

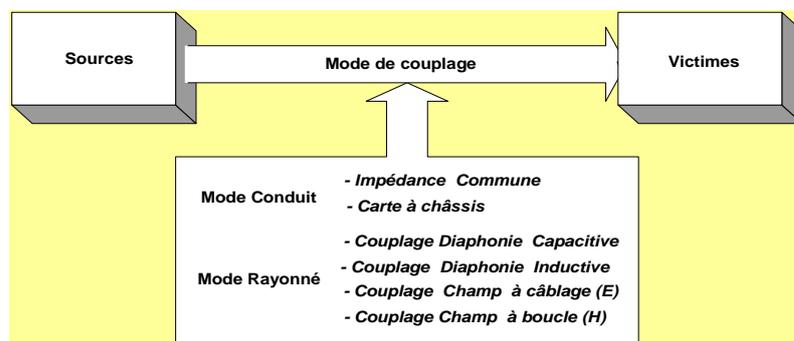
Cours de CEM

- Les couplages électromagnétiques

Les couplages Electromagnétique:

Définition

■ Mode conduit et Rayonné



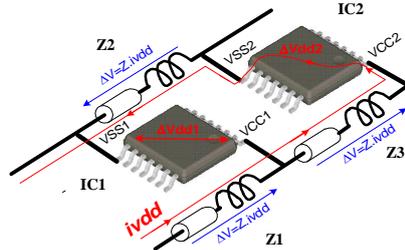
Les couplages Electromagnétique:

Définition

■ Mode conduit- Impédance commune

▪Description:

C'est une impédance partagée par un ou plusieurs systèmes. Elle provient la plus part du temps du fait que les conducteurs ne sont pas idéaux et présentent des éléments parasites.



Pour le cuivre

$$R_{PCB} (m\Omega) = 0.5 \cdot \frac{L}{W}$$

$$R_{Fil} (m\Omega) = 17 \cdot \frac{L}{S}$$

$$L_{Pcb/Fil} = 10nH/cm$$

$$Z_{cond} = R + j \cdot L\omega$$

ARALA – F4GSC -Jean-luc Levant May 12

3

Les couplages Electromagnétique:

Définition

■ Mode conduit -Impédance commune

▪ Remèdes:

- Diminuer Z1 en augmentant la section de la piste pour diminuer la résistance et l'inductance.
- Utiliser du circuit imprimé multicouches (plusieurs plans d'alimentation).
- Améliorer le découplage aux bornes de IC2.
- Séparer les alimentations des circuits intégrés qui consomment le plus.
- Limiter la bande passante des signaux.

$$Z_{cond} = R + j \cdot L\omega$$

ARALA – F4GSC -Jean-luc Levant May 12

4

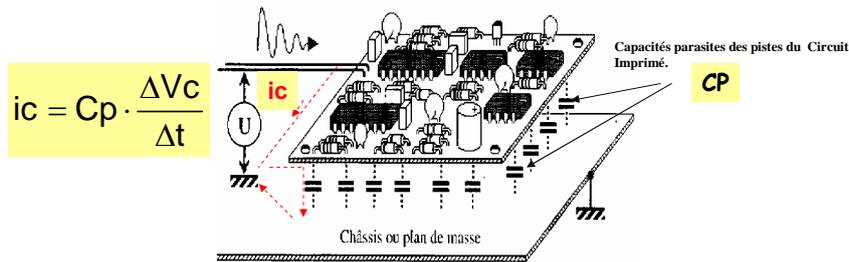
Les couplages Electromagnétique:

Définition

■ Mode conduit - Carte à châssis

▪ Description

- Les pistes, les plans de masse et d'alimentation présentent des capacités parasites, C_p , par rapport à la terre ou par rapport aux parties métalliques proches.
- C_p proportionnelle à la surface des conducteurs.
- Les courants de fuite, i_c , proportionnels aux capacités parasites C_p .
- Création de DDP entre les différents signaux et violation des niveaux logiques.



