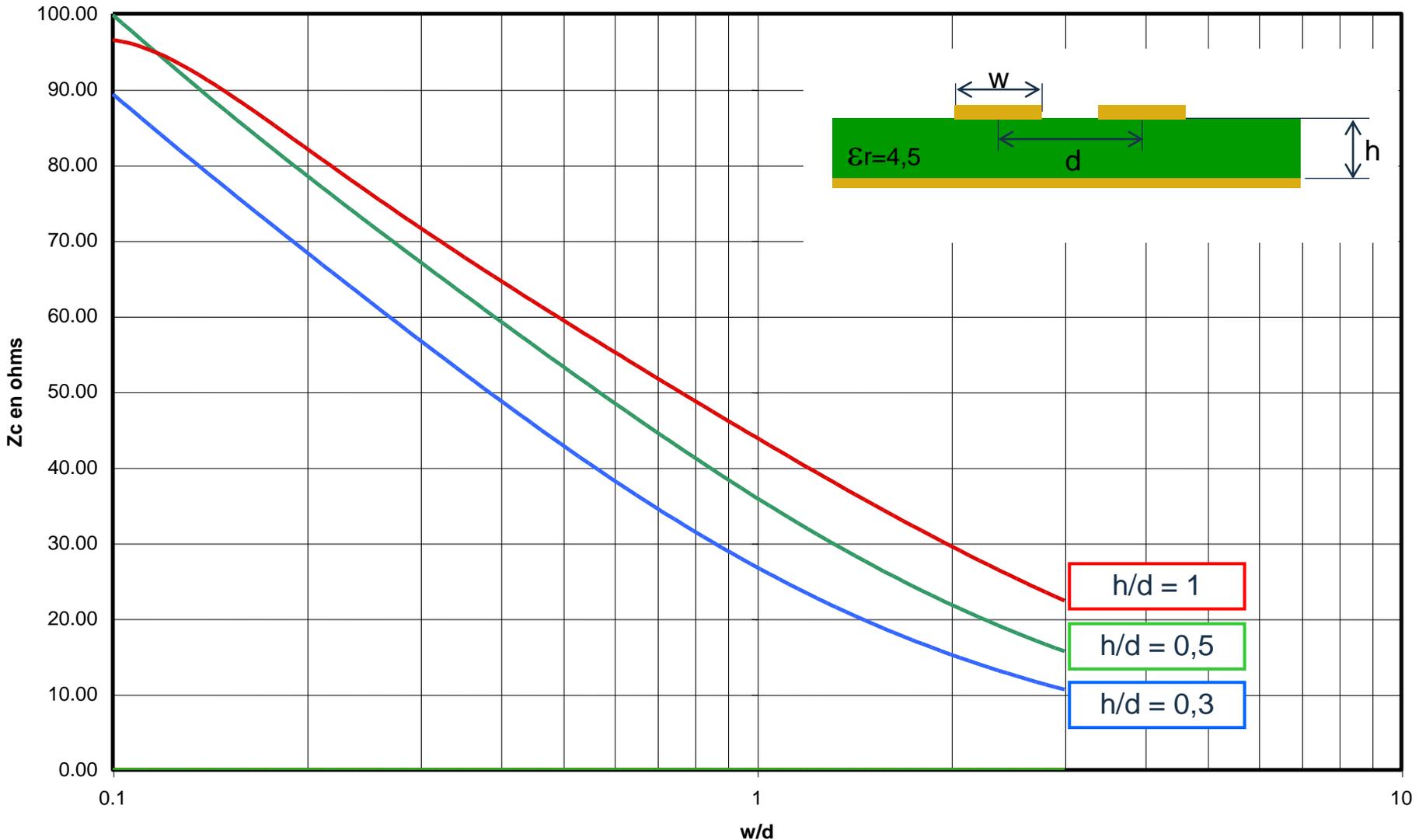
Ref : Capacitance, Inductance and crosstalk analysis – Charles S. Walker

