



# Les techniques de tracé et de routage des cartes électroniques

*Philippe DUNAND*

*\*Avançons en confiance*

© - Copyright Bureau Veritas

*Move Forward with Confidence\**



**BUREAU  
VERITAS**

# CEM - Définition

## ► Compatibilité ElectroMagnétique :

Capacité d'un dispositif, équipement ou système, à fonctionner de manière satisfaisante dans son environnement électromagnétique, sans introduire de perturbations électromagnétiques intolérables pour quoi que ce soit dans cet environnement

Emission



Immunité



# Champs d'action de la CEM

▶ Le champ d'action de la CEM est vaste :

## Phénomènes physiques

- ▶ Foudre
- ▶ Décharges électrostatiques
- ▶ Ondes électromagnétiques
- ▶ .....

## Domaines d'applications

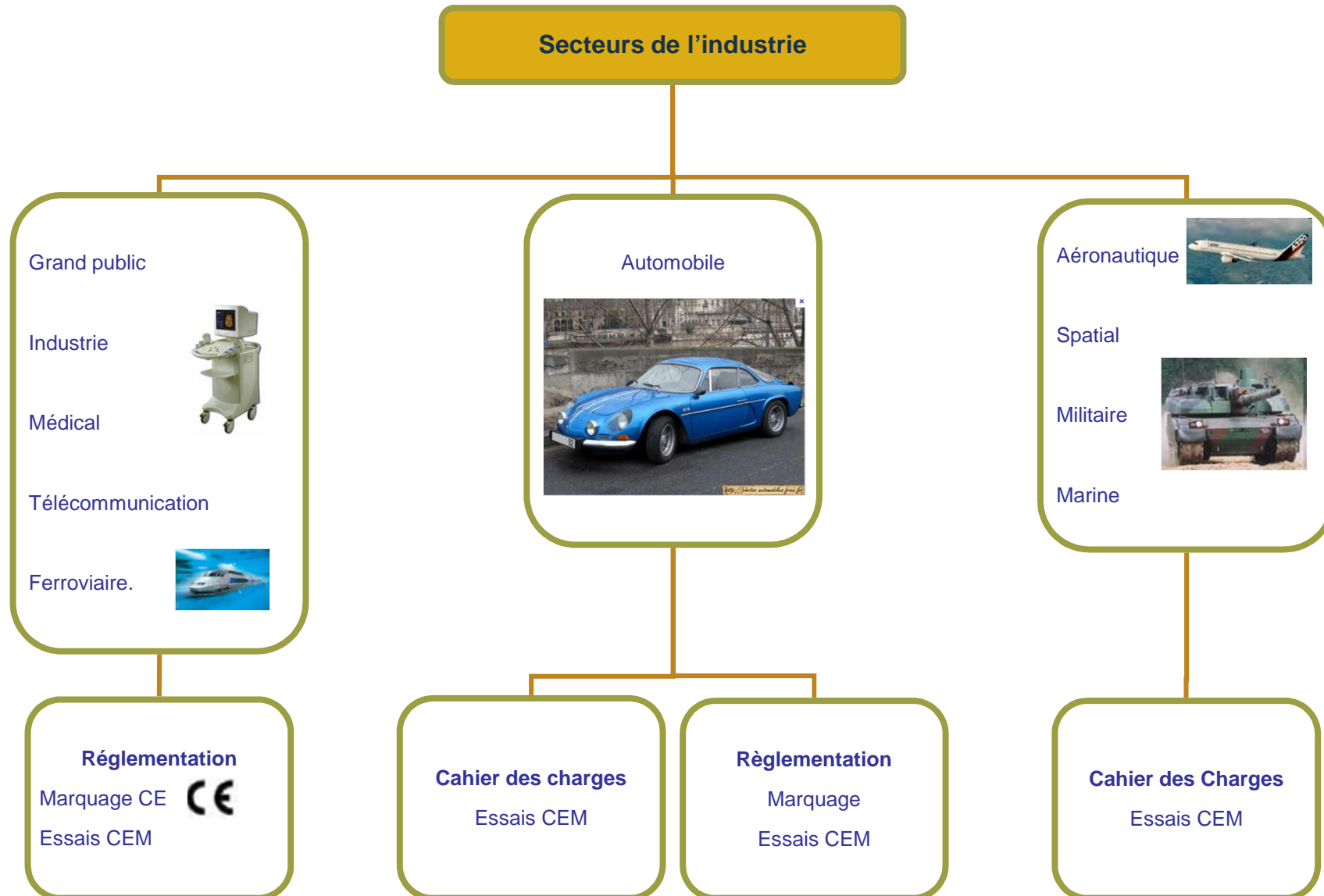
- ▶ Télécoms
- ▶ Spatial et Militaire
- ▶ Avionique
- ▶ Automobile
- ▶ Industrie
- ▶ ...

## Gamme de fréquence

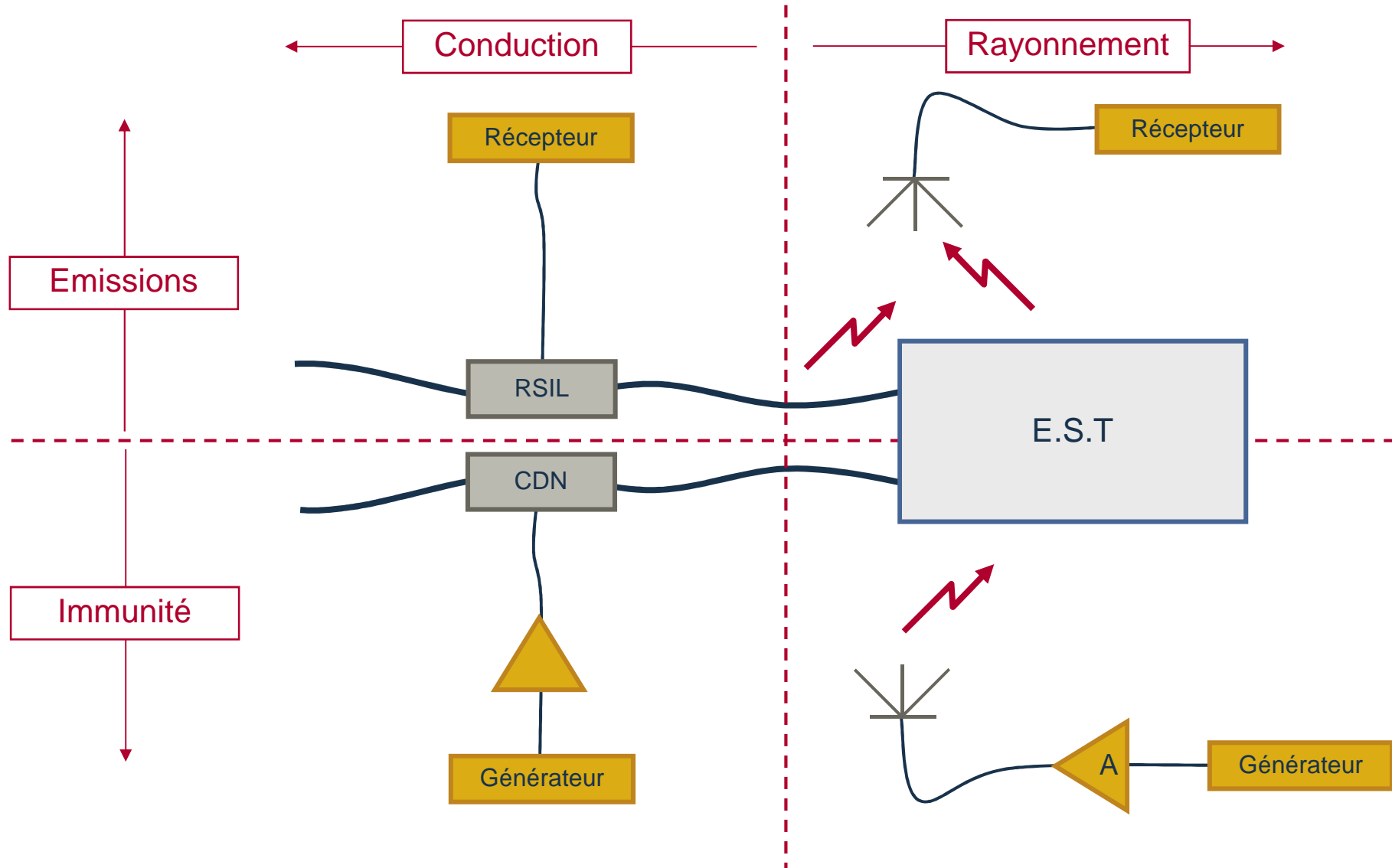
- ▶ De quelques Hz à quelques dizaines de GHz

▶ Des normes existent qui prennent en compte l'ensemble de ces trois points dans tous les environnements intégrant de l'électronique.

# Quelles contraintes CEM ?



# Principe des essais CEM



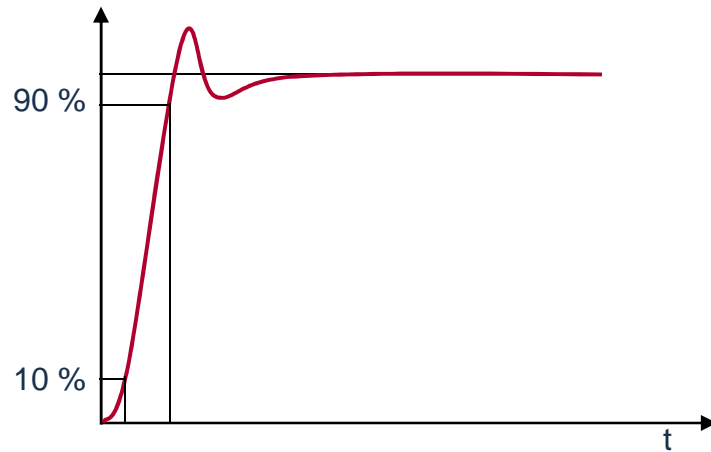
# Les unités utilisées en CEM

- ▶ La tension ou ddp Volt
- ▶ Le courant Ampère
- ▶ La puissance Watt
- ▶ Le temps Seconde
- ▶ La fréquence Hertz

▶ Loi d'Ohm :  $U(\text{Volt}) = Z(\text{Ohms}) \cdot I(\text{ampère})$

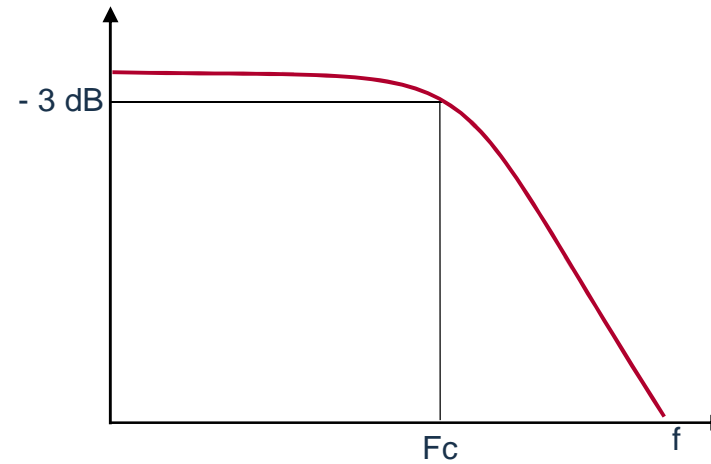
▶ Puissance :  $\frac{1}{T} \int_0^T U \cdot I \cdot dt (\text{Watt}) = \frac{V^2}{R} = RI^2$

# Relation Temps / Fréquence



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

$$F_c = 0,35 / T_m$$



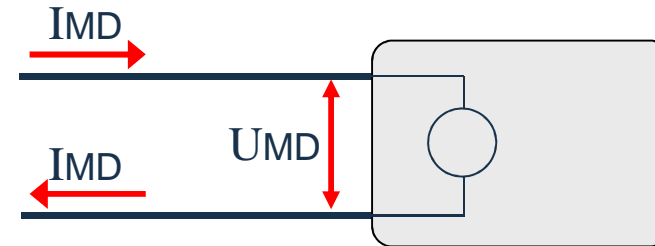
$$F_c = 1 / 2 \cdot \pi \cdot \tau$$

$$T_m = 0,35 / F_c$$

# Mode Différentiel / Mode Commun

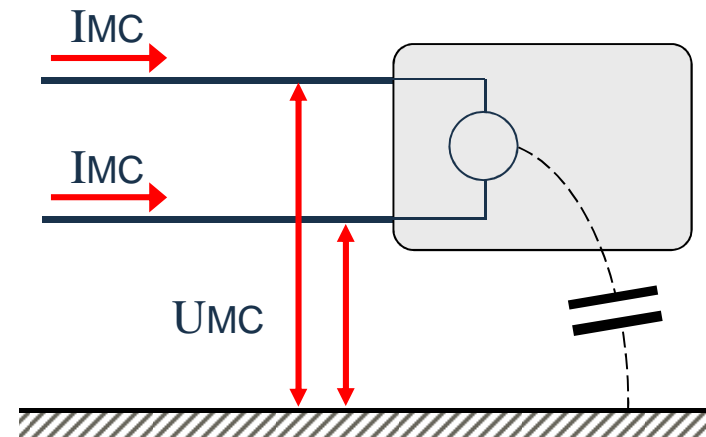
## ► Mode différentiel

- Le courant de Mode Différentiel se propage sur l'un des conducteurs, passe à travers l'équipement et revient par un autre conducteur.
- La tension de Mode Différentiel se mesure directement entre les conducteurs actifs



## ► Mode commun

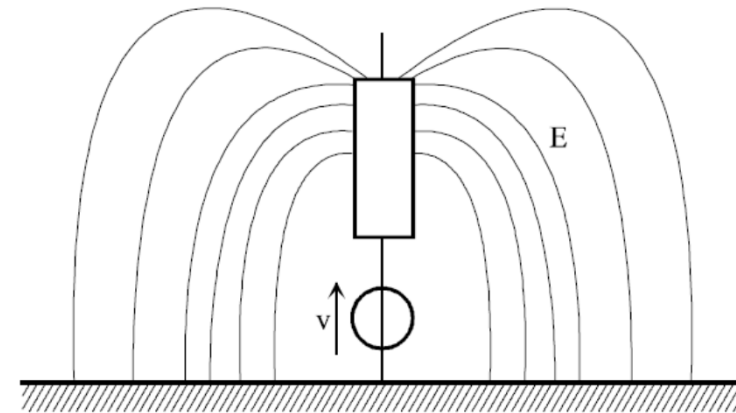
- Le courant de Mode Commun se propage sur tous les conducteurs dans le même sens et revient par la masse.
- La tension de Mode Commun se mesure entre les conducteurs actifs et la masse environnante.



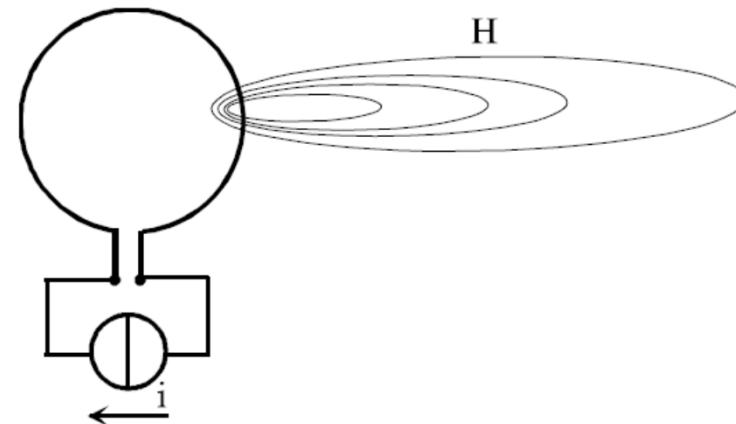


# Nature des sources de perturbations rayonnées

- ▶ Les circuits électriques, lorsqu'ils sont soumis à des différences de potentiel et ou parcourus par des courants, produisent des champs électromagnétiques dans l'espace. Leurs intensités dépendent de la nature, la fréquence et la distance par rapport à la source.
- ▶ Le **champ électrique** s'exprime en V/m. Son émission est produite par un circuit électrique à haute impédance soumis à une différence de potentiel élevée  $V$ .
- ▶ Le **champ magnétique** s'exprime en A/m. Son émission est engendré par un circuit basse impédance parcouru par un courant  $I$ .



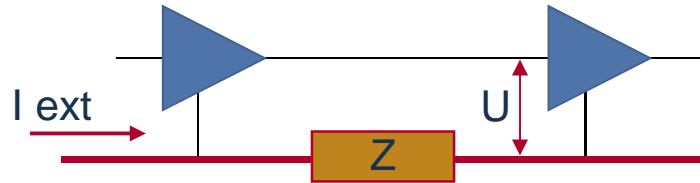
Emission en champ électrique



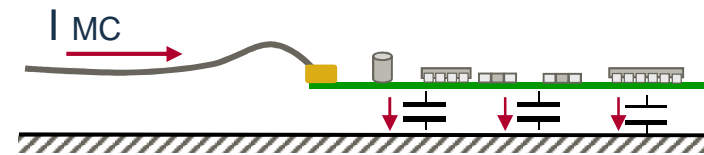
Emission en Champ magnétique

# Couplages

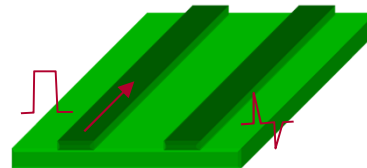
- ▶ Impédance commune



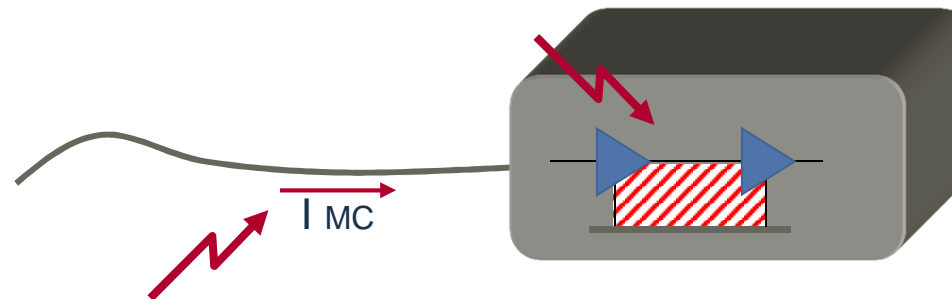
- ▶ Carte à châssis



- ▶ Diaphonie



- ▶ Champ à boucle

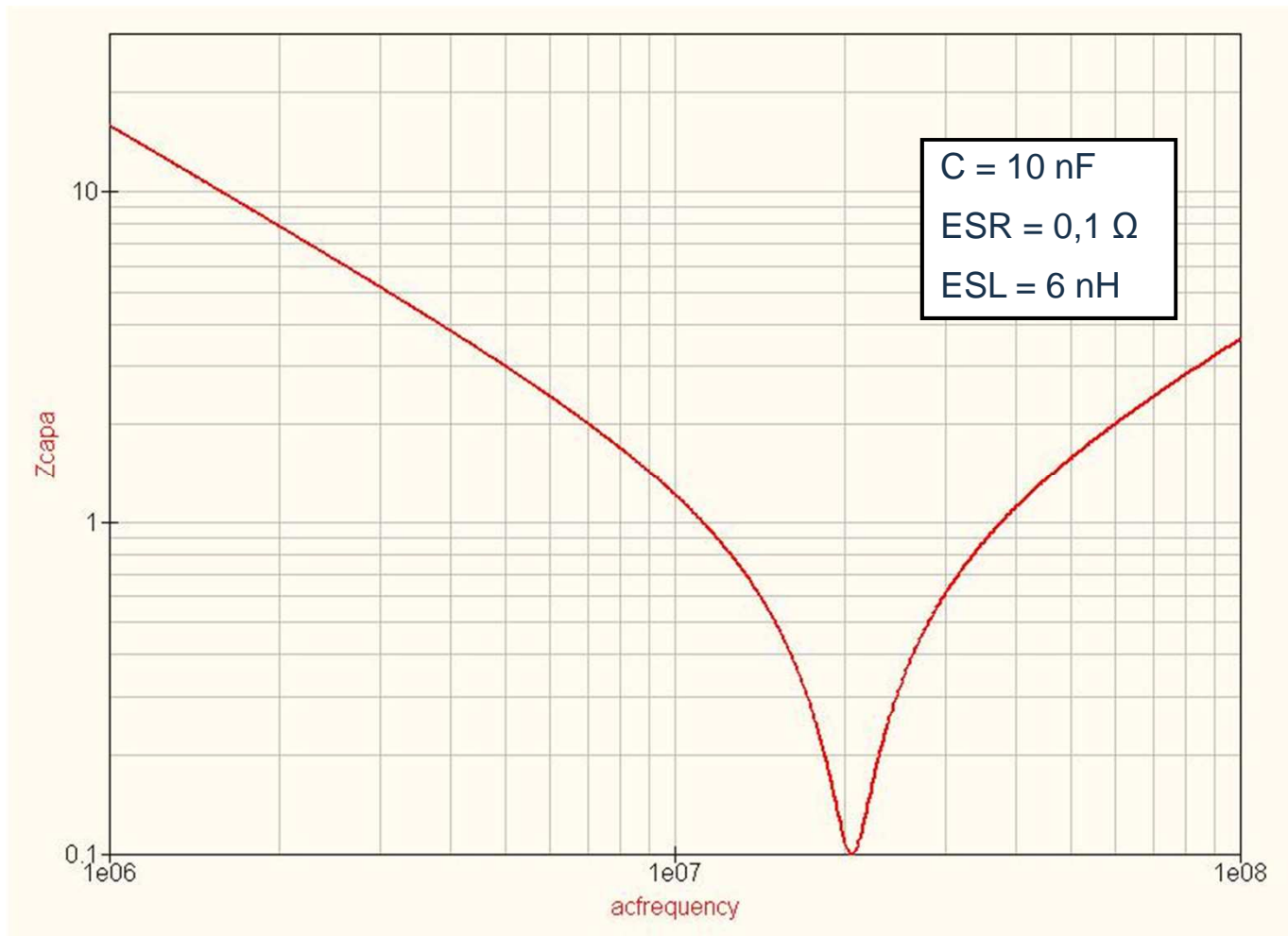
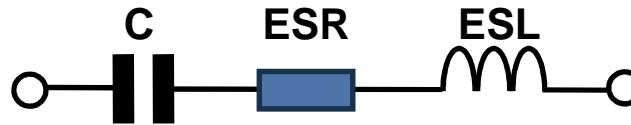


- ▶ Champ à câble

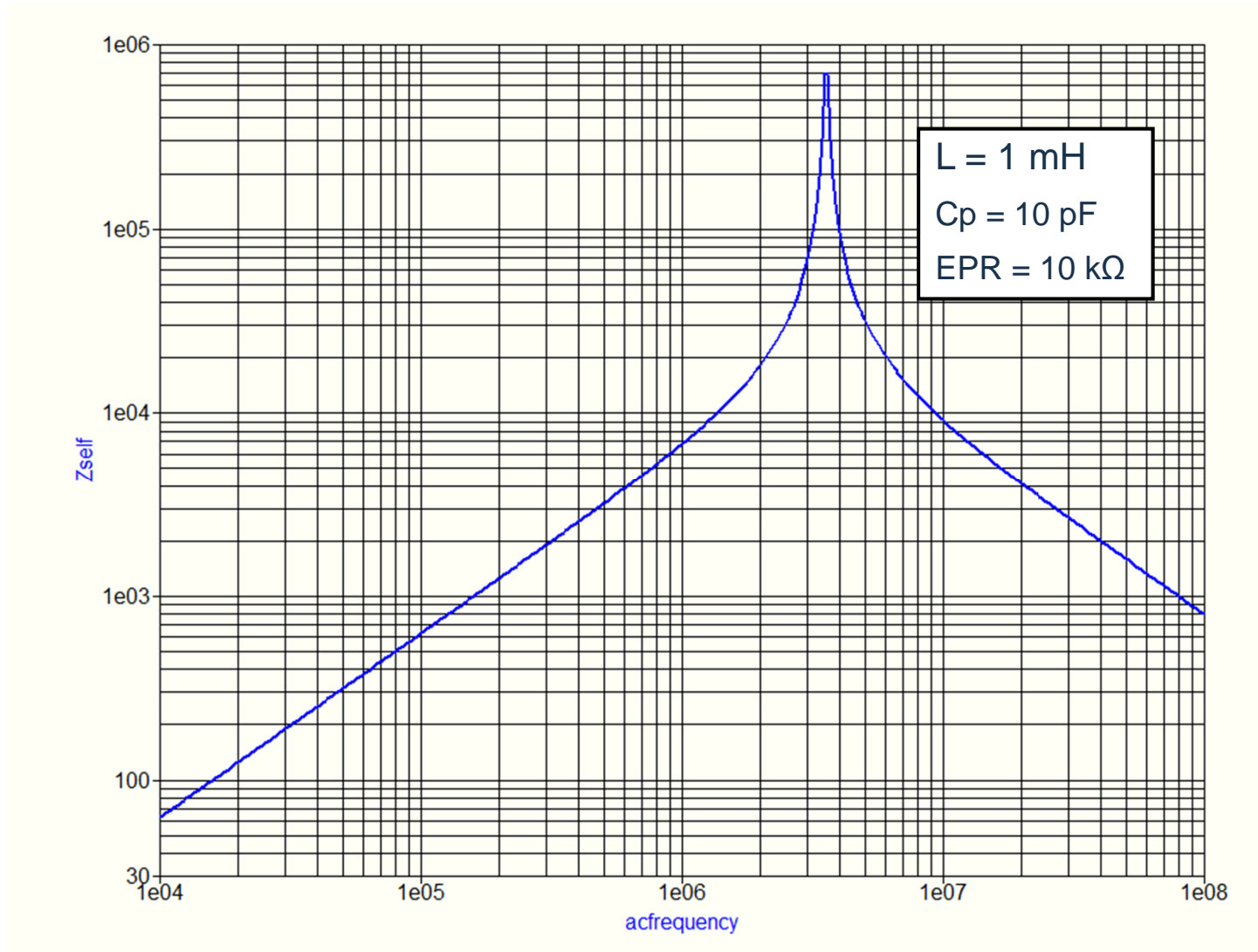
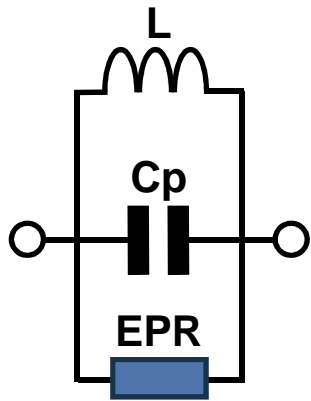