ARALA - F4GSC - Jean-luc Levant May 12

5

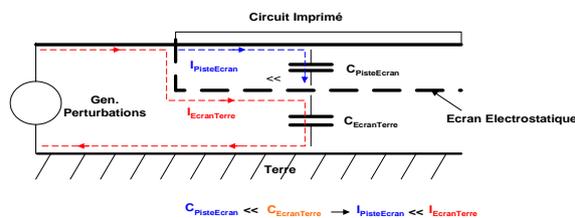
Les couplages Electromagnétique:

Définition

■ Mode conduit - Carte à châssis

▪ Remèdes

- Diminuer les capacités réparties entre le circuit imprimé et la masse au niveau des pistes les plus sensibles (haute impédance, faible niveau) en diminuant la surface des pistes.
- Rajouter un plan de masse si il n'existe pas (blindage, abaissement des capacités parasites et des impédances des pistes).
- Diminuer les variations de tension entre la carte et le châssis en reliant le « 0 volt » de la carte au châssis ou à un écran électrostatique.



$$i_c = C_p \cdot \frac{\Delta V_c}{\Delta t}$$

ARALA - F4GSC - Jean-luc Levant May 12

6

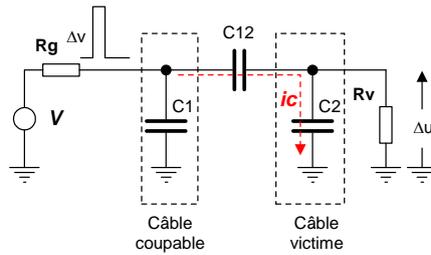
Les couplages Electromagnétique:

Définition

■ Couplage par diaphonie capacitive

• Description

La présence de deux câbles proches l'un de l'autre produit une capacité de couplage qui induit un courant dans le câble victime et donc une tension de perturbation.



$$i_c \cong C_{12} \cdot \frac{\Delta v - \Delta u}{\Delta t}$$

ARALA – F4GSC -Jean-luc Levant May 12

7

Les couplages Electromagnétique:

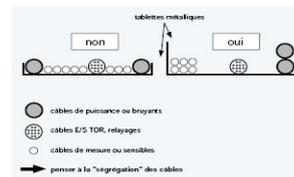
Définition

■ Diaphonie capacitive

▪ Remèdes

- Limiter les variations rapides de tension.
- Diminuer la capacité de couplage entre les deux circuits par un écran électrostatique (tresse, feuillard, plastique conducteur,...).
- Diminuer la capacité de couplage en éloignant le perturbé du perturbateur.
- Éviter les parcours parallèles de câbles sur de longues distances.
- Mettre le conducteur de retour dans le même câble que le conducteur aller.
- Séparer les câbles de puissance et les câbles travaillant à plus faibles niveaux.

$$i_c \cong C_{12} \cdot \frac{\Delta v - \Delta u}{\Delta t}$$



ARALA – F4GSC -Jean-luc Levant May 12

8

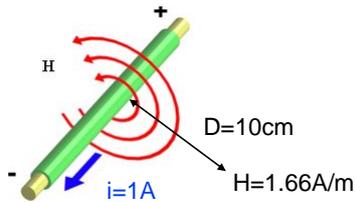
Les couplages Electromagnétique:

Définition

■ Diaphonie inductive

• Rappel de la loi d'Ampère

Tout conducteur parcouru par un courant i , produit un champ électromagnétique B inversement proportionnel à la distance d :



$$B(\text{Tesla}) = \mu_0 \cdot H$$

Avec:

$$H\left(\frac{\text{A}}{\text{m}}\right) = \frac{I}{2\pi \cdot D}$$

Exemple: Champ à une distance de 10cm pour $i=1\text{A}$. $\rightarrow H=1.66 \text{ A/m}$

$$B = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1.66 = 21 \cdot 10^{-7}$$

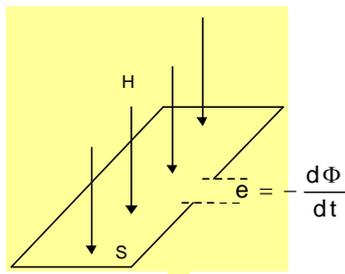
Les couplages Electromagnétique:

Définition

■ Diaphonie inductive

• Rappel de la loi de Faraday (théorie de l'induction)

Le champ magnétique traversant une surface S induit une tension e proportionnelle à S .



