



Les techniques de tracé et de routage des cartes électroniques

Philippe DUNAND

Avançons en confiance

© - Copyright Bureau Veritas

*Move Forward with Confidence**



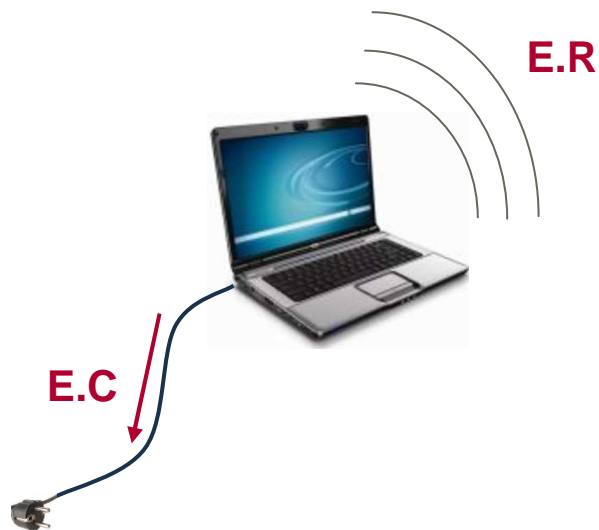
**BUREAU
VERITAS**

CEM - Définition

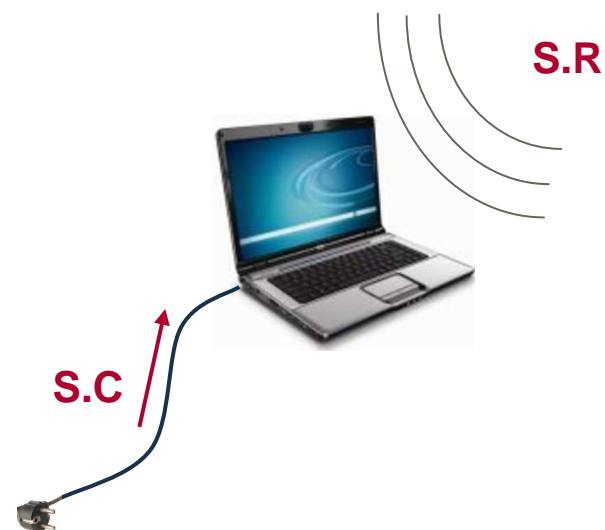
► Compatibilité ElectroMagnétique :

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

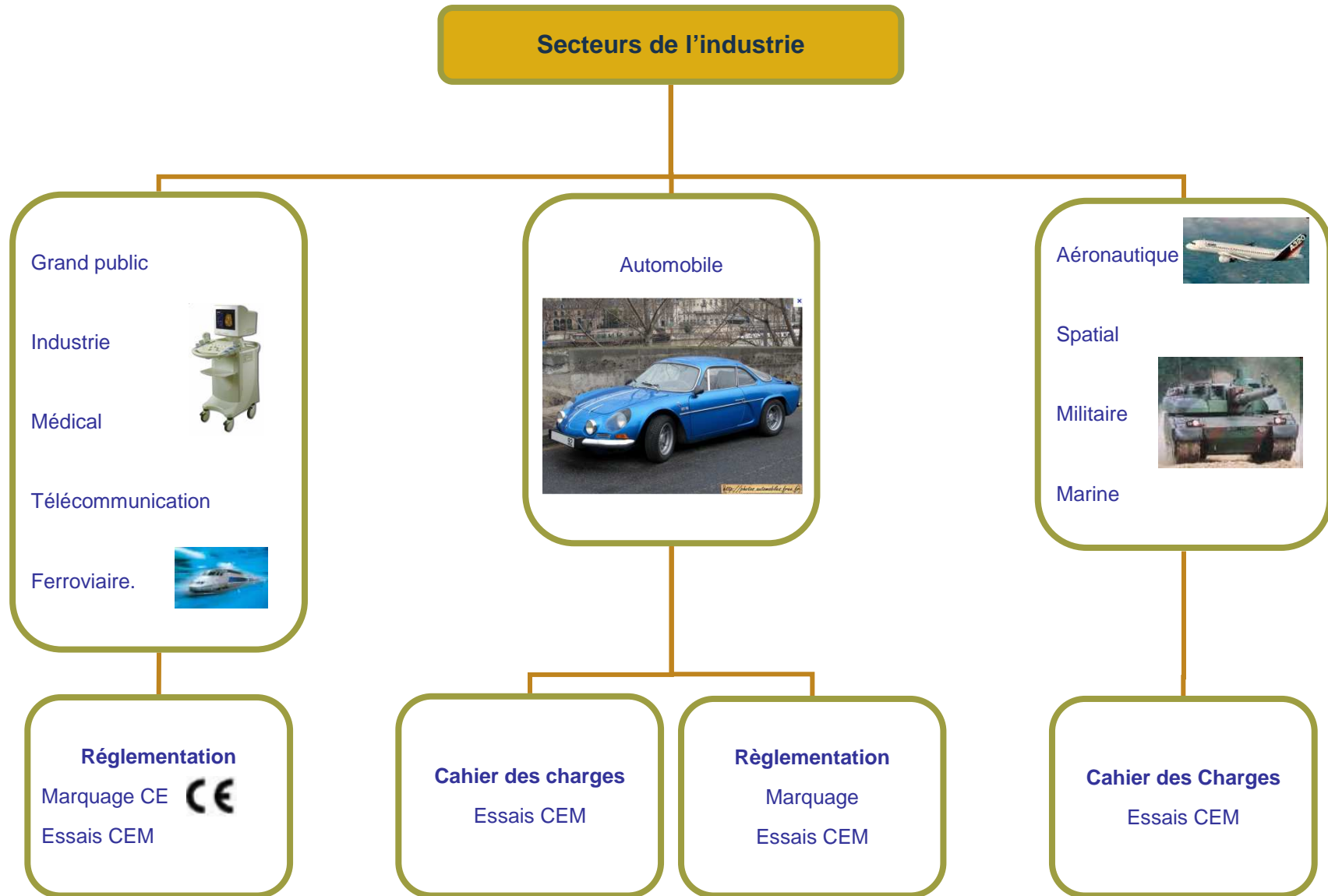
- ▶ Télécoms
- ▶ Spatial et Militaire
- ▶ Avionique
- ▶ Automobile
- ▶ Industrie
- ▶ ...

Gamme de fréquence

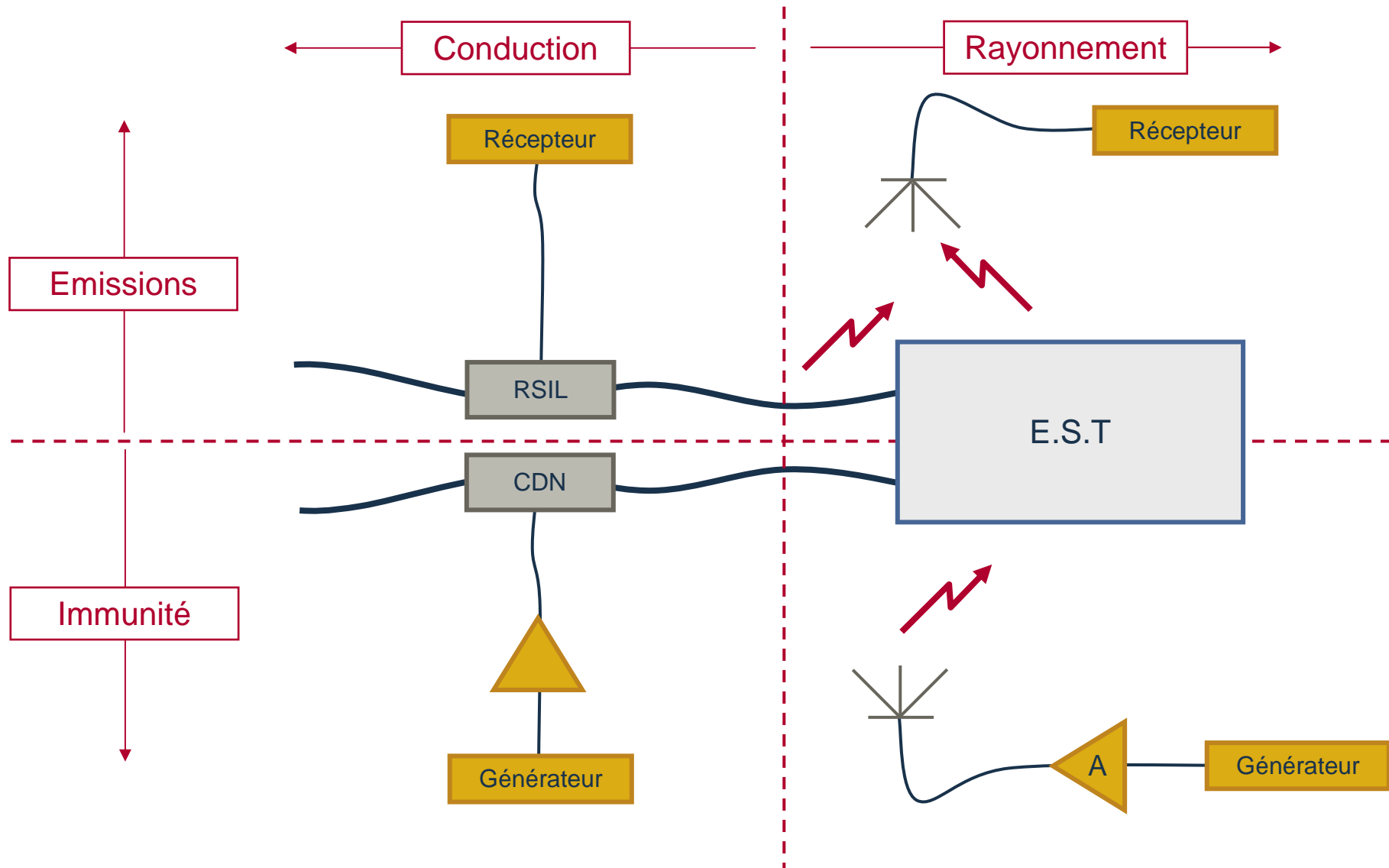
- ▶ De quelques Hz à quelques dizaines de GHz

▶ 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



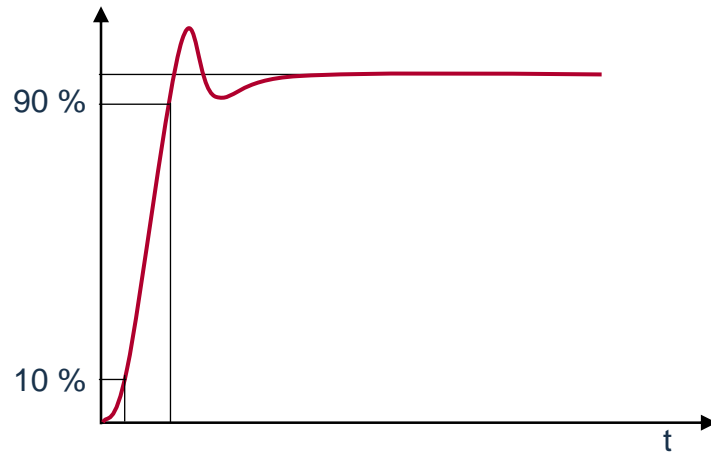
Les unités utilisées en CEM

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

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

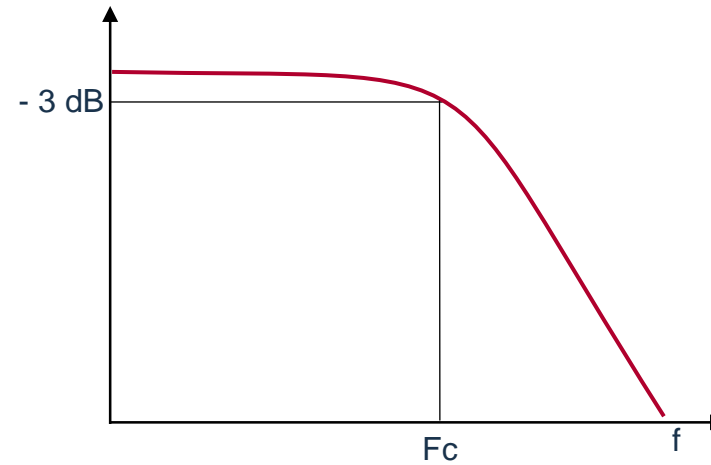
▶ Puissance : $\frac{1}{T} \int_0^T U \cdot I \cdot dt (\text{Watt}) = \frac{V^2}{R} = RI^2$

Relation Temps / Fréquence



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

$$F_c = 0,35 / T_m$$



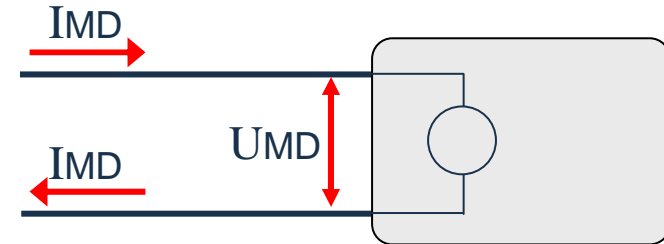
$$F_c = 1 / 2 \cdot \pi \cdot \tau$$

$$T_m = 0,35 / F_c$$

Mode Différentiel / Mode Commun

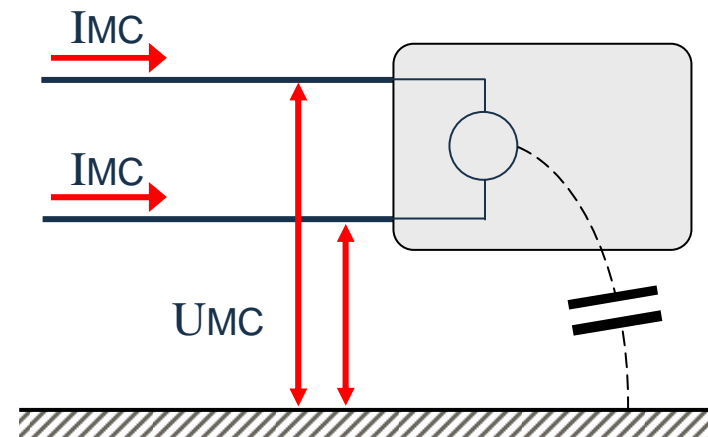
► Mode différentiel

- 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



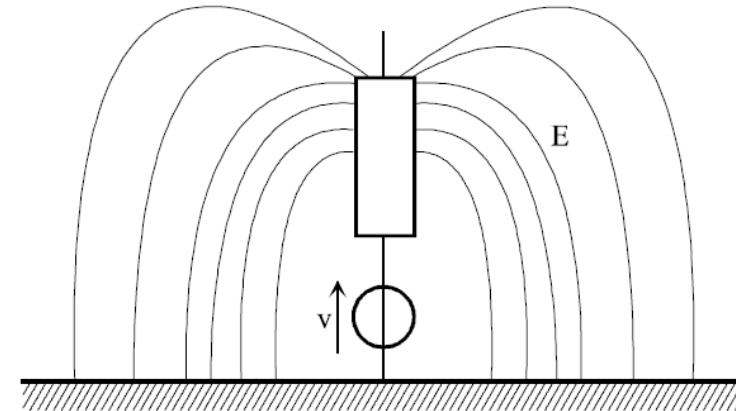
► Mode commun

- 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.

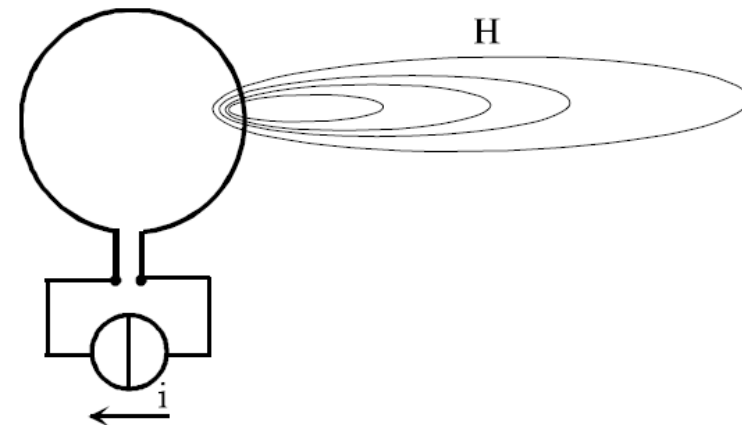


Nature des sources de perturbations rayonnées

- ▶ 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 .



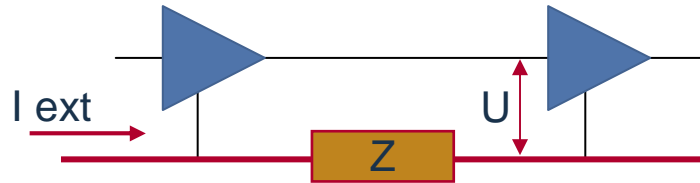
Emission en champ électrique



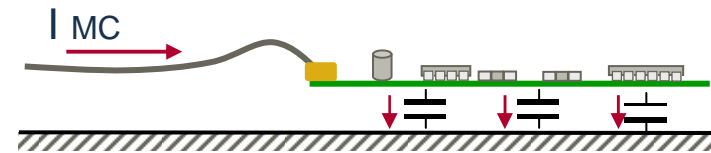
Emission en Champ magnétique

Couplages

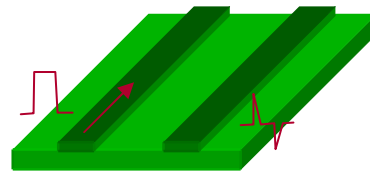
- ▶ Impédance commune



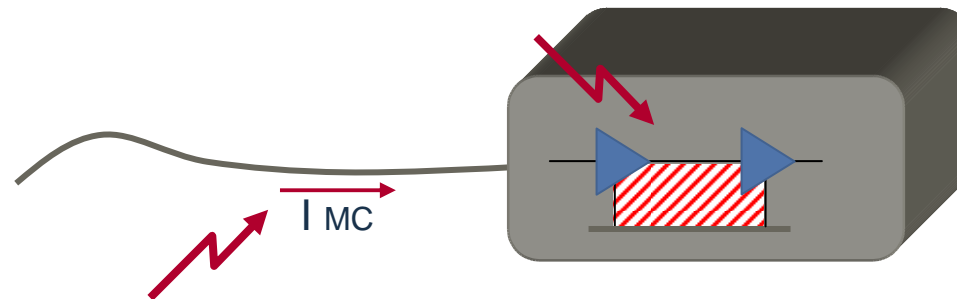
- ▶ Carte à châssis



- ▶ Diaphonie



- ▶ Champ à boucle

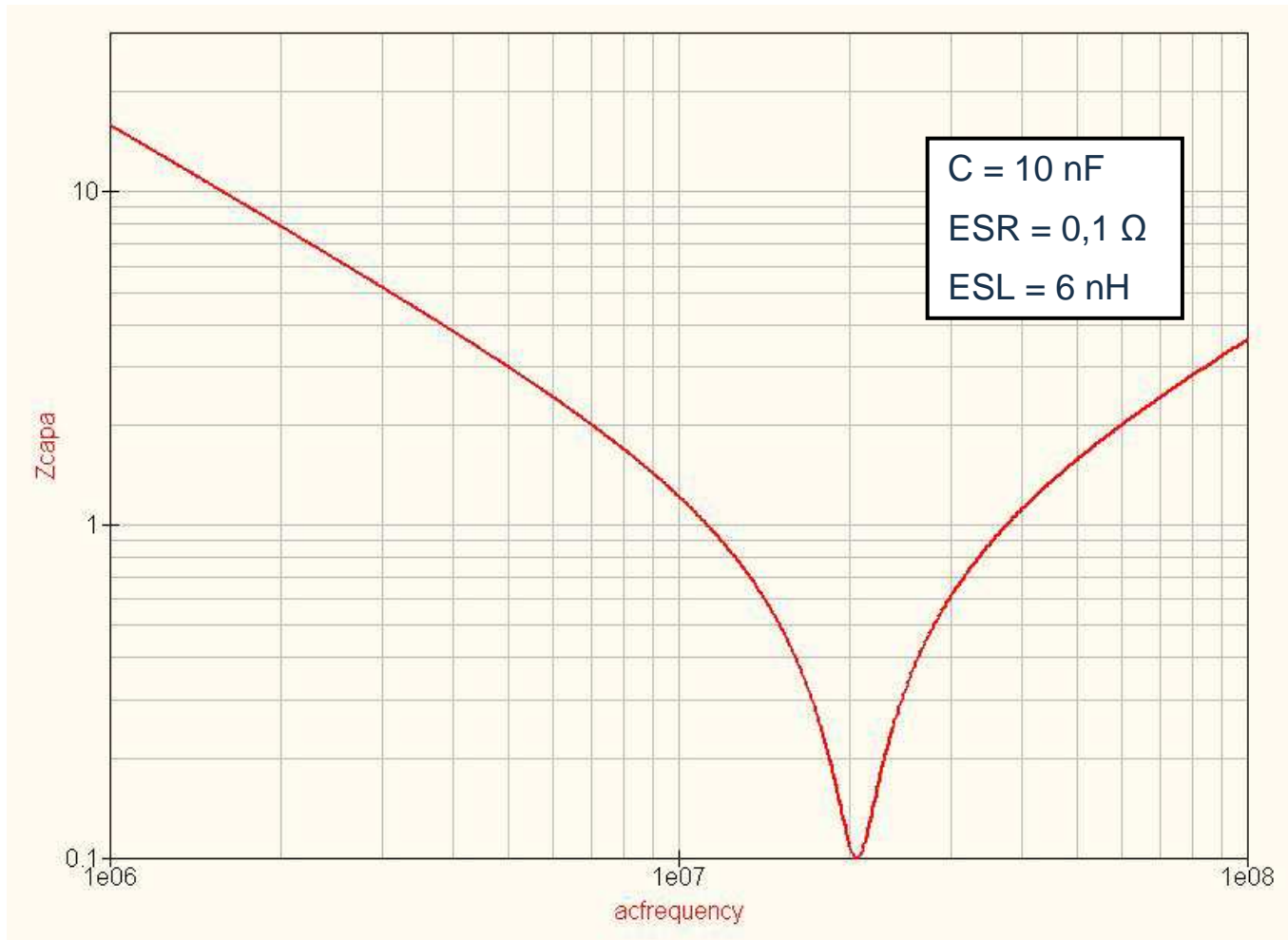
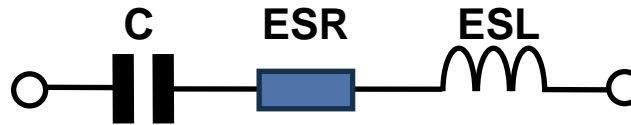


- ▶ Champ à câble

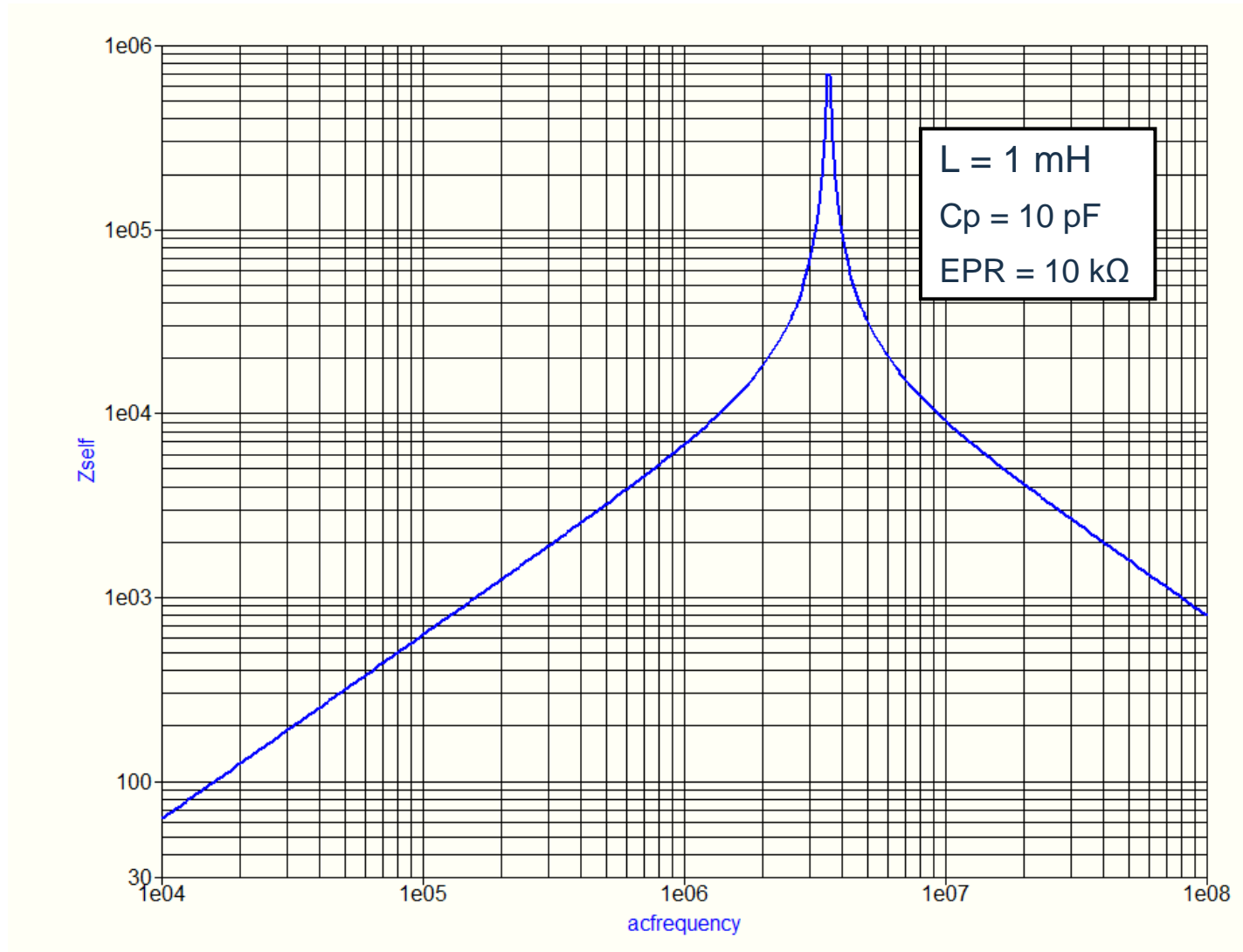
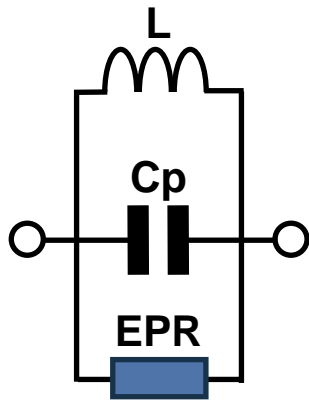