## Composants et CEM

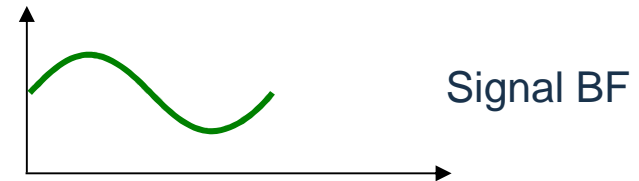
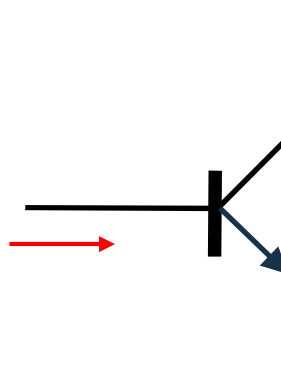
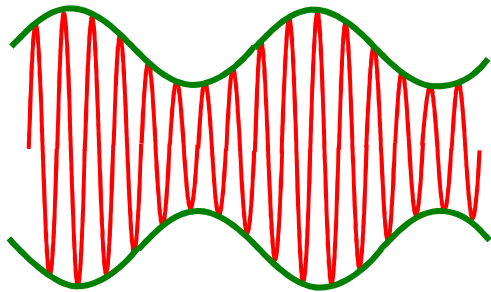
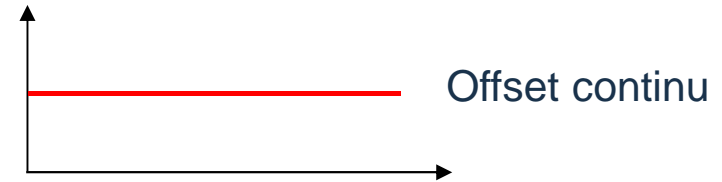
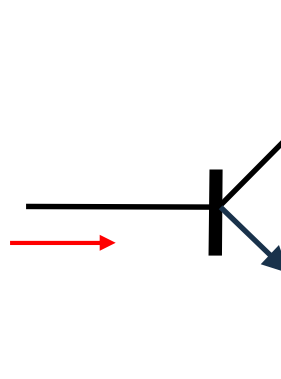
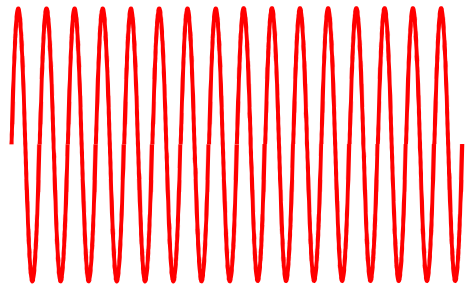
# Impédance d'un condensateur



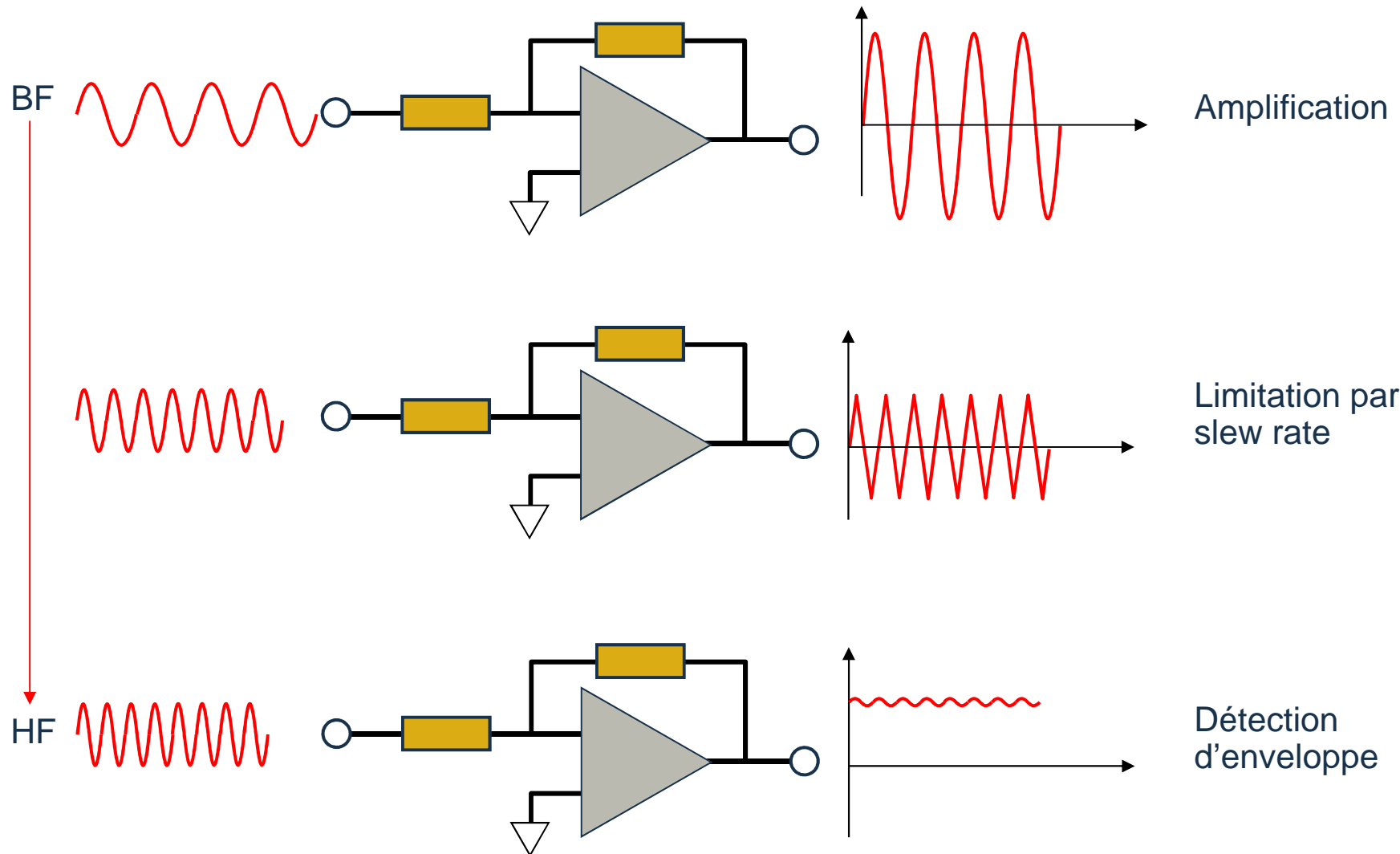
# Impédance d'une self



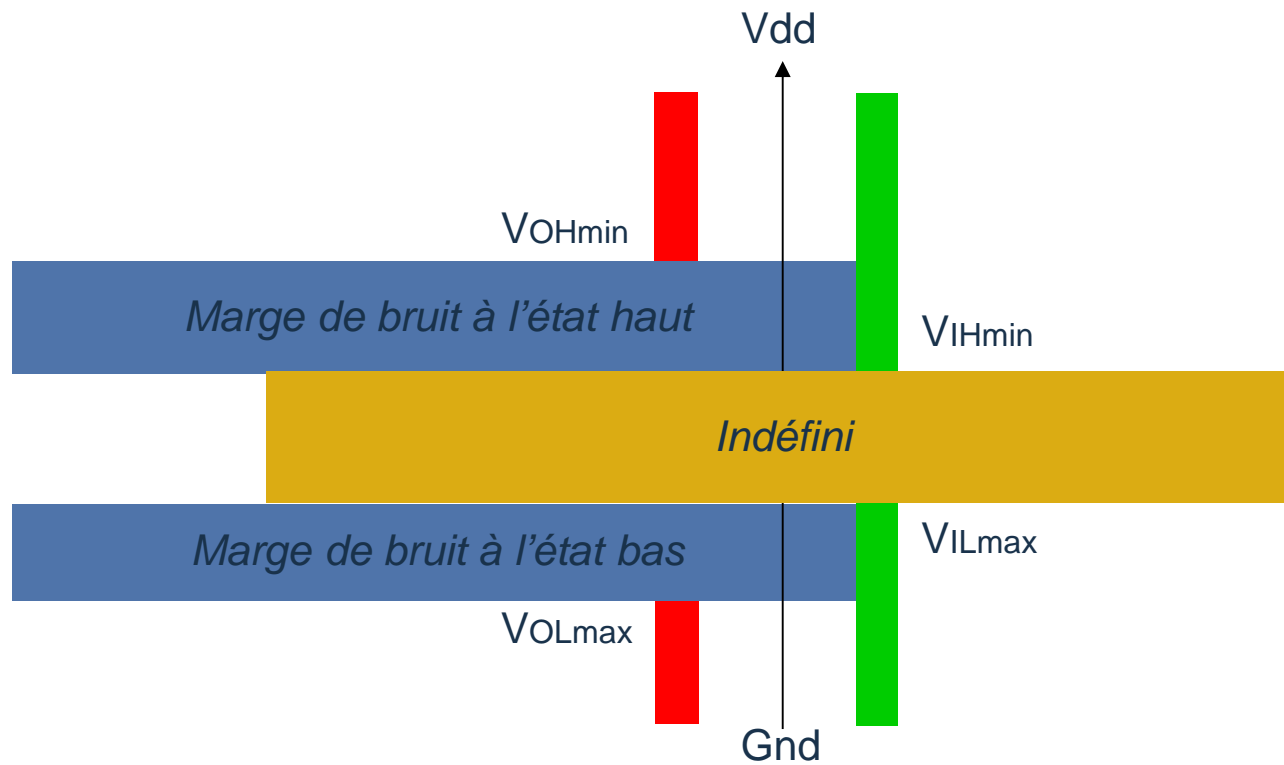
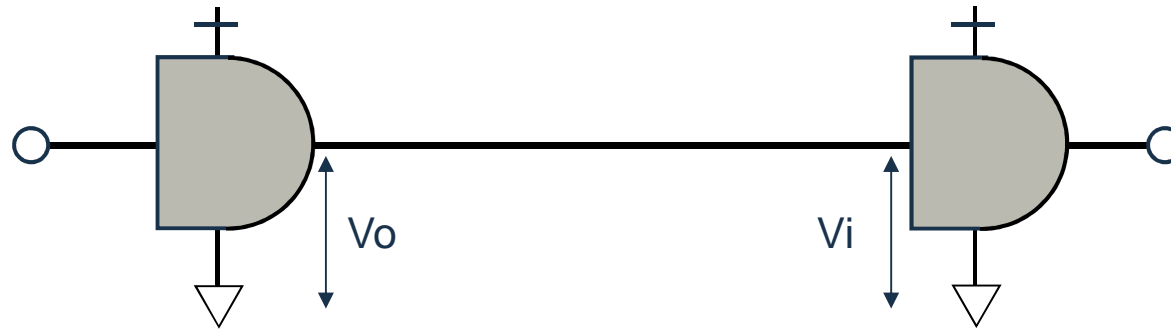
# Détection d'enveloppe des composants



# Comportement d'un ampli OP en fonction de la fréquence



# Marge de bruit des circuits logiques

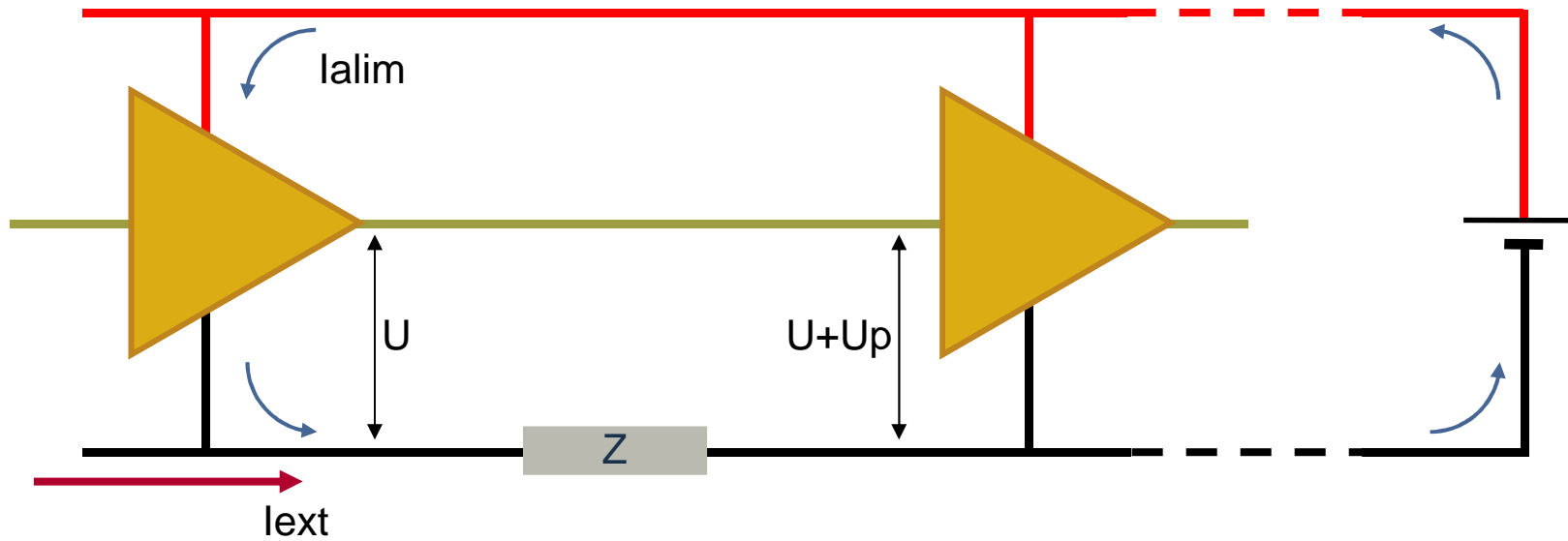






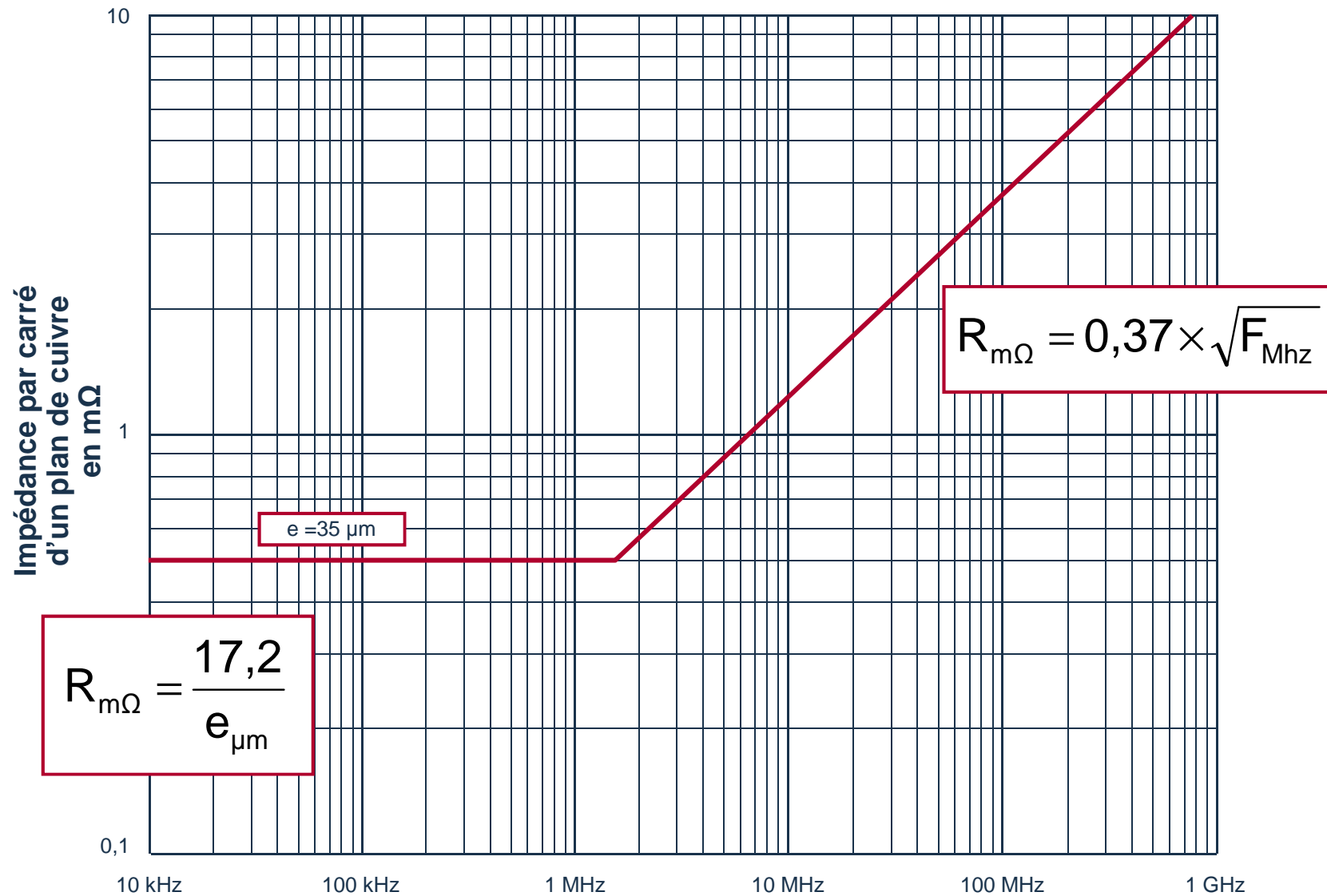
## Masses et alimentations d'un système

# Couplage par impédance commune

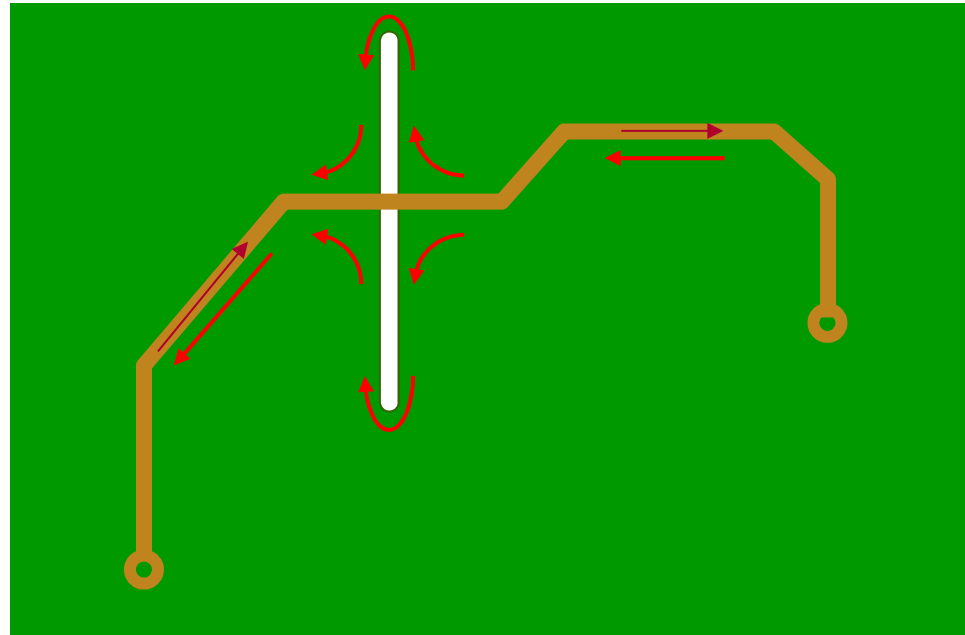


$$U_p = Z \cdot (I_{ext} + I_{lim})$$

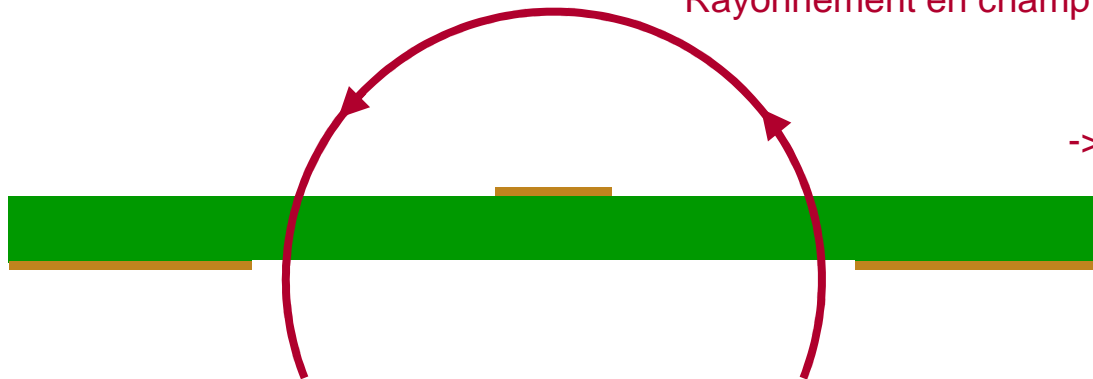
# Impédance d'un plan de masse



# Effet d'une fente dans un plan de masse

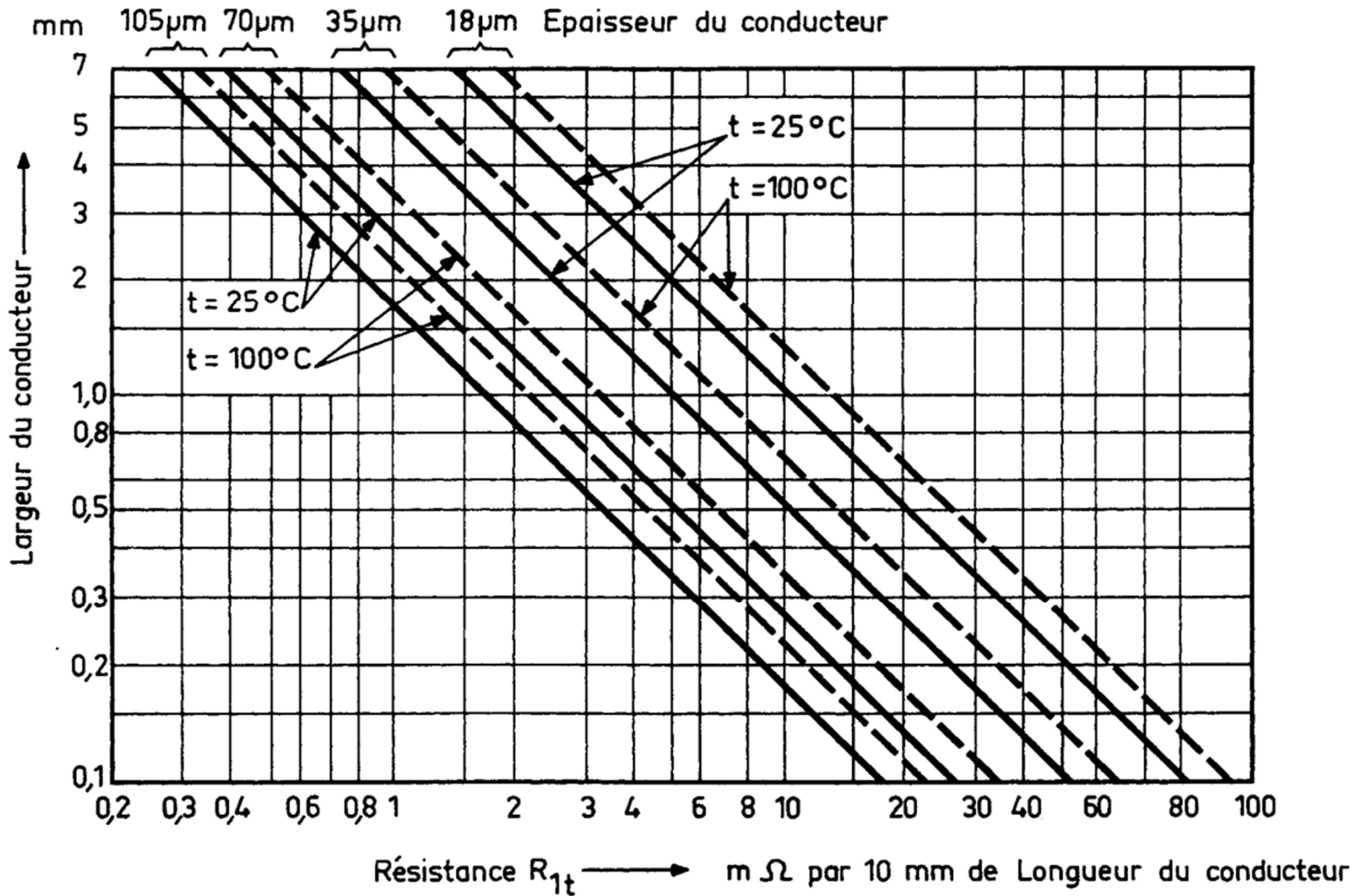


Rayonnement en champ magnétique

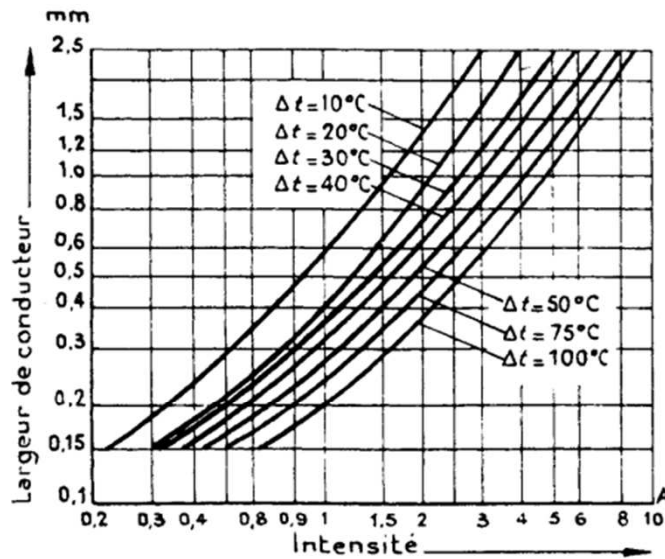


-> Self équivalente : 1 nH/cm

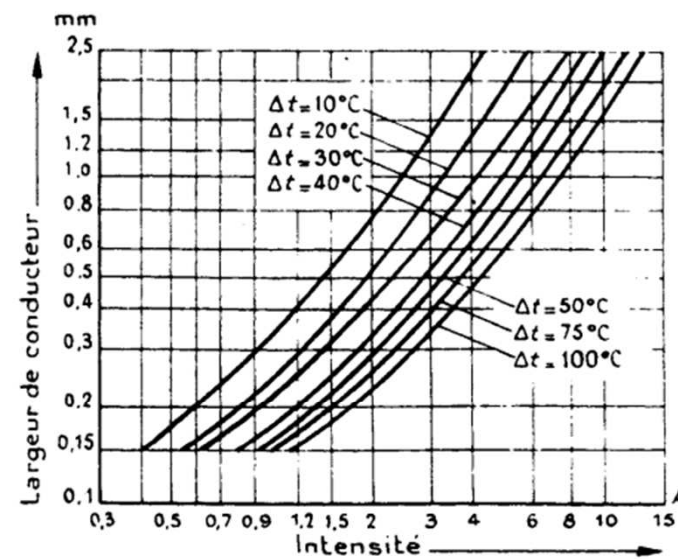
# Résistance d'une piste de circuit imprimé