Variation temporelle: $e = -\mu_0 \cdot S \cdot \frac{dH}{dt}$

Variation fréquentielle: $e = -\mu_0 \cdot S \cdot 2\pi \cdot f \cdot H$

Avec: $\Phi = B \cdot S$ $B = \mu_0 \cdot H$

μ_0 ($\frac{\text{H}}{\text{m}}$) Perméabilité de l'air, $12.56\text{e-}6$
 S (m^2) Surface de la boucle

B (Tesla) Champ d'induction magnétique

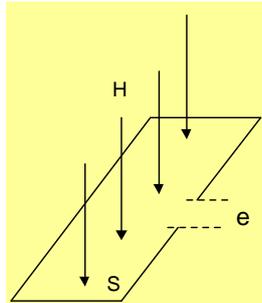
Φ (Weber) Flux d'induction magnétique

Les couplages Electromagnétique:

Définition

■ Diaphonie inductive

- Rappel de la loi de Faraday - Exemple.



$$e = -\mu_0 \cdot S \cdot \frac{dH}{dt}$$

$$H = 1A/m, dt = 10ns, S=10cm^2.$$

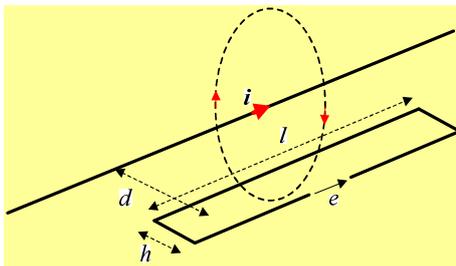
$$e=-1.256V$$

Les couplages Electromagnétique:

Définition

■ Diaphonie inductive

- Rappel de la loi de Faraday
- Exemple.



- $i= 1A, dt = 100ns$
- $h=1cm, l=1m$
- $d =10cm$, distance moyenne fil à boucle.

H traversant la boucle à la distance d:

$$H=1.6A/m$$

Tension induite:

$$e = -\mu_0 \cdot S \cdot H / dt$$

$$e = -0.2v$$

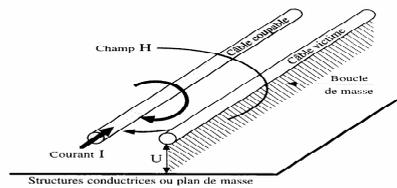
Les couplages Electromagnétique:

Définition

■ Diaphonie inductive

•Rappel sur l'inductance mutuelle

- La présence de deux fils crée une inductance mutuelle.
- Tension de perturbation induite dans la boucle.



$$U = ZL \cdot i = 2\pi \cdot f \cdot M \cdot i$$

$$U = M \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

Les couplages Electromagnétiques

Définition

■ Diaphonie inductive

•Rappel sur l'inductance mutuelle

Exemple

Deux fils parallèles de 1m de long à 10cm du plan de masse et séparés de 5cm ont une inductance mutuelle de $0,22\mu\text{H}$.

Le courant circulant dans le câble coupable est de 10A et s'établit en 500ns.

Déterminons U dans le câble victime.

$$U = 0,22\mu\text{H} \cdot \frac{10\text{A}}{500\text{ns}} = 4,4\text{V}$$

Les couplages Electromagnétiques

Définition

■ Couplage par diaphonie inductive.