Impédance caractéristique d'une ligne stripline



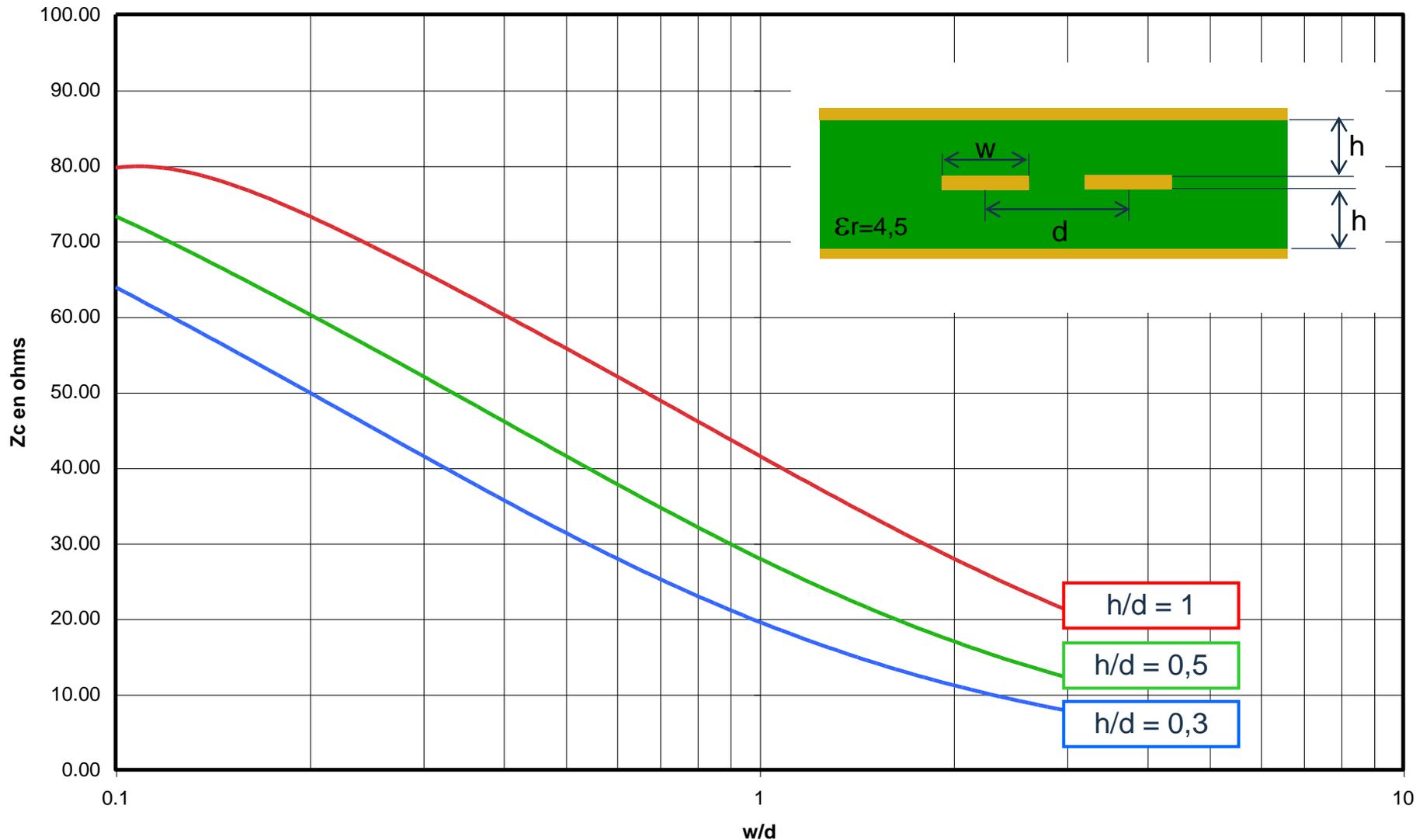
Ref : Capacitance, Inductance and crosstalk analysis – Charles S. Walker

Impédance caractéristique d'une ligne différentielle - Microstrip



Ref : Capacitance, Inductance and crosstalk analysis – Charles S. Walker

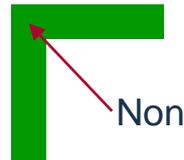
Impédance caractéristique d'une ligne différentielle - Stripline



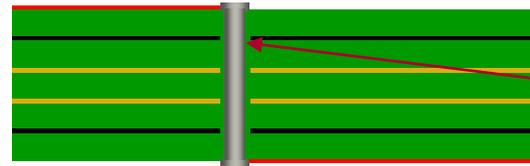
Ref : Capacitance, Inductance and crosstalk analysis – Charles S. Walker

► Rupture d'impédance « Géométrique » :