Composants et CEM

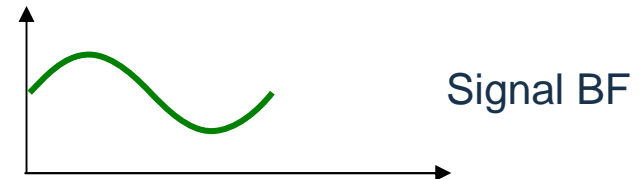
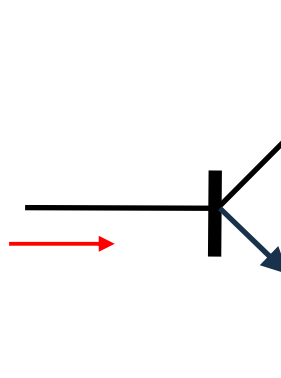
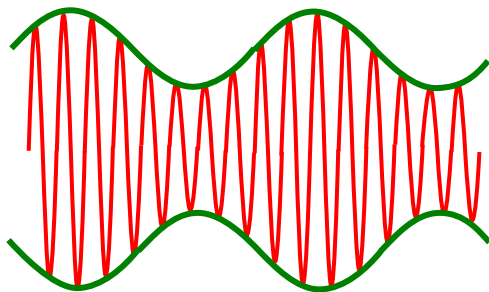
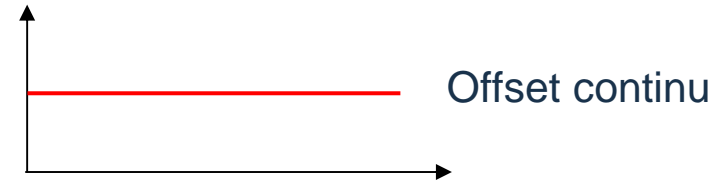
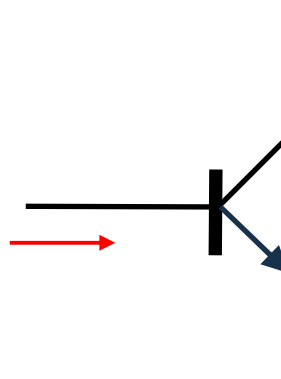
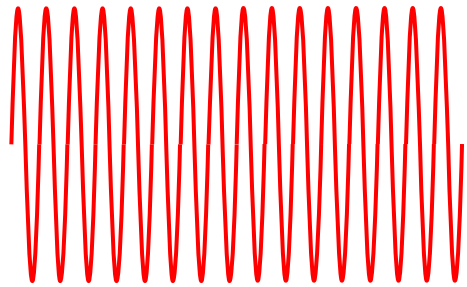
Impédance d'un condensateur



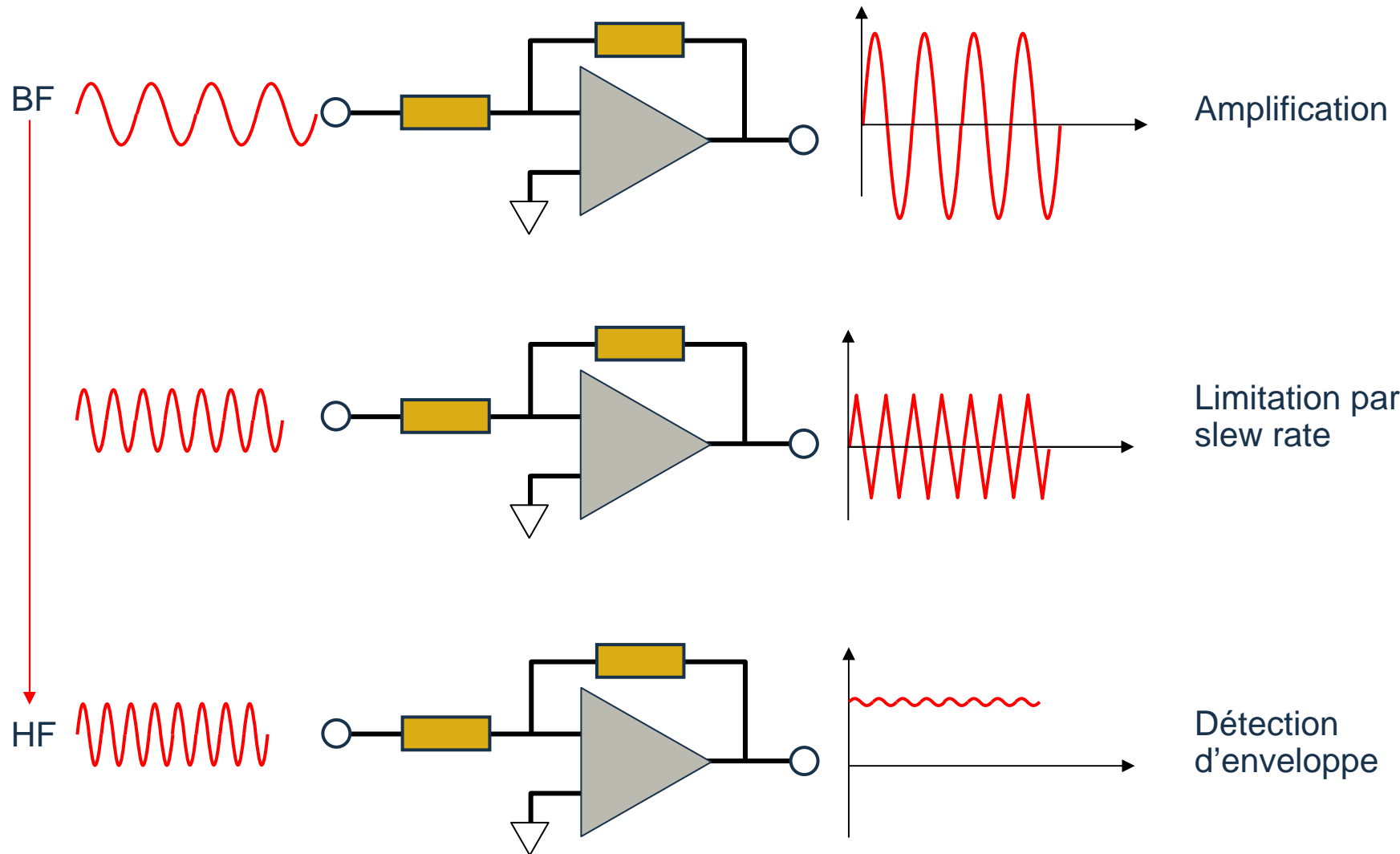
Impédance d'une self



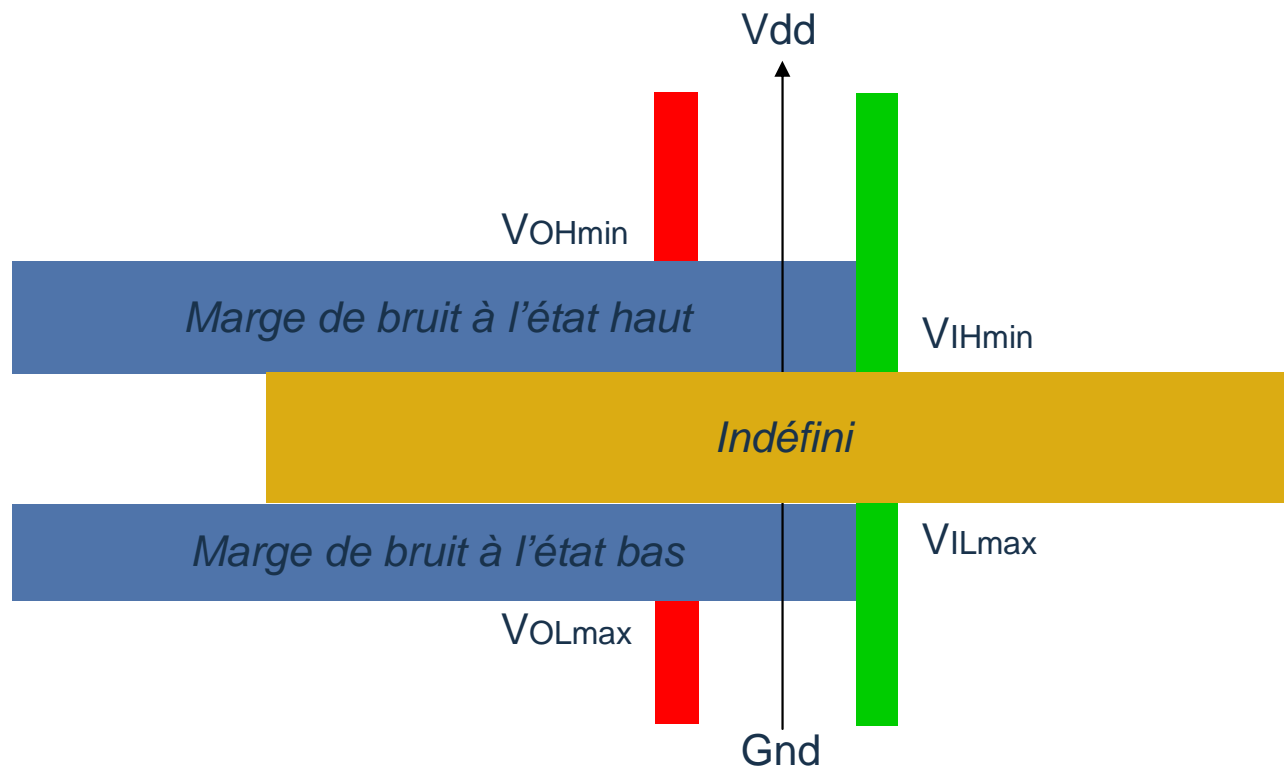
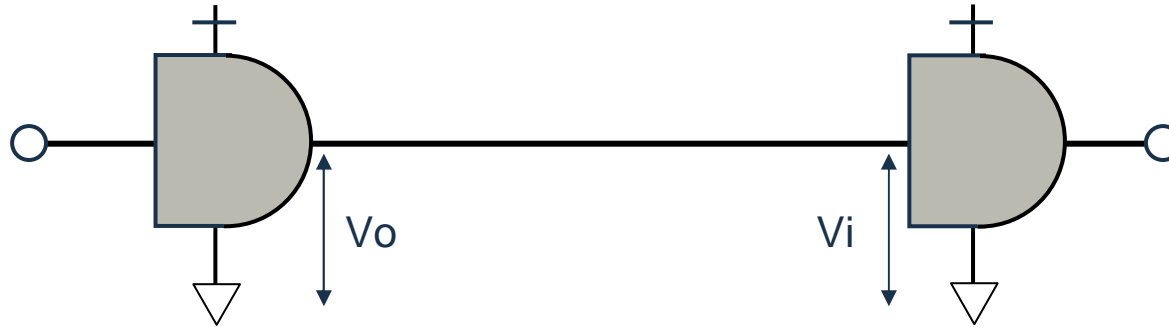
Détection d'enveloppe des composants