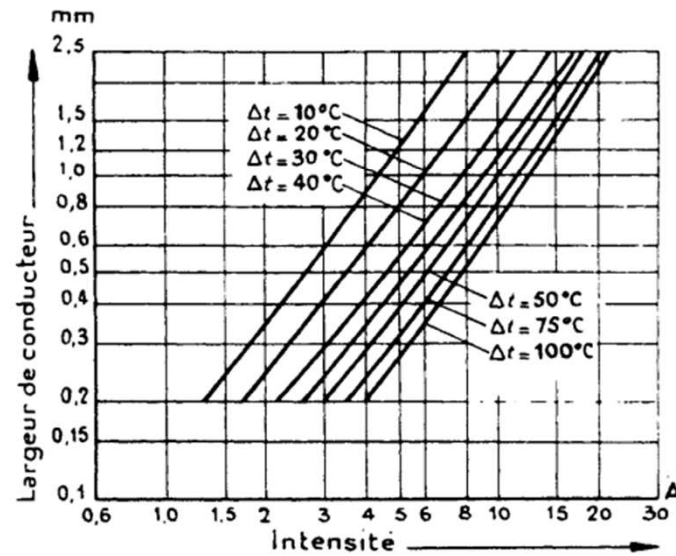
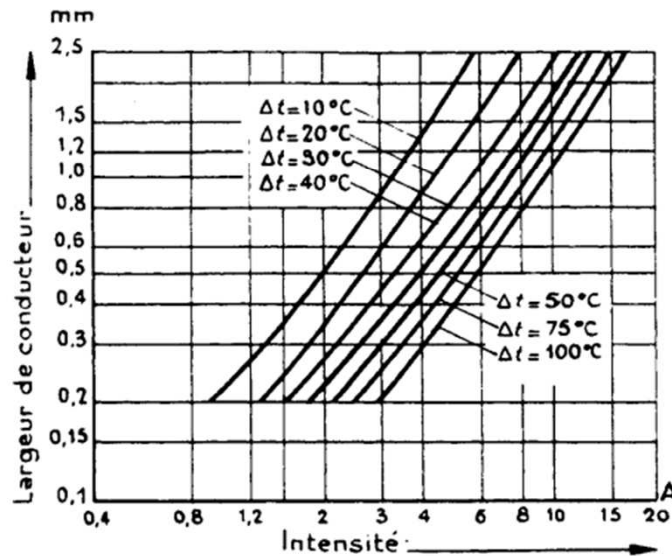
# Intensité maximale admissible



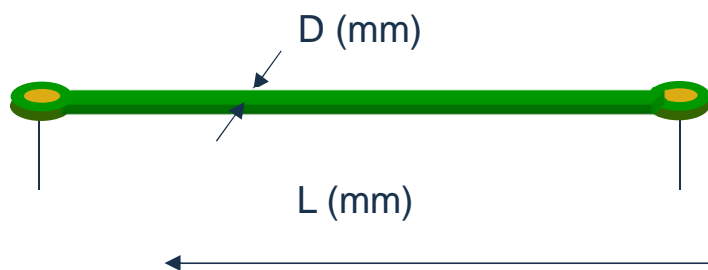
Epaisseur de conducteur 18 µm



Epaisseur de conducteur 35 µm



# Impédance d'une piste de circuit imprimé

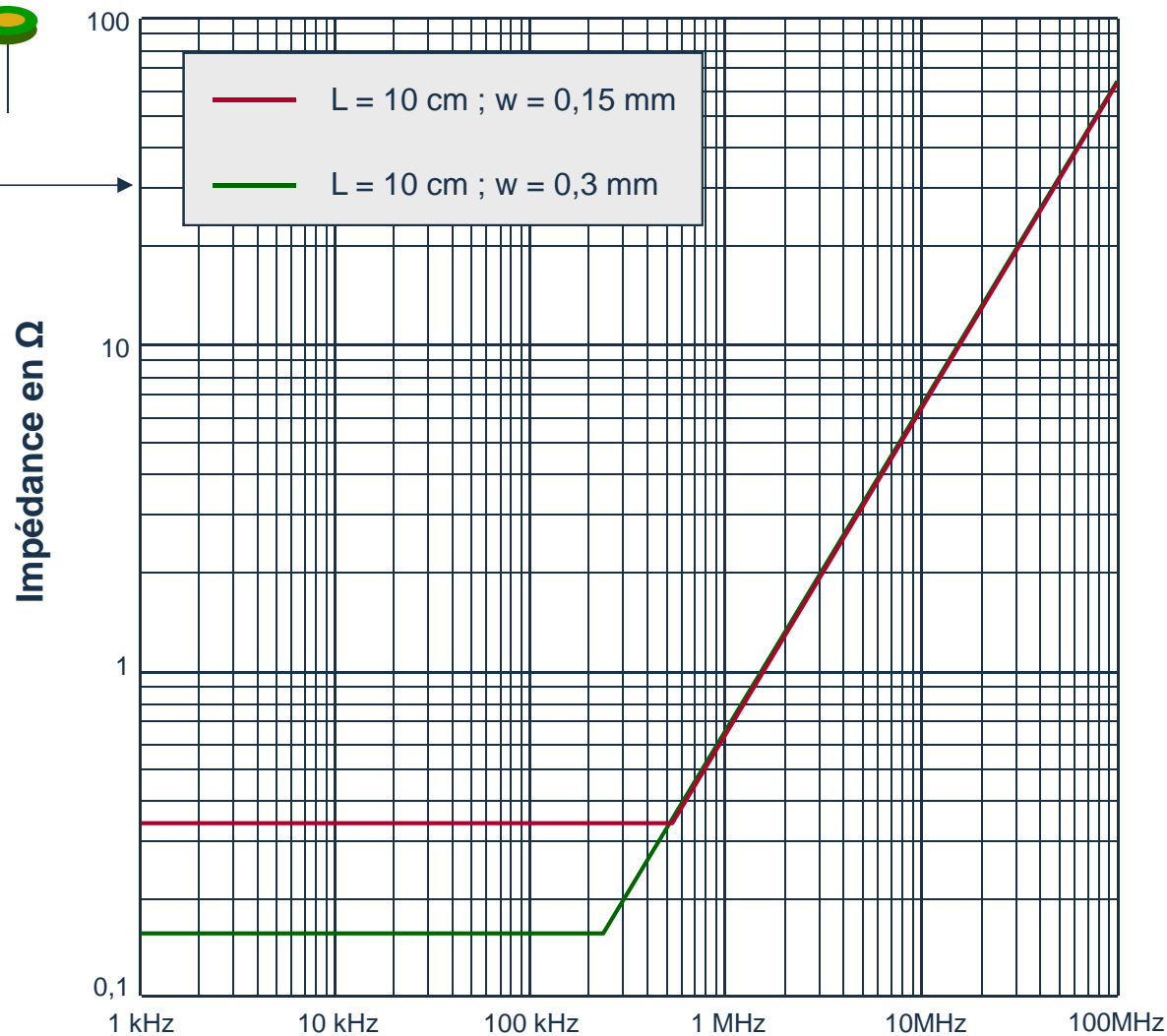


► Résistance ( $e = 35 \mu\text{m}$ )

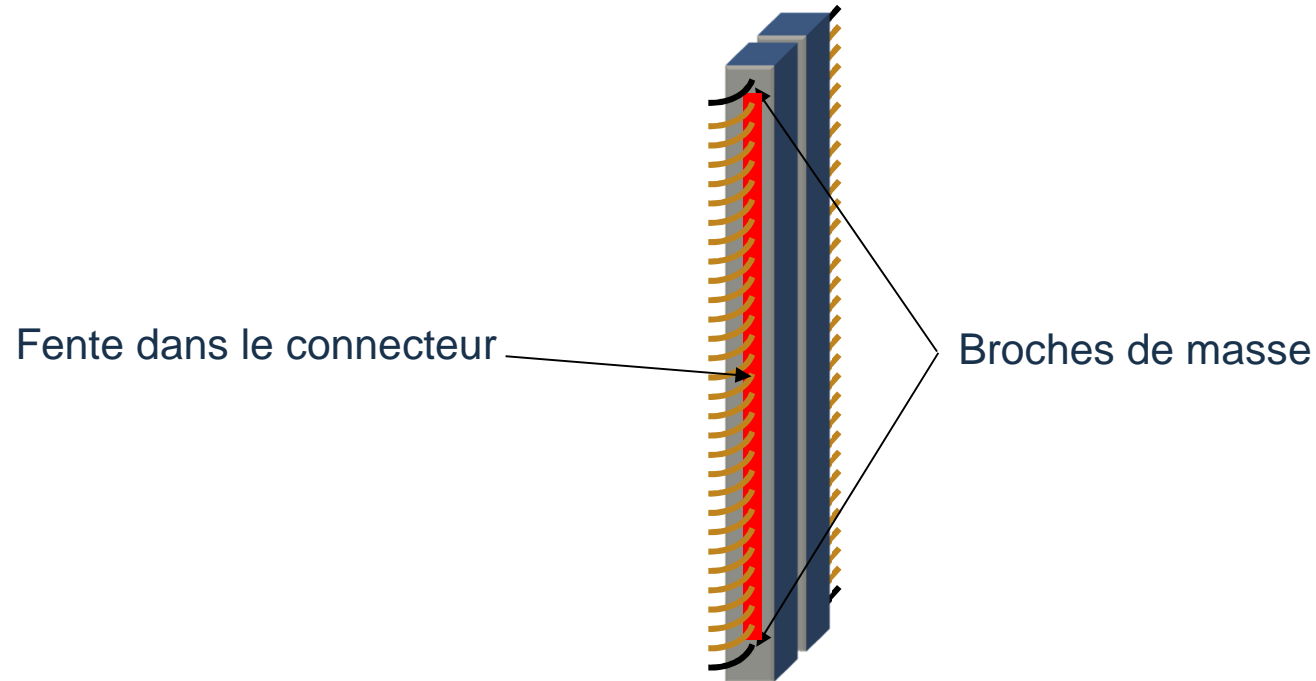
- $R_{m\Omega} = \frac{0,5 \times L}{D}$

► Self

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



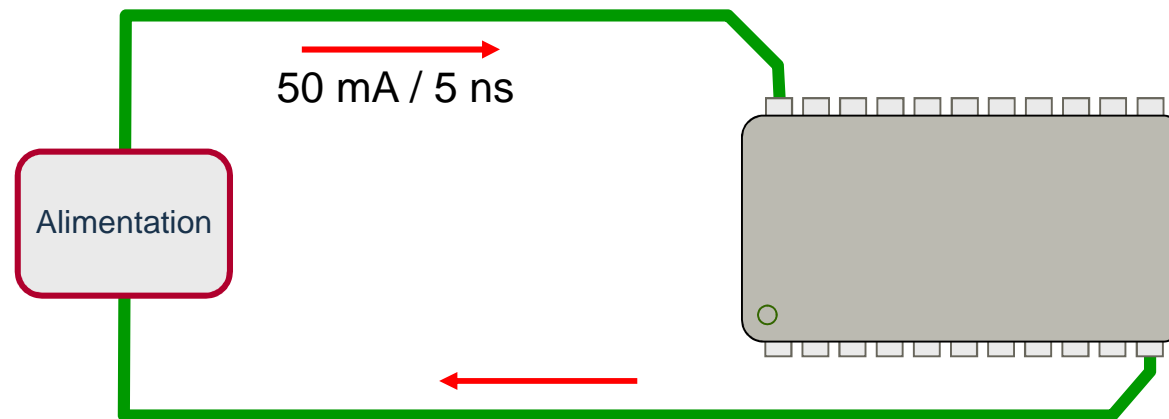
# Impédance d'un connecteur



- 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



# Bruit d'alimentation sur une carte



Longueur totale de la piste d'alimentation : 5 cm

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

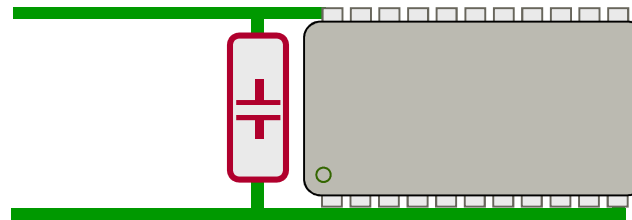
$$U_{\text{boitier}} = 5 \times 10^{-9} \times \frac{50 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-9}}$$

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

# Découplage des boitiers

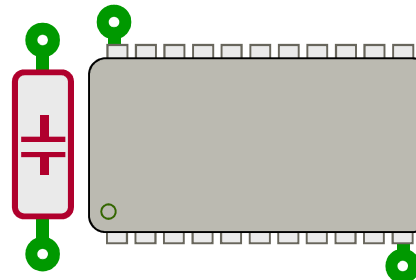
## ► Alimentation par piste :

- Longueur minimale entre le boitier et le condensateur de découplage

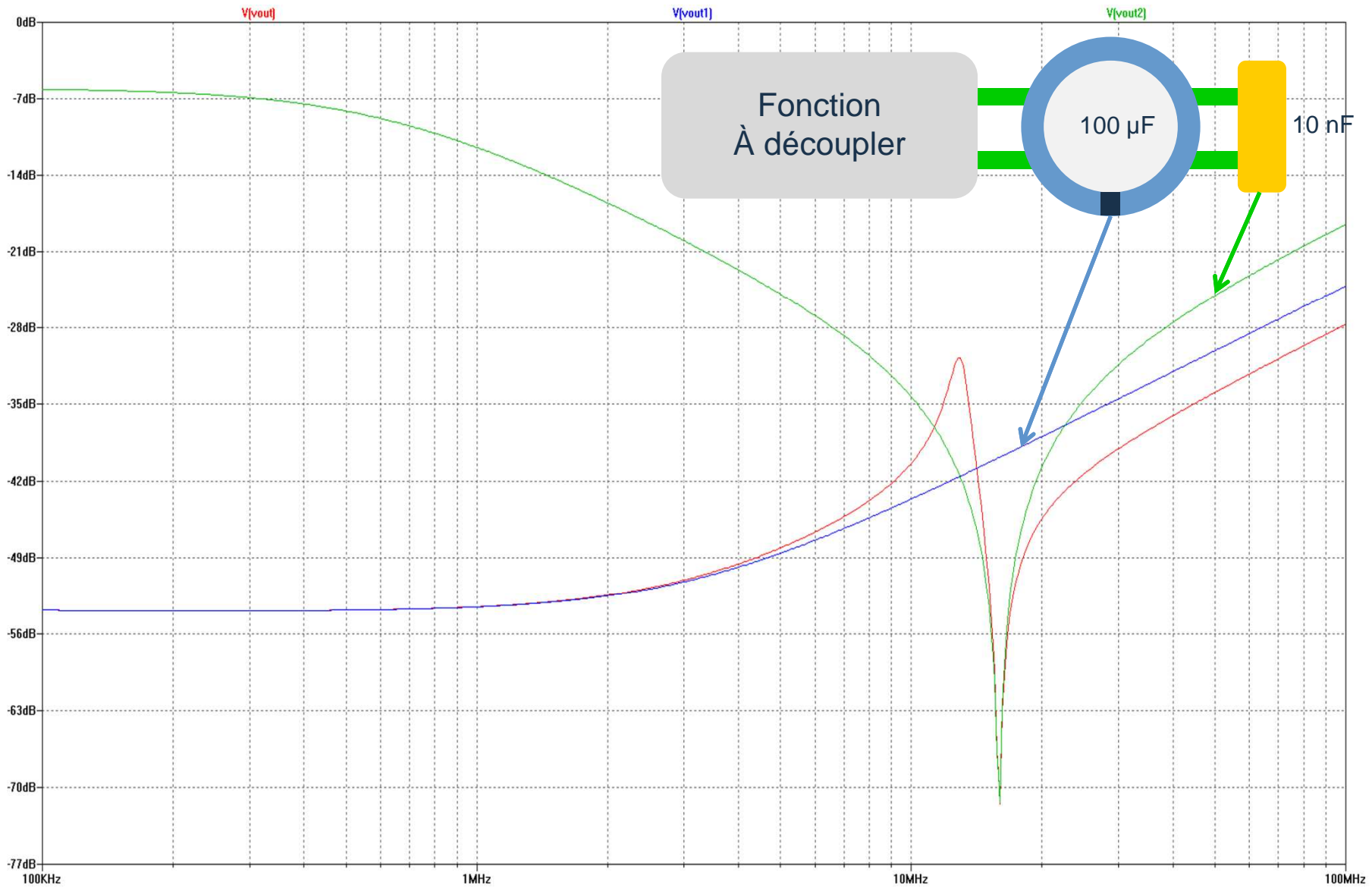


## ► Alimentation par plans :

- Connexion directe des boitiers et des condensateurs aux plans

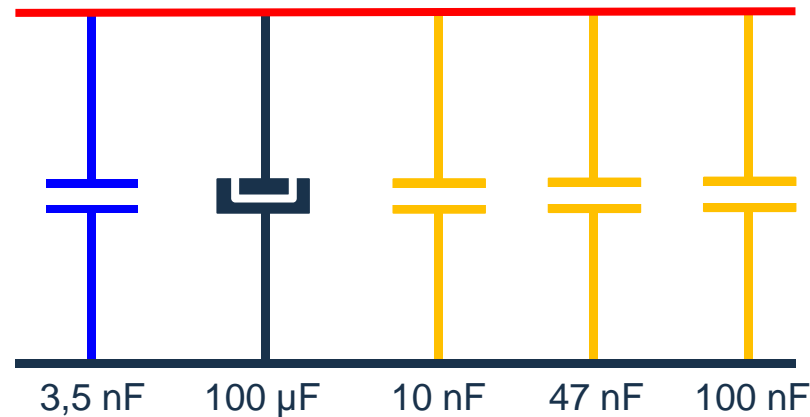


# Mise en parallèle de condensateurs de découplage



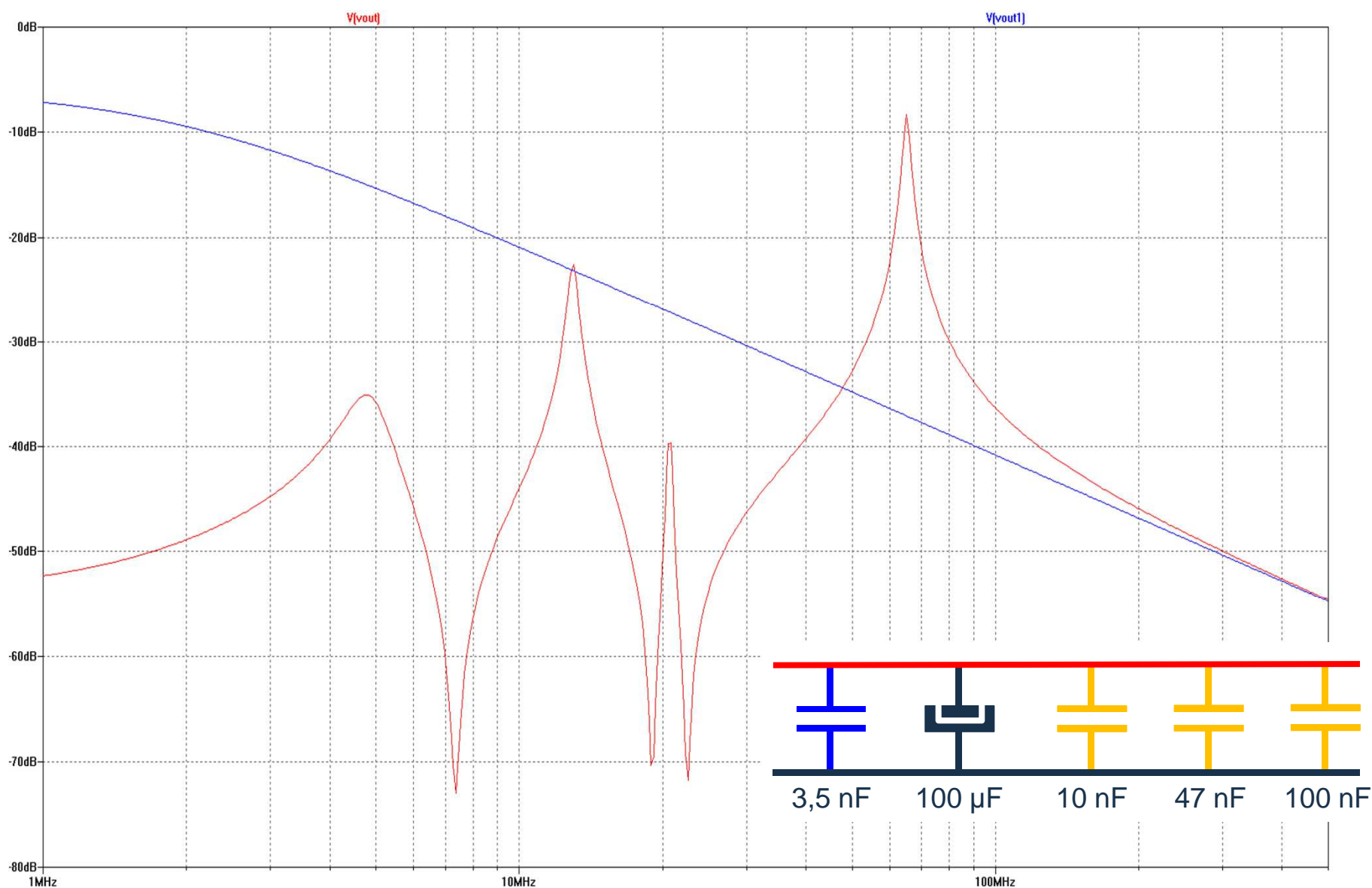
## Modèle de l'impédance globale de la carte

- ▶ Modèle plus réaliste d'un circuit imprimé multicouche.