- Changement de direction

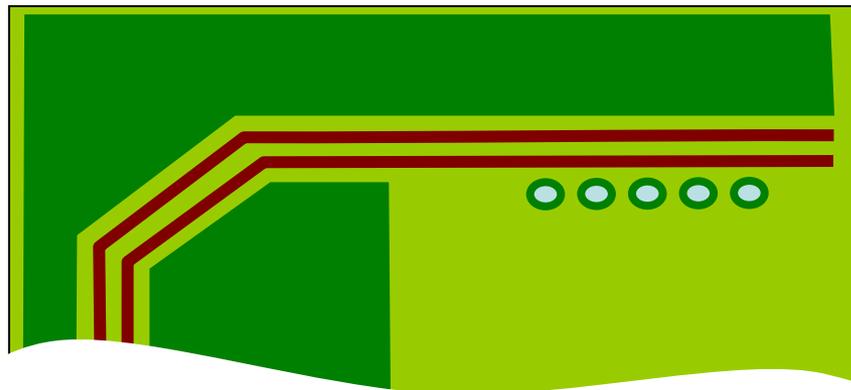


- Trous métallisés



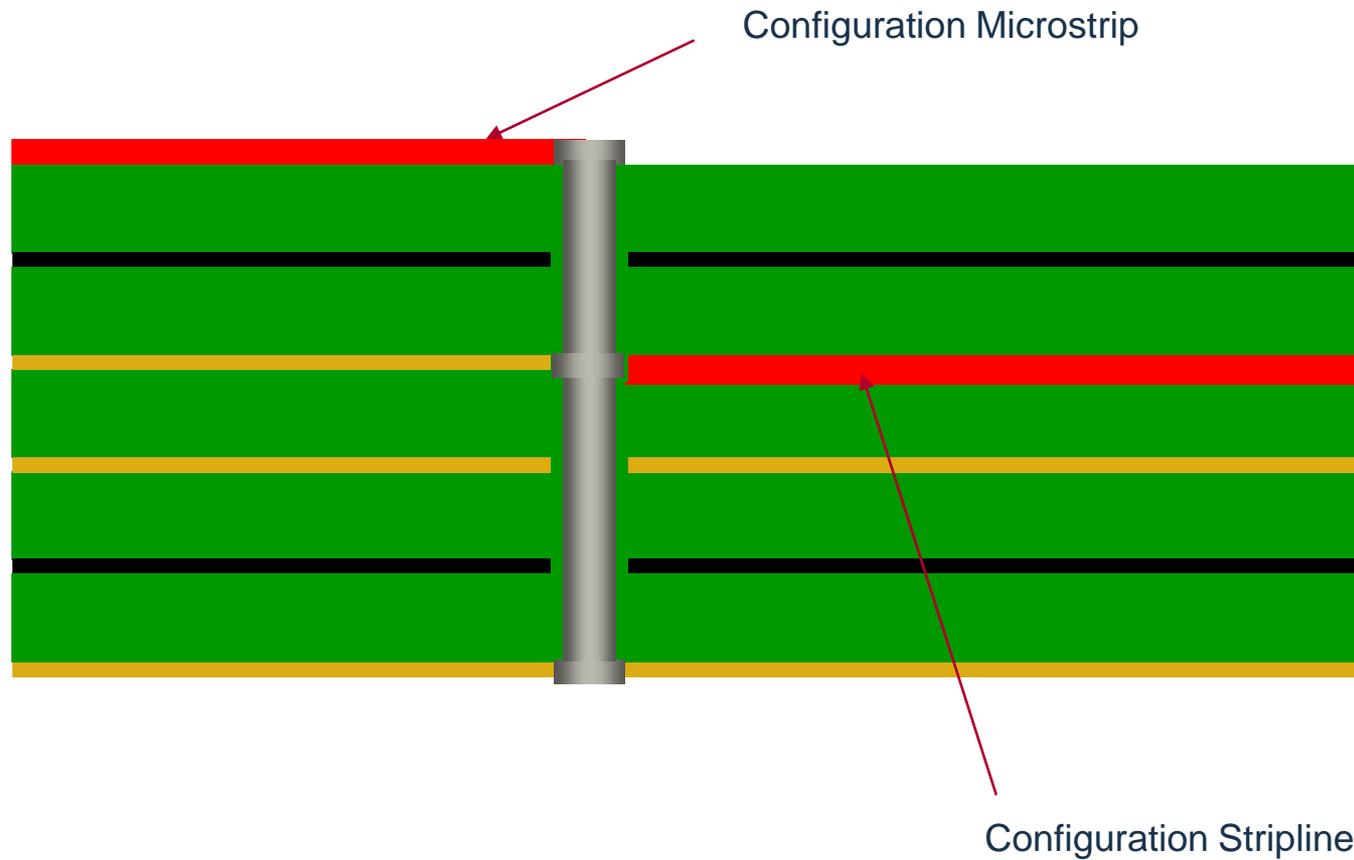
Rupture d'impédance capacitive