▪ Remèdes :

- Diminuer l'inductance mutuelle en éloignant le perturbé du perturbateur.
- Diminuer la surface de la boucle du circuit perturbé.
- Éviter les parcours parallèles de câbles sur de longues distances.
- Diminuer la vitesse de variation du courant.
- Plaquer les conducteurs victimes et perturbateurs sur la masse.
- Travailler en basse impédance.

$$U = M \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

$$e = -\mu_0 \cdot S \cdot \frac{dH}{dt}$$

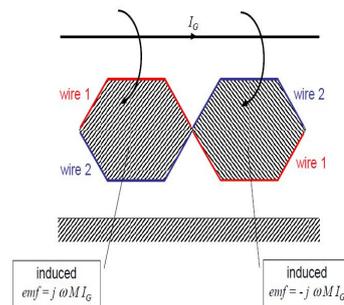
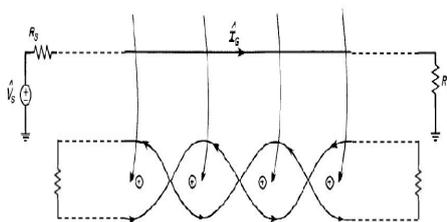
Les couplages Electromagnétiques

Définition

■ Couplage par diaphonie inductive.

▪ Remèdes :

Utilisation de câbles Torsadés (efficace en B.F)



Les couplages Electromagnétiques

Définition

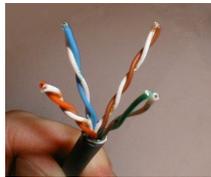
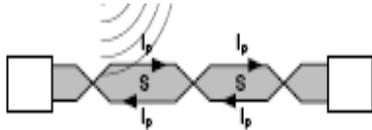
■ Couplage par diaphonie inductive.

▪ Remèdes :

Utilisation de câbles Torsadés (efficace en B.F)

La tension avec torsades est égale à :

$$V_{\text{avec}} (V) = \frac{V_{\text{sans}}}{ET}$$



Avec:

$$ET = \frac{2 \cdot n \cdot L + 1}{1 + 2 \cdot n \cdot L \cdot \sin\left[\frac{3 \cdot \pi}{4 \cdot n \cdot \lambda}\right]}$$

n : nombre de torsades par mètre

L : Longueur du câble soumis au champ en mètre.

λ : Longueur d'onde en mètre.

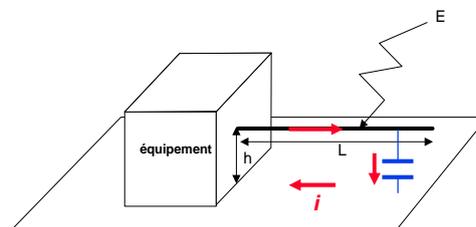
Les couplages Electromagnétiques

Définition

■ Couplage champ à câble isolé

▪ Description

- Un câble est isolé à une de ses extrémités et est parallèle à un plan de masse (ex. la souris du PC).
- Celui-ci reçoit un champ électromagnétique incident E.
- Ce couplage champ à fil produit un courant i (capacité répartie du câble).



Les couplages Electromagnétiques

Définition

■ Couplage champ à câble isolé

▪ Description

En fonction du rapport $\frac{L}{\lambda}$ le courant aura une expression différente.

Si $L \leq \frac{\lambda}{4}$	$i(A) \leq \frac{L^2}{80 \cdot \lambda \cdot \ln\left(\frac{L}{2 \cdot d}\right)} \cdot E$	$i(mA) \leq \frac{L^2 \cdot FMHz}{120} \cdot E$
Si $L \geq \frac{\lambda}{2}$	$i(A) \leq \frac{\lambda}{240} \cdot E$	$i(mA) \leq \frac{1.25}{FMHz} \cdot E$

$E(V/m)$, champ électrique incident.
 $L(m)$, longueur du conducteur.

$FMHz$, f en MHz
 $d(m)$, diamètre du conducteur.

Les couplages Electromagnétiques

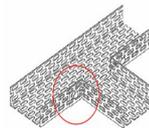
Définition

■ Couplage champ à câble - isolé

▪ Remèdes

- Réduire l'effet d'antenne en plaquant le câble contre la masse et diminuant la longueur du câble.
- Blinder le conducteur perturbé.
- Eloigner la source du fil perturbé.
- Augmenter l'impédance du câble (ferrite).
- Filtrer les câbles.
- Limiter la bande passante de signaux.

$$i(A) \leq \frac{L^2}{80 \cdot \lambda \cdot \ln\left(\frac{L}{2 \cdot d}\right)} \cdot E$$