Comportement d'un ampli OP en fonction de la fréquence



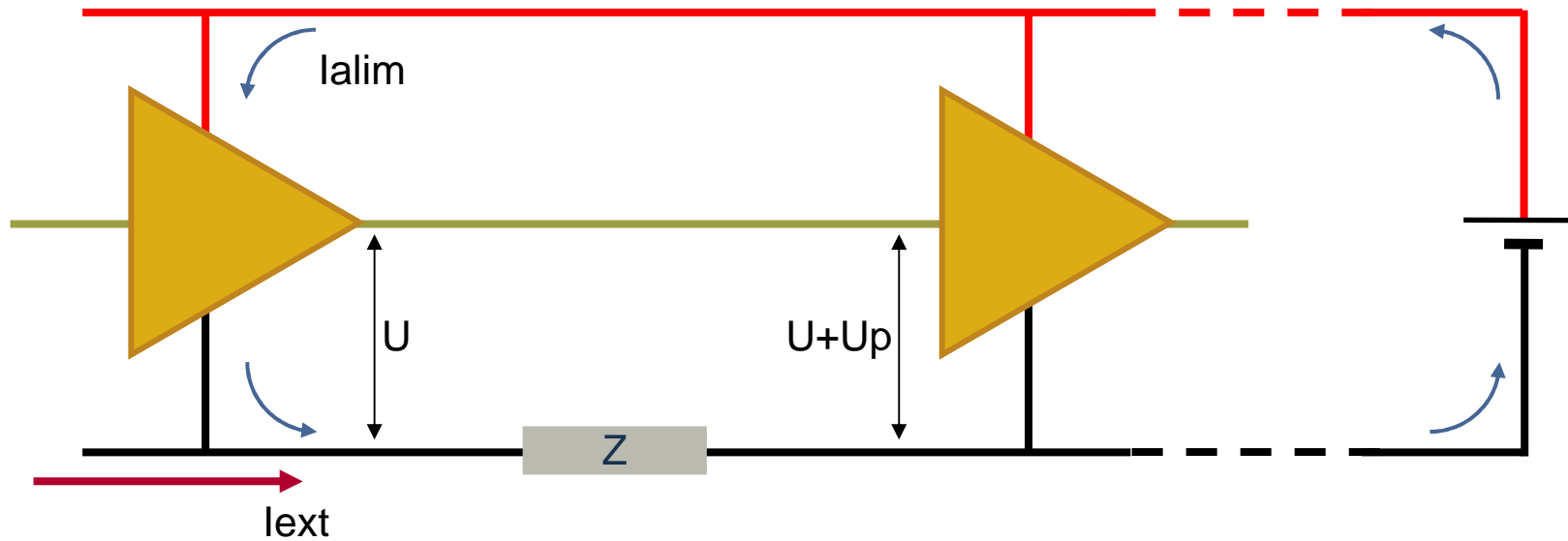
Marge de bruit des circuits logiques





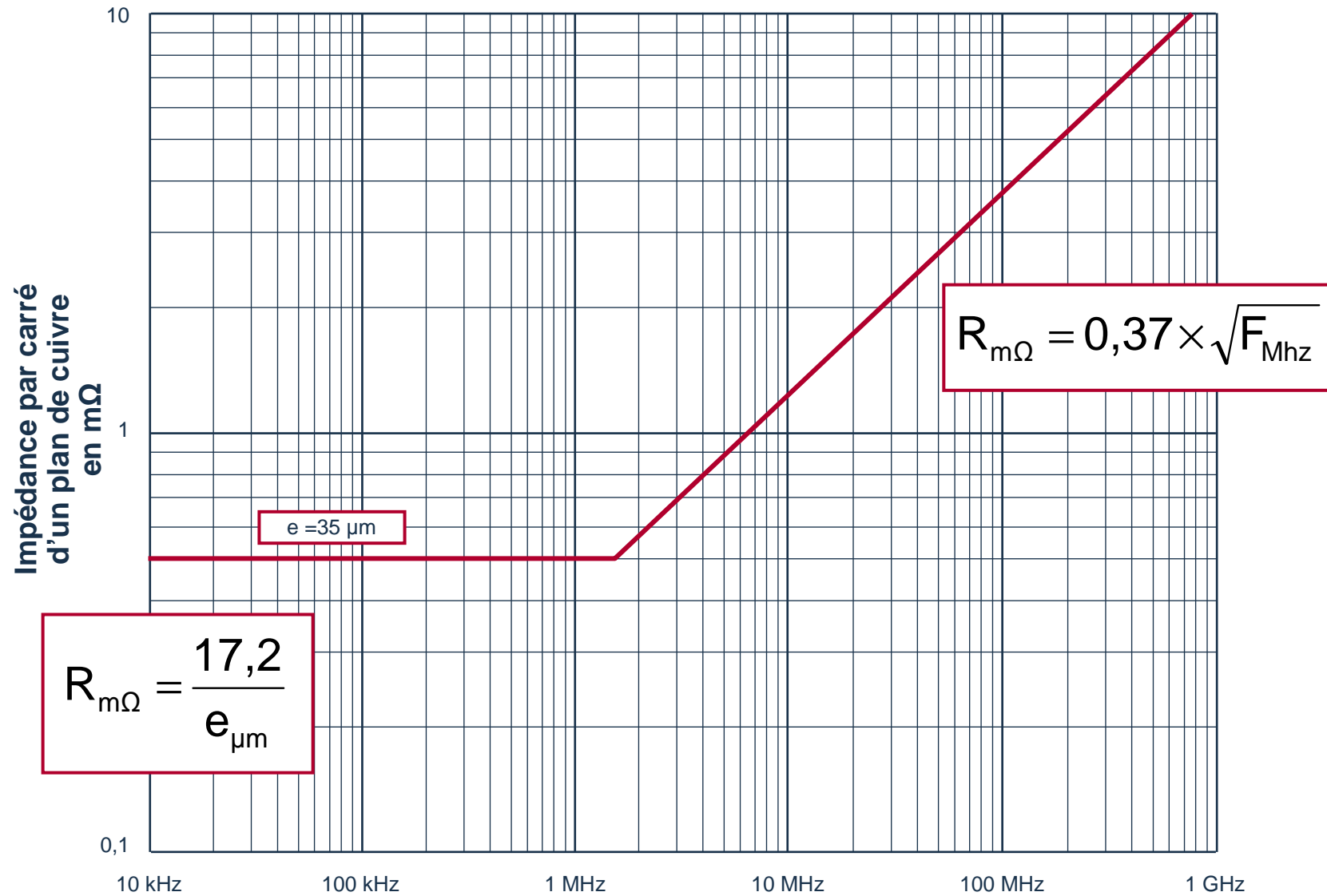
Masses et alimentations d'un système

Couplage par impédance commune

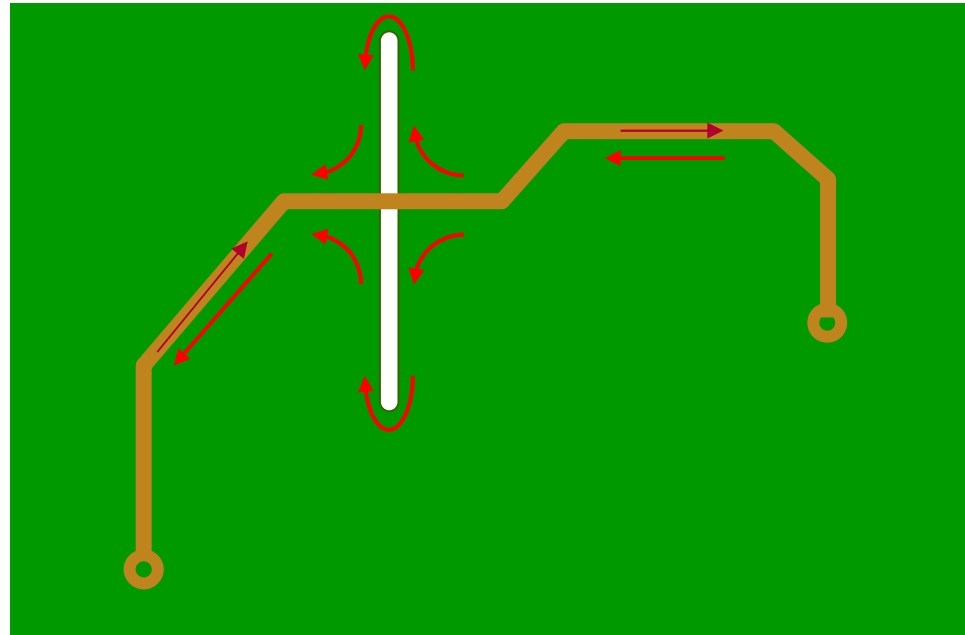


$$U_p = Z \cdot (I_{ext} + I_{lim})$$

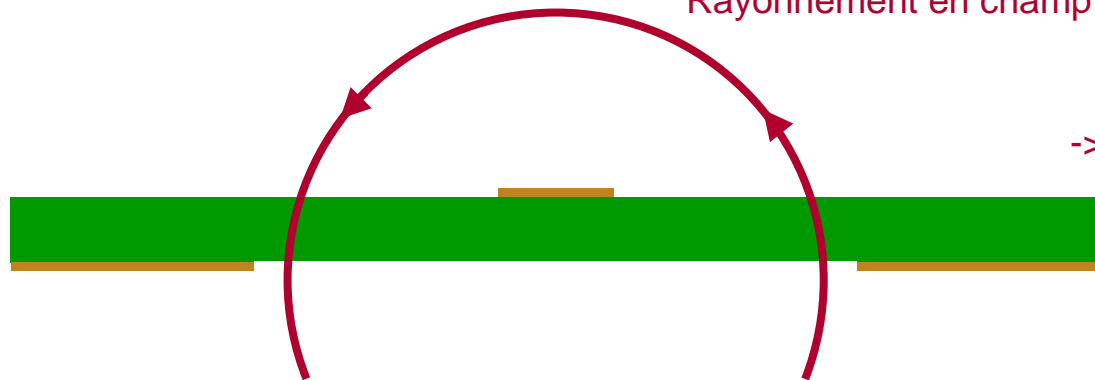
Impédance d'un plan de masse



Effet d'une fente dans un plan de masse

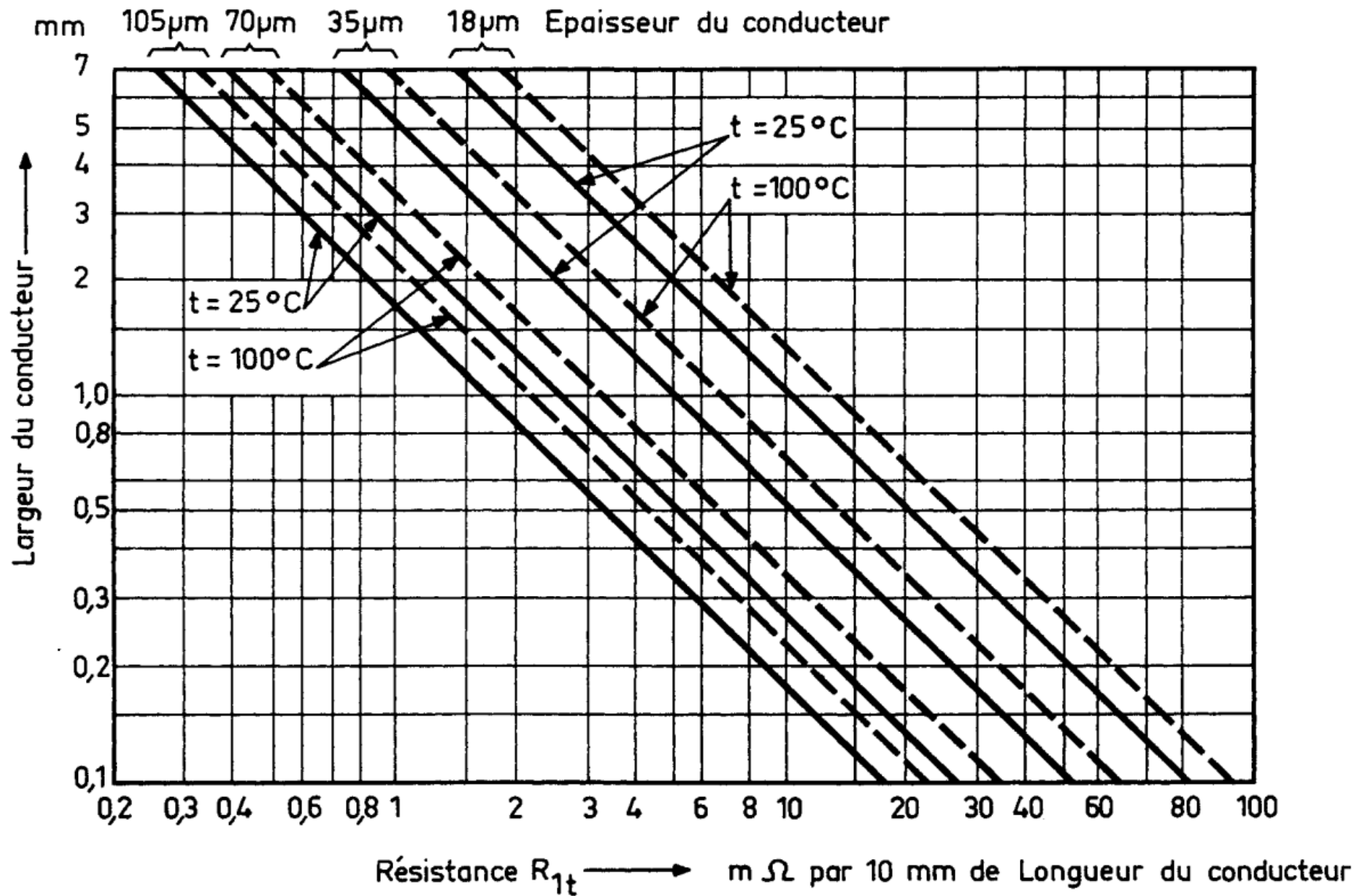


Rayonnement en champ magnétique

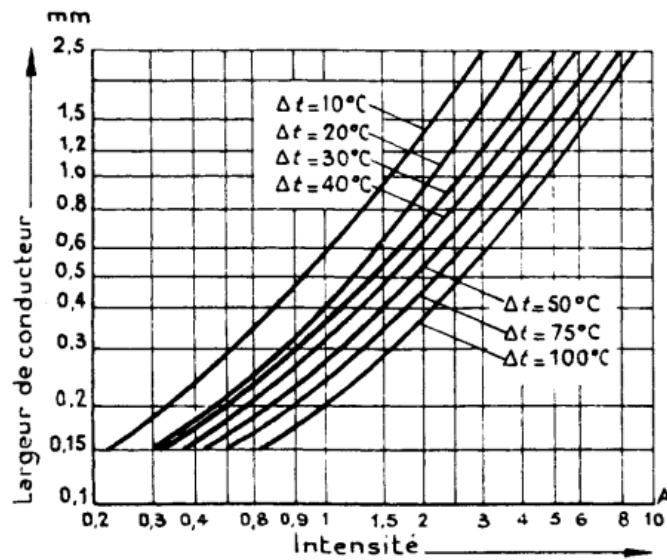


-> Self équivalente : 1 nH/cm

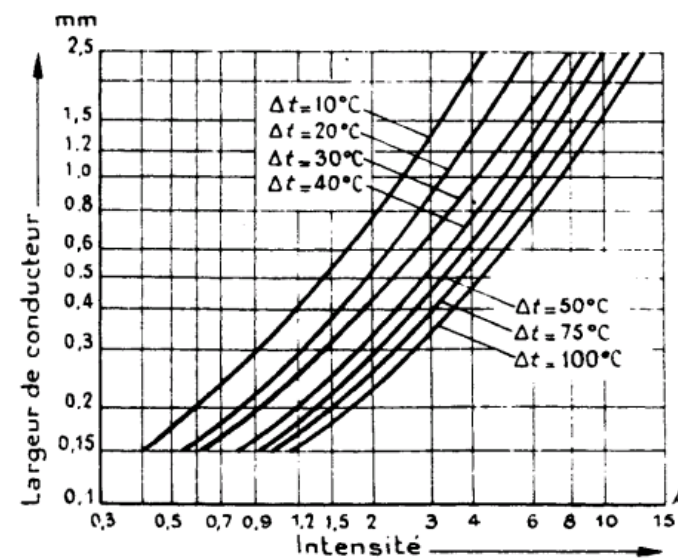
Résistance d'une piste de circuit imprimé



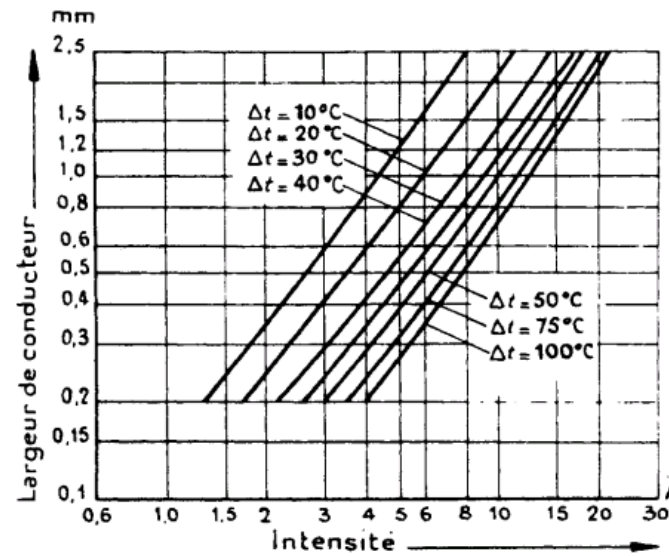
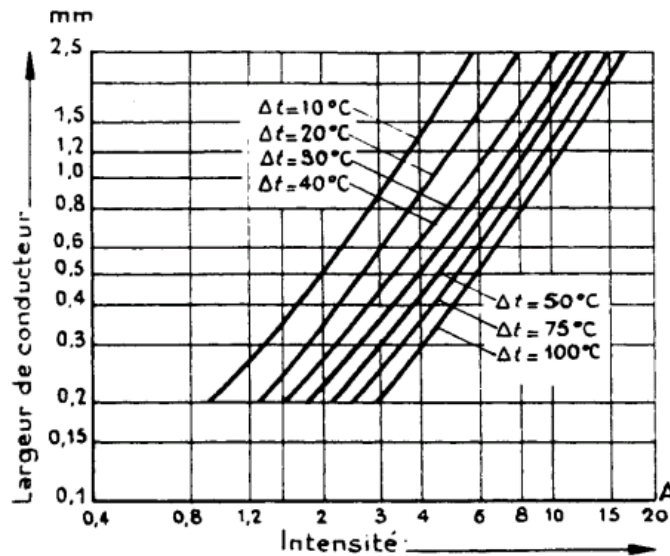
Intensité maximale admissible



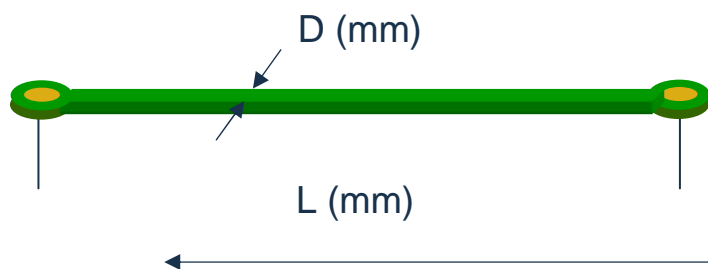
Épaisseur de conducteur 18 µm



Épaisseur de conducteur 35 µm



Impédance d'une piste de circuit imprimé

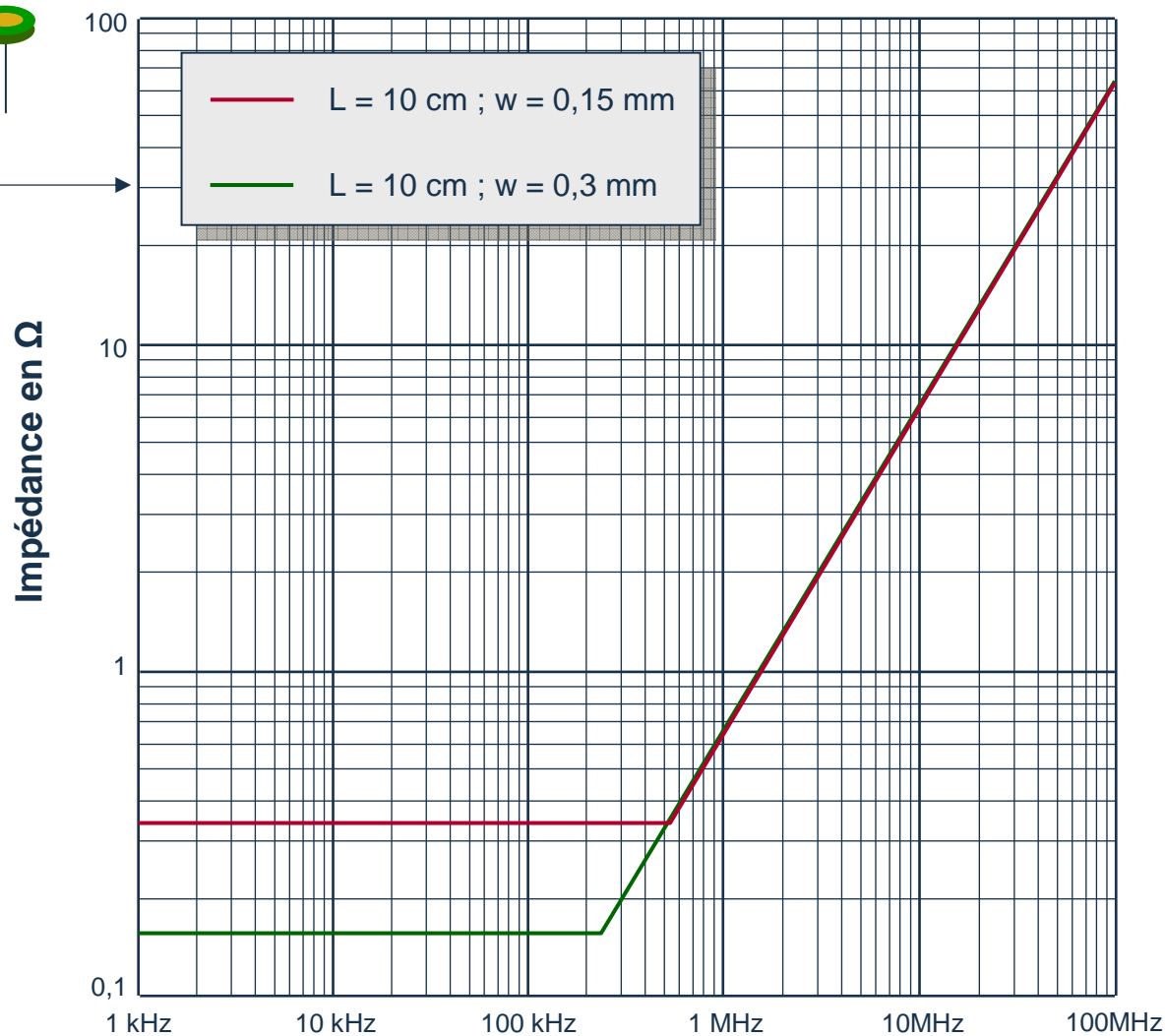


► Résistance ($e = 35 \mu\text{m}$)

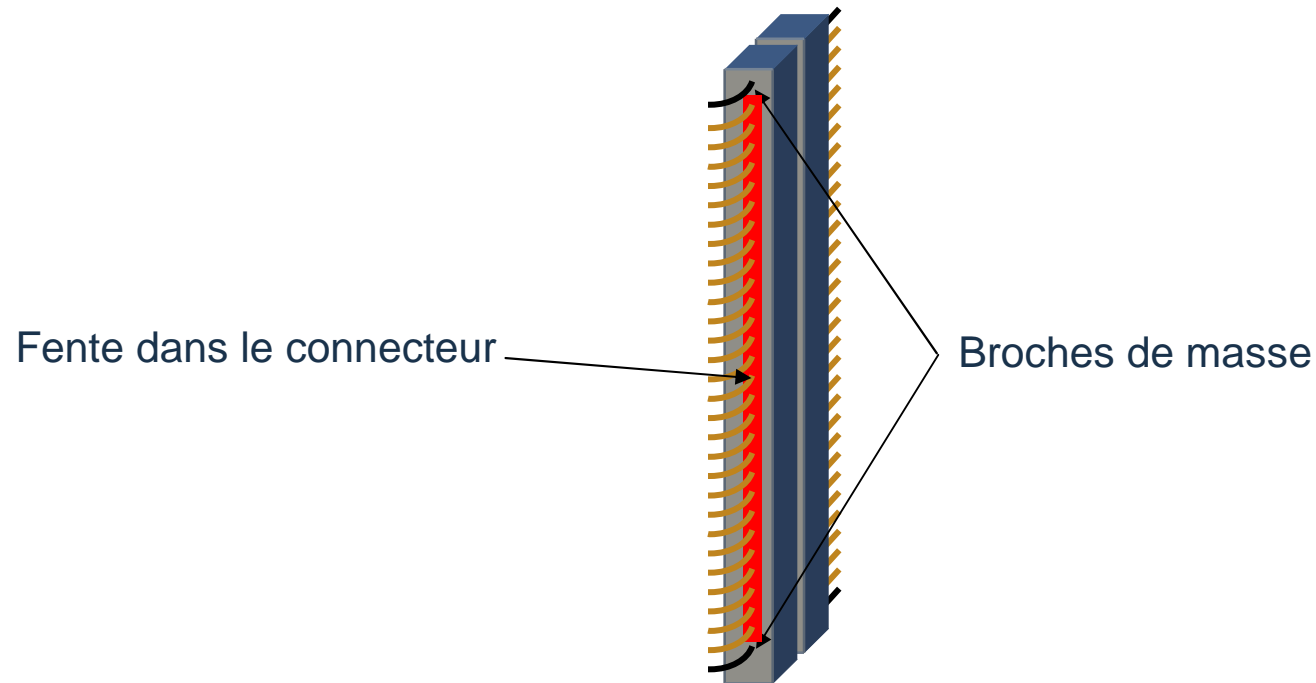
- $R_{m\Omega} = \frac{0,5 \times L}{D}$

► Self

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

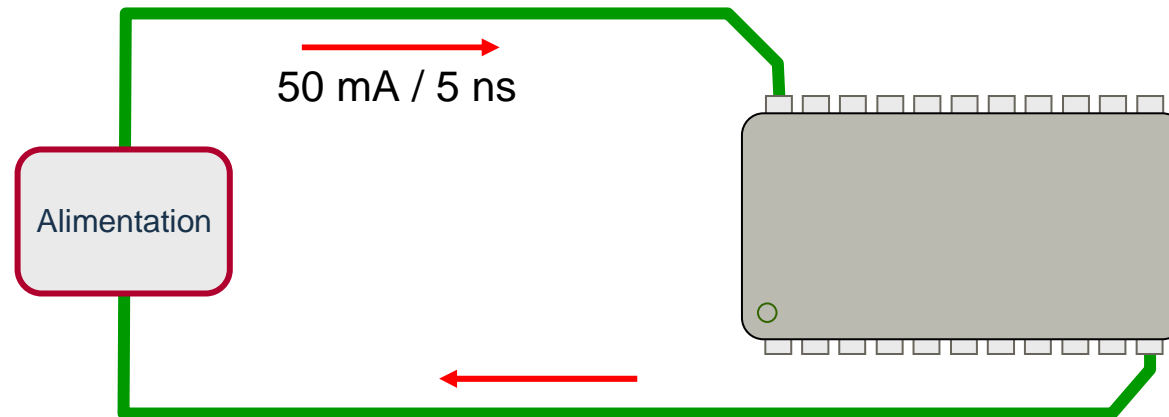


Impédance d'un connecteur



- 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

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

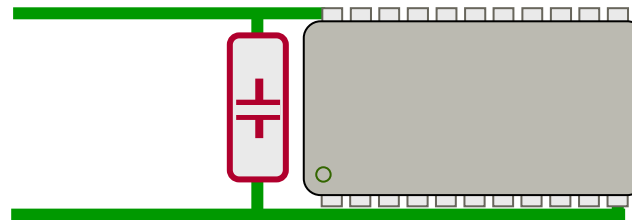
$$U_{\text{boitier}} = 5 \times 10^{-9} \times \frac{50 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-9}}$$

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

Découplage des boitiers

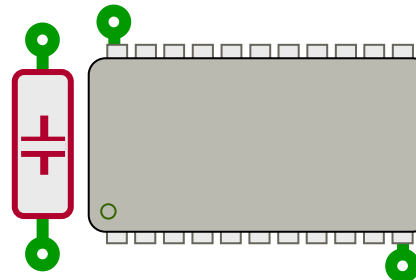
► Alimentation par piste :

- Longueur minimale entre le boitier et le condensateur de découplage

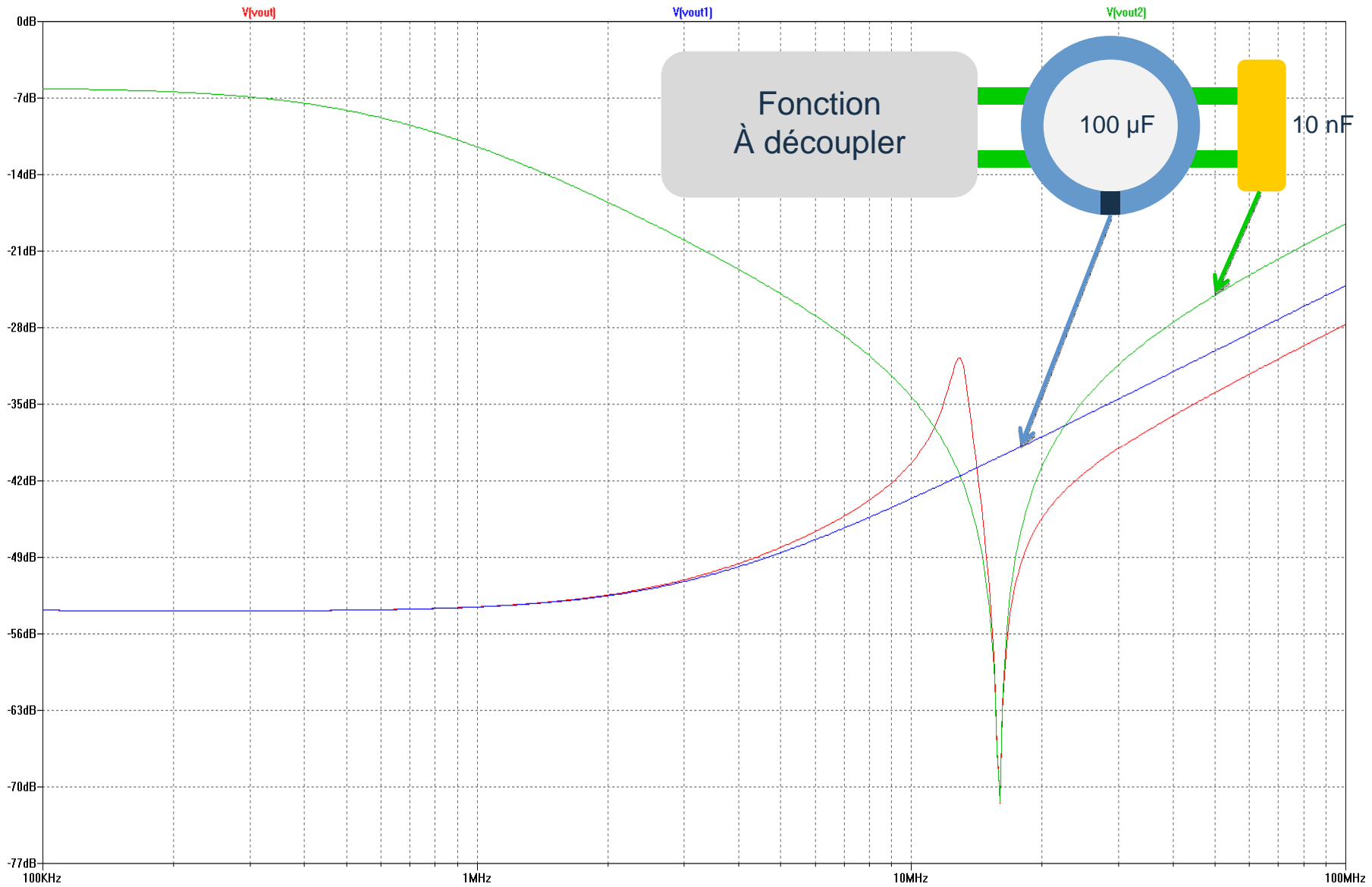


► Alimentation par plans :

- Connexion directe des boitiers et des condensateurs aux plans

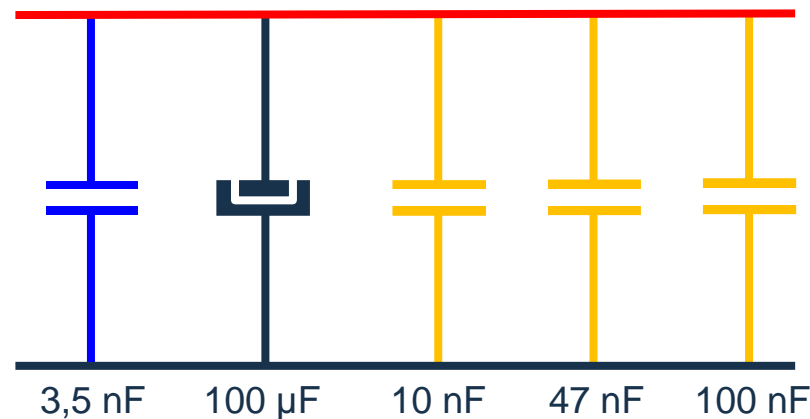


Mise en parallèle de condensateurs de découplage



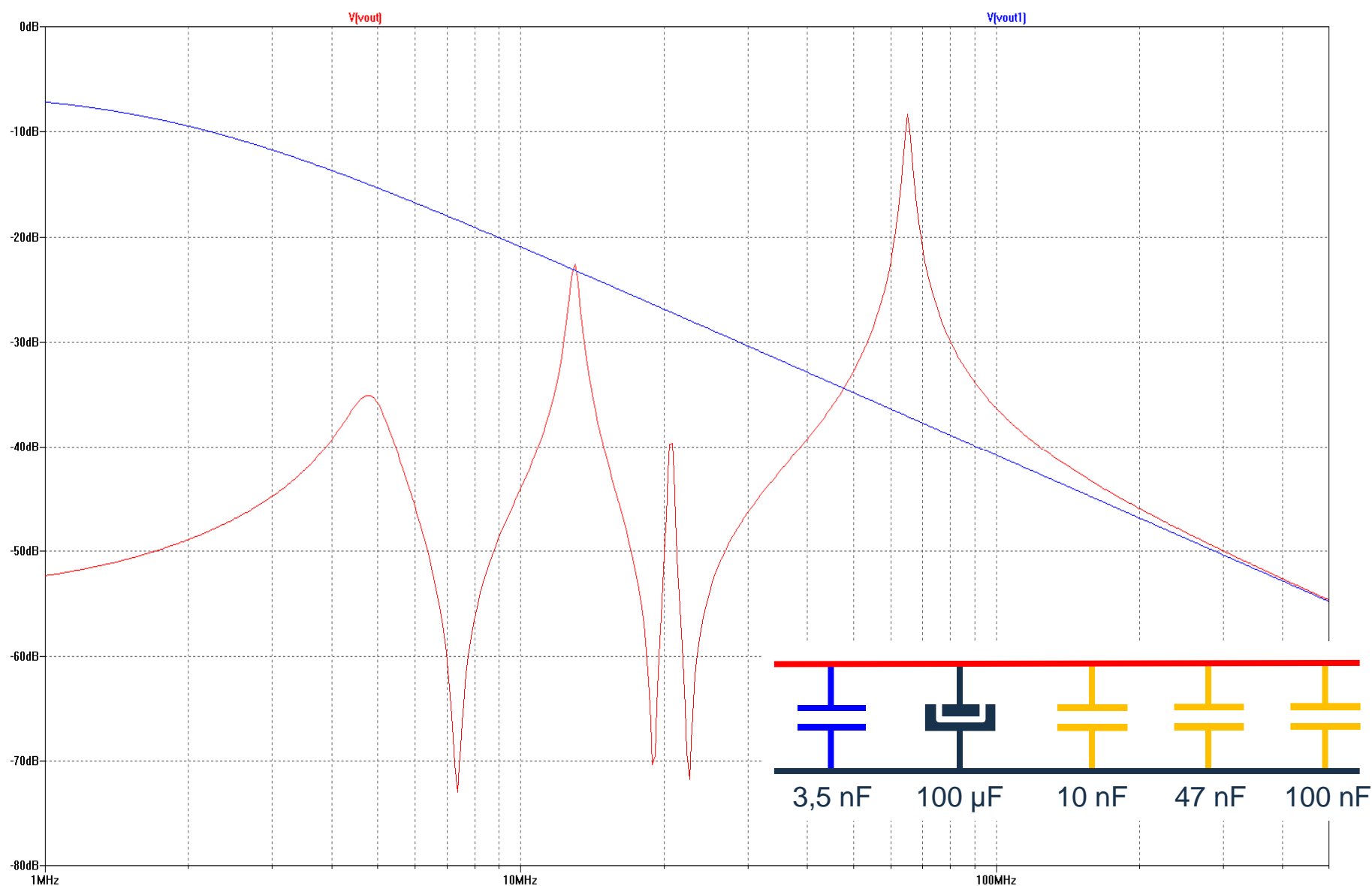
Modèle de l'impédance globale de la carte