► « Influence » éléments externes sur une ligne différentielle

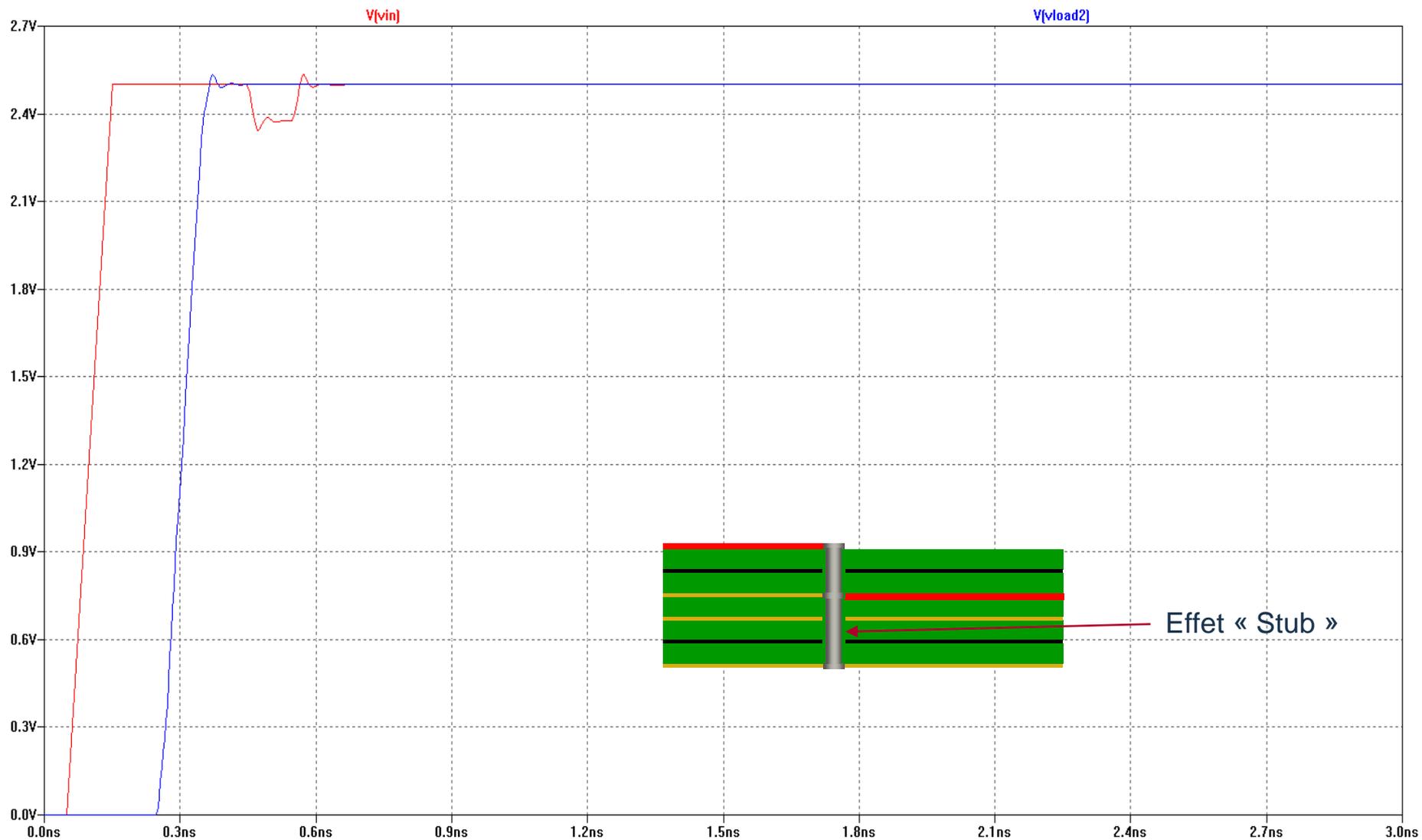


Rupture d'impédance « Structurelle »