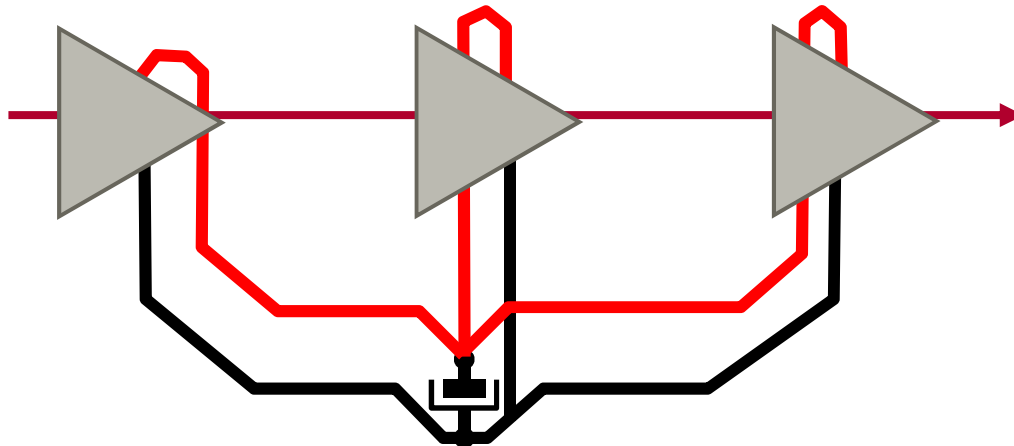


- ▶ La capacité entre les deux plans de l'alimentation est de 3.5 nF.
- ▶ La résistance de 50 Ohms présente la charge DC des composants actifs du circuit. 5 capacités de découplage sont utilisées dans ce modèle.
- ▶ Une capacité 'bulk' de 1 μF, et 4 capacités locales de ayant chacune une valeur différente et une inductance de connexion propre.
- ▶ Une résistance série typique de 0.05 Ohms a aussi été ajoutée à chaque capacité de découplage.

# Découplage d'une carte multicouche

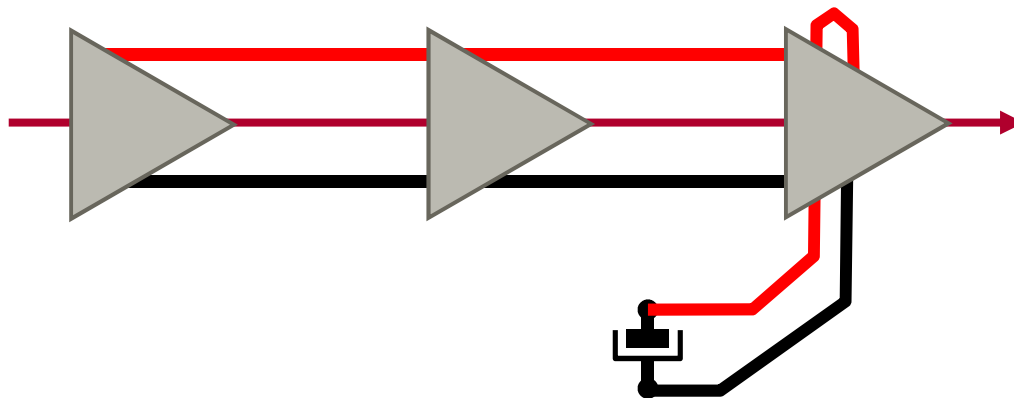


# Distribution des alimentations d'une carte analogique



## ► Alimentation en étoile

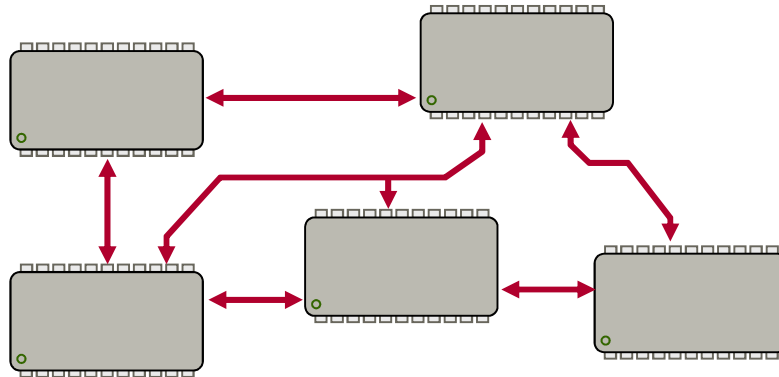
- Forte impédance commune entre les différents étages de traitement
- Grande surface de boucle entre les conducteurs d'alimentation et les signaux



## ► Chaînage des alimentations

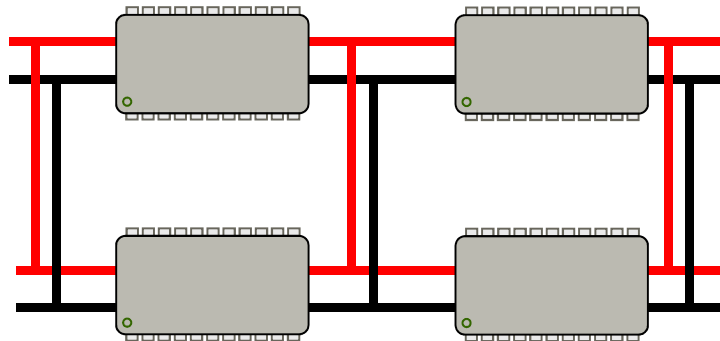
- Maîtrise de la circulation des courants
- Alimentation du « propre » à partir du « sale »

# Principe d'alimentation d'une carte numérique



## ► Topologie

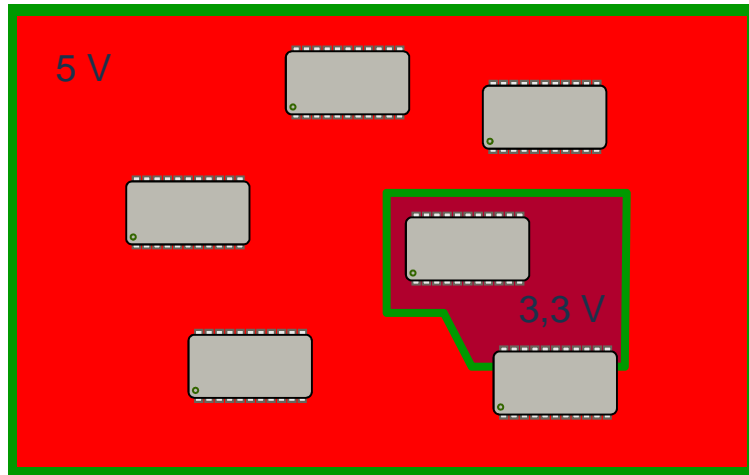
- Interconnexion de tous les circuits actifs de la carte
- Nécessité d'une équipotentialité globale



## ► Maillage des alimentations

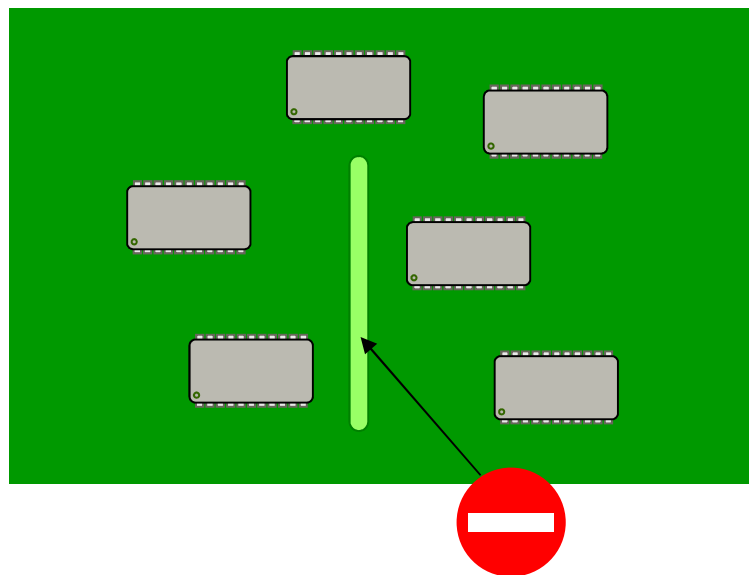
- Maillage de la masse ET des alimentations
- Préférer la solution d'une alimentation par plan

# Alimentation d'une carte numérique



## ► Alimentation

- Alimentation par plan
- Possibilité de mettre plusieurs alimentations dans le même plan



## ► Masse

- Plan de masse unique
- Pas de pistes ni de fentes dans la plan de masse



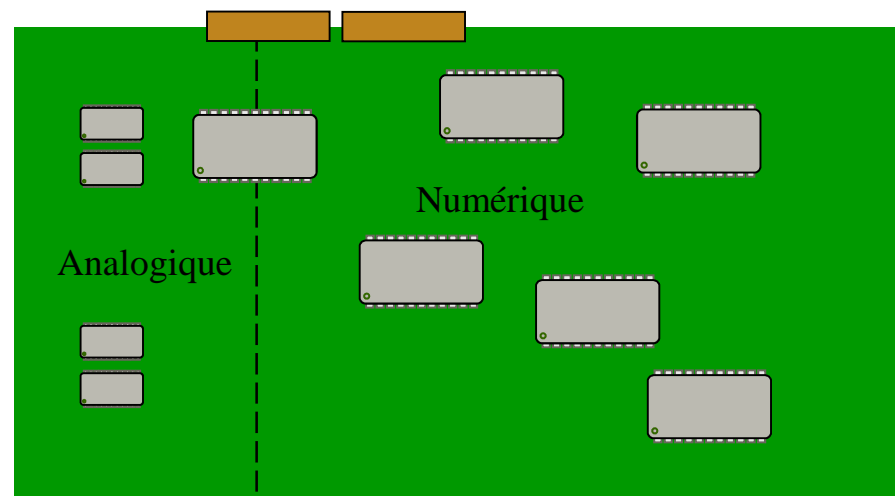
# Gestion des masses – Carte mixte

## ► 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

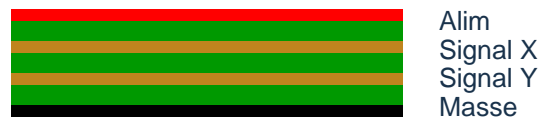
- Utiliser un plan de masse **UNIQUE** analogique / numérique
- Eviter toute mise en œuvre introduisant une séparation des masses ou des fentes dans la plan de masse



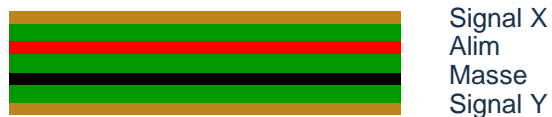
# Répartition des couches

## ► 4 couches

- Théorique



- Pratique

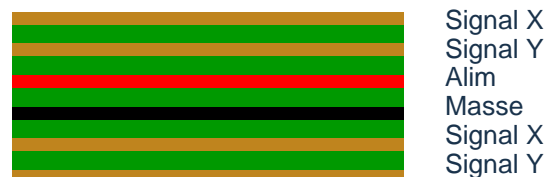


## ► 6 couches

- Optimum avec peu de pistes



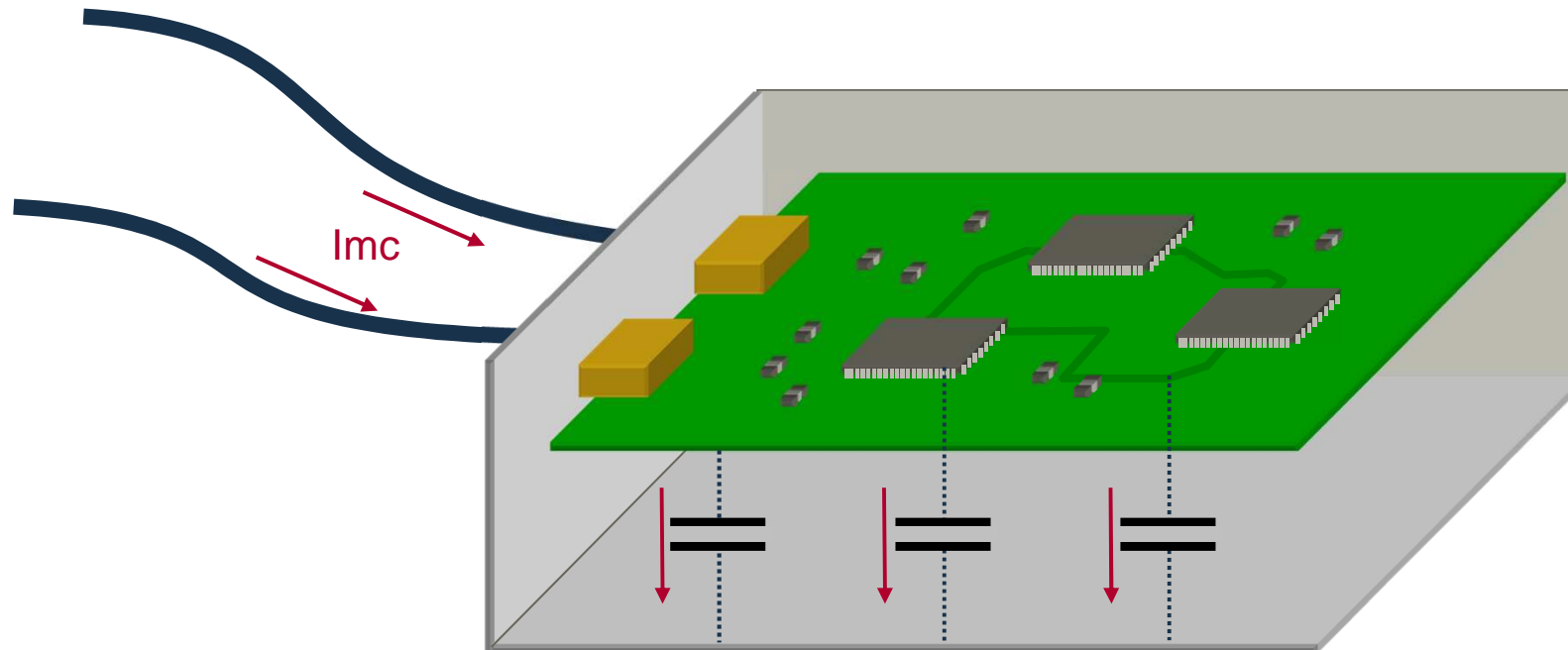
- Solution pratique





## Pistes Sensibles

# Couplage capacitif Carte / Environnement



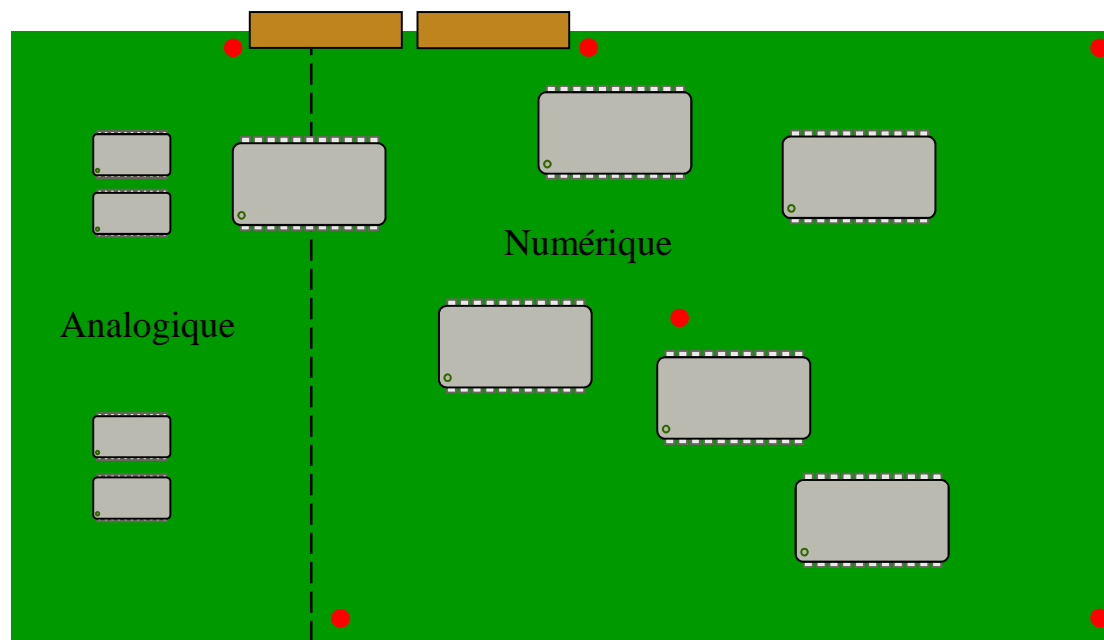
► **Couplage capacitif par effet de main qui se manifeste par :**

- Augmentation du bruit sur les cartes par approche de la main
- Diminution du bruit en raccordant par exemple la masse d'une sonde de scope

# Masse électronique et Masse mécanique

## ► 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

# Capacité parasite d'une carte

## ► Capacité parasite d'une carte :

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

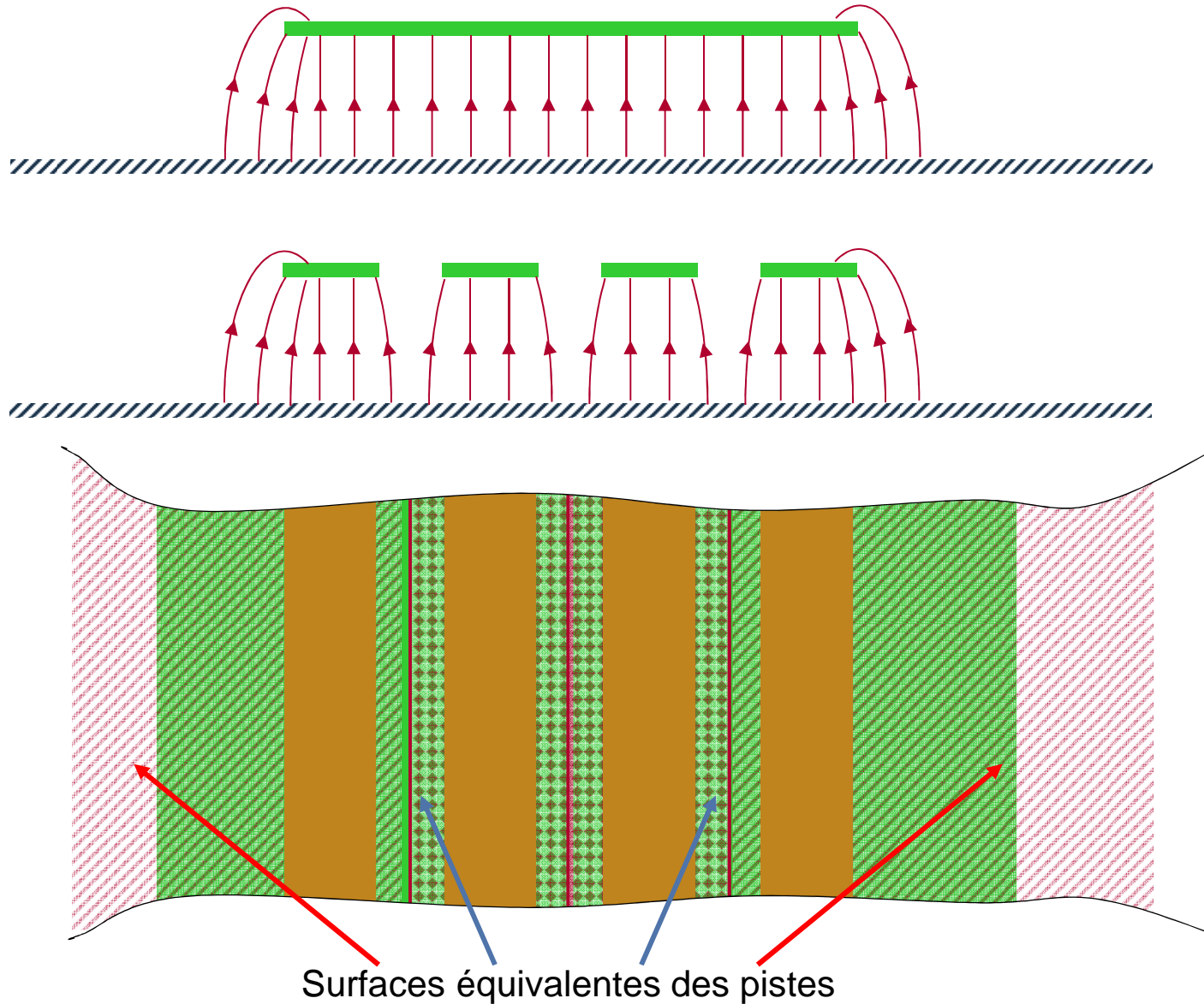
$$C_{pF} = 8,85 \cdot 10^{-2} \times \frac{S_{\text{cm}^2}}{h_{\text{cm}}}$$

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

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

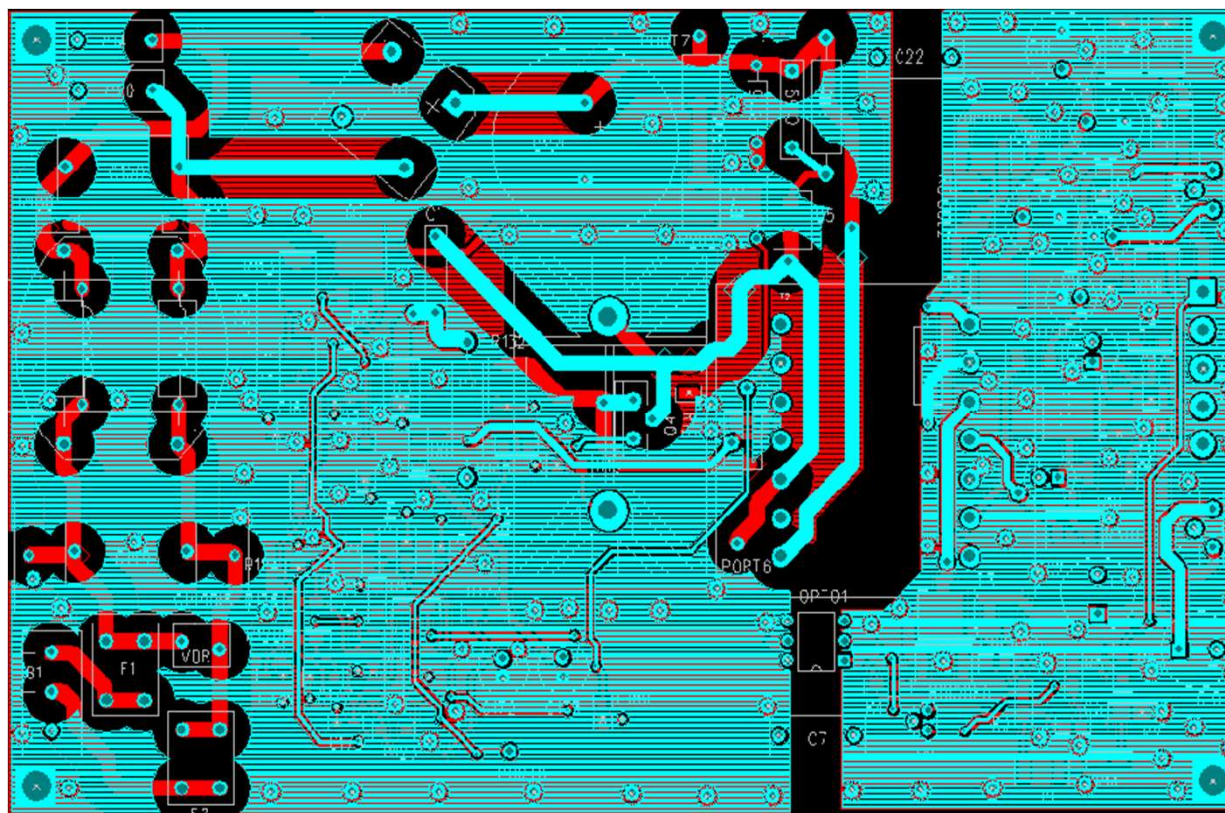
*S* : surface de la carte - *h* : hauteur entre la carte et l'environnement - *D* : Diamètre équivalent de la carte