Les couplages Electromagnétiques

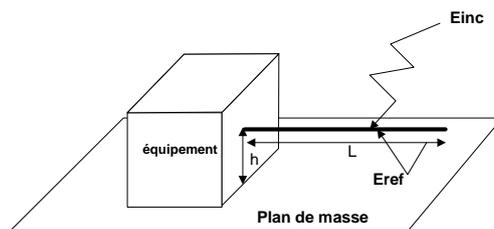
Définition

■ Couplage champ à câble - par rapport à un plan de masse

▪ Description

C'est le même type de couplage que le précédent excepté que le câble est près d'un plan de masse.

L'onde incidente, E_{inc} , est réfléchiée sur le plan de masse, E_{ref} , et se retrouve +/- en phase avec E_{inc} .



Les couplages Electromagnétiques

Définition

■ Couplage champ à câble - par rapport à un plan de masse

▪ Description

Deux cas sont possibles

Le plan atténue l'onde $h \leq \frac{\lambda}{10}, E \approx E_0 \cdot \frac{h}{30} \cdot FMHz$

Le plan amplifie l'onde $h > \frac{\lambda}{10}, E \approx 2 \cdot E_0$

Un câble près d'une plan de masse réduit le rayonnement si $h < \frac{\lambda}{10}$

Les couplages Electromagnétiques

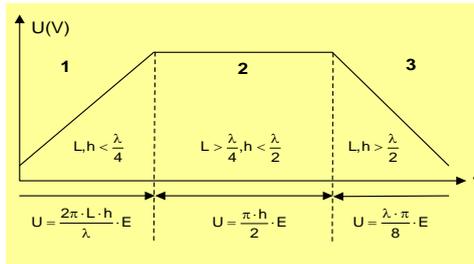
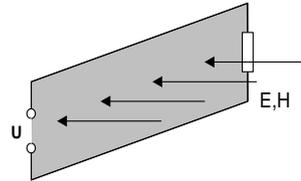
Définition

■ Couplage champ à boucle

▪ Description

La boucle reçoit un champ rayonné et induit une tension dans la boucle U

Suivant le rapport des dimensions par rapport à la longueur d'onde, U sera plus ou moins fort.



$$U = E \cdot \frac{2\pi \cdot L \cdot h}{\lambda \cdot \sqrt{\left[1 + \left(4 \cdot \frac{L}{\lambda}\right)^2\right] \cdot \left[1 + \left(4 \cdot \frac{h}{\lambda}\right)^2\right]}}$$

Les couplages Electromagnétiques

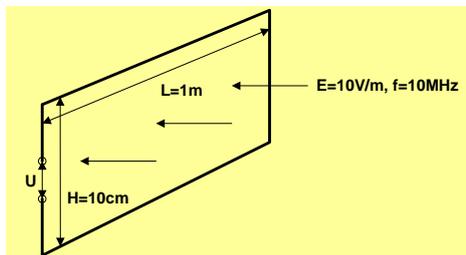
Définition

■ Couplage champ à boucle

▪ Exemple

Une boucle de 1m de long, et de 10cm de haut reçoit un champ électrique de 10V/m à 10MHz.

Déterminons la tension induite U.



Déterminons la longueur d'onde

$$\lambda = \frac{300}{10} = 30\text{m}$$

Déterminons U $L, H \ll \lambda$

$$U = 2\pi \cdot \frac{L \cdot h}{\lambda} \cdot E = 6.28 \cdot \frac{1 \cdot 0.1}{30} \cdot 10 = 0.21\text{V}$$

■ Couplage champ à boucle

▪ Remèdes

- Pour les BF, $f < 75/L$, diminuer la surface des boucles en jouant sur L et h.

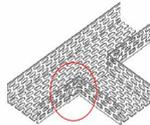
$$U = \frac{2\pi \cdot L \cdot h}{\lambda} \cdot E$$

- Pour les fréquences intermédiaires, $75/L < f < 75/h$, diminuer h.

$$U = \frac{\pi \cdot h}{2} \cdot E$$

- Pour les fréquences $> 75/h$, éloigner la boucle du perturbateur ou blinder.