► Changement de configuration



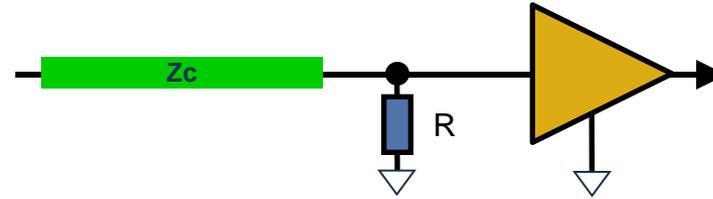
Effet des trous métallisés



Techniques d'adaptation

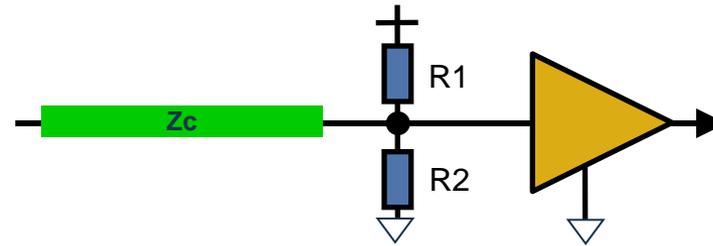
► Adaptation parallèle :

- Adaptation analogique



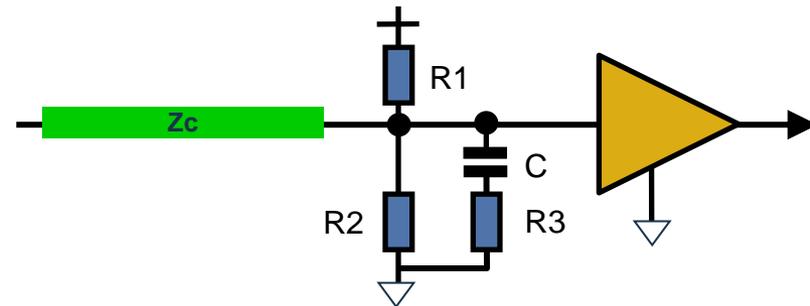
► Liaison asymétrique :

- $R1 // R2 \approx 1,1.Zc$ (-> $2.Zc$)
- $R1 = 220$ & $R2 = 330 \Omega$ (pour une ligne 100Ω)



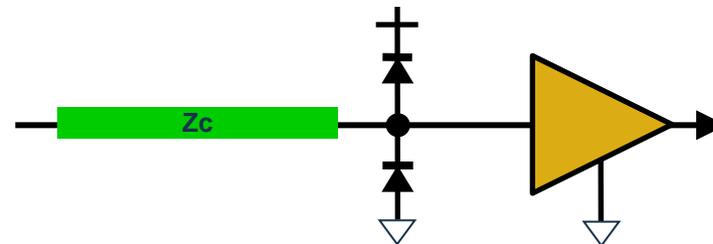
► Adaptation « Dynamique » :