# Capacité parasite des pistes



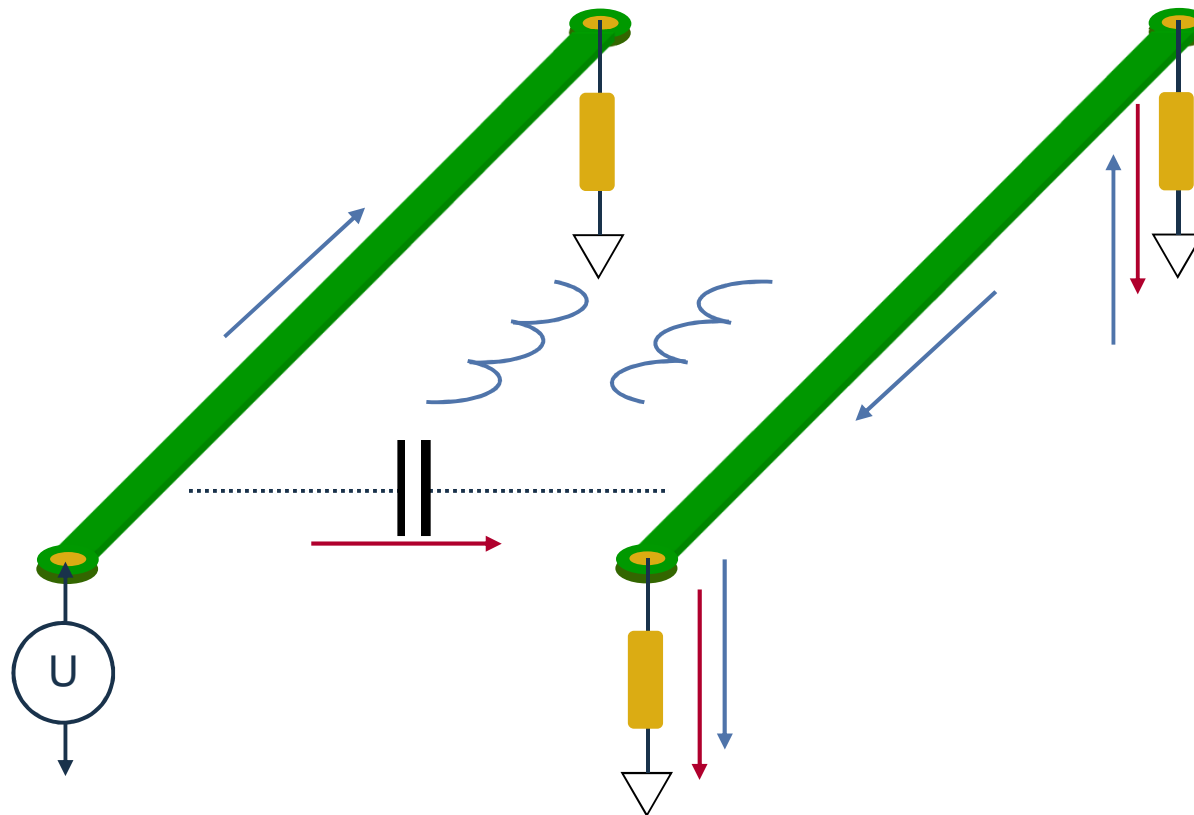
# Remplissage de masse

- ▶ Remplir des couches externes de masse en fin de routage :
  - Réduction « automatique » de la surface des pistes sensibles
  - Contribution à l'équipotentialité de la carte

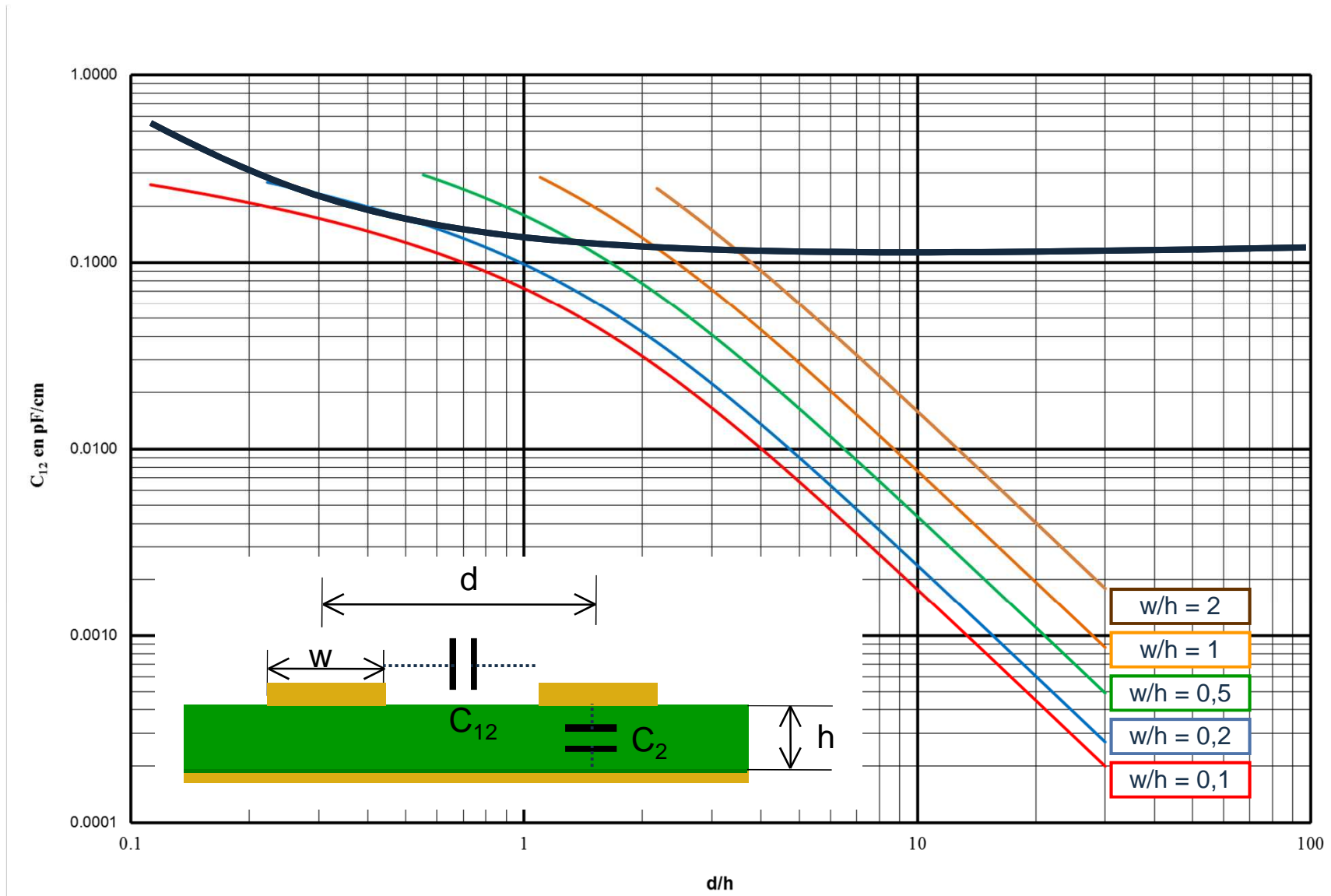




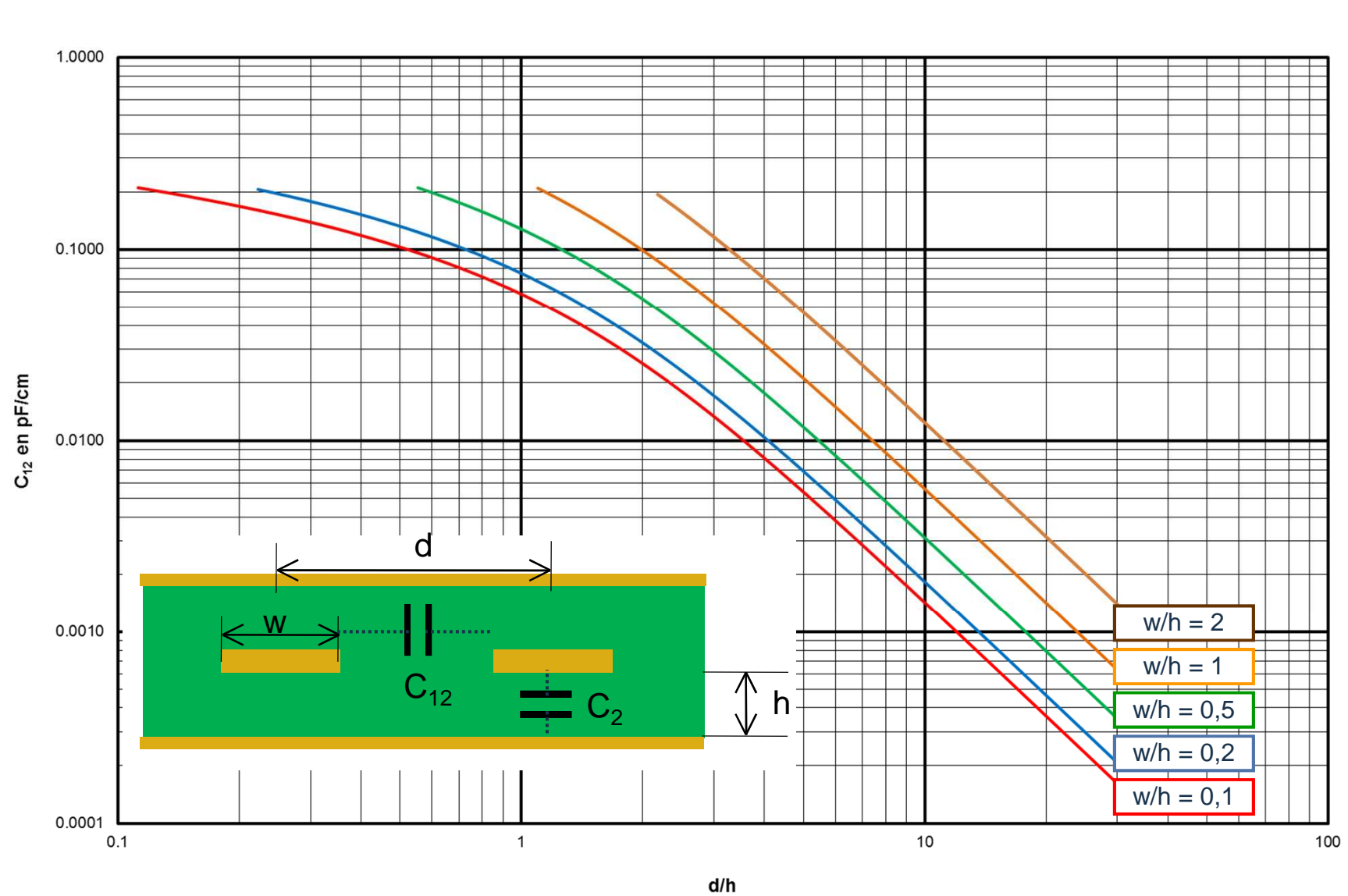
# Diaphonie piste à piste



# Capacité de couplage $C_{12}$ – Configuration microstrip



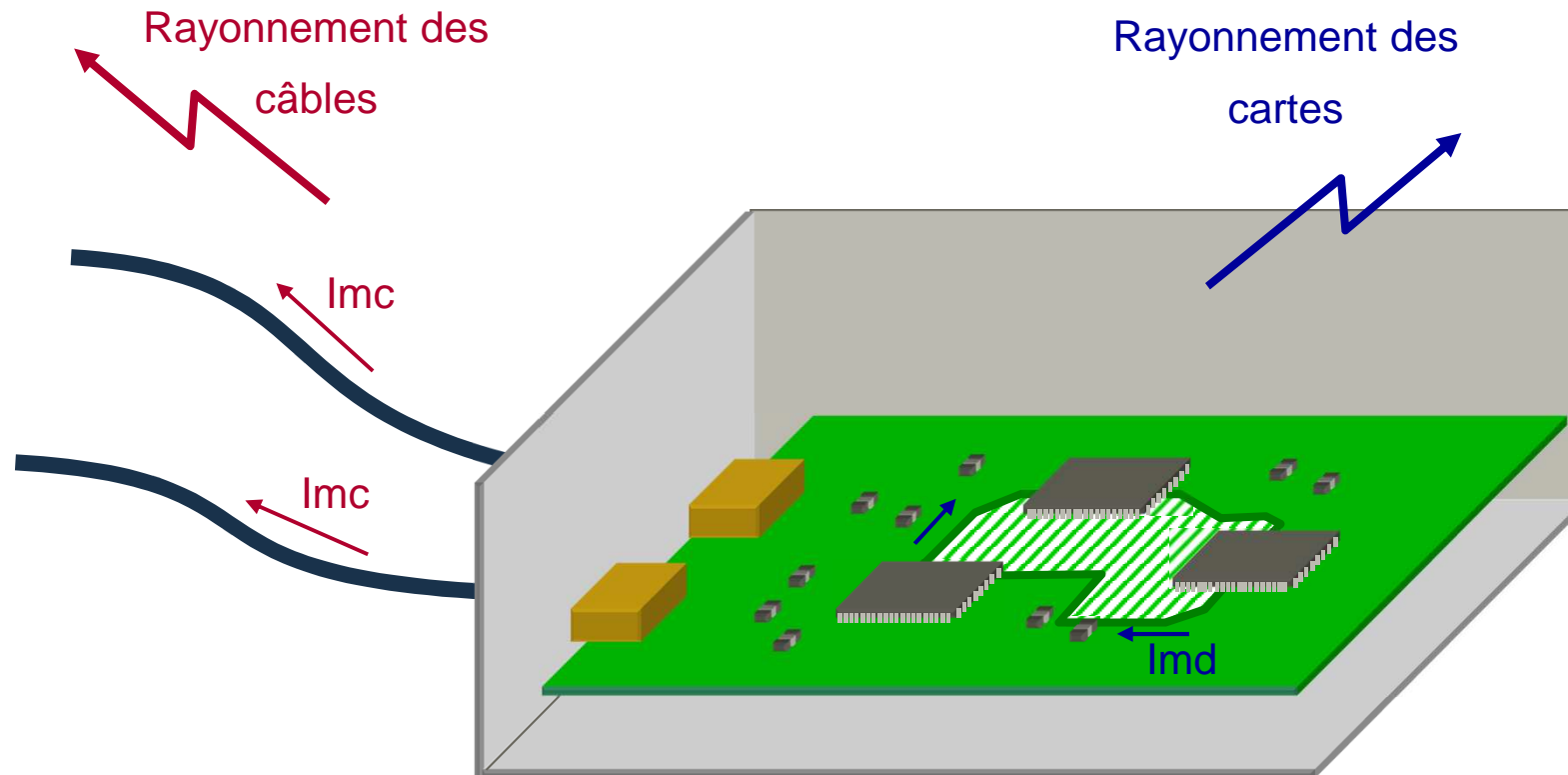
# Capacité de couplage $C_{12}$ – Configuration stripline



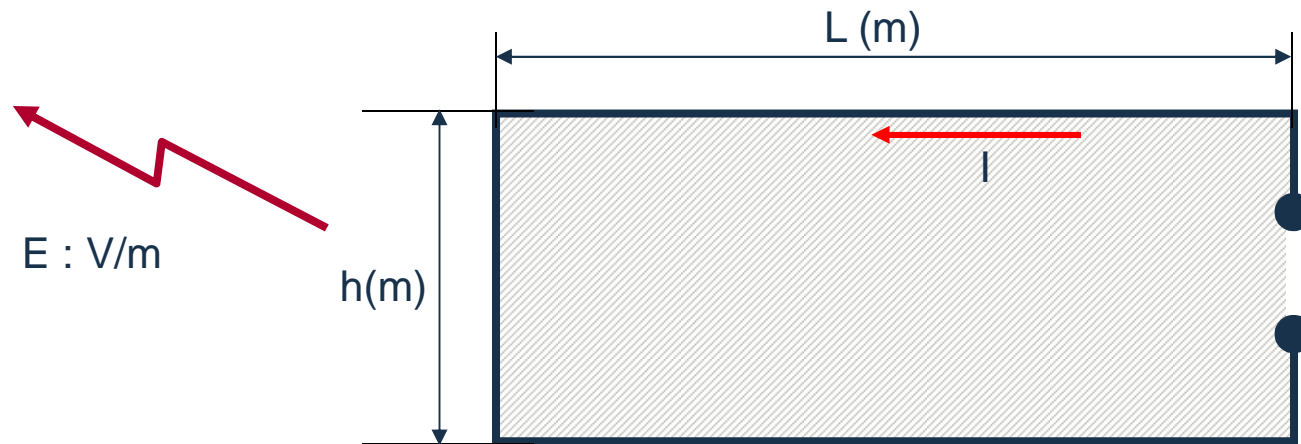


## Rayonnements des systèmes

# Sources d'émission en rayonnement



# Calcul du rayonnement d'une boucle



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

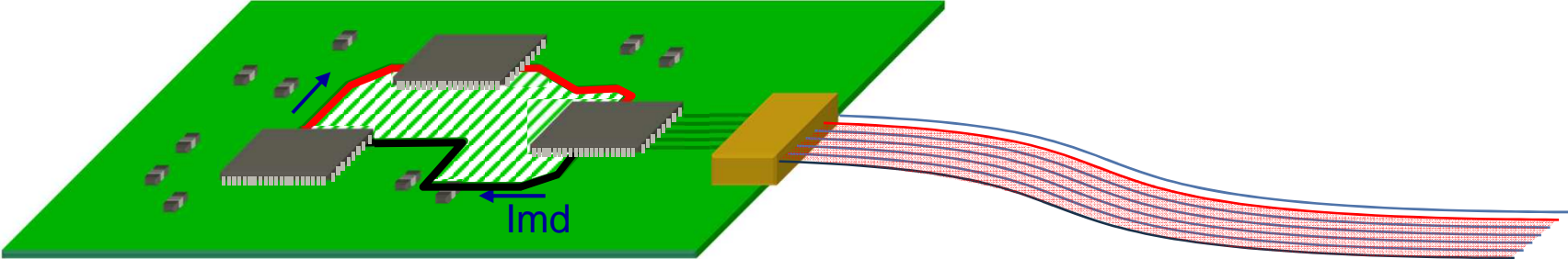
$$E_{v/m} = \frac{0,013 \times L \times h \times I_A \times F_{\text{MHz}}^2}{D_m}$$

► 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 :  $D > \lambda/2 \cdot \pi$  soit  $D > 48/F_{\text{MHz}}$*

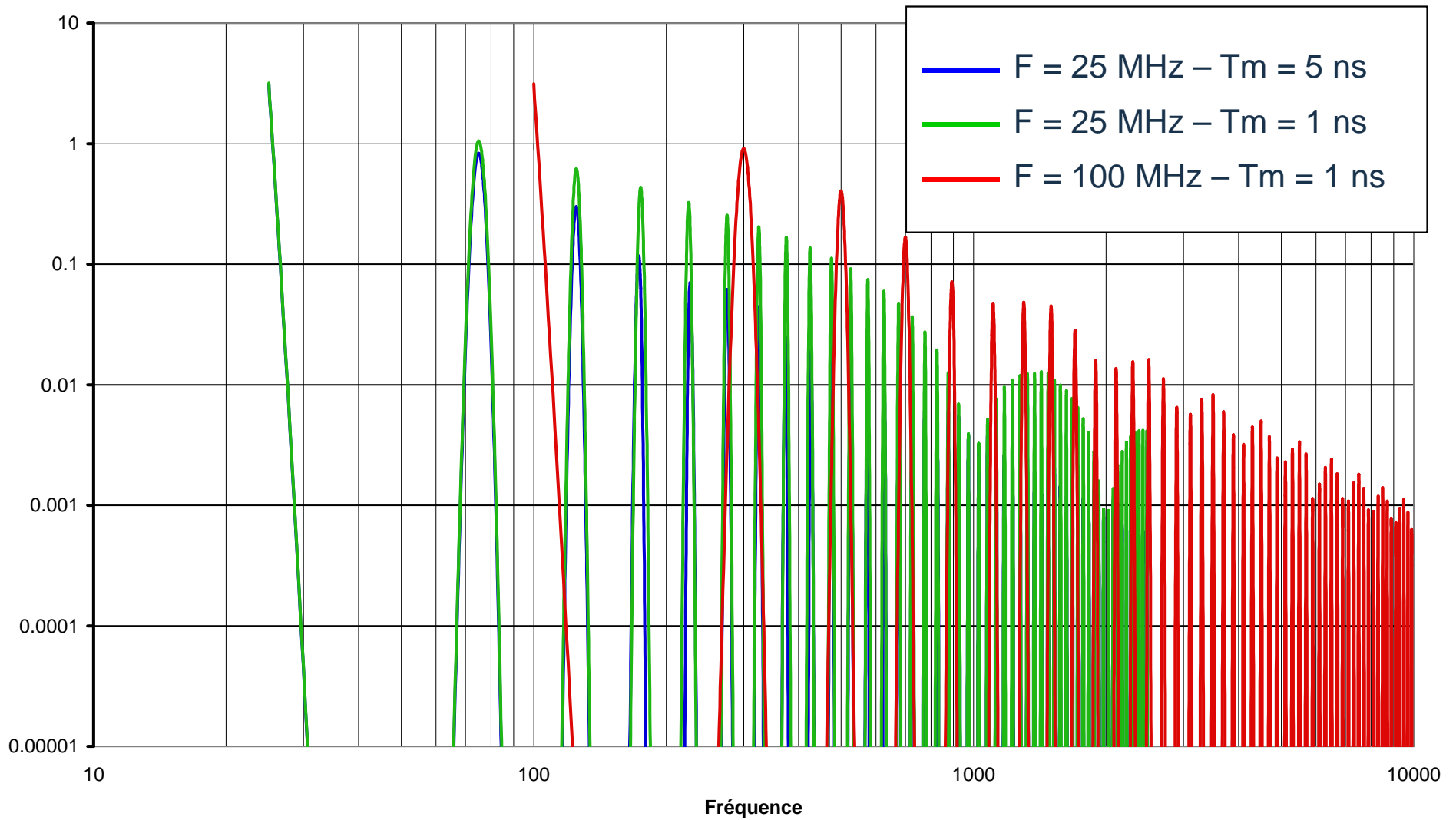
# Rayonnement des boucles d'horloge



# Spectres d'horloges

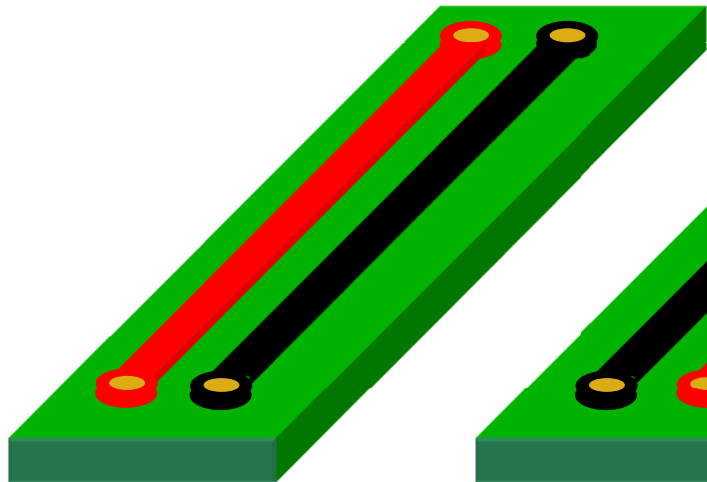
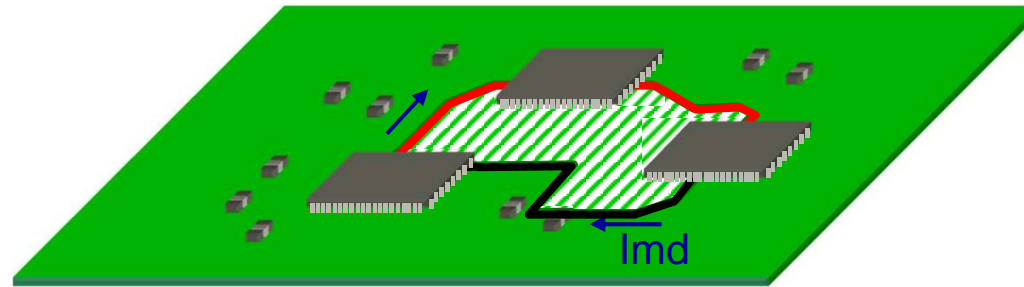