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

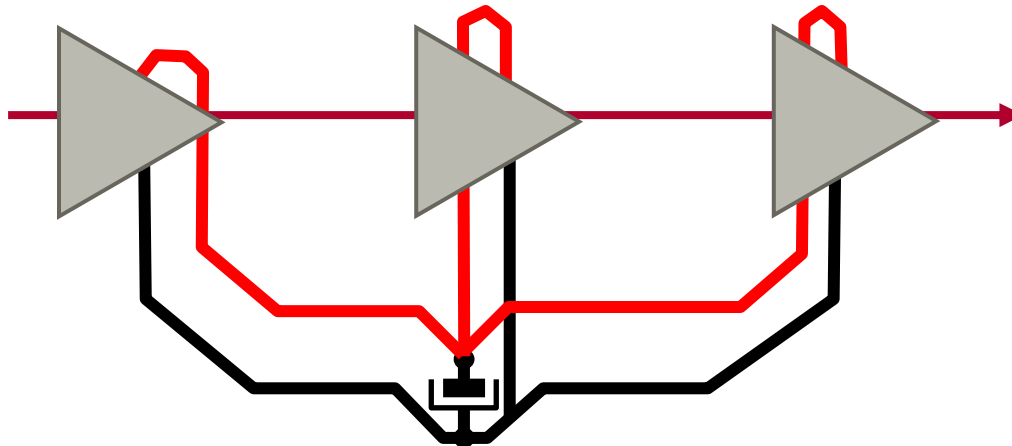


- ▶ La capacité entre les deux plans de l'alimentation est de 3.5 nF.
- ▶ La résistance de 50 Ohms présente la charge DC des composants actifs du circuit. 5 capacités de découplage sont utilisées dans ce modèle.
- ▶ Une capacité 'bulk' de 1 µF, et 4 capacités locales de ayant chacune une valeur différente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

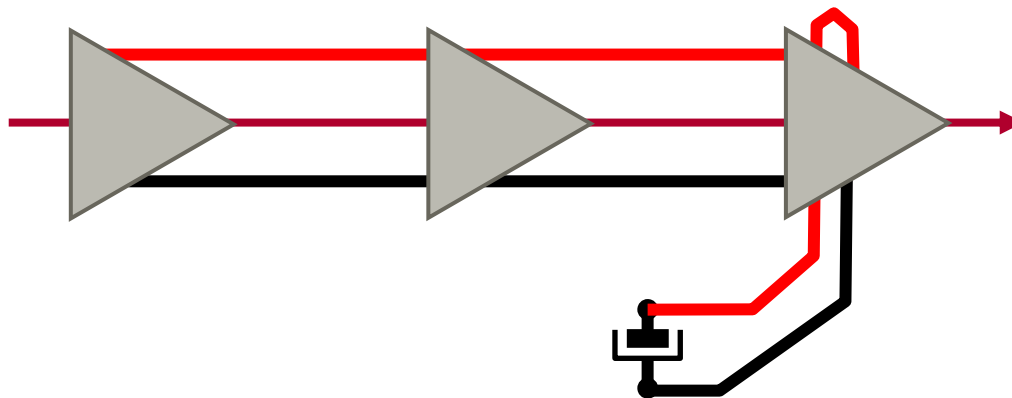


Distribution des alimentations d'une carte analogique



► Alimentation en étoile

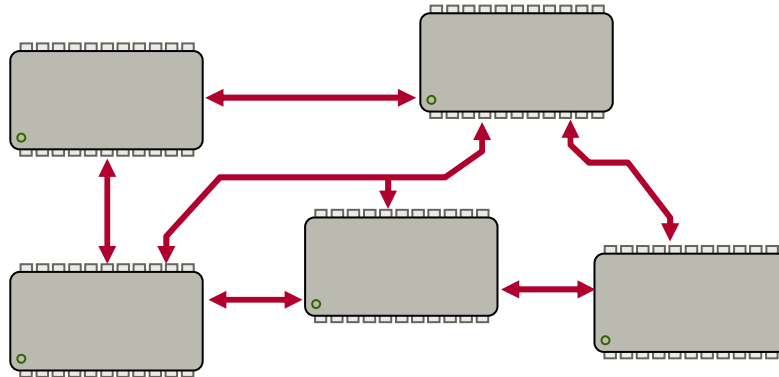
- Forte impédance commune entre les différents étages de traitement
- Grande surface de boucle entre les conducteurs d'alimentation et les signaux



► Chaînage des alimentations

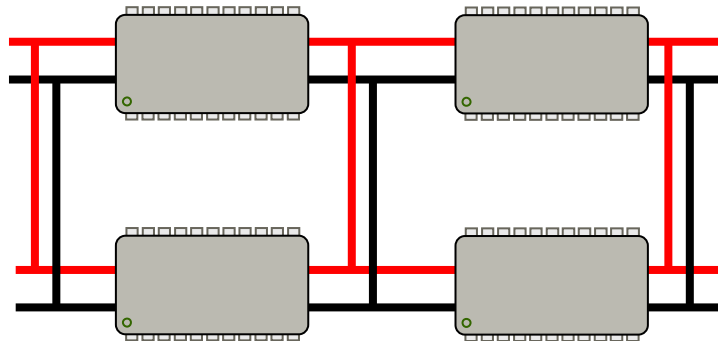
- Maîtrise de la circulation des courants
- Alimentation du « propre » à partir du « sale »

Principe d'alimentation d'une carte numérique



► Topologie

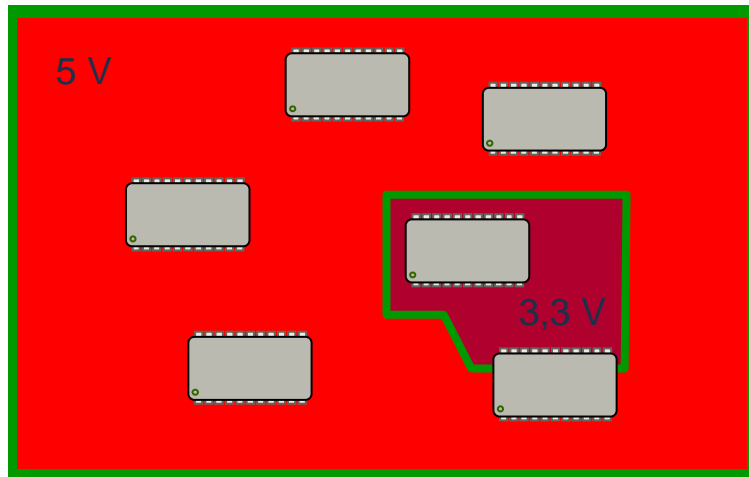
- Interconnexion de tous les circuits actifs de la carte
- Nécessité d'une équipotentialité globale



► Maillage des alimentations

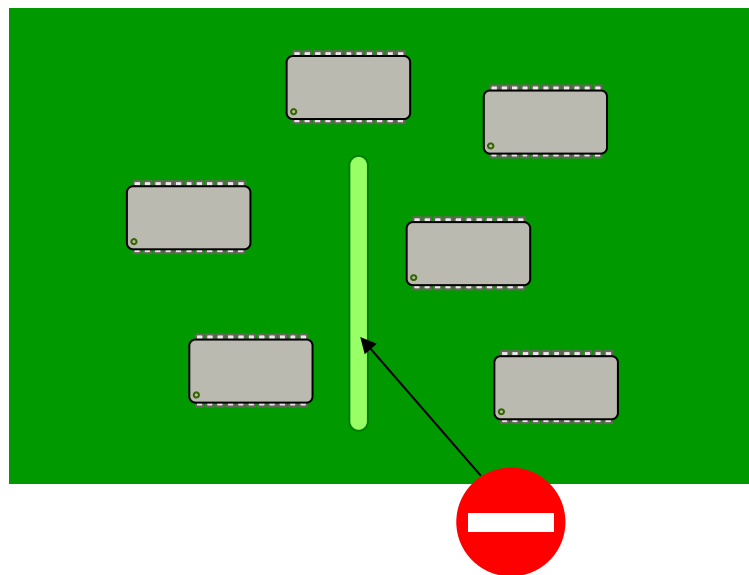
- Maillage de la masse ET des alimentations
- Préférer la solution d'une alimentation par plan

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

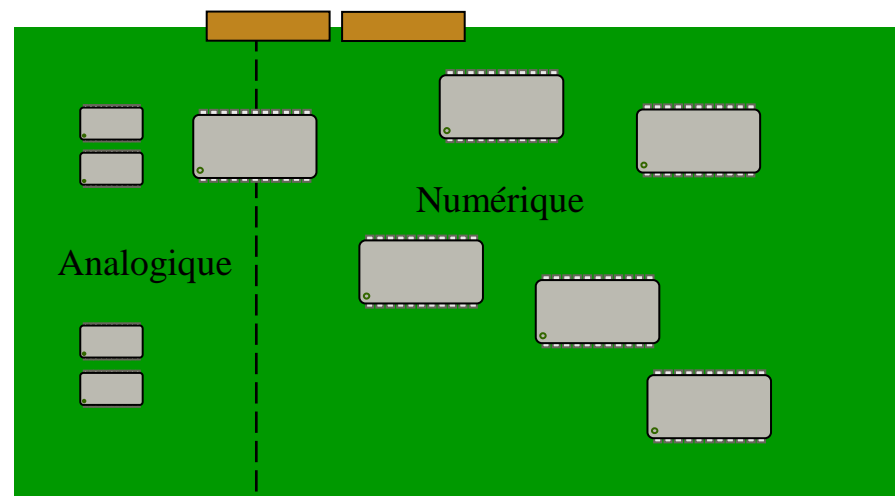
Gestion des masses – Carte mixte

► 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



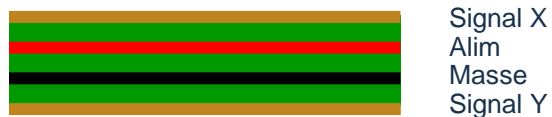
Répartition des couches

► 4 couches

- Théorique



- Pratique



► 6 couches

- Optimum avec peu de pistes



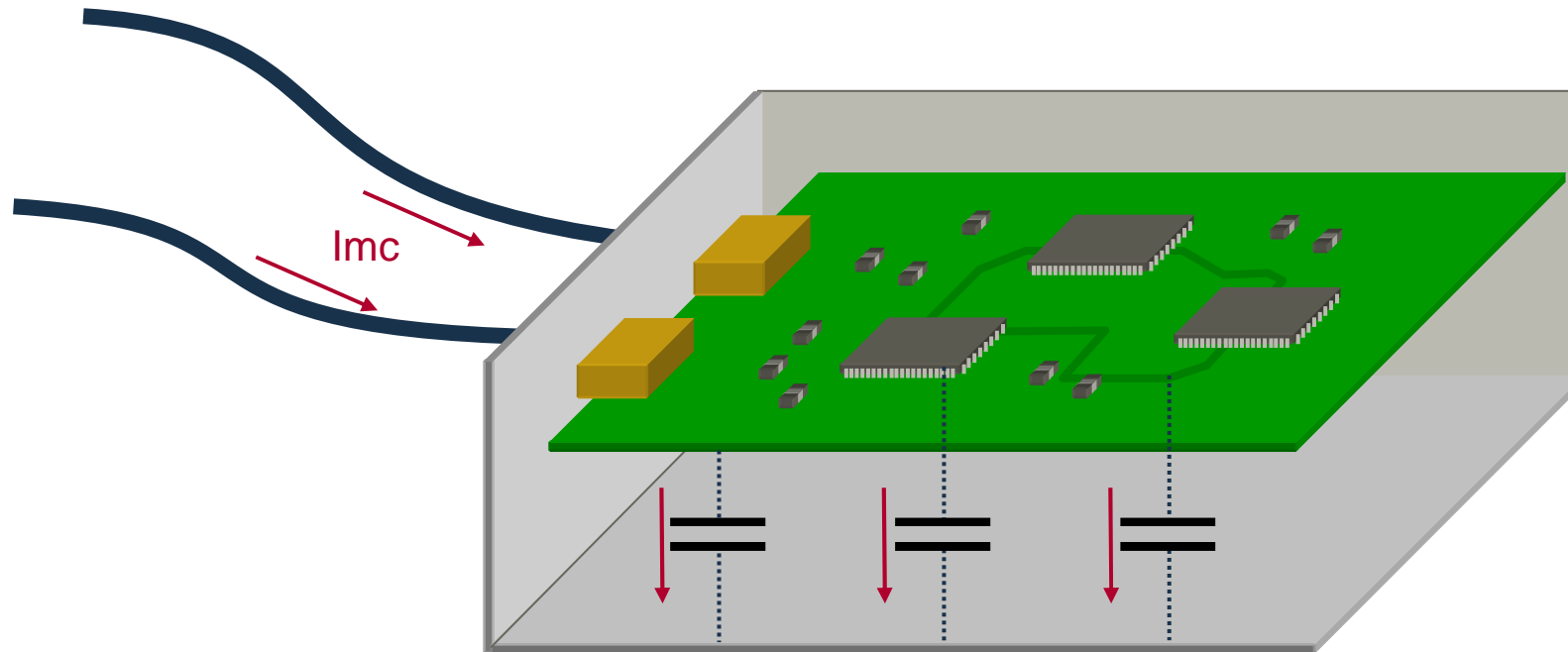
- Solution pratique





Pistes Sensibles

Couplage capacitif Carte / Environnement



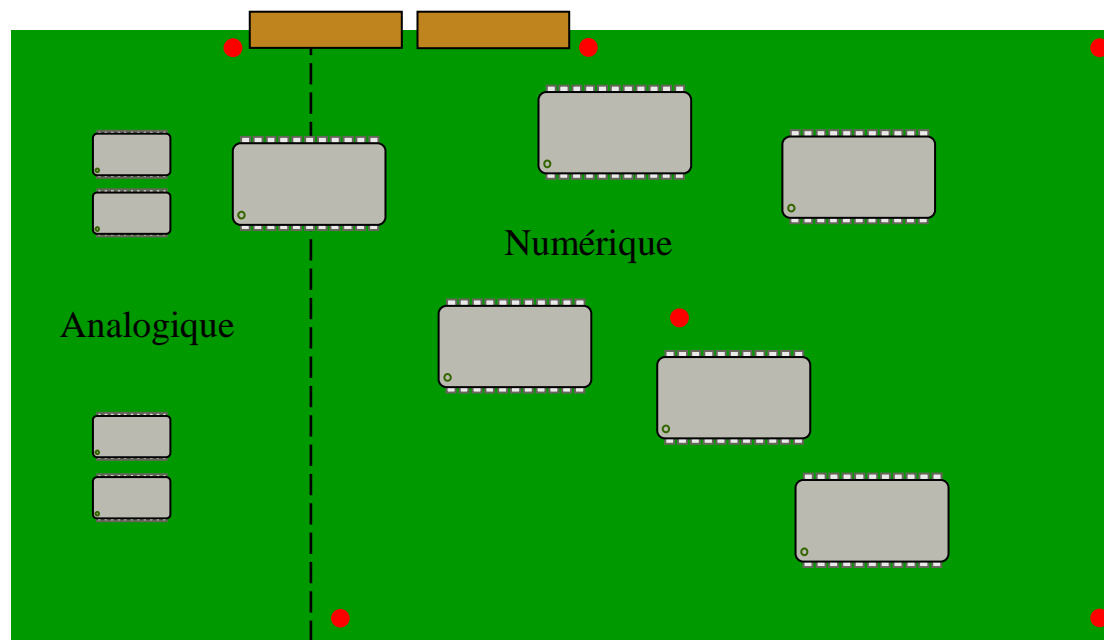
► **Couplage capacitif par effet de main qui se manifeste par :**

- 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

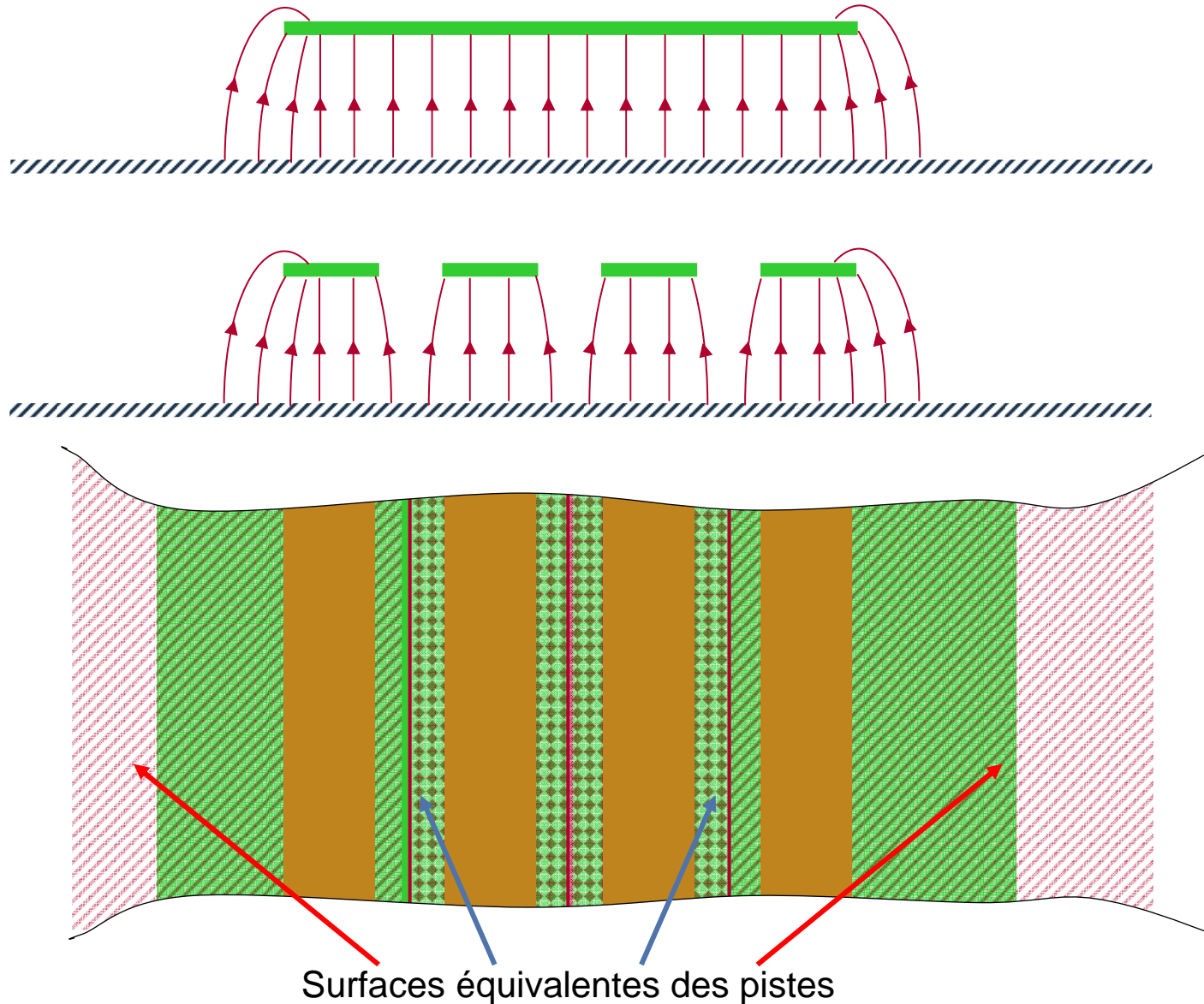
$$C_{pF} = 8,85 \cdot 10^{-2} \times \frac{S_{\text{cm}^2}}{h_{\text{cm}}}$$

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

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

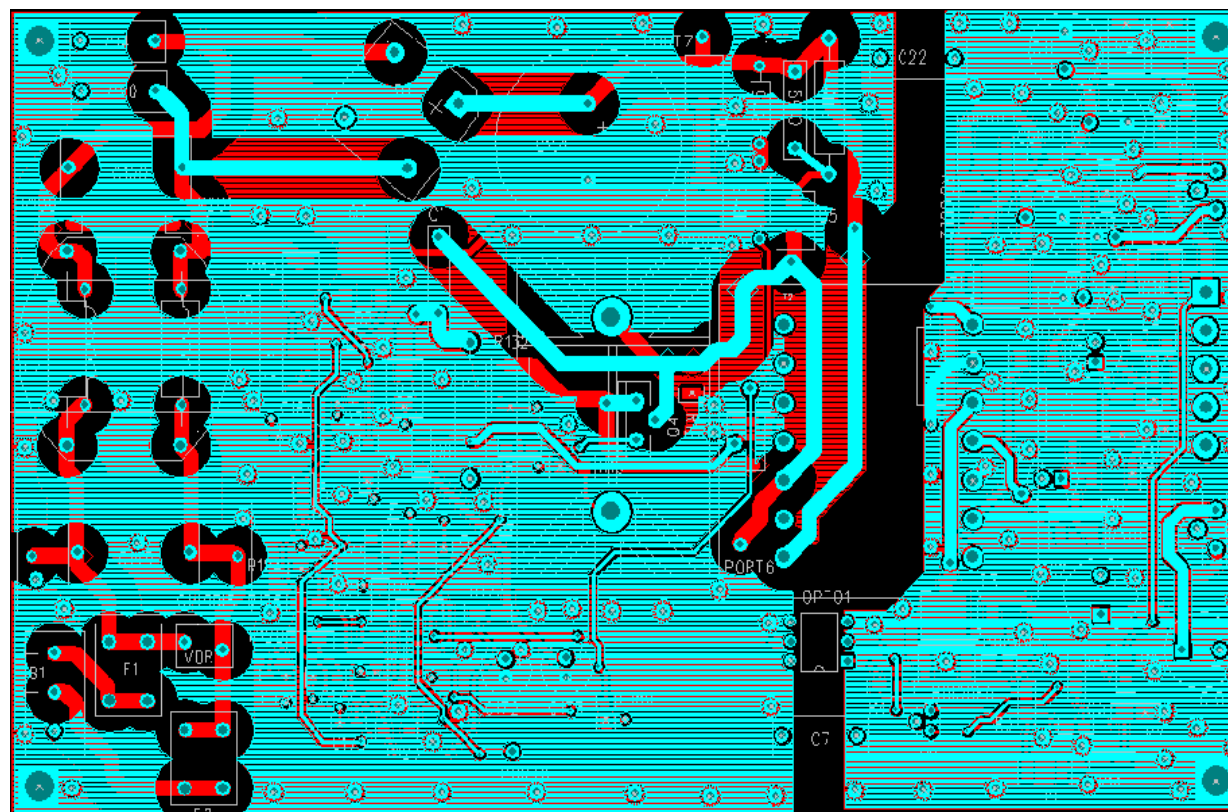
S : surface de la carte - *h* : hauteur entre la carte et l'environnement - *D* : Diamètre équivalent de la carte