- $R1 // R2 \approx 1,1.Zc$ (-> $2.Zc$)
- TTL: $R1 = 220$ & $R2 = 330 \Omega$

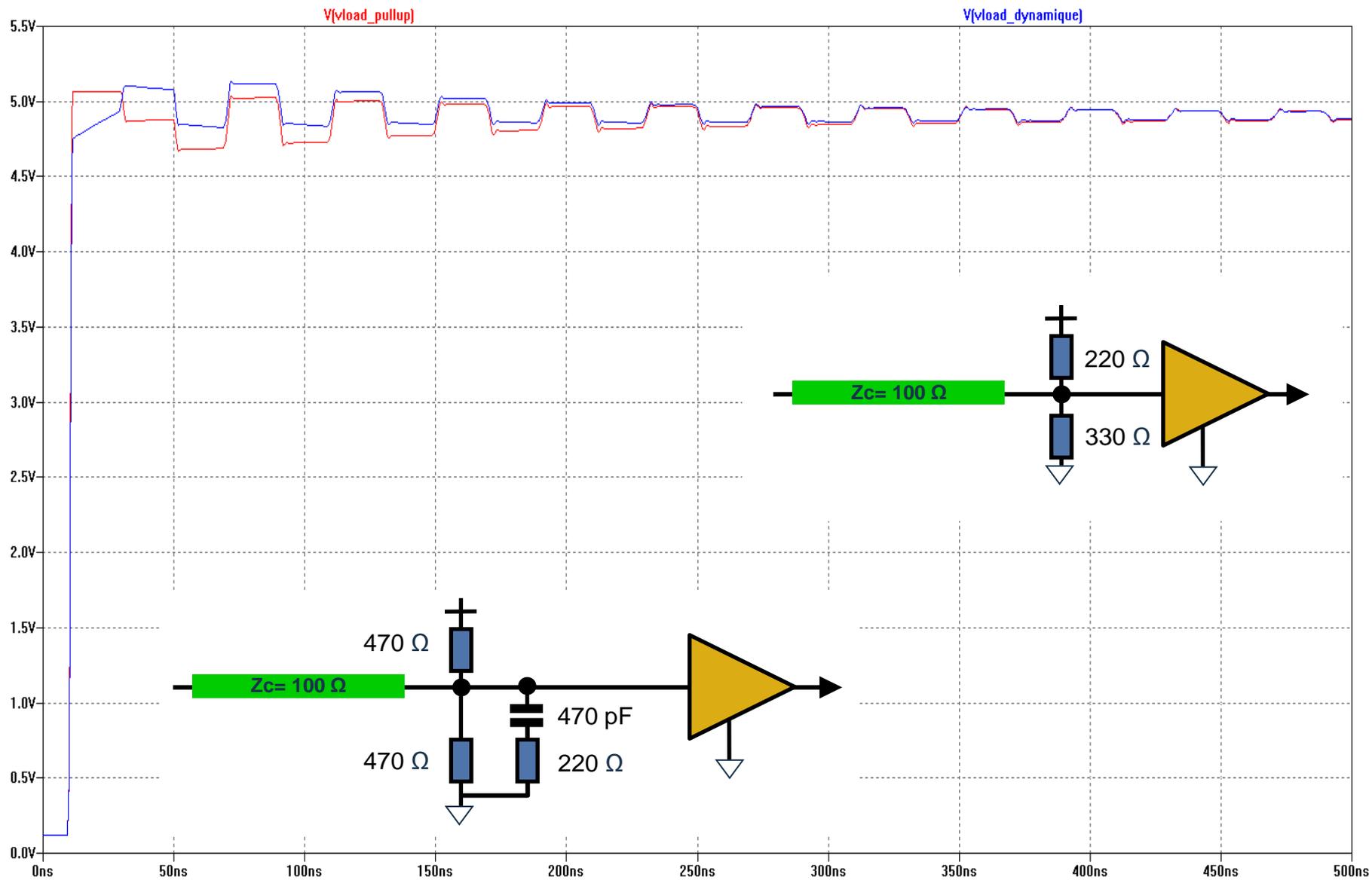


► Adaptation « minimaliste » :