Spectre d'horloges

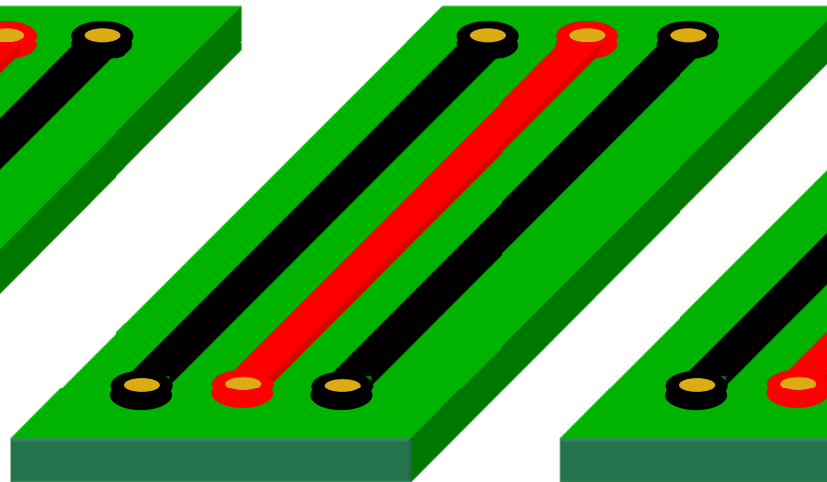




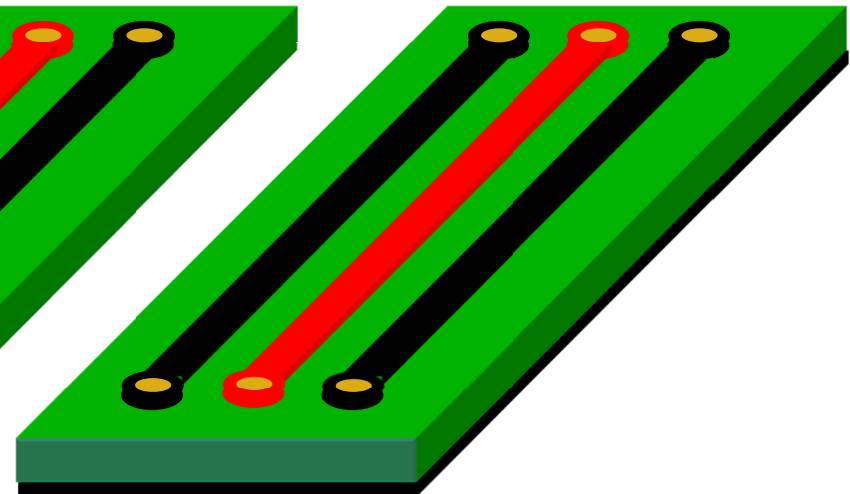
# Distribution et routages des horloges



Moyen

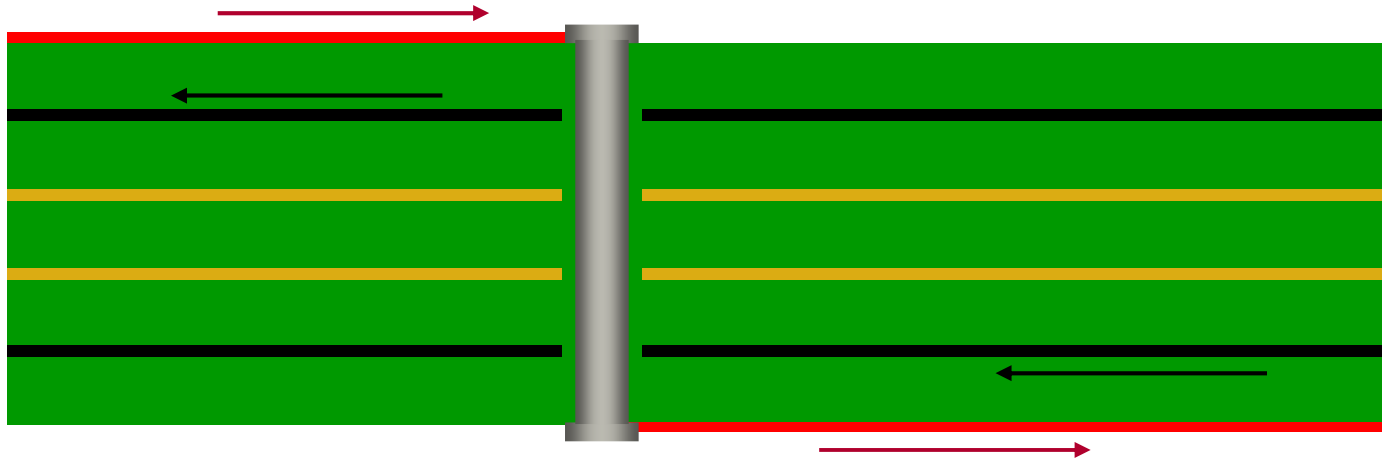


Bon



Préférable

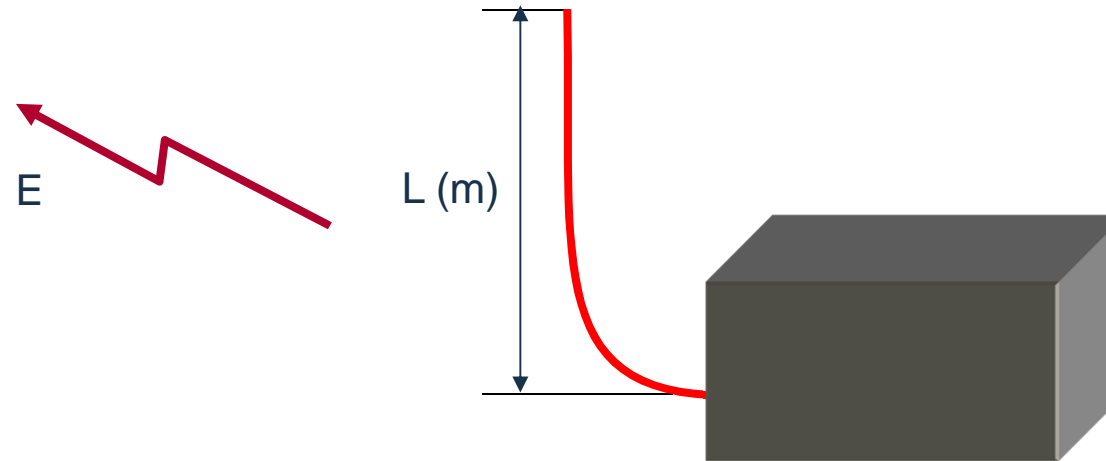
# Maîtriser le retour du courant



## ► 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

# Calcul du rayonnement d'un câble



► Si  $L < \lambda/4$

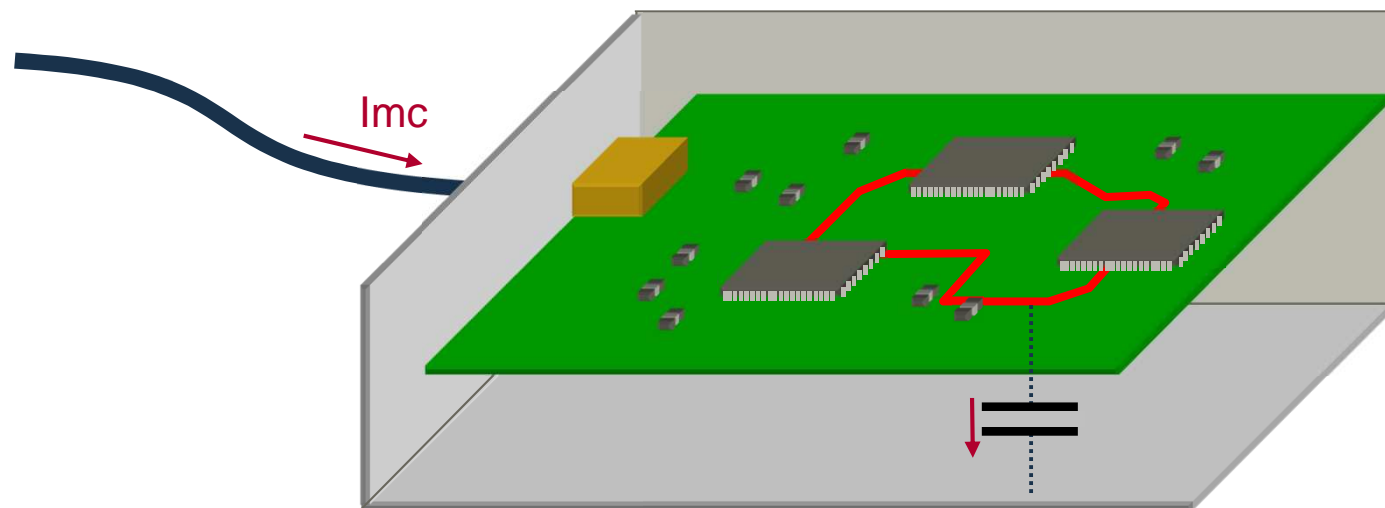
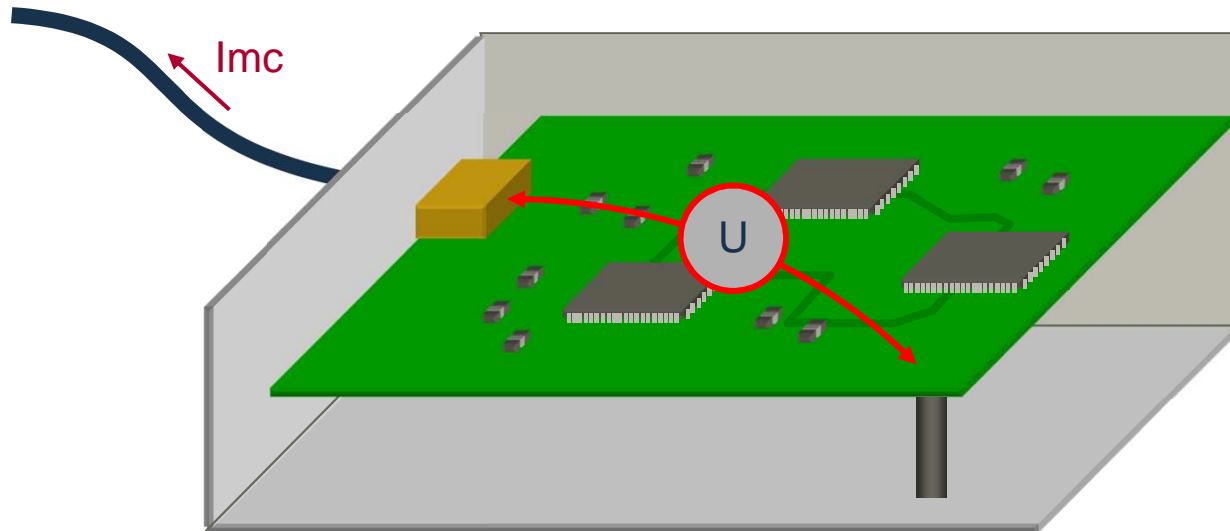
$$E_{\mu\text{V/m}} = \frac{1,26 \times I_{\mu\text{A}} \times L \times F_{\text{MHz}}}{D_m}$$

► Si  $L > \lambda/4$

$$E_{\mu\text{V/m}} \approx \frac{90 \times I_{\mu\text{A}}}{D_m}$$

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

# Rayonnement des câbles : Couplage carte à câble



# Réduction du rayonnement des systèmes

---



## ► Rayonnement des boucles

- Principe fondamental : Fil Aller proche du Fil Retour
- Carte avec plan de masse
- Nombreuses broches de masse dans les connecteurs
- 1 fils / 2 à la masse dans les nappes

## ► Rayonnement des câbles

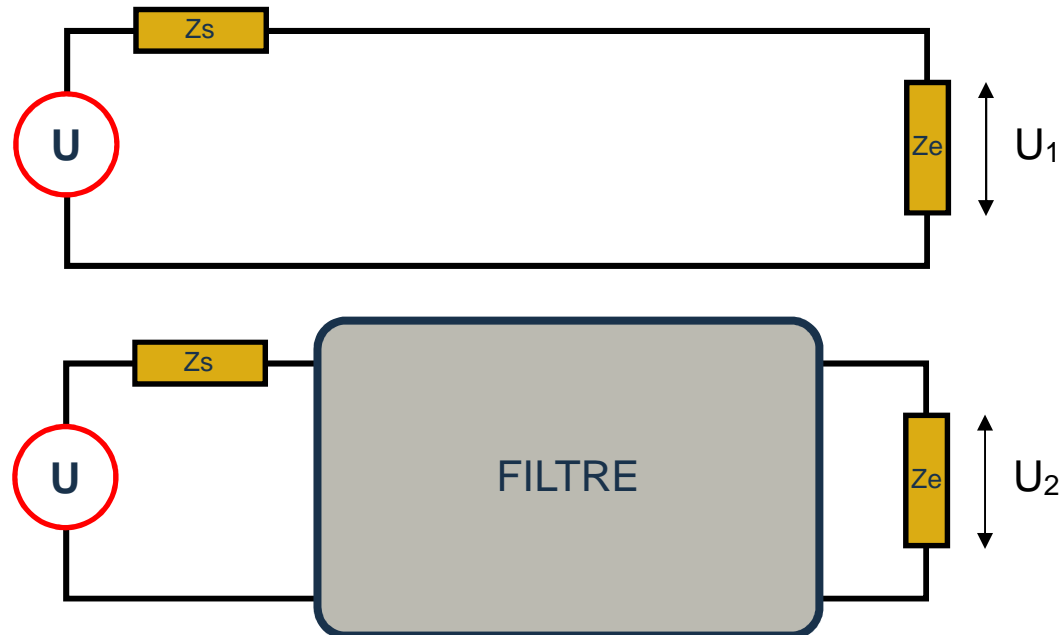
- Carte avec plan de masse
- Raccordement du 0 V au châssis
- Blindage / Filtrage des entrées-sorties



Filtrage

# Atténuation d'un filtre

Un filtre est caractérisé par sa perte d'insertion : A

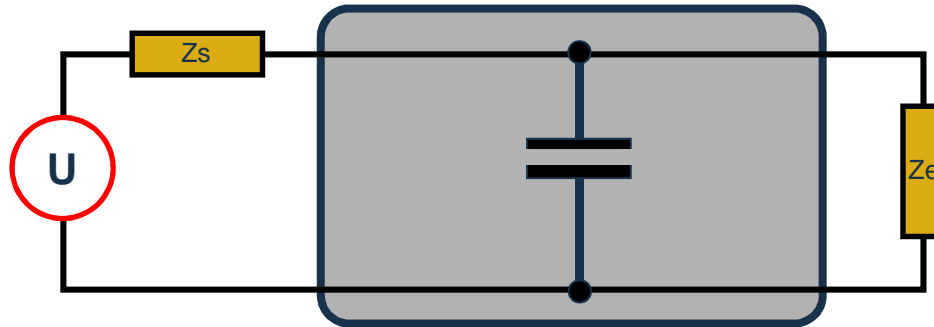


$$A_{dB} = 20 \cdot \text{Log} \left( \frac{U_1}{U_2} \right)$$

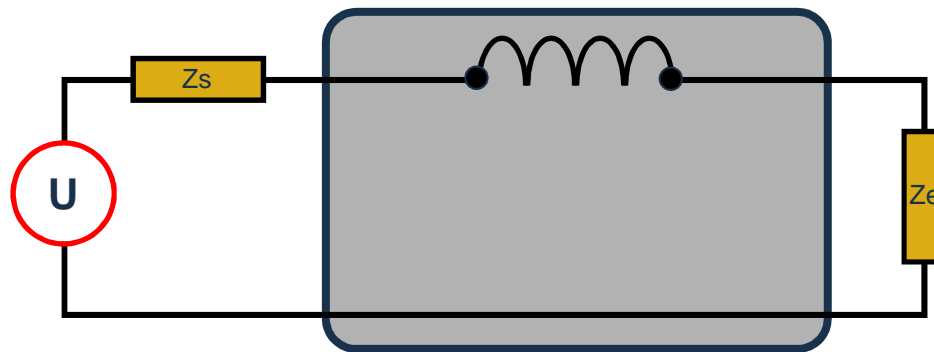
**Note :** Dans la majorité des cas,  $Z_s = Z_e = 50 \Omega$

En pratique,  $Z_s$  et  $Z_e$  peuvent prendre des valeurs très différentes

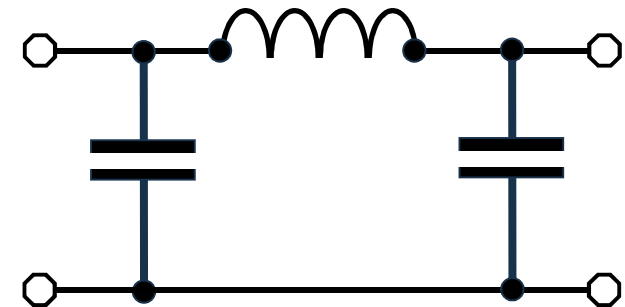
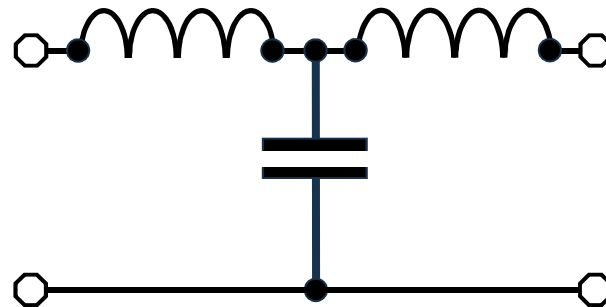
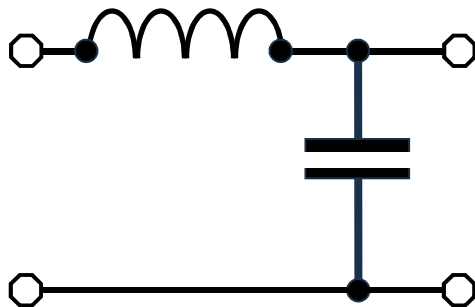
# Principes de filtrage



$Z_s$  Forte

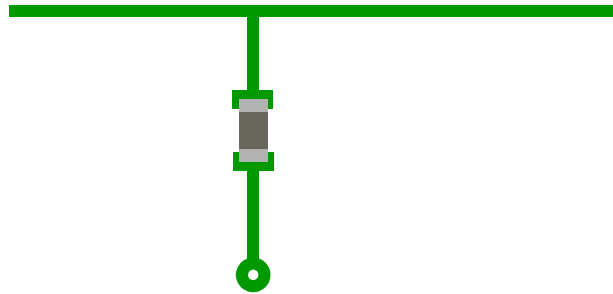


$Z_s$  Faible

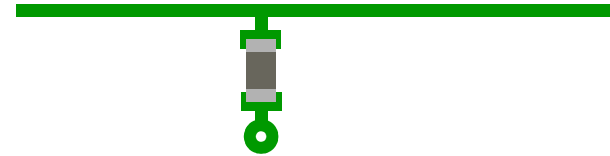




# Mises en oeuvre des composants de filtrage

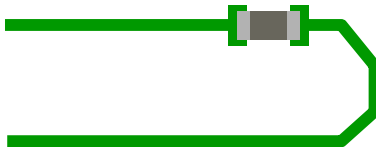


Non



Oui

Filtrage capacitif



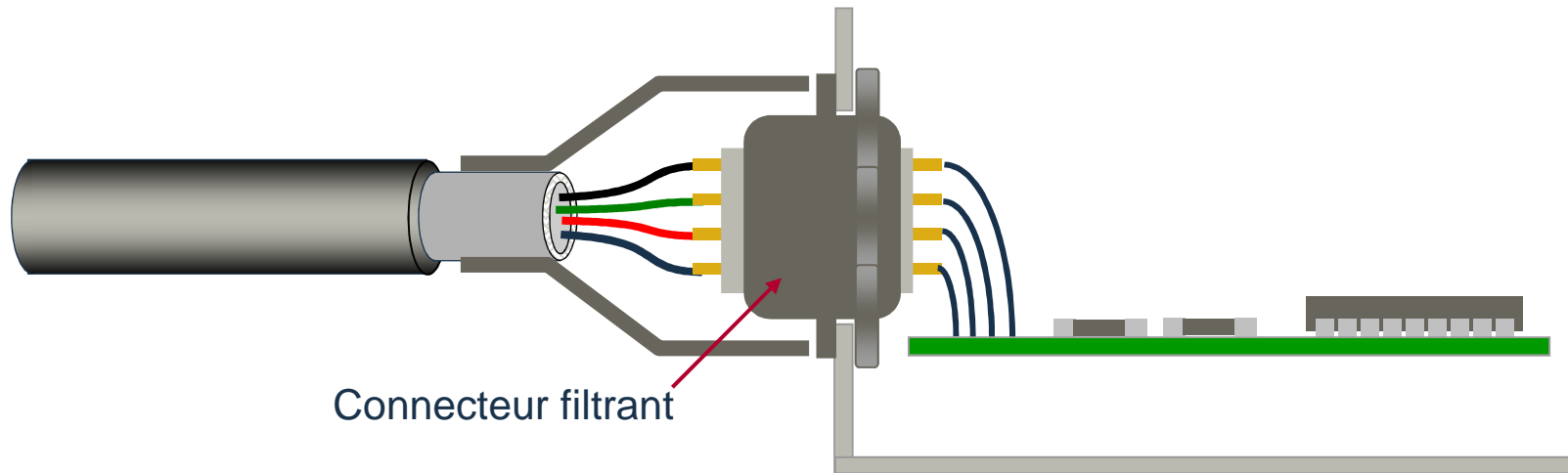
Non



Oui

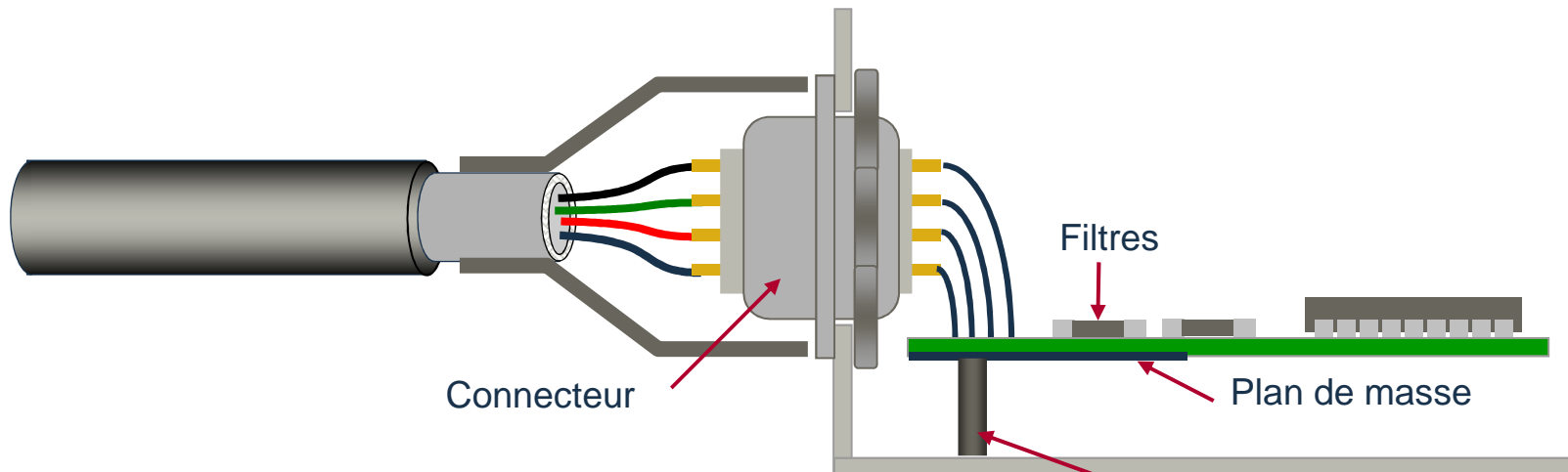
Filtrage capacitif

# Implantation des filtres



Connecteur filtrant

**Filtrage optimal**



Connecteur

Filtres

Plan de masse

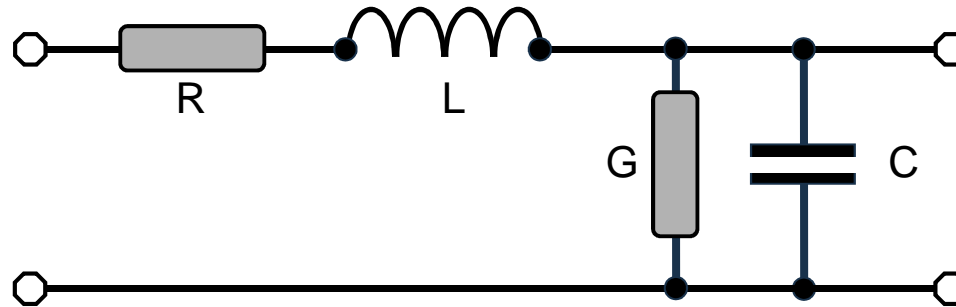
**Filtrage sur circuit imprimé**

Raccordement au  
châssis



## Intégrité du signal

# Lignes de transmission - Définitions



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

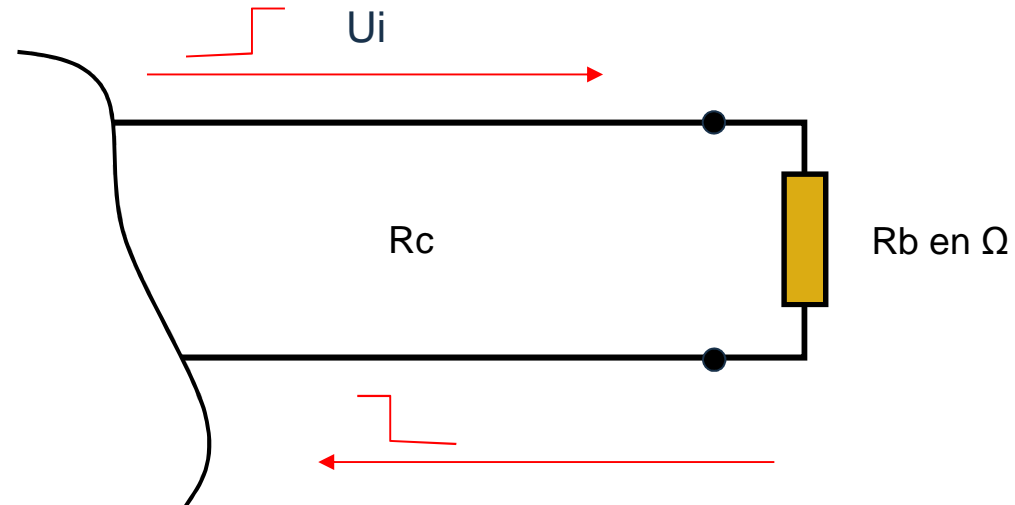
► Propagation dans une ligne sans perte :