Capacité parasite des pistes

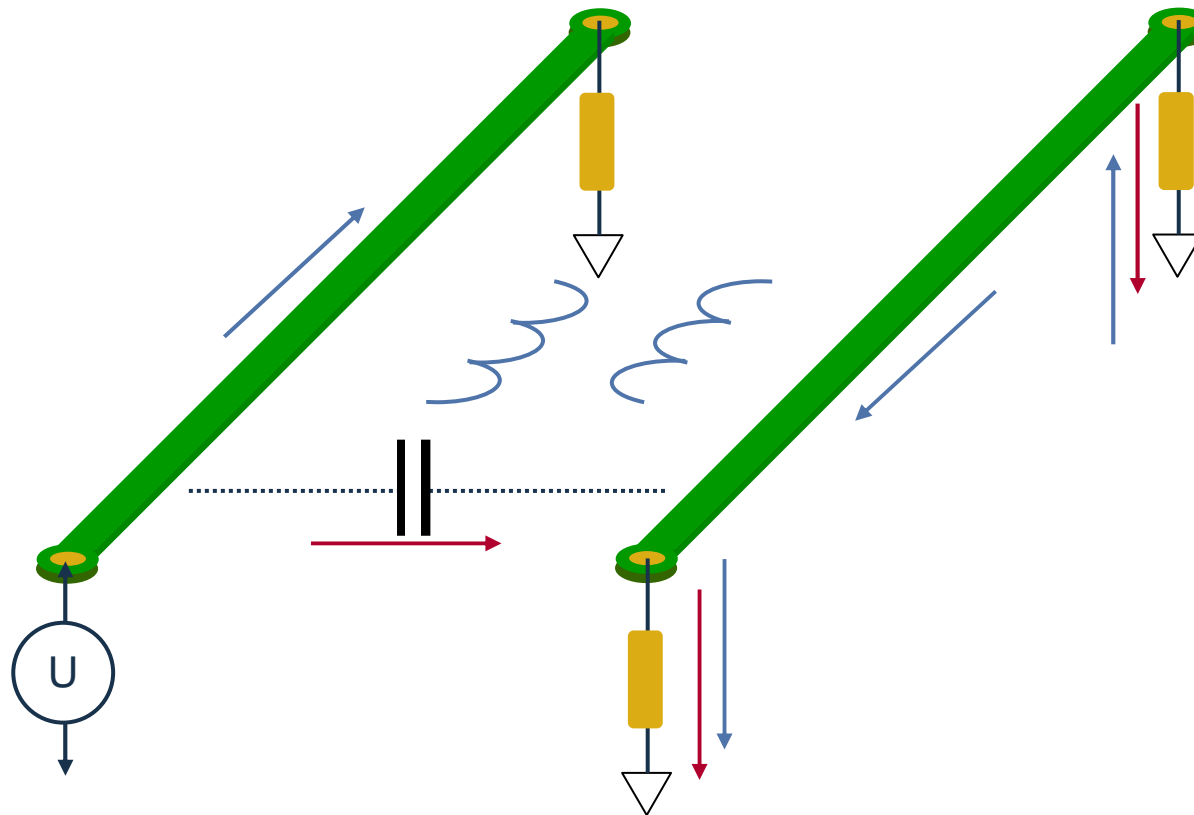


Remplissage de masse

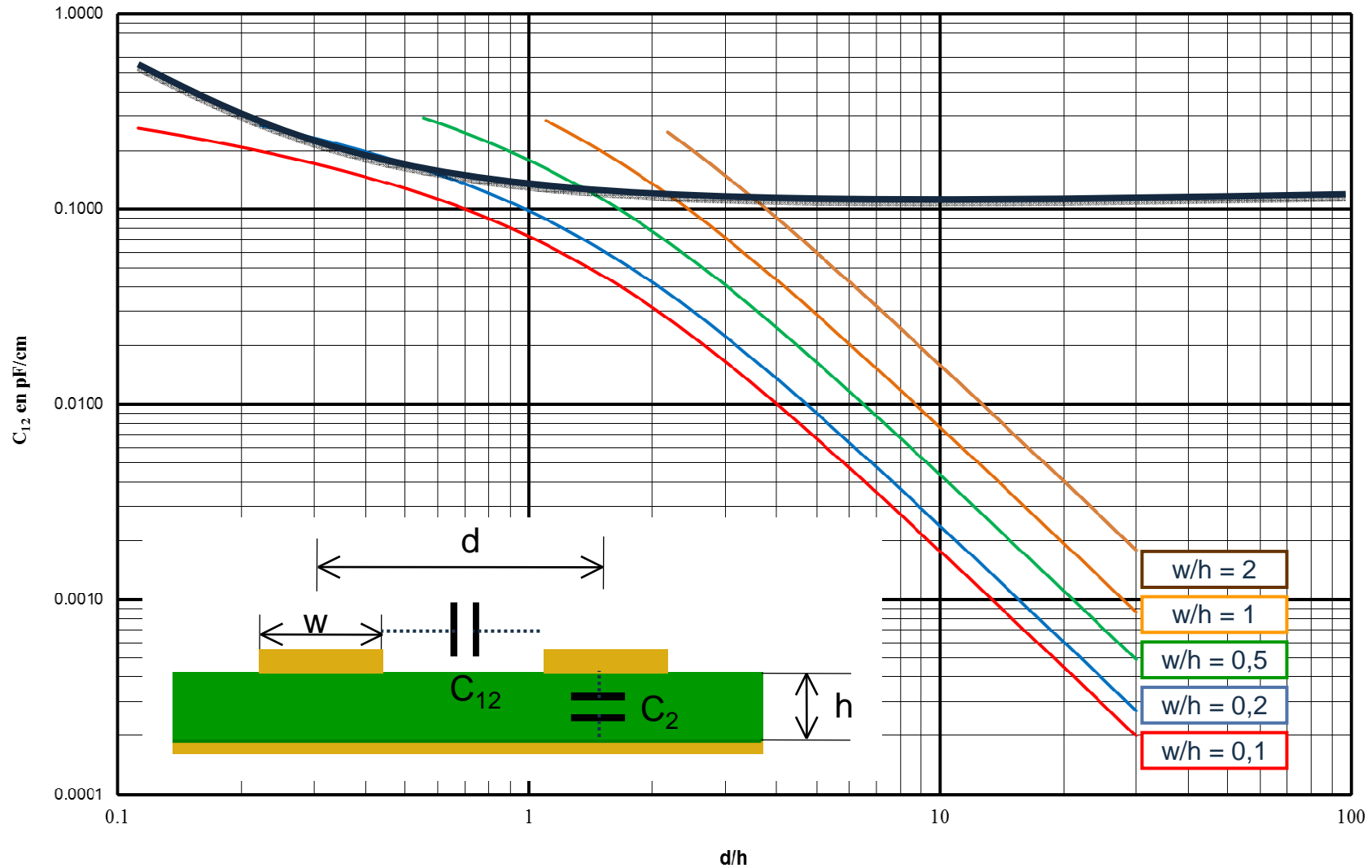
- ▶ Remplir des couches externes de masse en fin de routage :
 - Réduction « automatique » de la surface des pistes sensibles
 - Contribution à l'équipotentialité des la carte



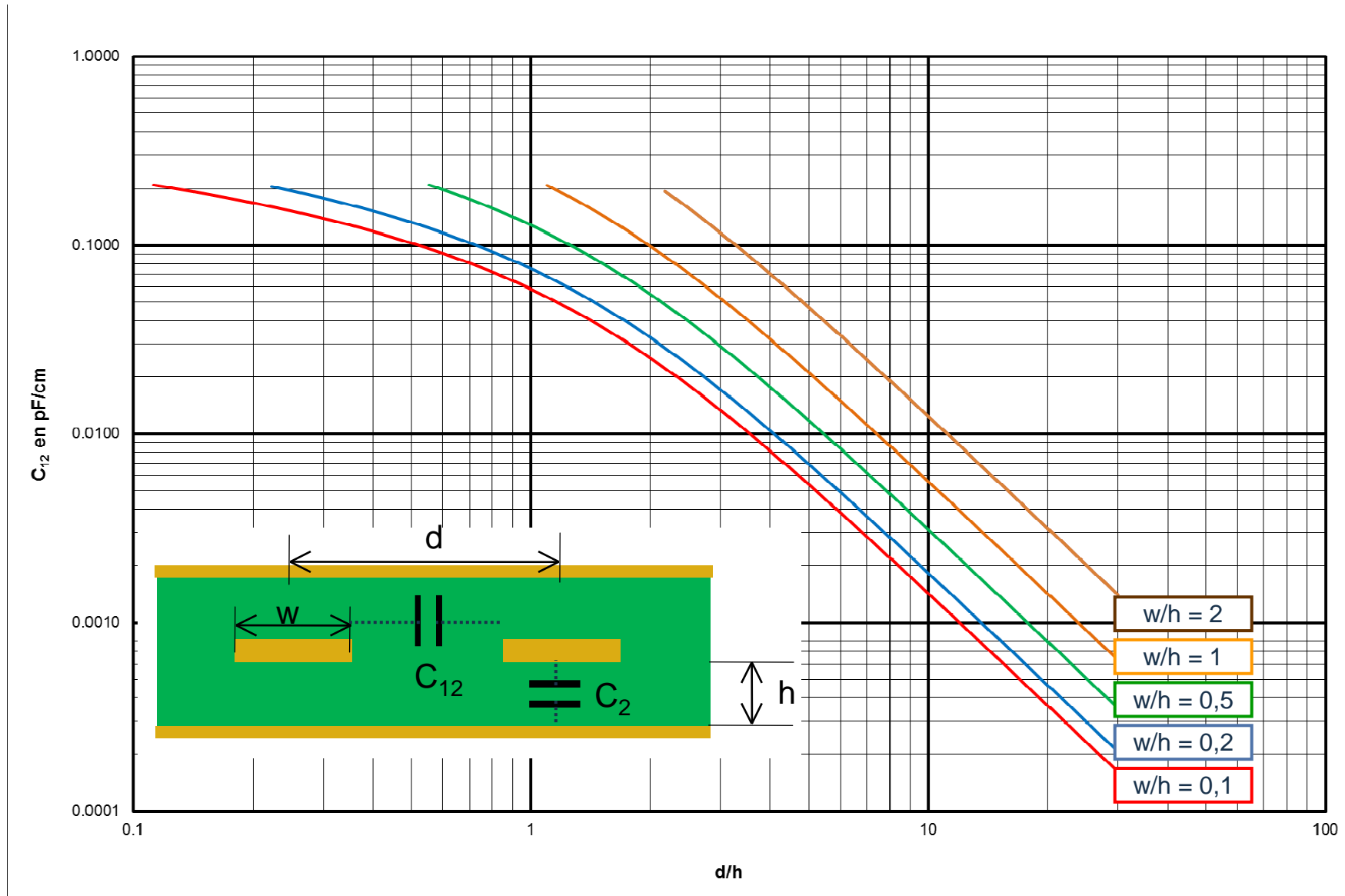
Diaphonie piste à piste



Capacité de couplage C_{12} – Configuration microstrip



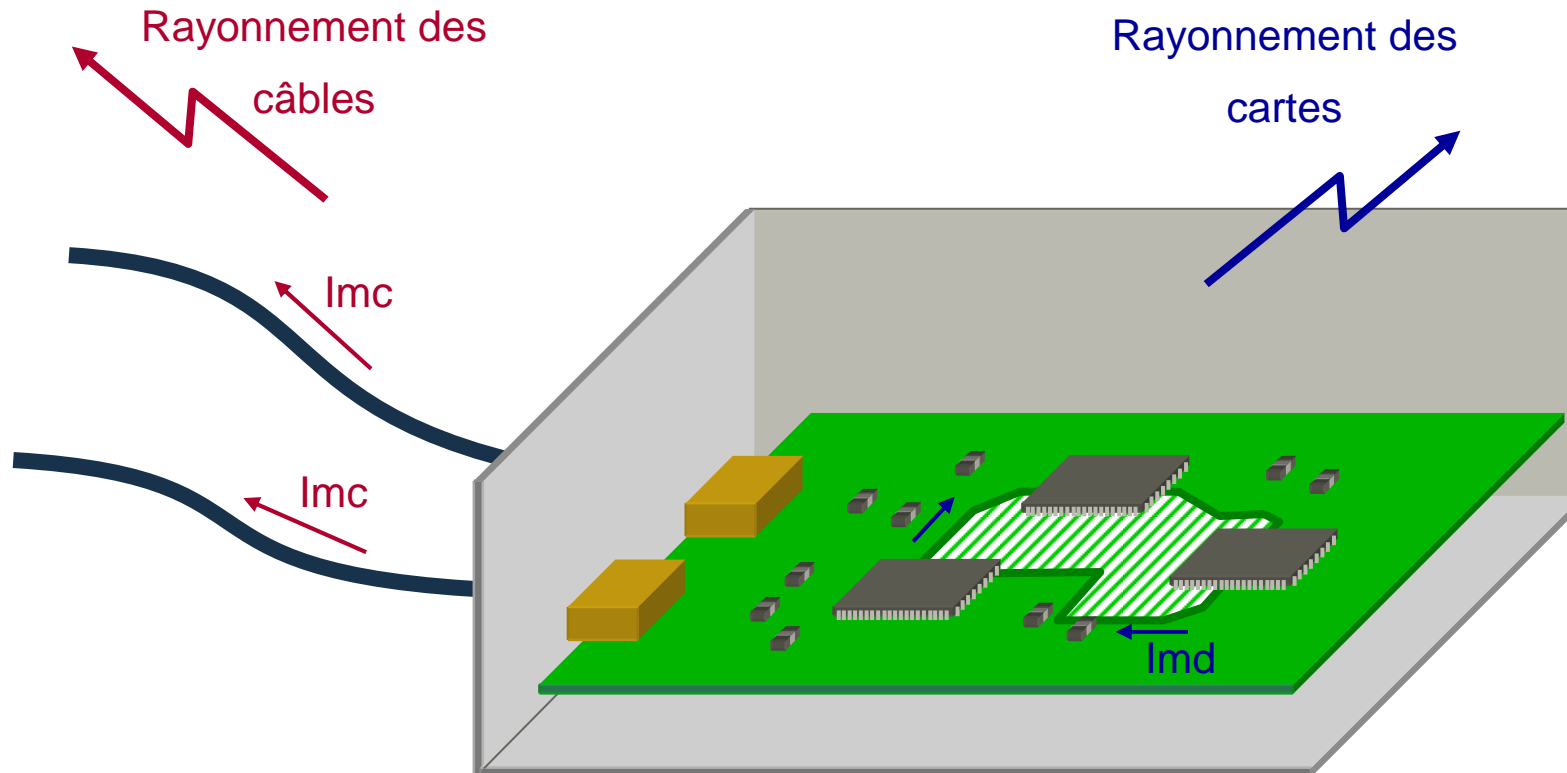
Capacité de couplage C_{12} – Configuration stripline



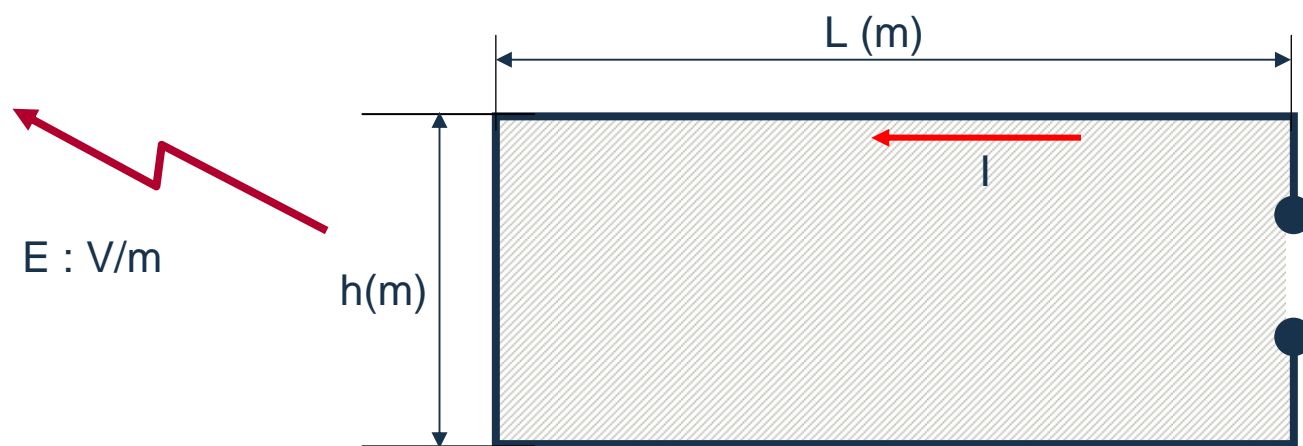


Rayonnements des systèmes

Sources d'émission en rayonnement



Calcul du rayonnement d'une boucle



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

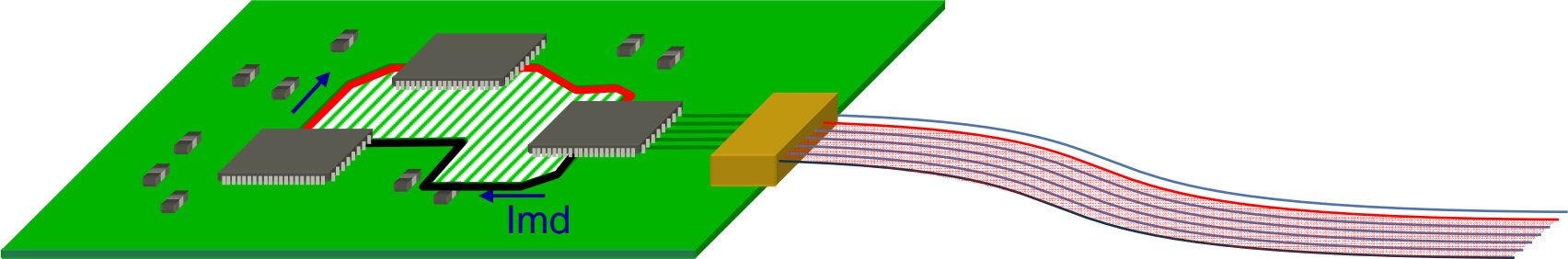
$$E_{v/m} = \frac{0,013 \times L \times h \times I_A \times F_{\text{MHz}}^2}{D_m}$$

► 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 $D > 48/F_{\text{MHz}}$

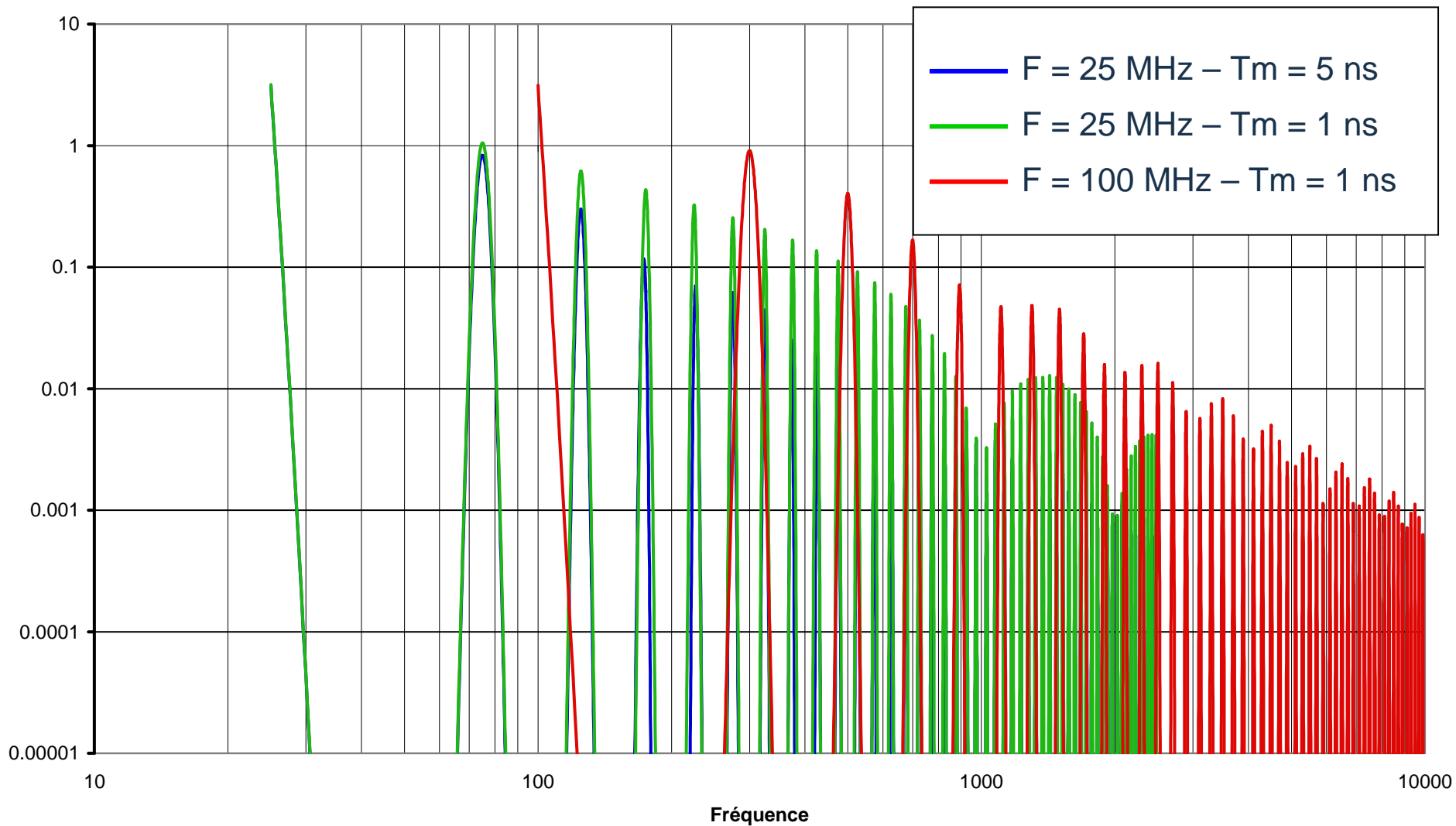
Rayonnement des boucles d'horloge



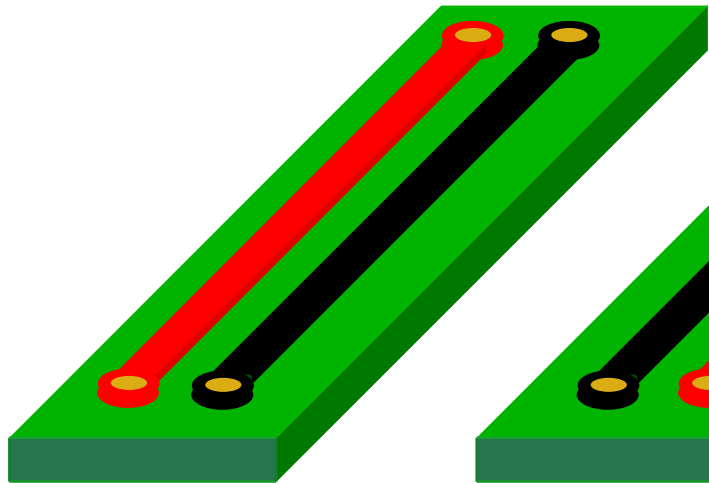
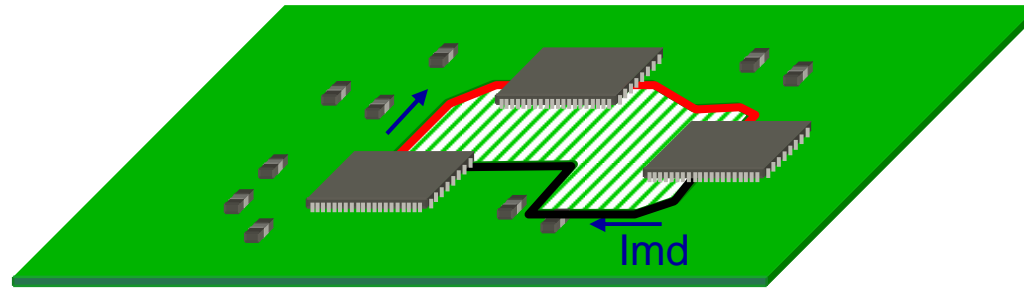
Spectres d'horloges