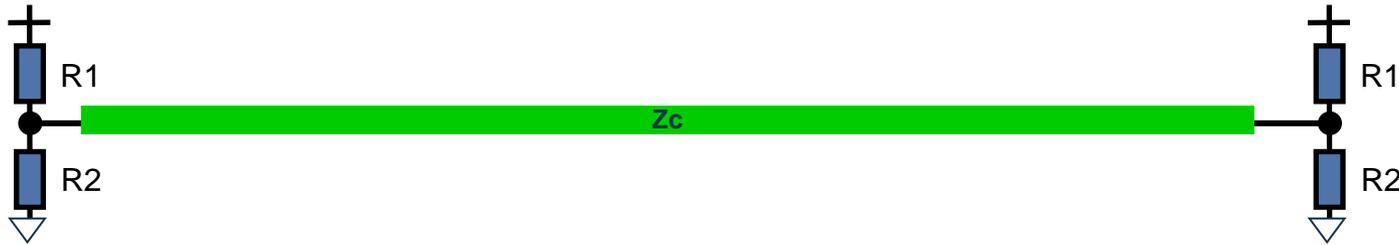
- Economique
- Pas de consommation



Exemples d'adaptation

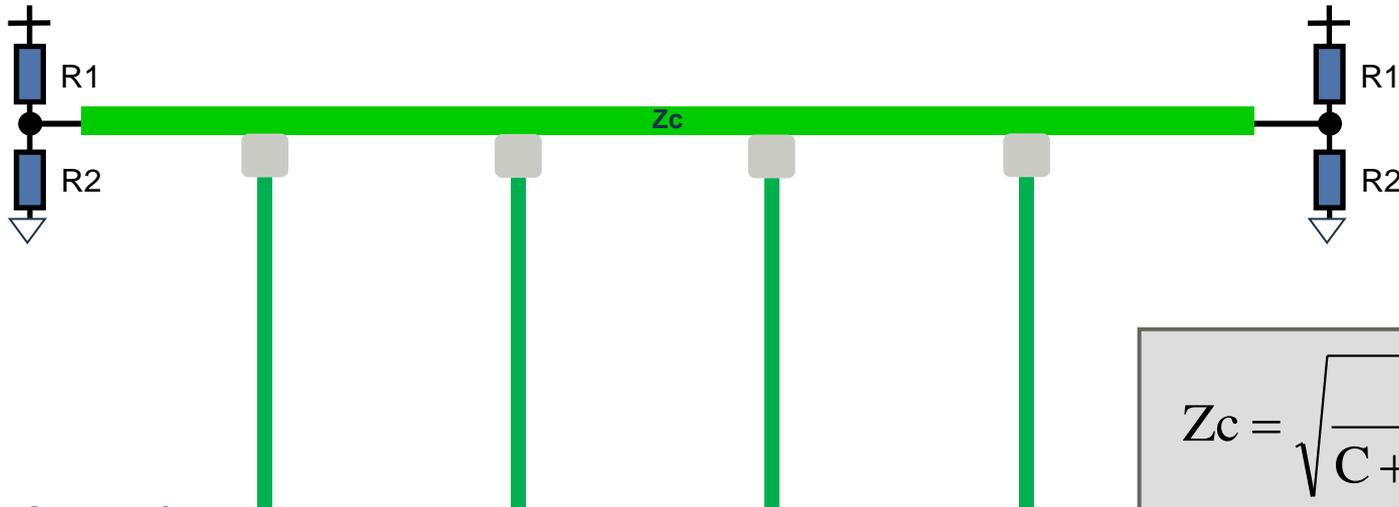


- Adaptation aux deux extrémités : Consommation importante



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

- Insertion de carte : Modification de Zc

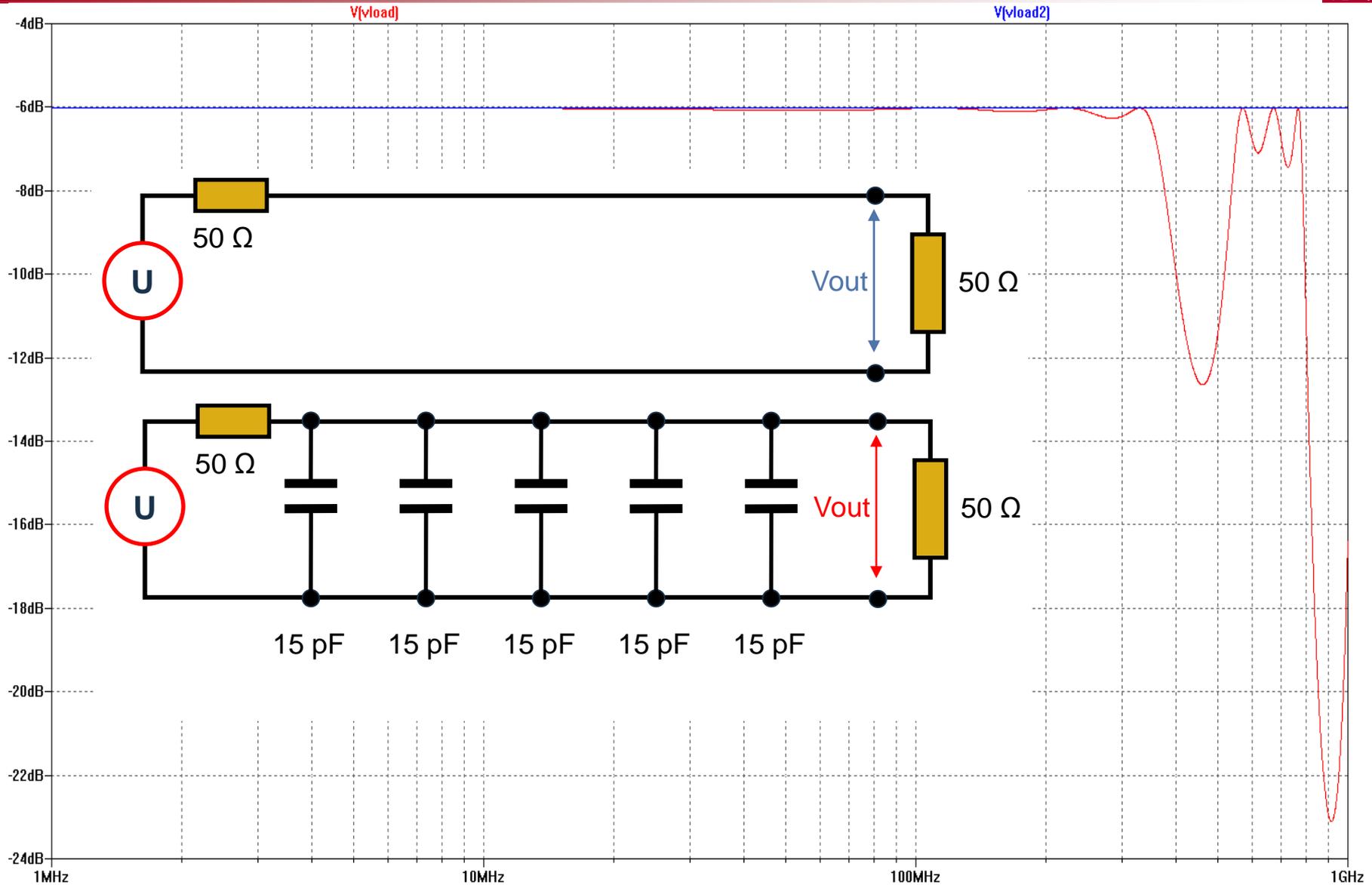


$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C + (n \times 15 \text{ pF})}}$$

C rajouté :

- Broches $\approx 2 \text{ pF}$
- Capacité porte entrée $\approx 6 \text{ pF}$
- Capacité des piste $\approx 8 \text{ pF}$

Fonds de panier : Modification de la bande passante

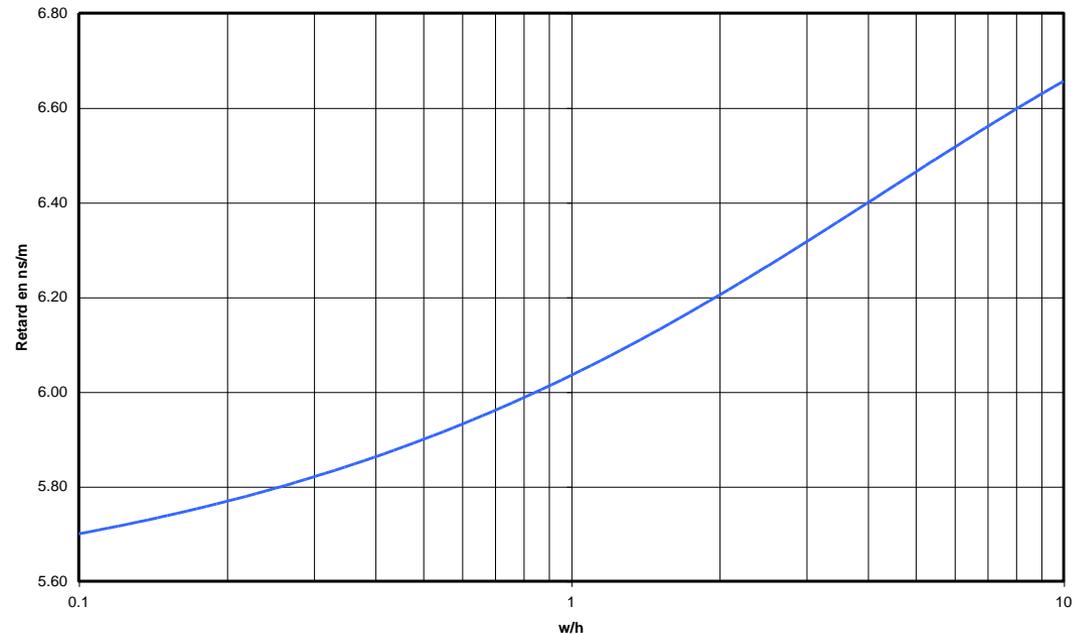


► Isolant homogène :

- La vitesse de propagation est indépendante de la géométrie et ne dépend que de ϵ_r
- Pour les géométries Stripline avec un verre epoxy, le retard est donc de **7 ns/m**

► Isolant inhomogène :

- La vitesse de propagation dépendant de la géométrie
- Retard pour un ligne microstrip



► Conception des lignes de transmission :

- Identification du besoin en fonction des contraintes de vitesse et intégrité du signal
- Choix du type de topologie
- Choix des techniques d'adaptation

► Mise en œuvre des lignes de transmission :

- Choix de la configuration
- Calcul des paramètres géométriques
- **Maîtrise de la géométrie sur toute la longueur de la ligne**



Move Forward with Confidence*