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

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

# Ligne de transmission – Réflexion

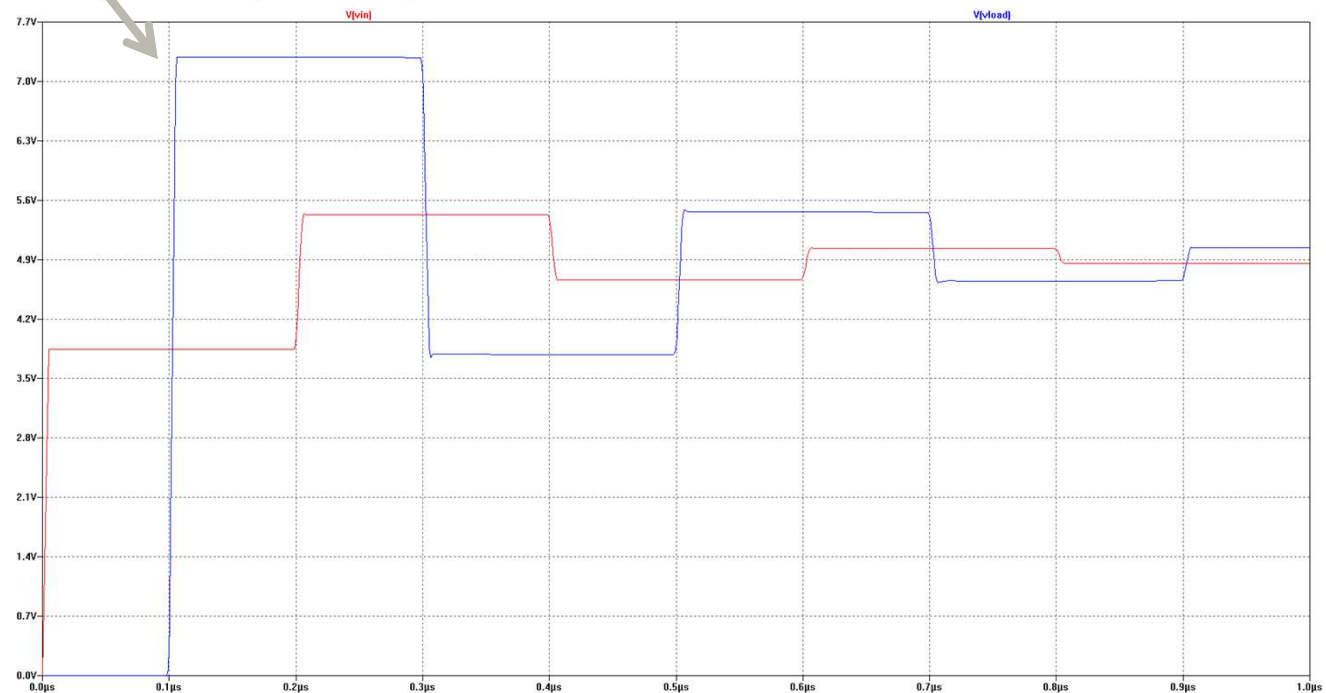
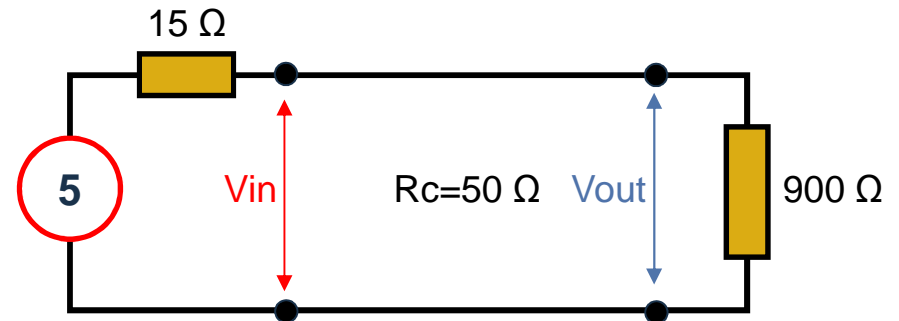
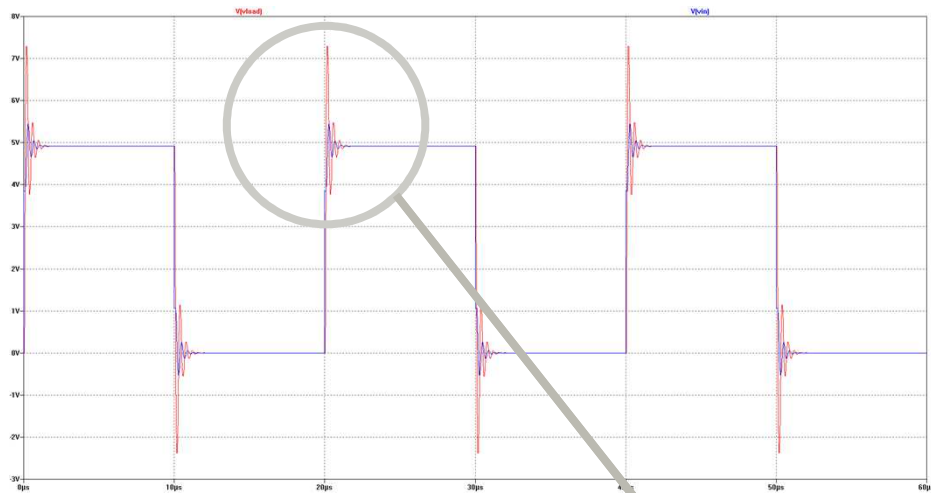
- Propagation le long d'une ligne non adaptée :



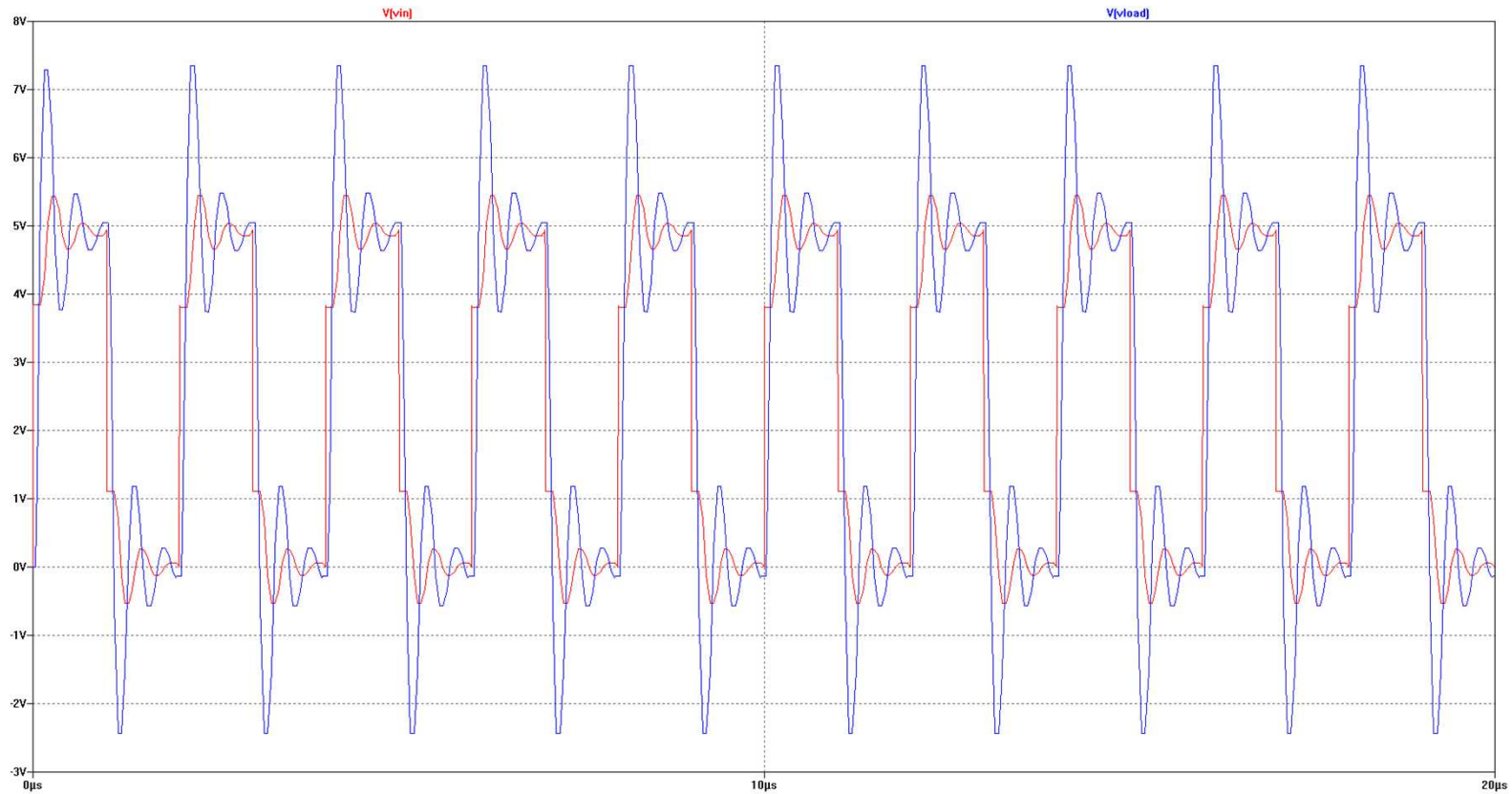
$$R = \frac{R_b - R_c}{R_b + R_c}$$

$$U_r = U_i \times R$$

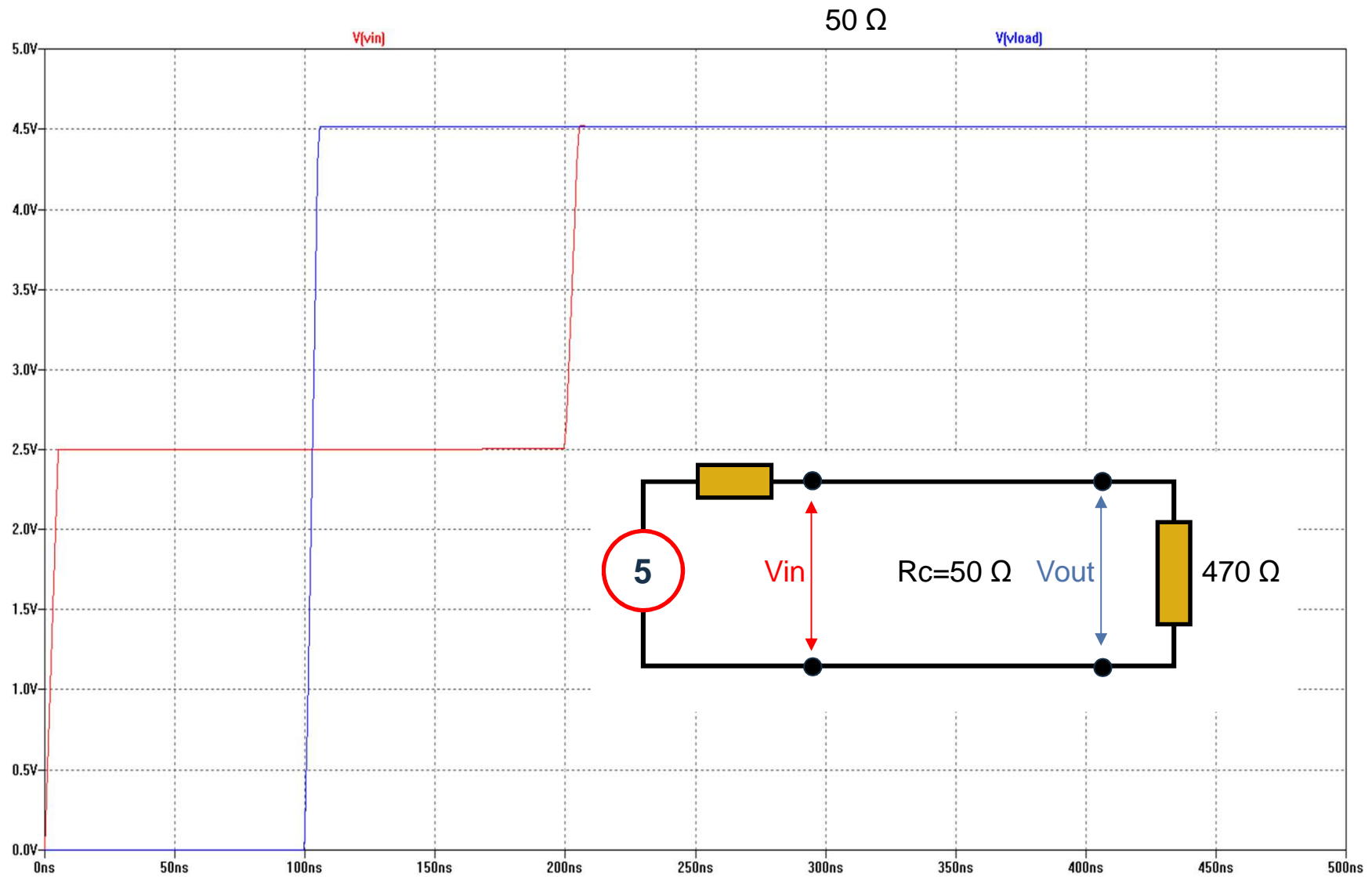
# Ligne de transmission – Forme des signaux



# Ligne de transmission – Forme des signaux



# Ligne de transmission – Adaptation série

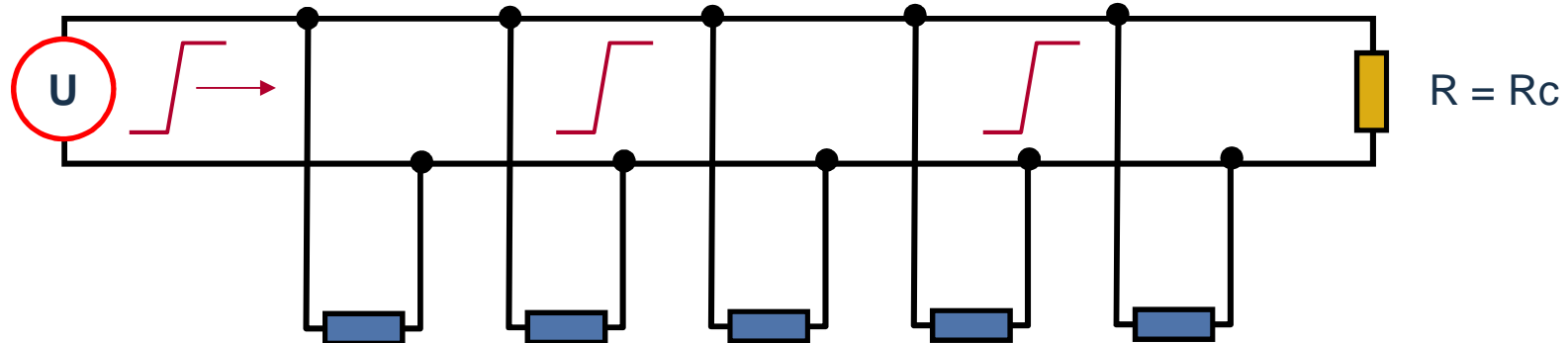




# Différents de type de transmission

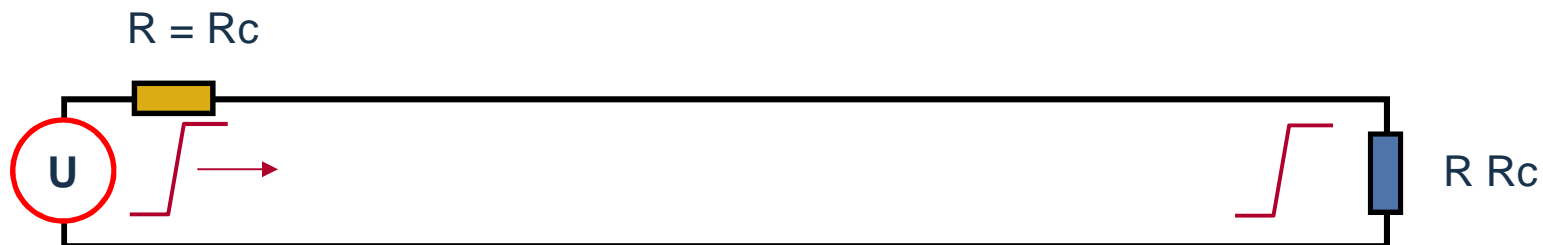
## ► Liaison multipoints :

- Adaptation parallèle



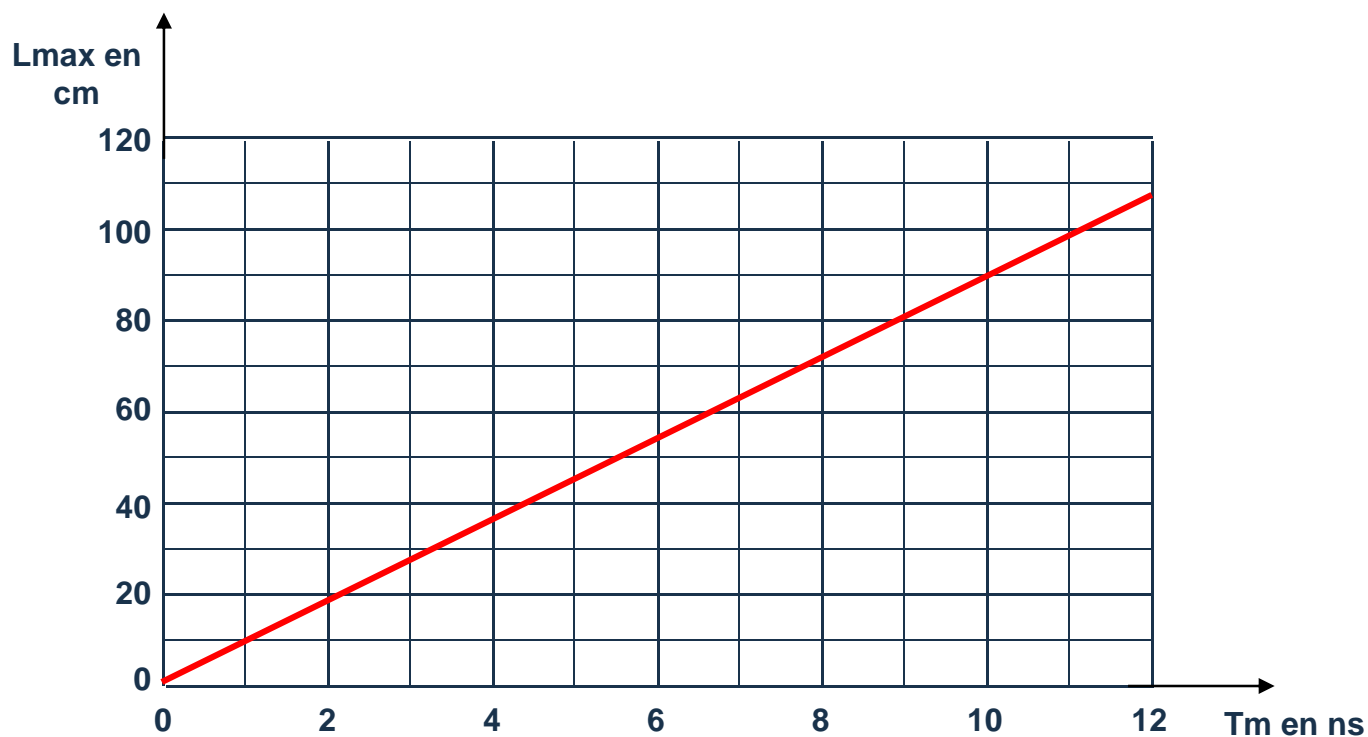
## ► Liaison point à point :

- Adaptation série



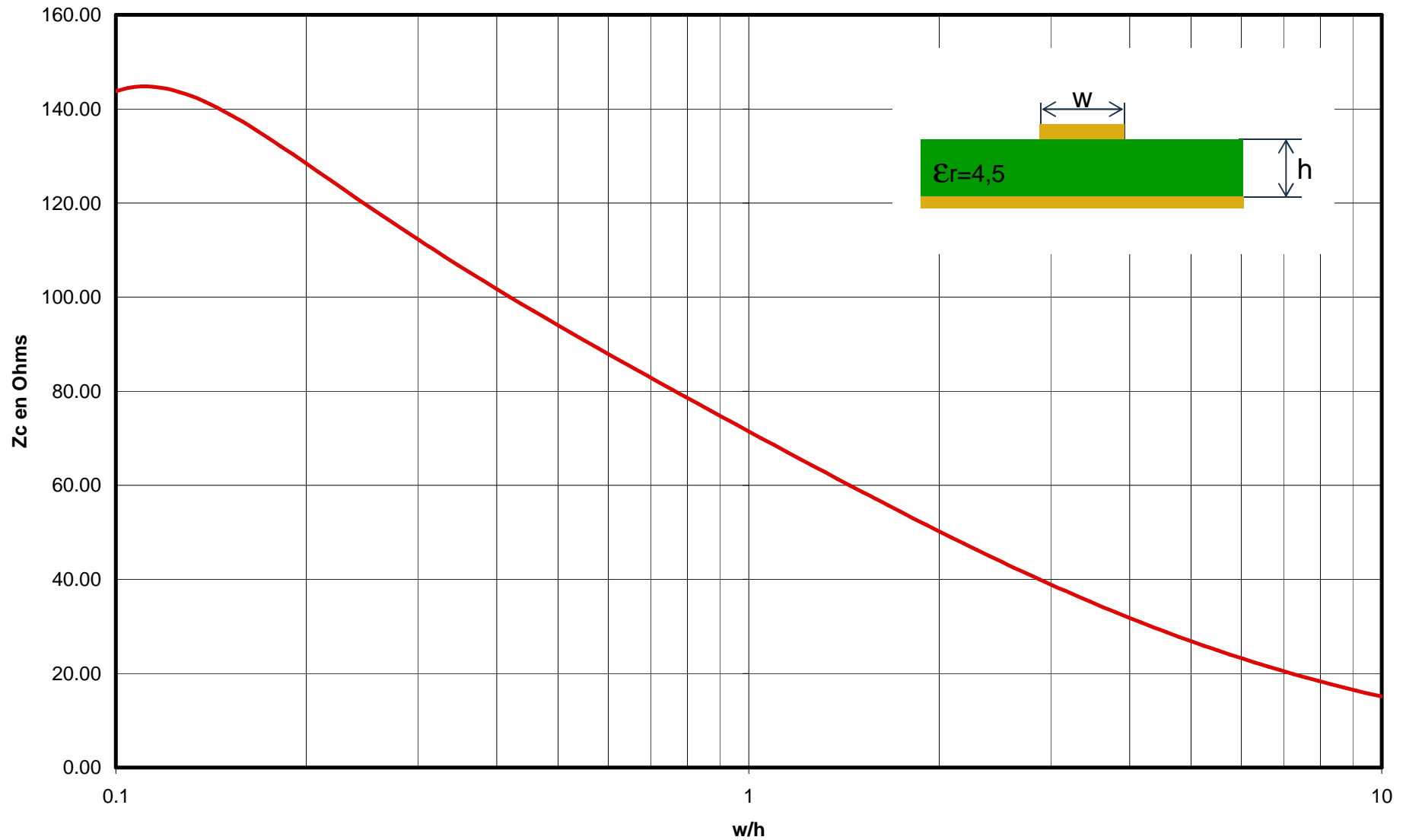
## Longueur maximale sans adaptation

- 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.