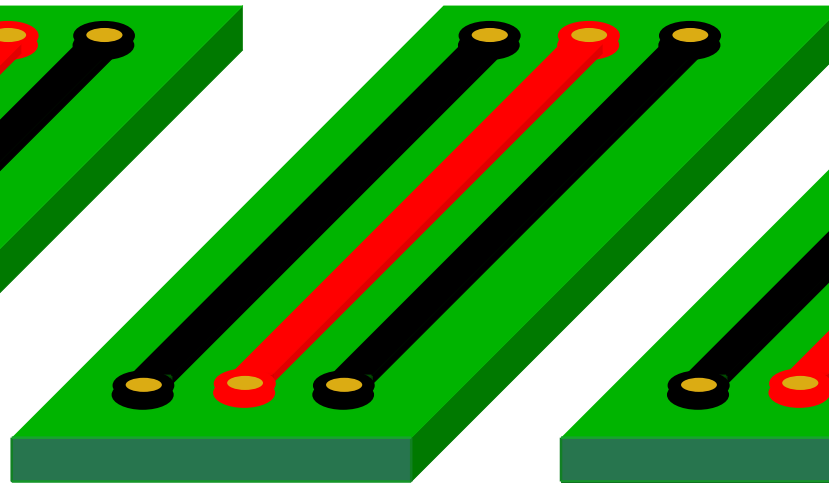
Spectre d'horloges



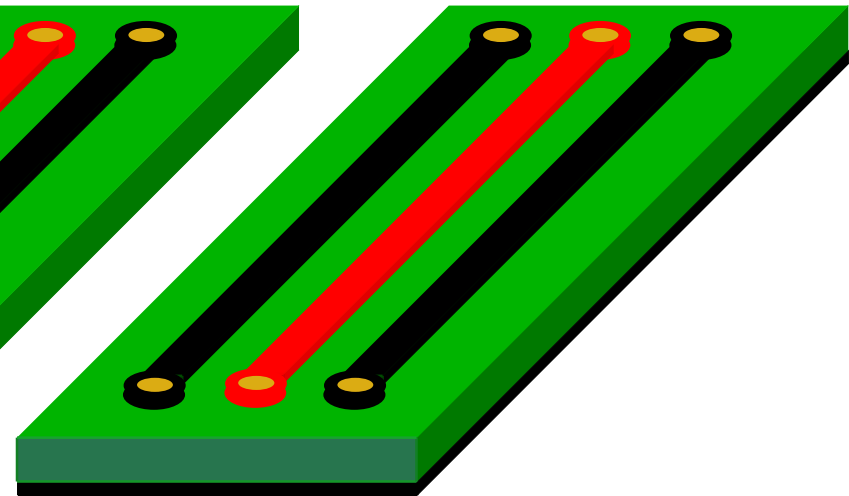
Distribution et routages des horloges



Moyen

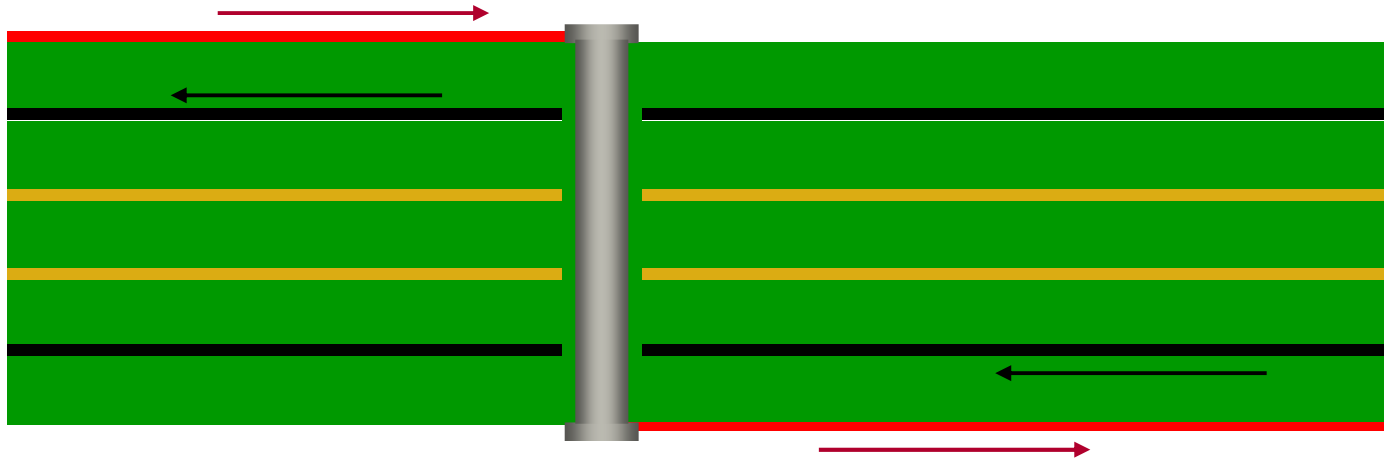


Bon



Préférable

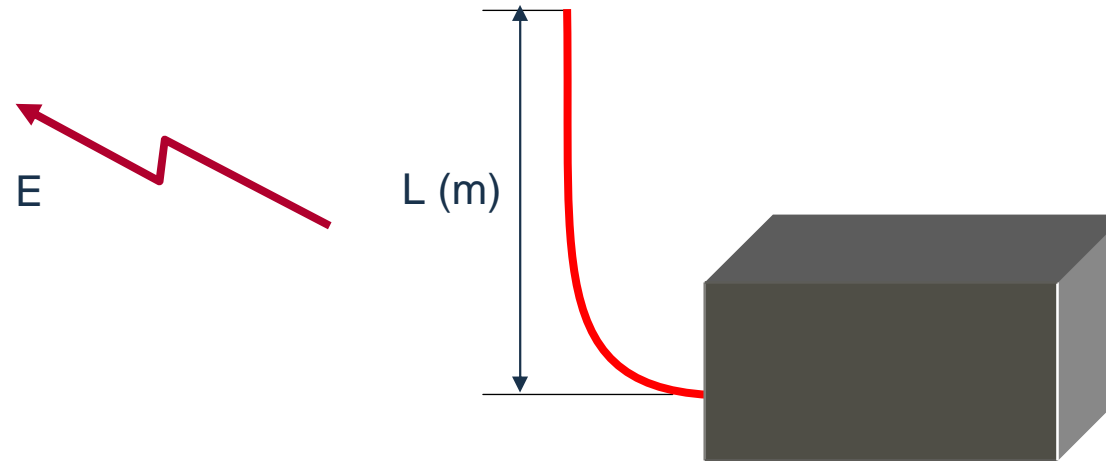
Maîtriser le retour du courant



► 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 $L < \lambda/4$

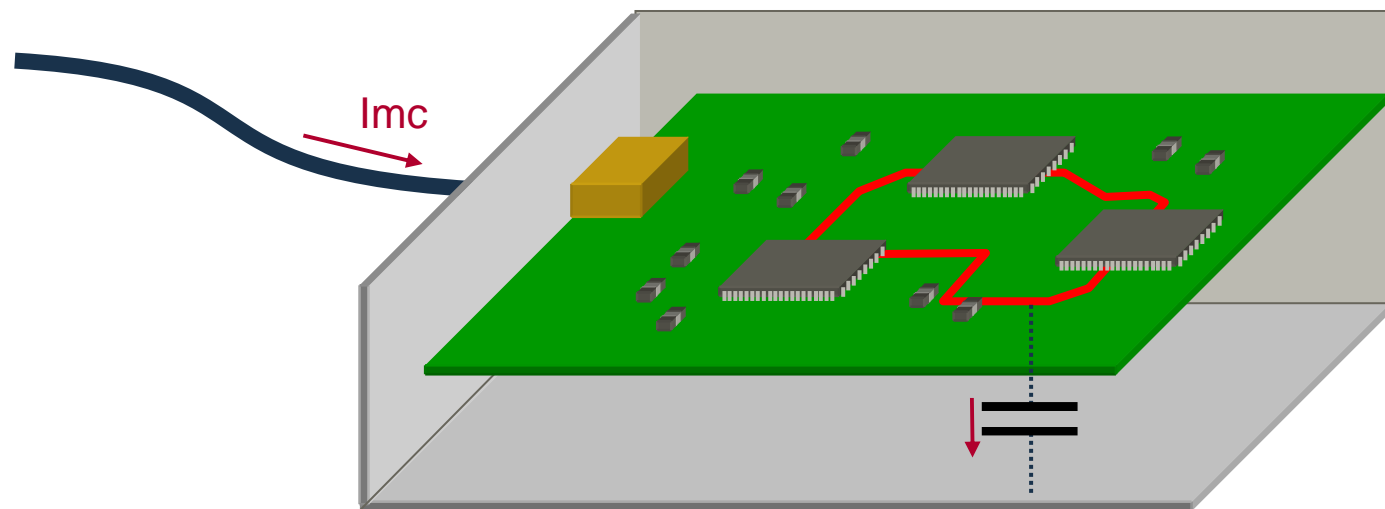
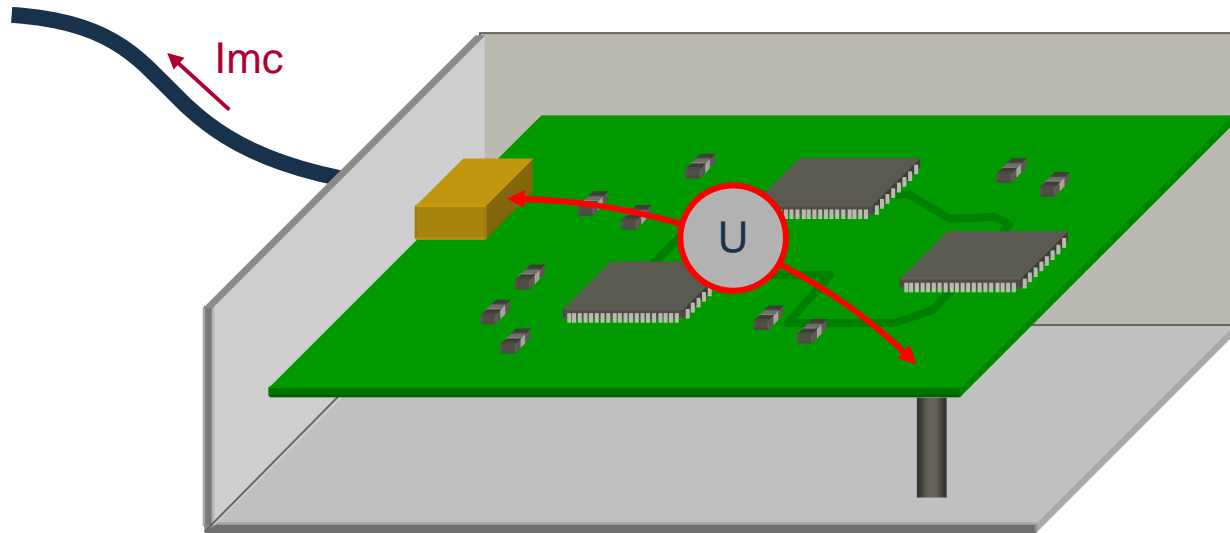
$$E_{\mu\text{V/m}} = \frac{1,26 \times I_{\mu\text{A}} \times L \times F_{\text{MHz}}}{D_m}$$

► 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



► 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

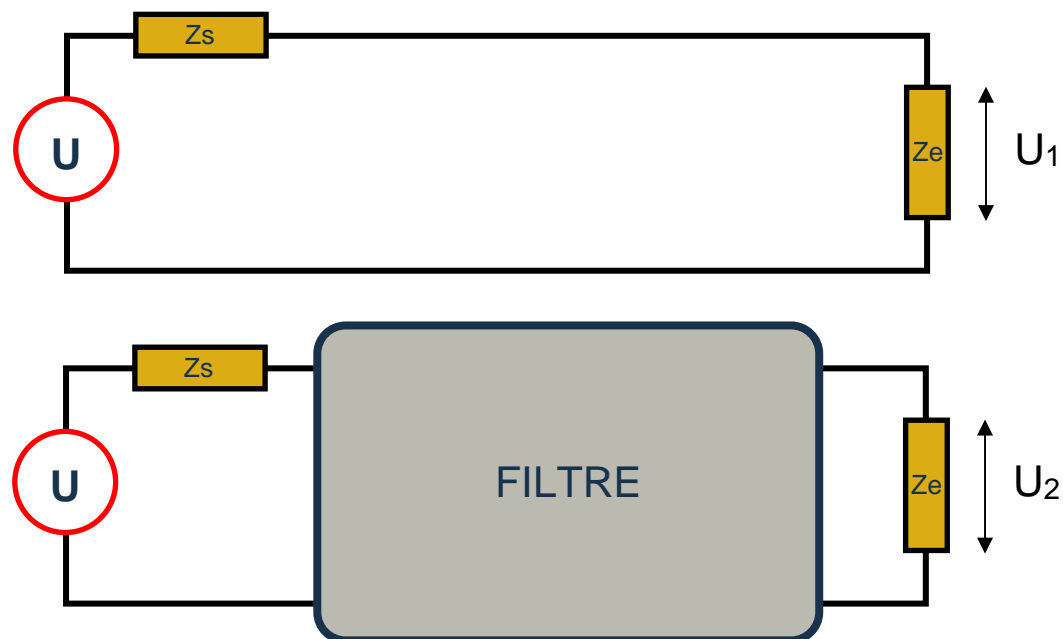
- Carte avec plan de masse
- Raccordement du 0 V au châssis
- Blindage / Filtrage des entrées-sorties



Filtrage

Atténuation d'un filtre

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

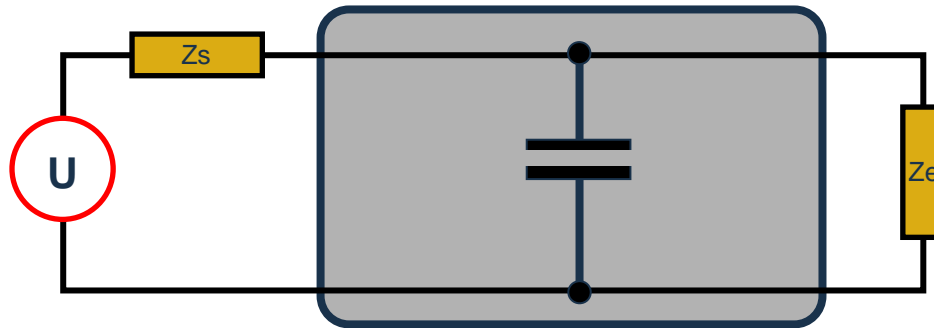


$$A_{dB} = 20 \cdot \text{Log} \left(\frac{U_1}{U_2} \right)$$

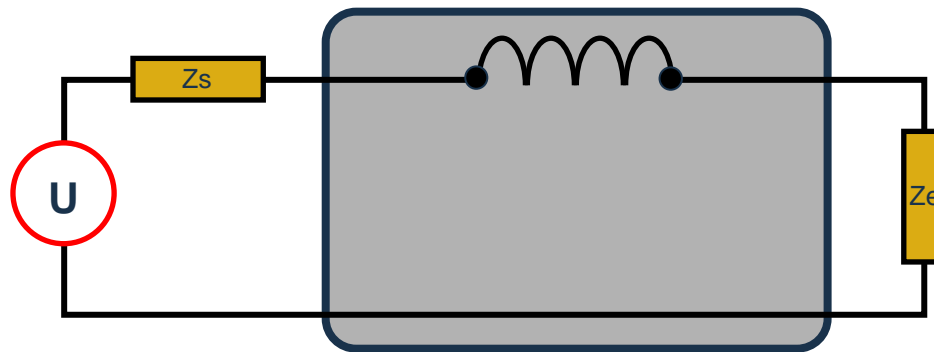
Note : Dans la majorité des cas, $Z_s = Z_e = 50 \Omega$

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

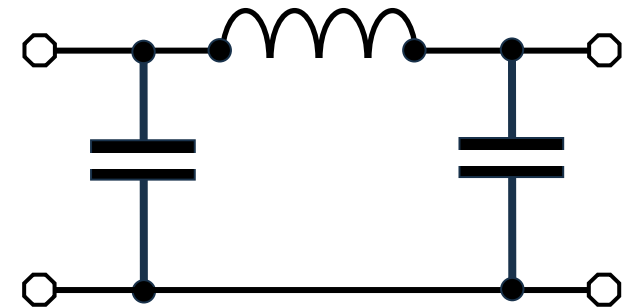
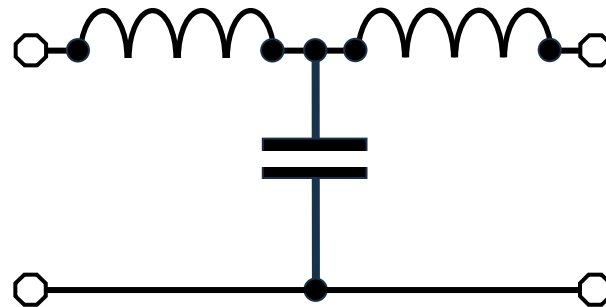
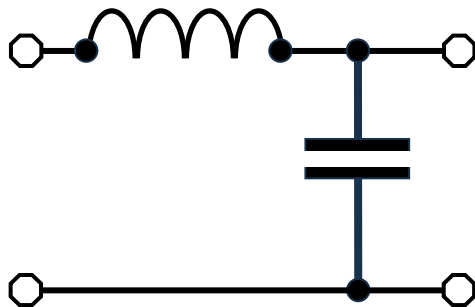
Principes de filtrage



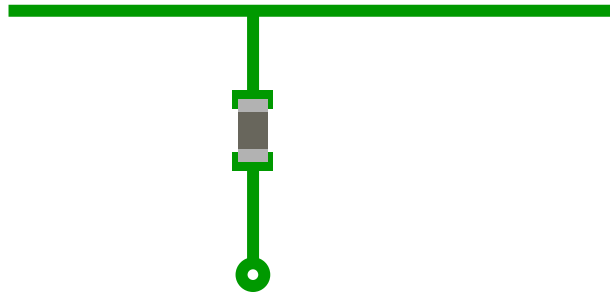
Z_s Forte



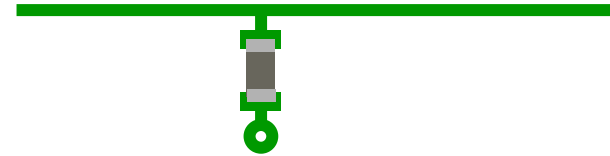
Z_s Faible



Mises en oeuvre des composants de filtrage

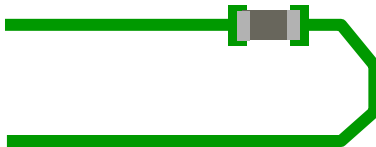


Non



Oui

Filtrage capacitif



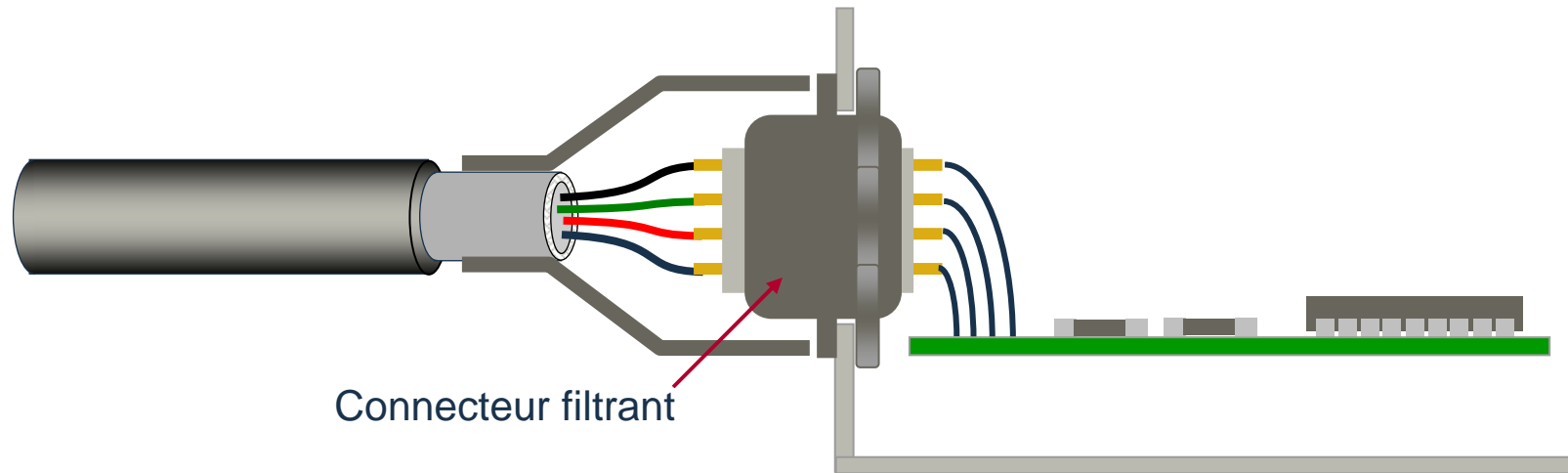
Non



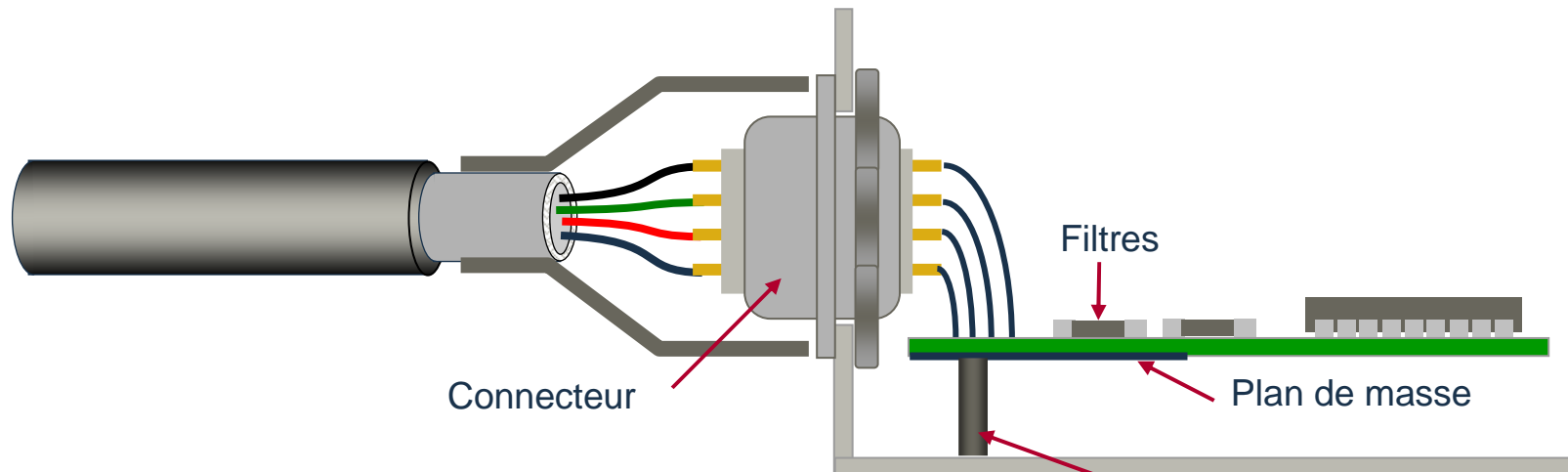
Oui

Filtrage capacitif

Implantation des filtres



Filtrage optimal

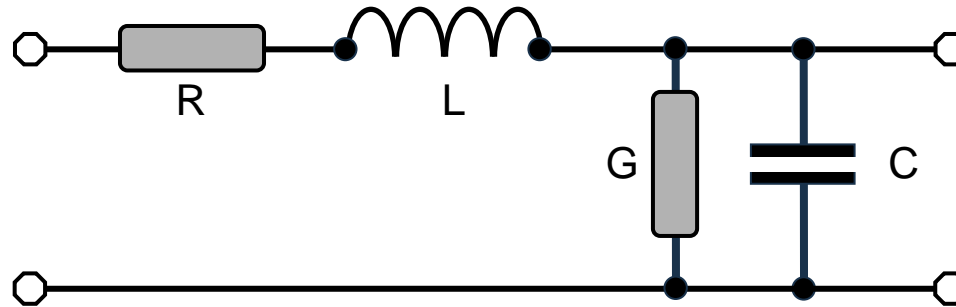


Filtrage sur circuit imprimé



Intégrité du signal

Lignes de transmission - Définitions



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

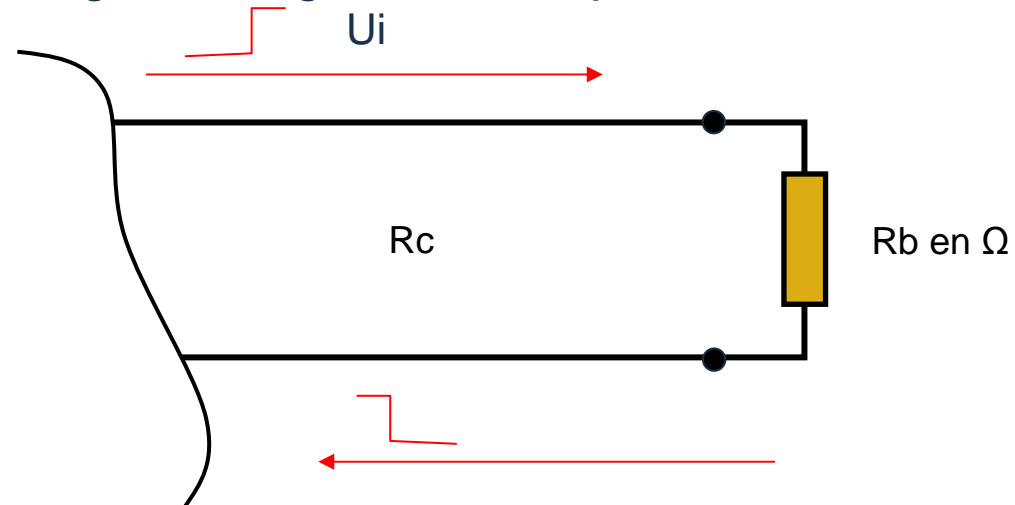
► Propagation dans une ligne sans perte :