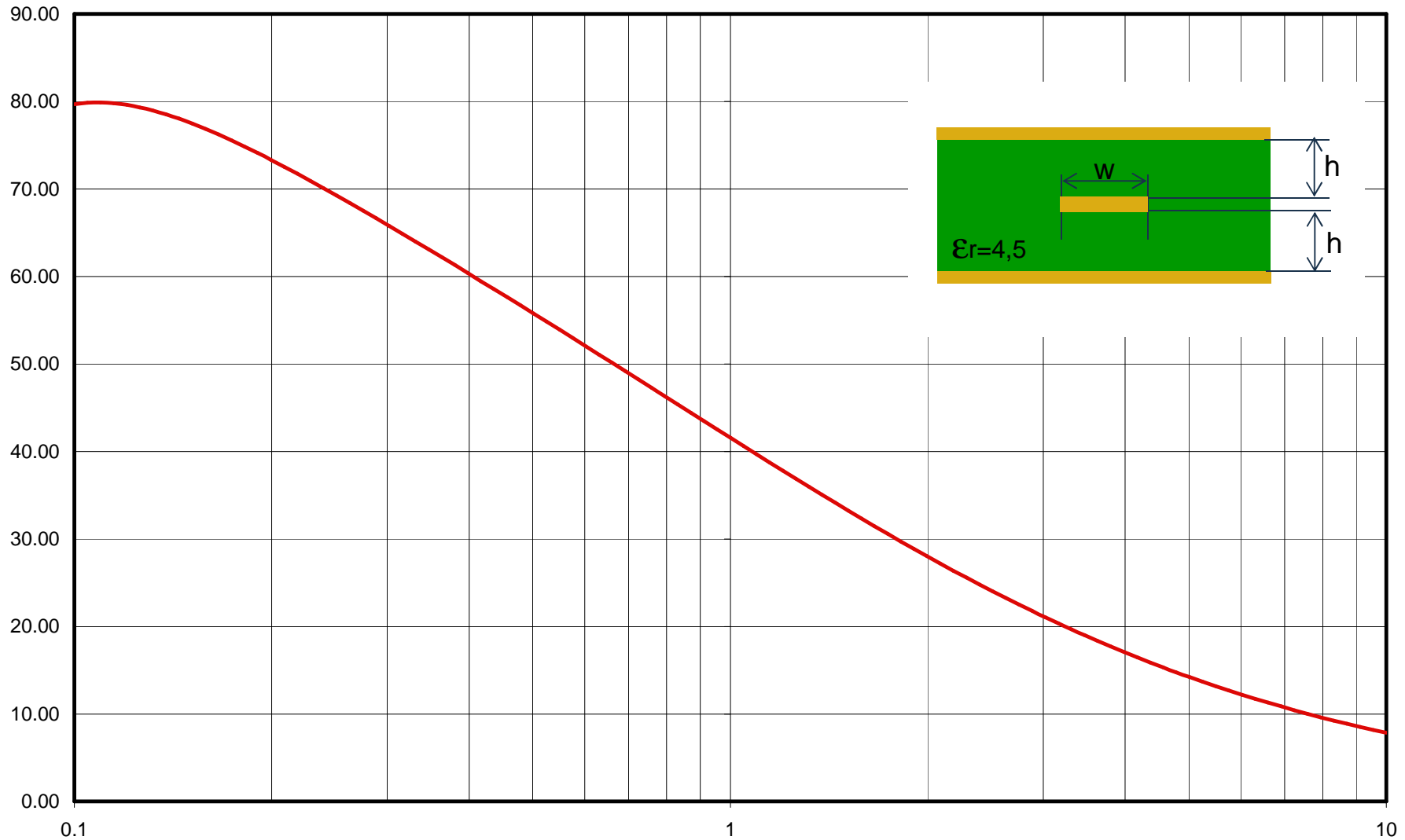
Longueur maximale d'une ligne non-adaptée en fonction du temps de montée des signaux

# Impédance caractéristiques d'une ligne microstrip



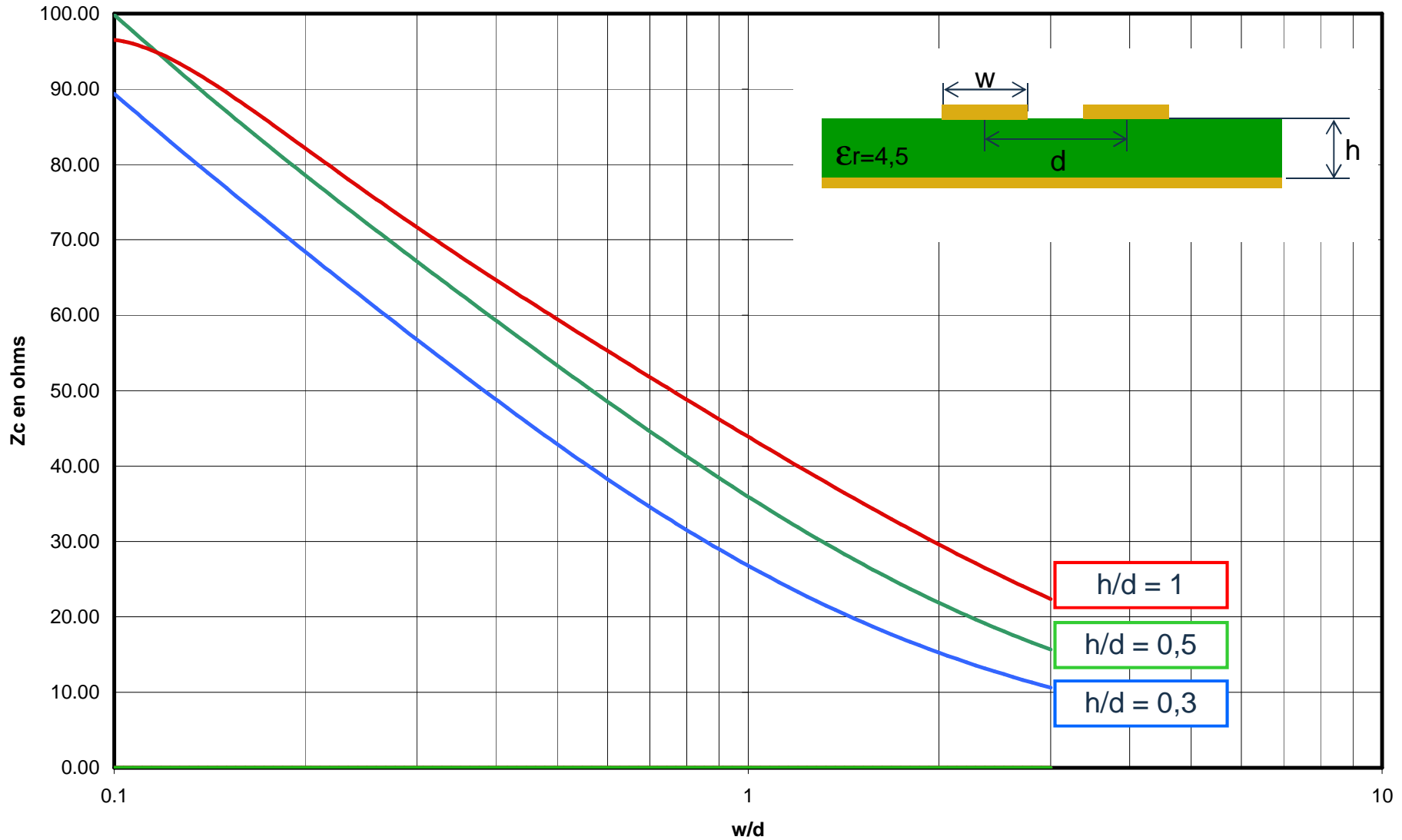
Ref : Capacitance, Inductance and crosstalk analysis – Charles S. Walker

# Impédance caractéristique d'une ligne stripline



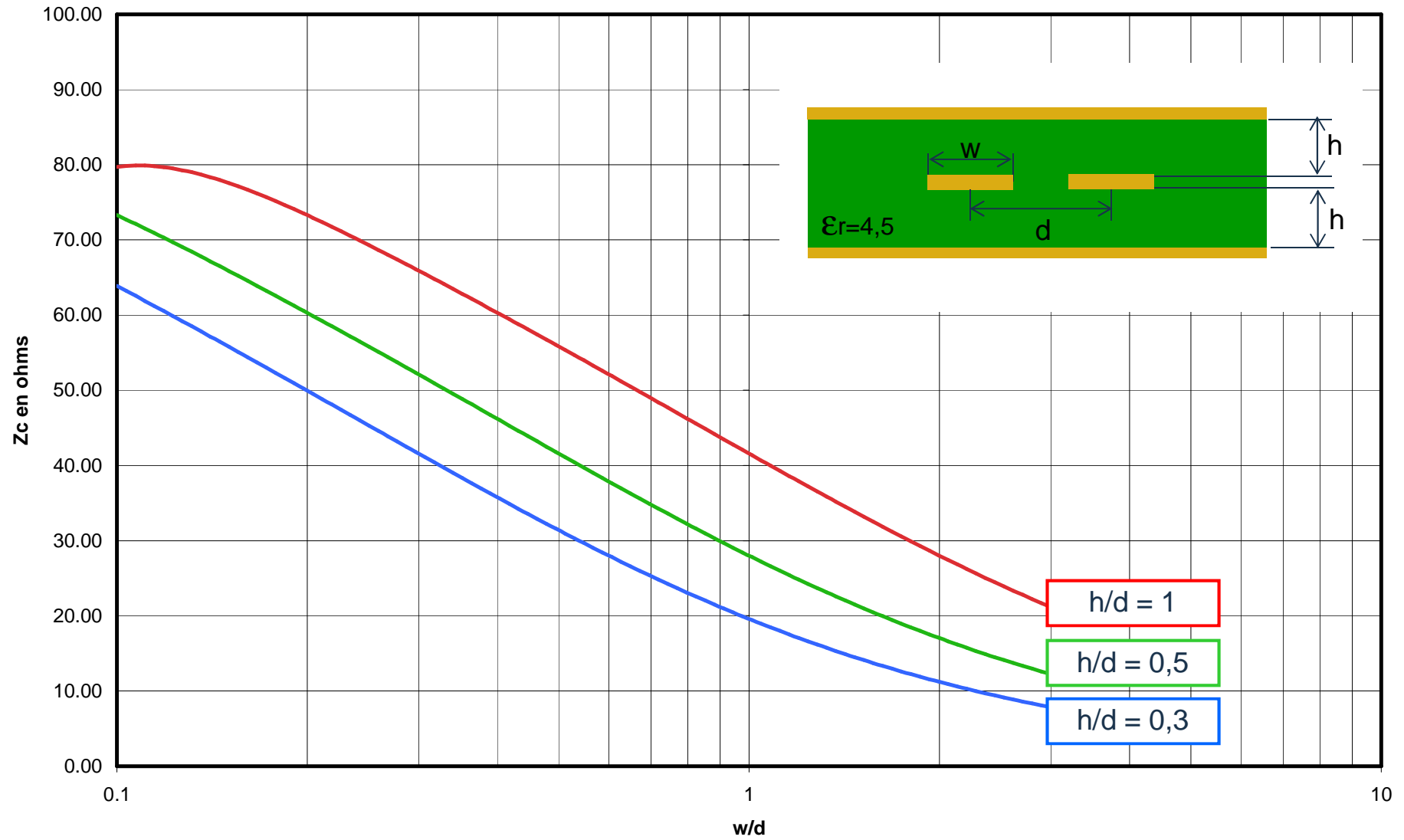
Ref : Capacitance, Inductance and crosstalk analysis – Charles S. Walker

# Impédance caractéristique d'une ligne différentielle - Microstrip



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

# Impédance caractéristique d'une ligne différentielle - Stripline

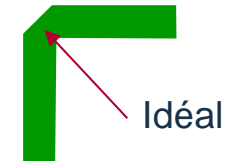
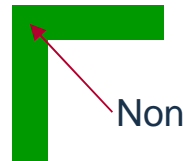


Ref : Capacitance, Inductance and crosstalk analysis – Charles S. Walker

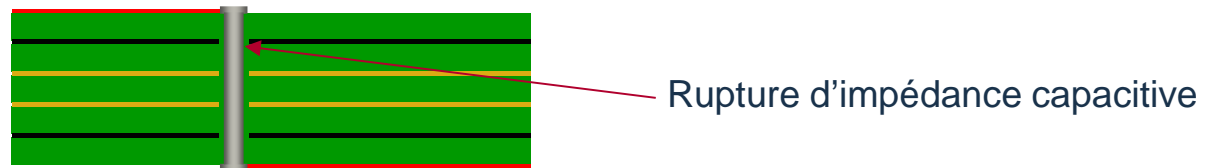
# Lignes de transmissions - Ruptures d'impédance

## ► Rupture d'impédance « Géométrique » :

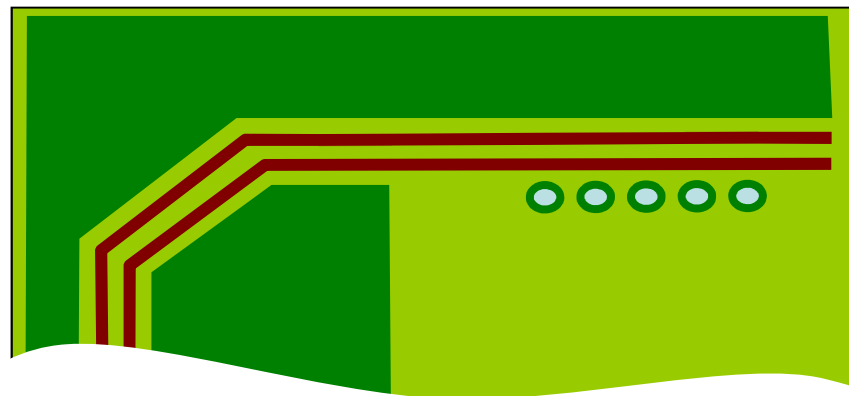
- Changement de direction



- Trous métallisés

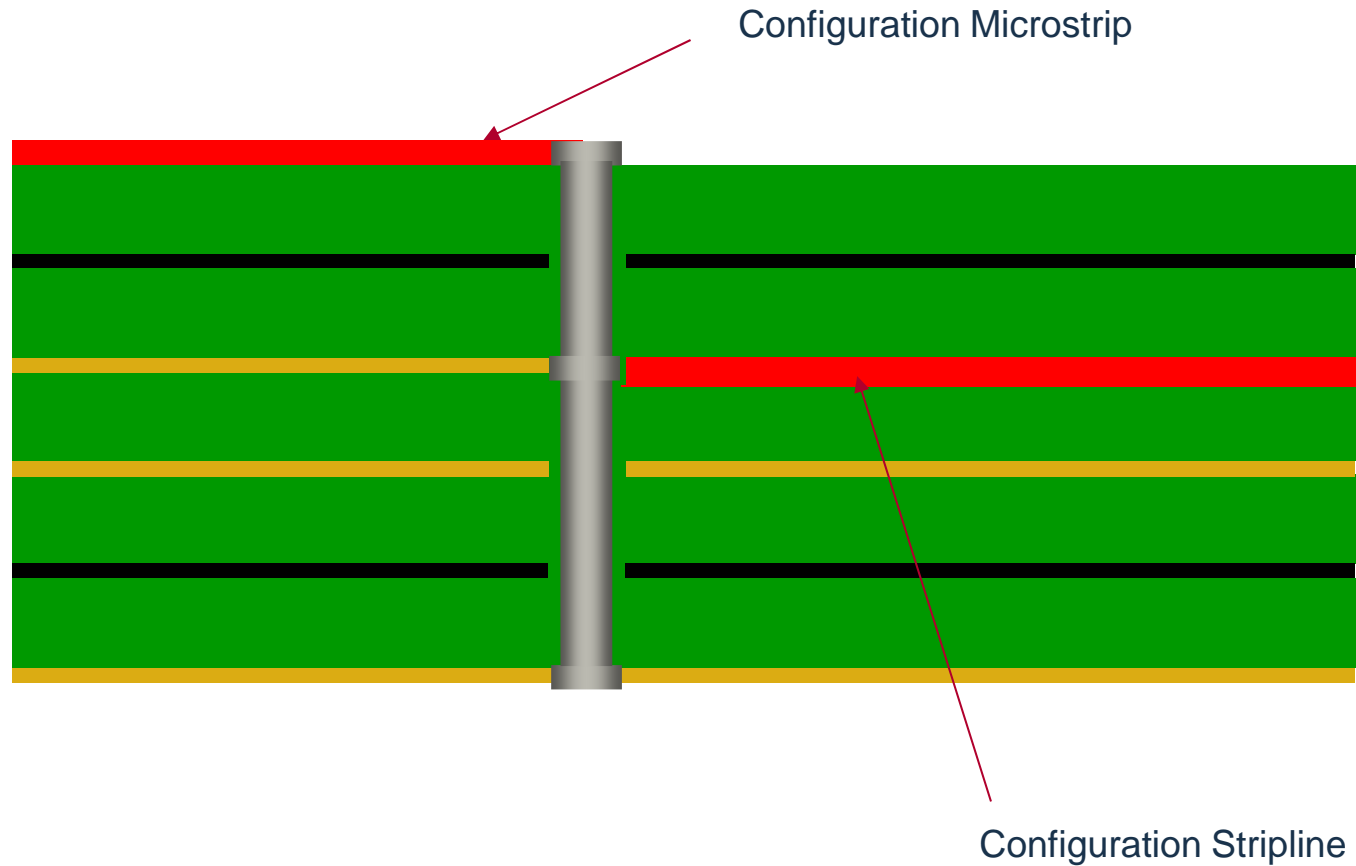


## ► « Influence » éléments externes sur une ligne différentielle



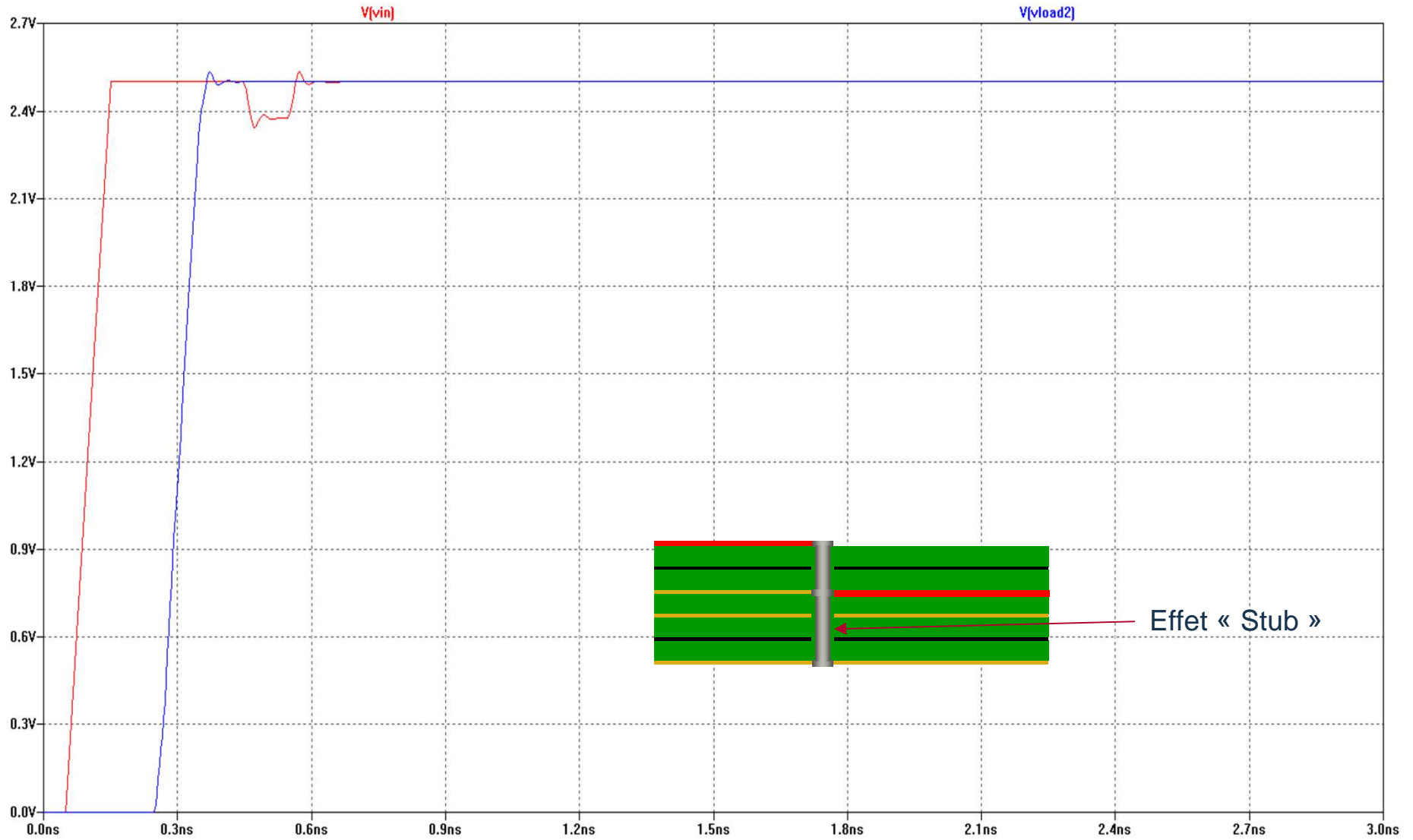
# Rupture d'impédance « Structurelle »

## ► Changement de configuration





# Effet des trous métallisés

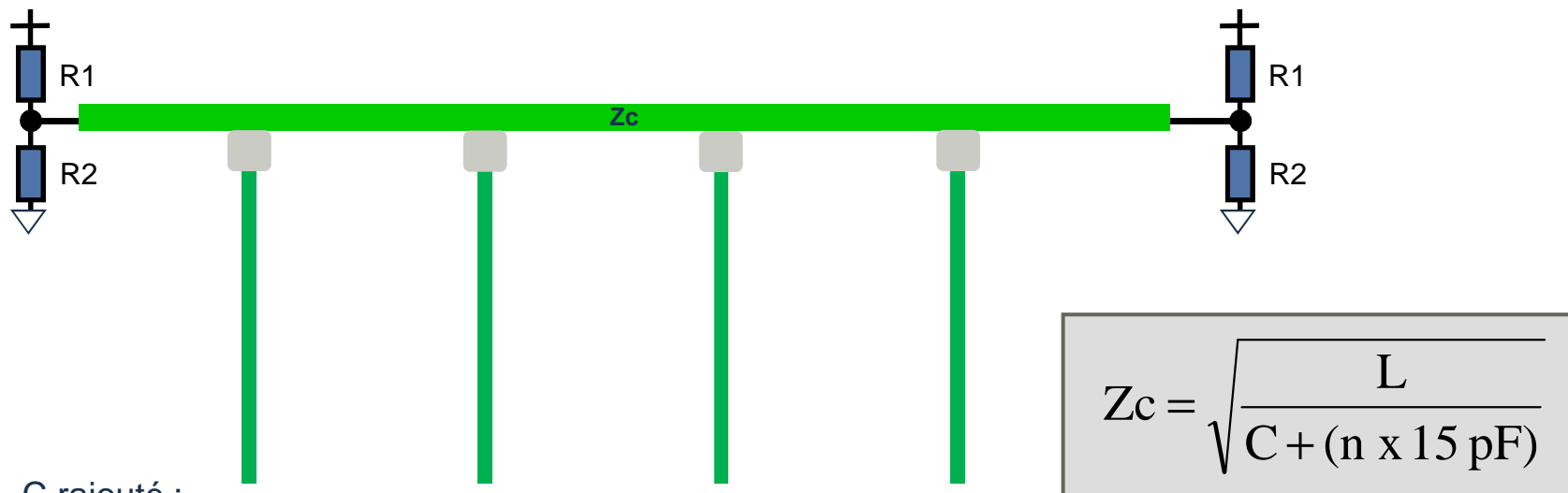


# Problèmes des fonds de panier

- ▶ Adaptation aux deux extrémités : Consommation importante



- ▶ Insertion de carte : Modification de  $Z_c$



C rajouté :

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

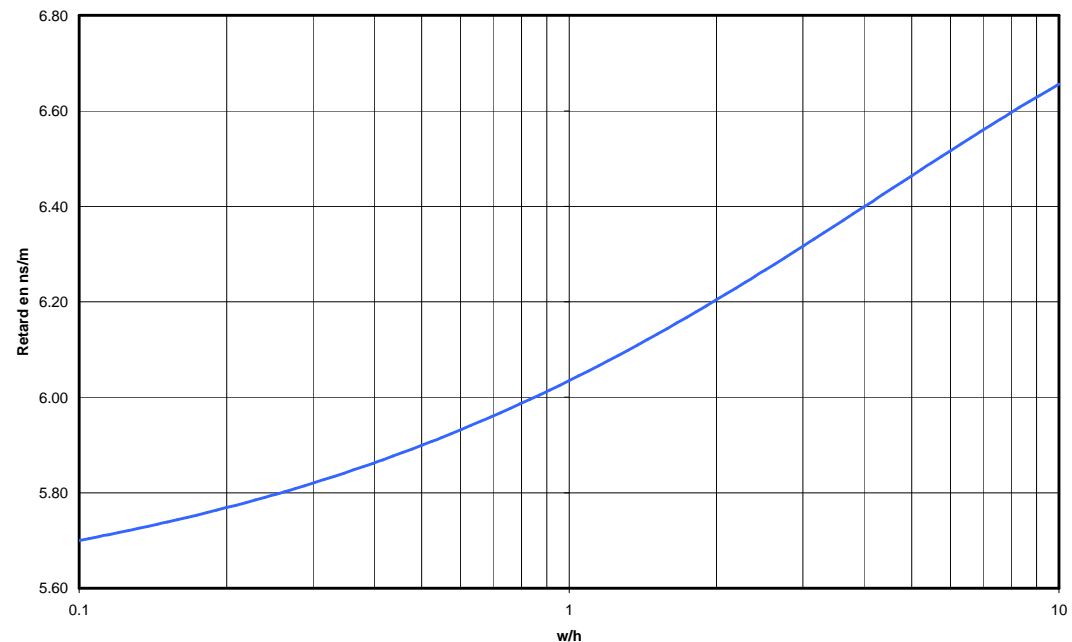
# Vitesse de propagation et Retards

## ► Isolant homogène :

- La vitesse de propagation est indépendante de la géométrie et ne dépend que de  $\epsilon_r$
- 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



# Lignes de transmission : Impact sur le choix du câblage et du circuit imprimé

---



## ► 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**



## 4 : Synthèse

# Maitriser l'application des règles CEM



- ▶ **Importance de la prise en compte de la CEM au stade conception**
- ▶ **Le schéma doit intégrer toutes les consignes spécifiques aux règles de conception retenues**
- ▶ **L'équipotentialité constitue quelque chose de fondamentale en hautes fréquences ; attention aux impédances de masse !**
- ▶ **Mettre en place les moyens de protection contre ce type de perturbations pendant la phase conception :**
  - ▶ Routage de la carte électronique
  - ▶ Câbles blindés avec reprise sur 360 ° au niveau des connecteurs ou en traversée de paroi
  - ▶ Filtrage des alimentations et des entrées sorties
  - ▶ Equipotentialité au niveau de la carte électronique, entre cartes et entre les cartes et le châssis (prévoir des capacités de liaison dans si connexion directe non autorisée)
  - ▶ Blindage du boîtier avec maîtrise des ouvertures et passages de câbles
  - ▶ Intégration des équipements dans les boîtiers
  - ▶ Ferrites



BUREAU  
VERITAS

***Move Forward with Confidence\****