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

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

Ligne de transmission – Réflexion

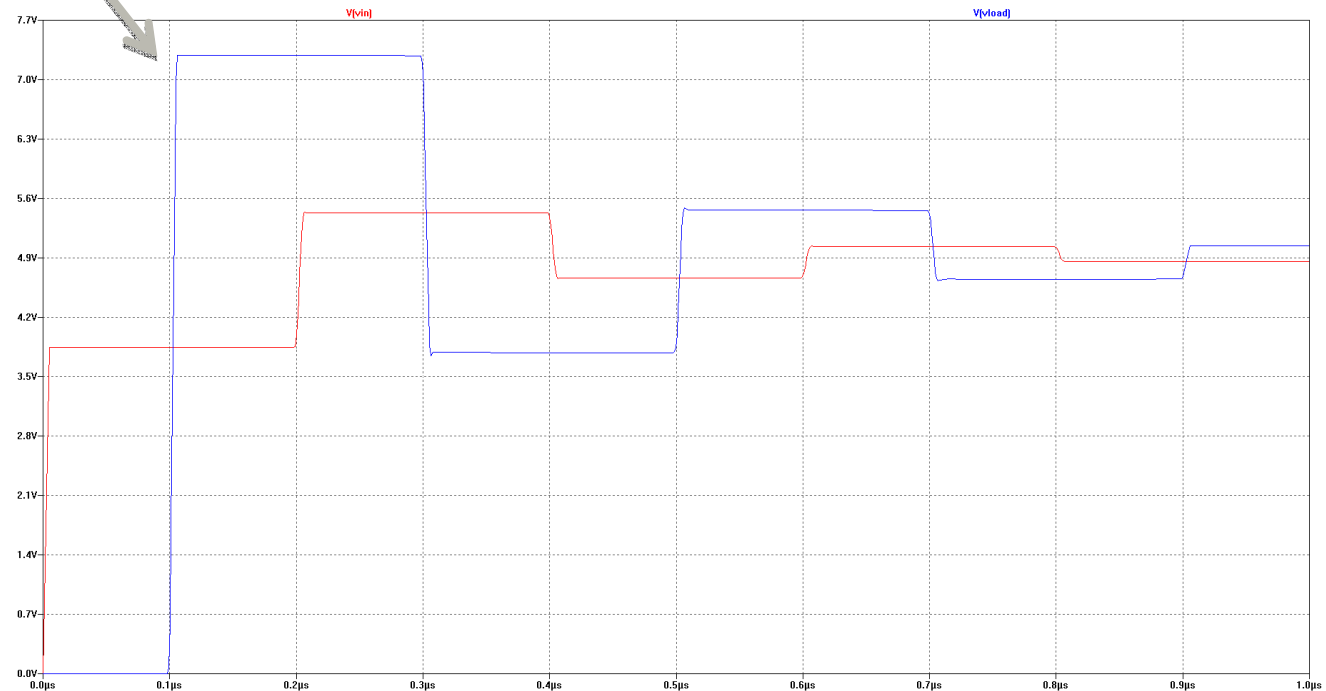
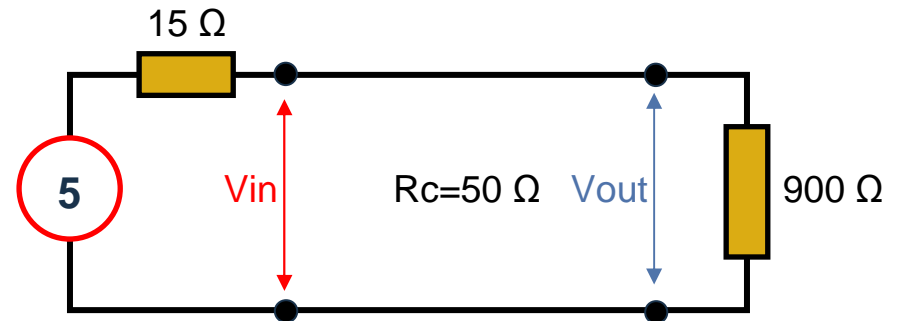
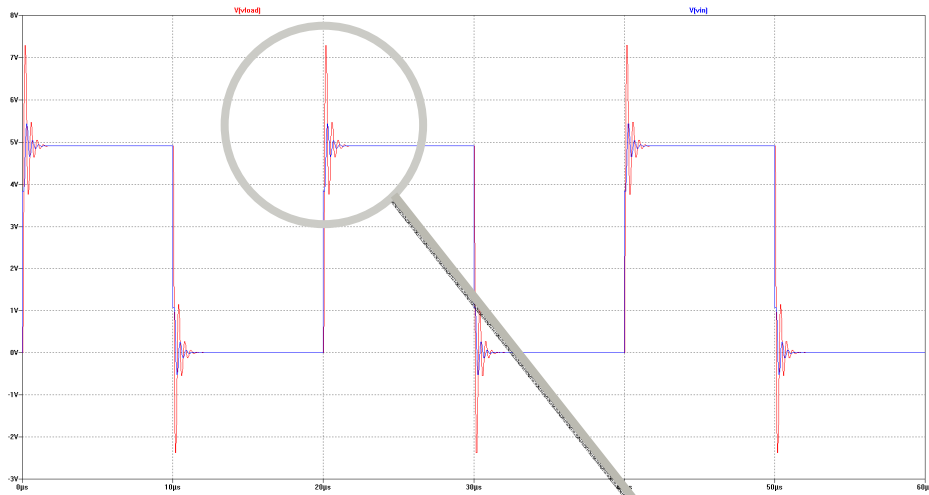
- Propagation le long d'une ligne non adaptée :



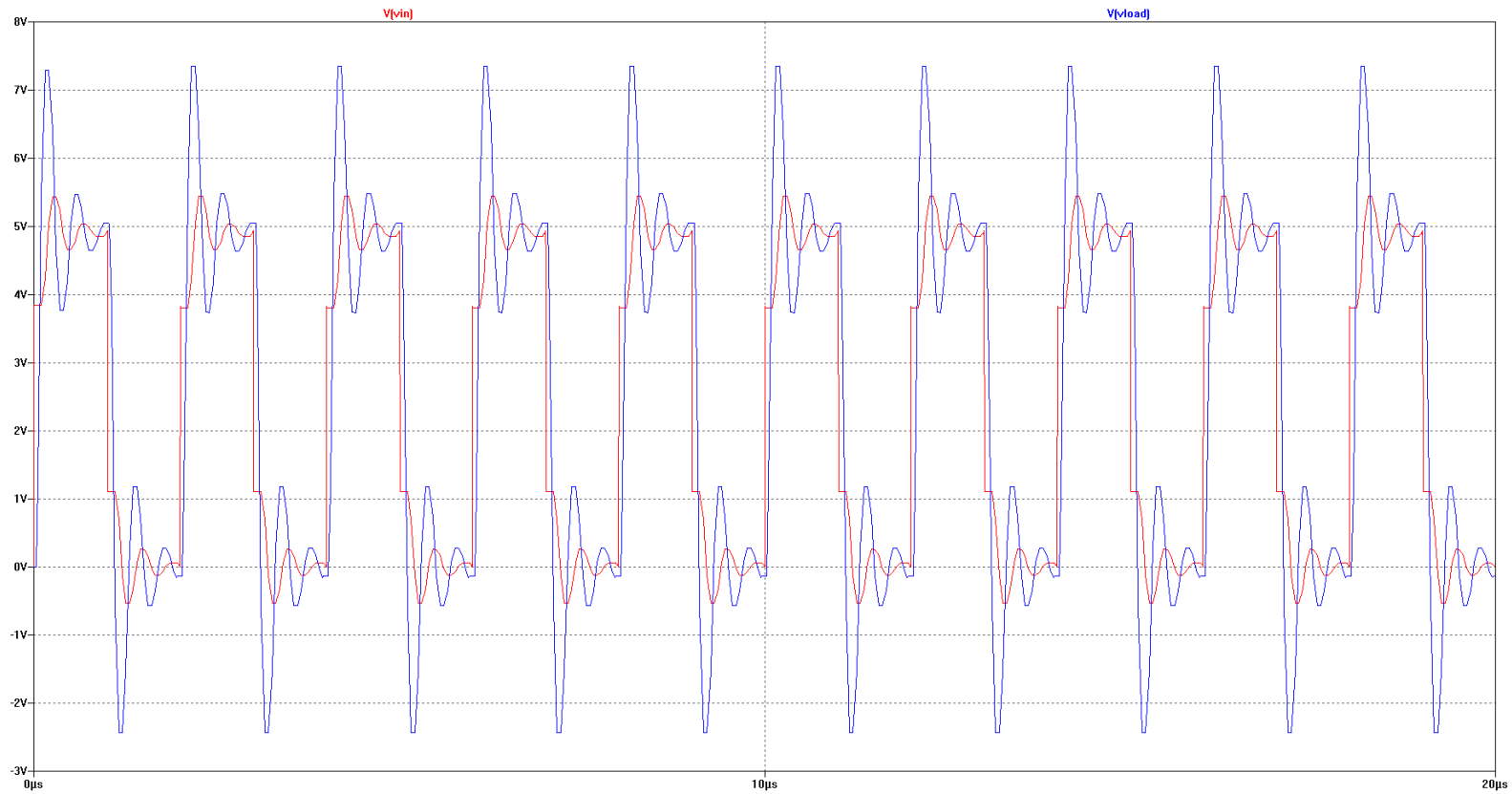
$$R = \frac{R_b - R_c}{R_b + R_c}$$

$$U_r = U_i \times R$$

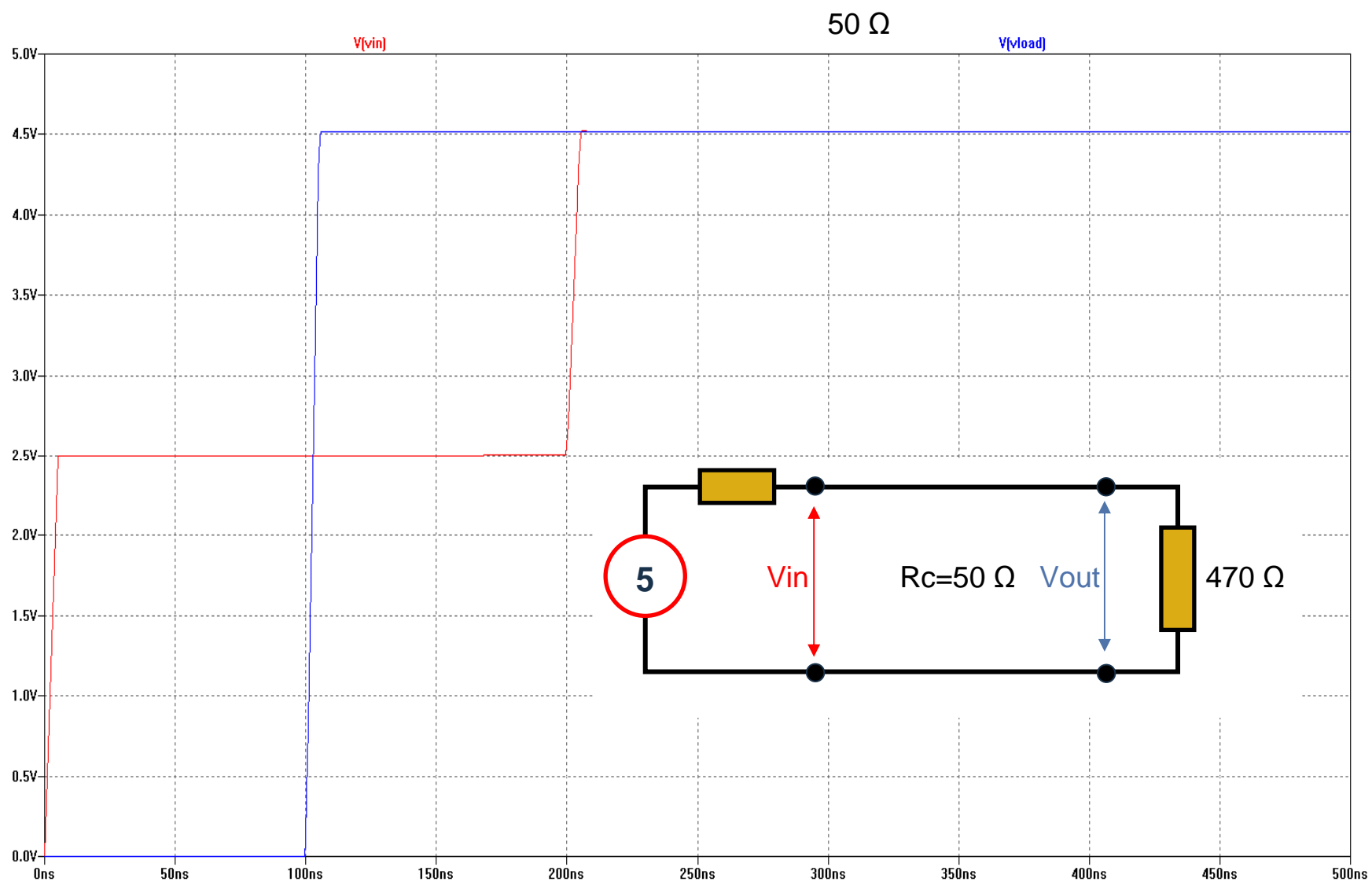
Ligne de transmission – Forme des signaux



Ligne de transmission – Forme des signaux



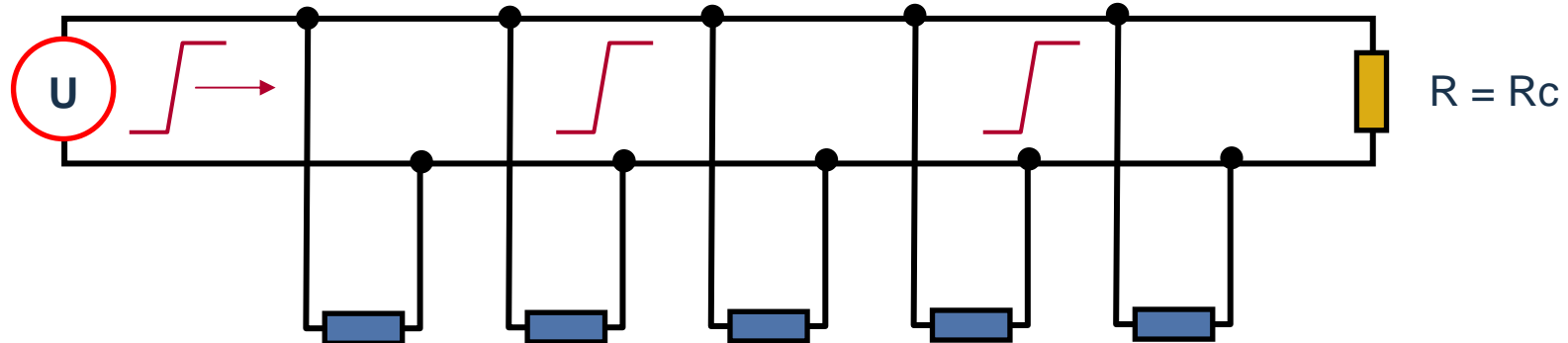
Ligne de transmission – Adaptation série



Différents de type de transmission

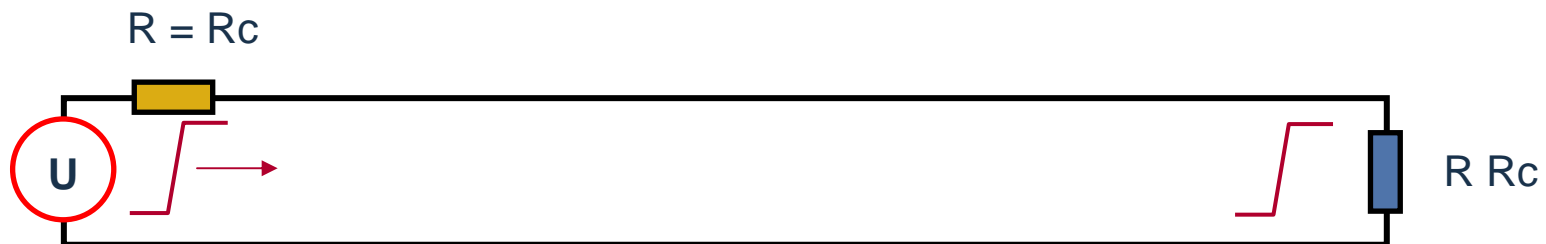
► Liaison multipoints :

- Adaptation parallèle



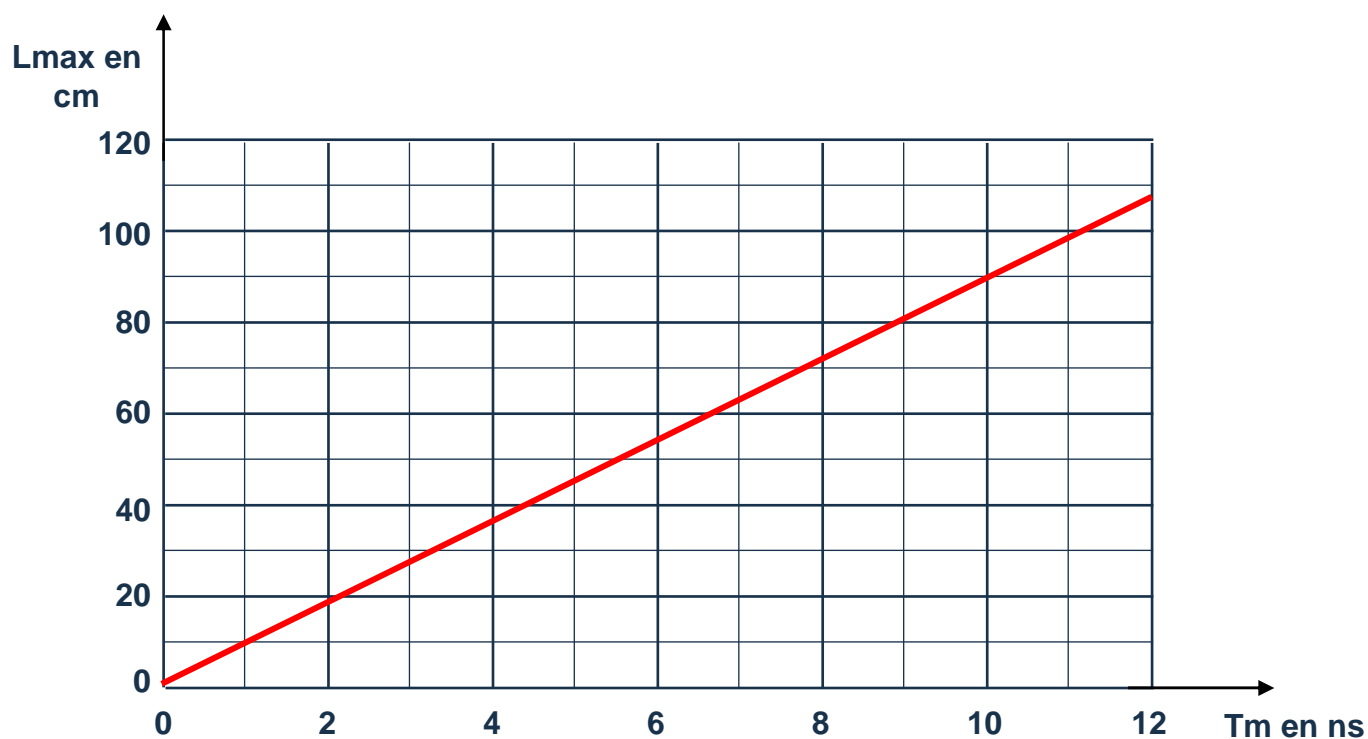
► Liaison point à point :

- Adaptation série



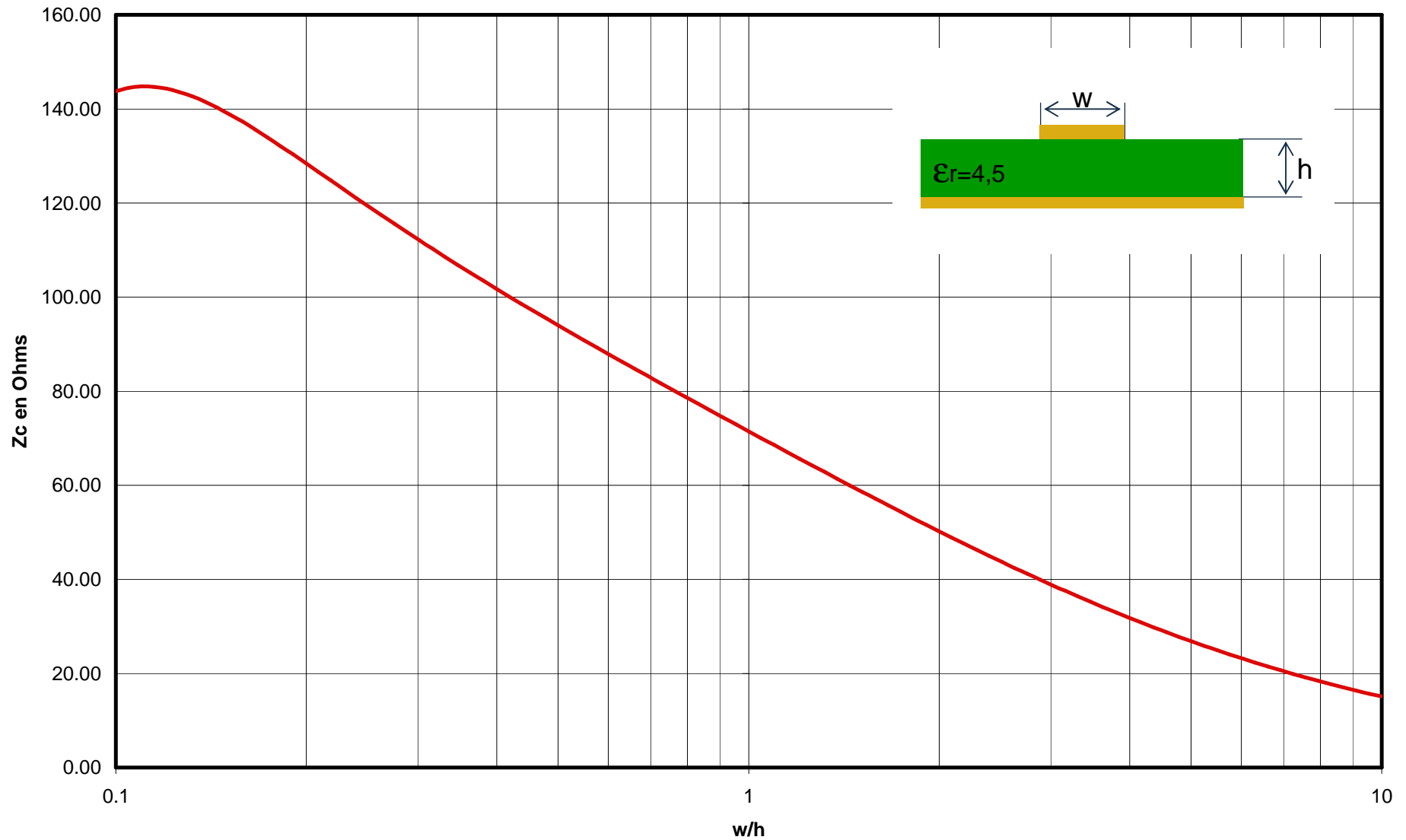
Longueur maximale sans adaptation

- 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.



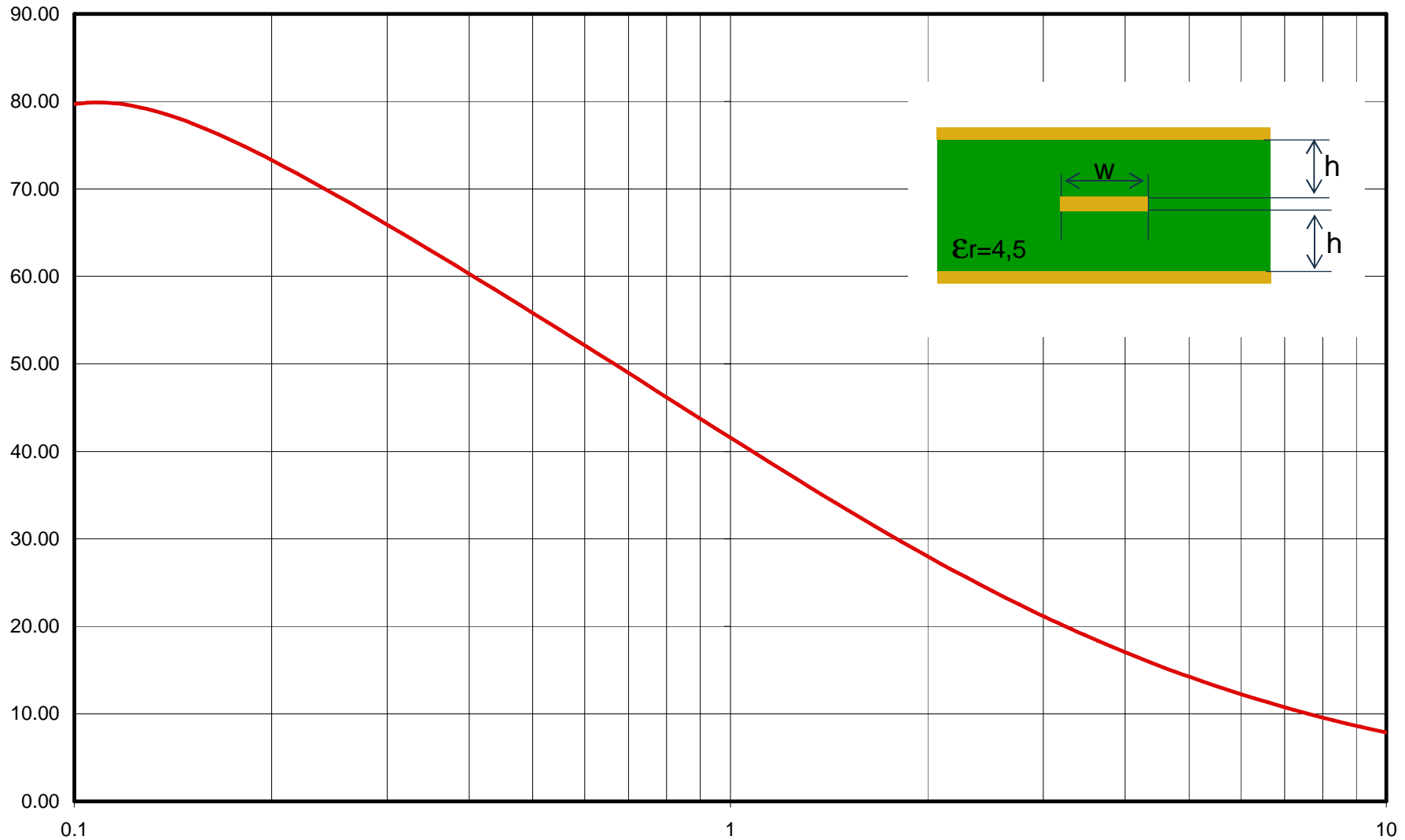
Longueur maximale d'une ligne non-adaptée en fonction du temps de montée des signaux

Impédance caractéristiques d'une ligne microstrip



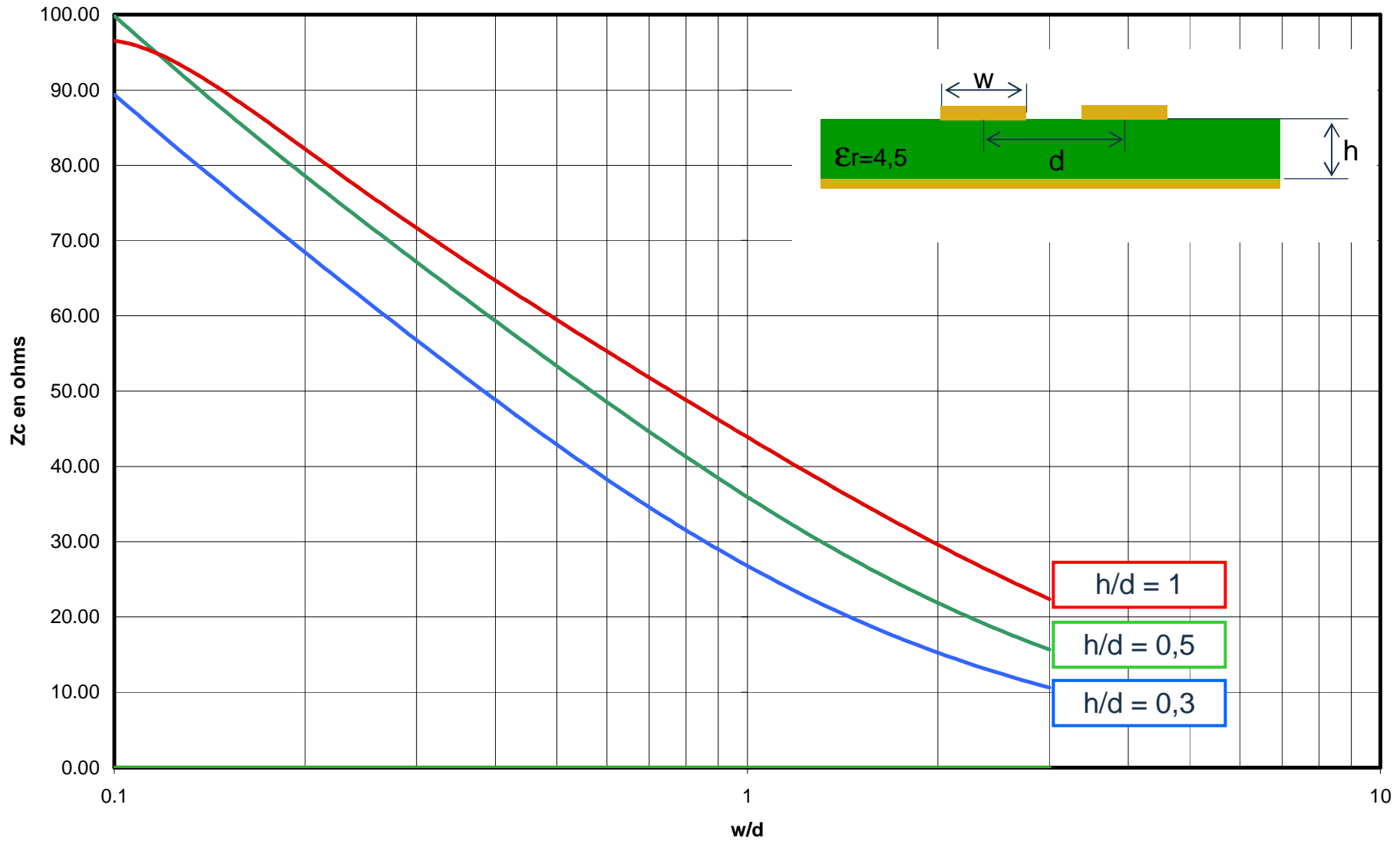
Ref : Capacitance, Inductance and crosstalk analysis – Charles S. Walker

Impédance caractéristique d'une ligne stripline



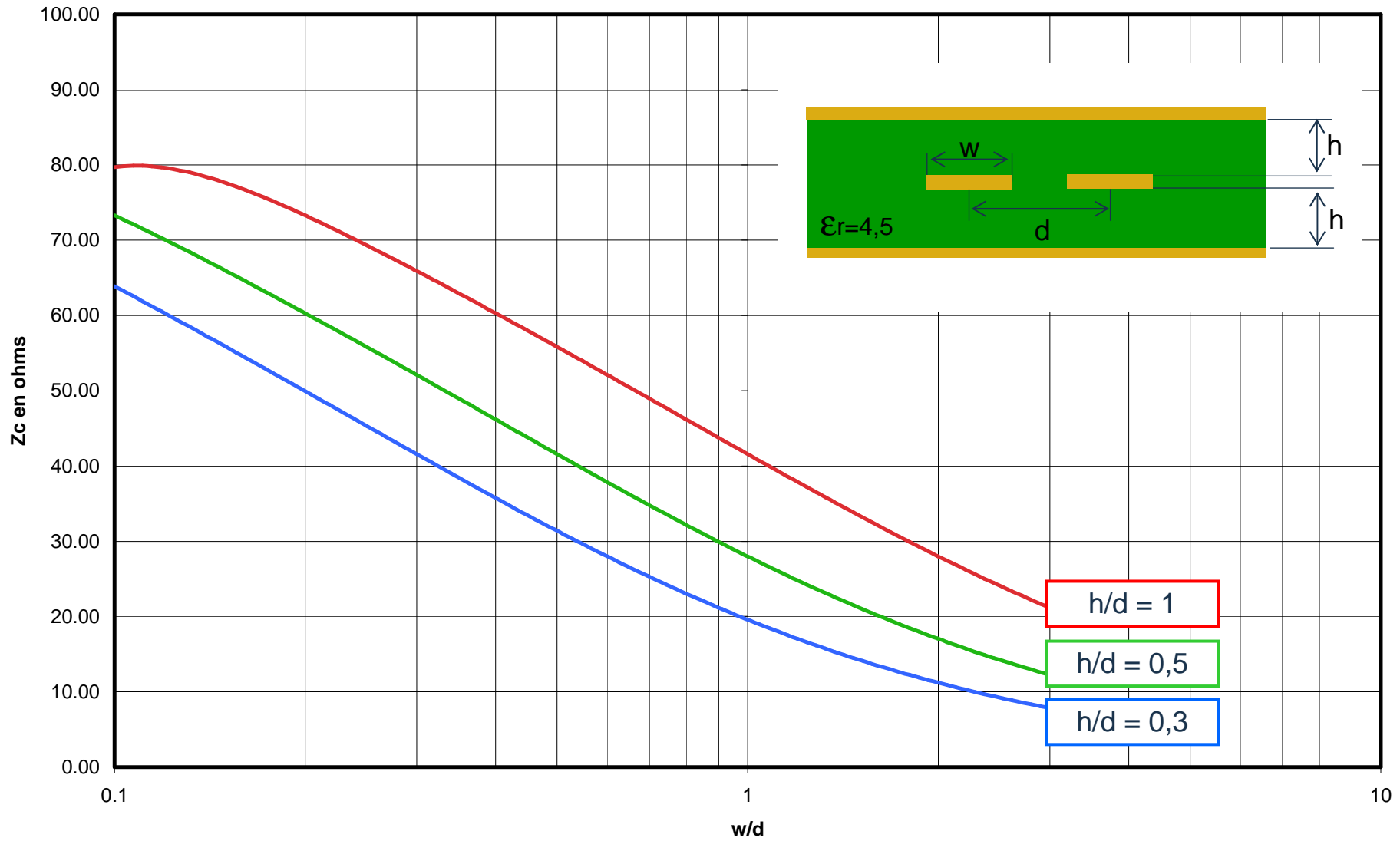
Ref : Capacitance, Inductance and crosstalk analysis – Charles S. Walker

Impédance caractéristique d'une ligne différentielle - Microstrip



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

Impédance caractéristique d'une ligne différentielle - Stripline

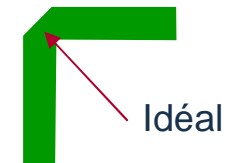
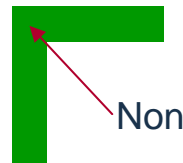


Ref : Capacitance, Inductance and crosstalk analysis – Charles S. Walker

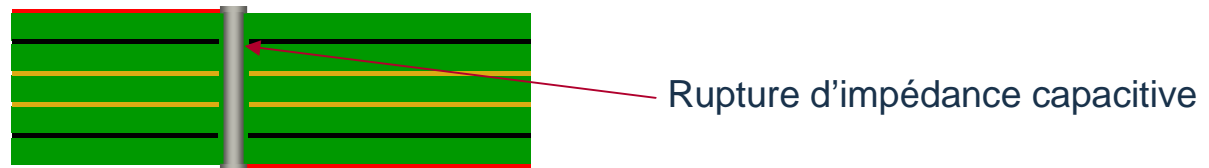
Lignes de transmissions - Ruptures d'impédance

► Rupture d'impédance « Géométrique » :

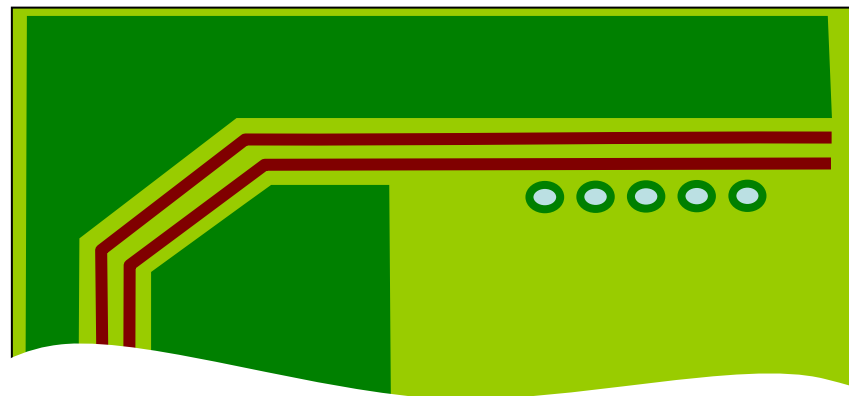
- Changement de direction



- Trous métallisés

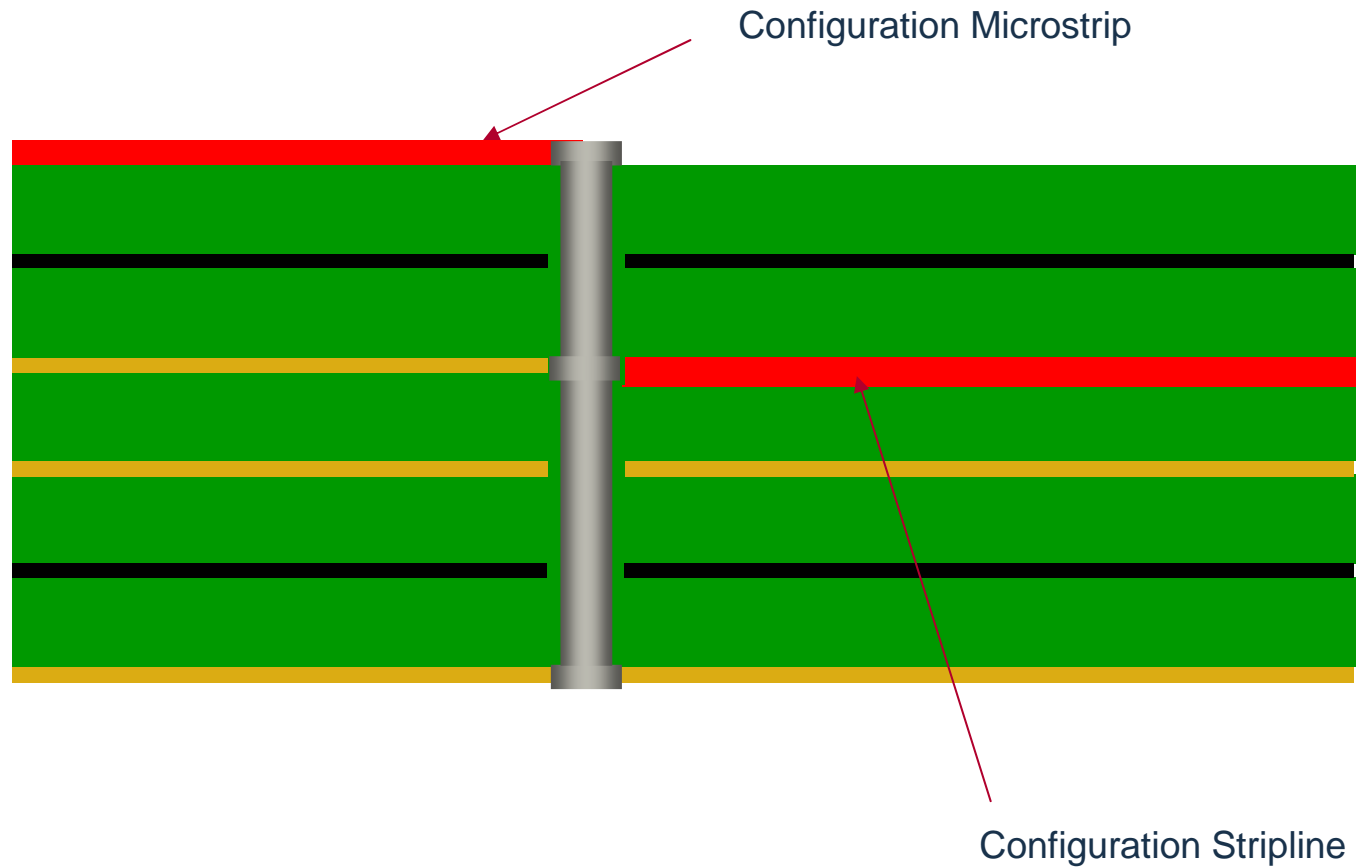


► « Influence » éléments externes sur une ligne différentielle

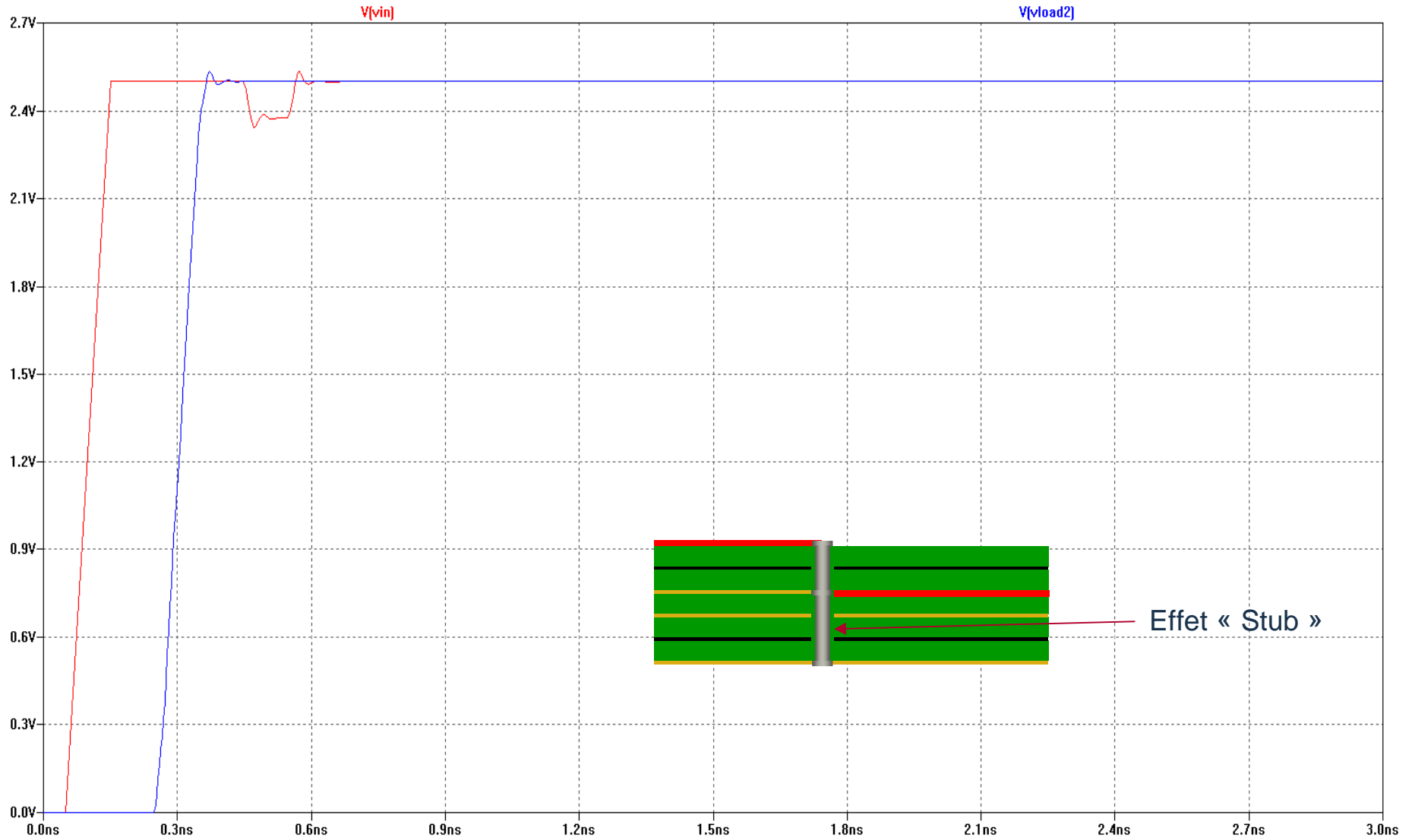


Rupture d'impédance « Structurelle »

► Changement de configuration



Effet des trous métallisés

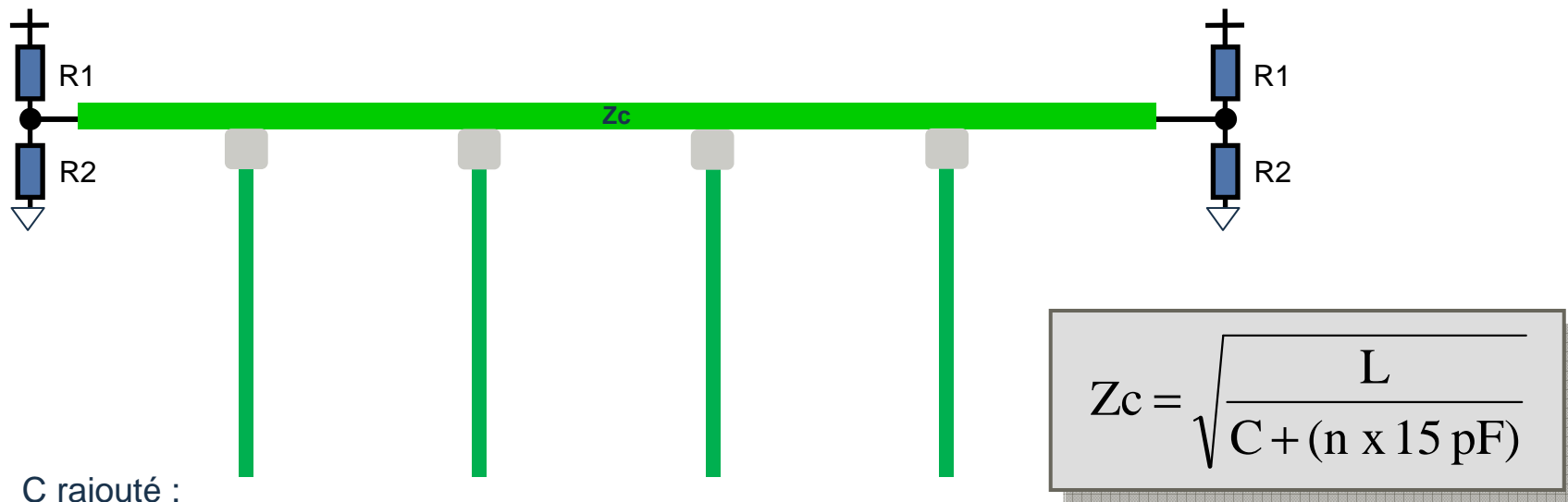


Problèmes des fonds de panier

- Adaptation aux deux extrémités : Consommation importante



- Insertion de carte : Modification de Z_c



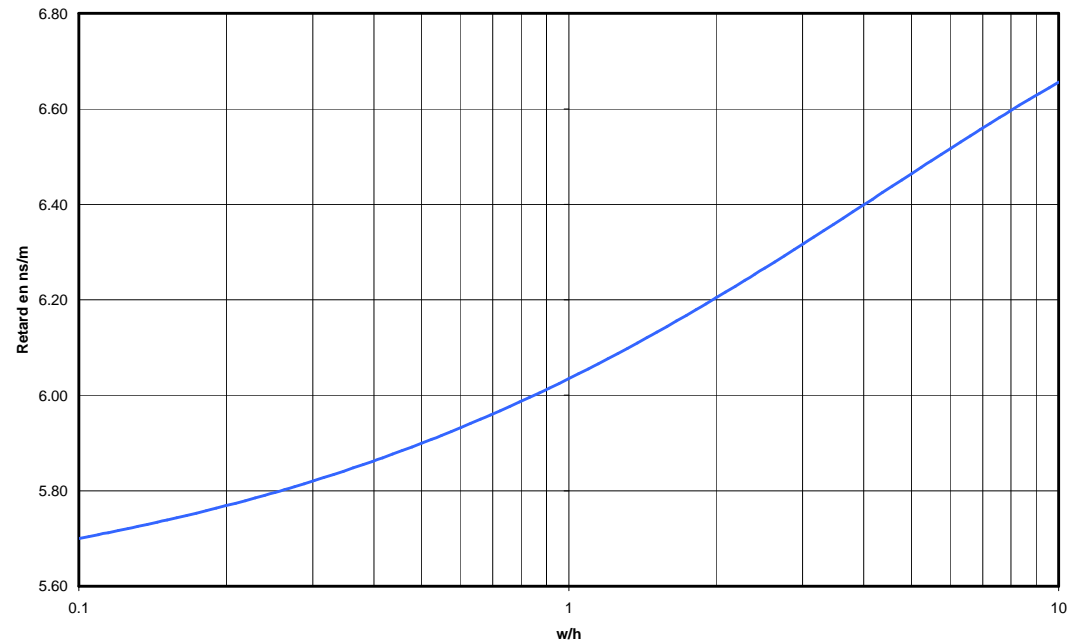
Vitesse de propagation et Retards

► 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



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*