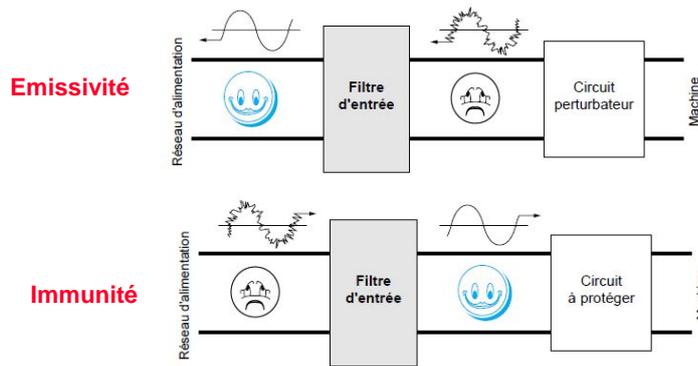
$$U = \frac{\lambda \cdot \pi}{8} \cdot E$$



Les solutions de filtrage, blindage et protection

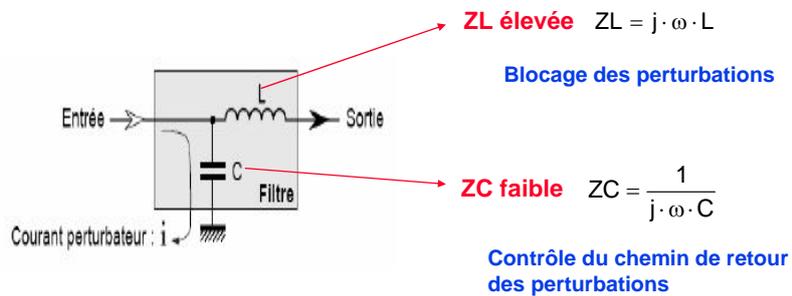
Les couplages Electromagnétique: Filtrage, blindage et protections

■ Filtrage
 ▪ Principe



Les couplages Electromagnétique: Filtrage, blindage et protections

■ Filtrage
 ▪ Principe



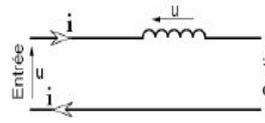
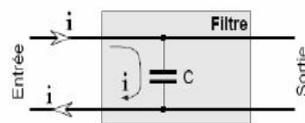
■ Filtrage des alimentations

▪ Filtrage de mode différentiel

- Objectif, éliminer une perturbation qui arrive sur un fil par rapport à une référence (masse,...).

Contrôle du retour du courant perturbateur de mode différentiel

Impédance plus élevée en mode différentiel



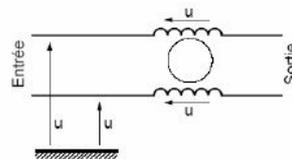
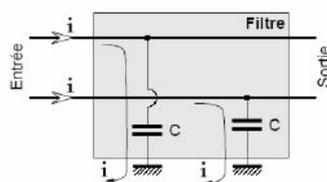
■ Filtrage des alimentations

▪ Filtrage de mode commun

- Objectif, éliminer une perturbation qui arrive en phase sur les fils de phase et de neutre

Contrôle du retour du courant perturbateur de mode commun

Impédance plus élevée en mode commun



■ Filtrage des alimentation

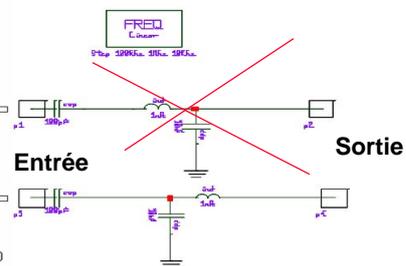
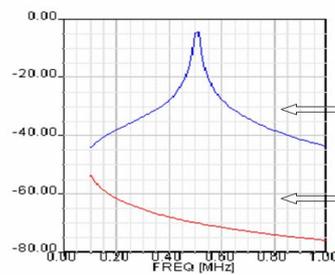
- Exemples de filtre de commun/différentiel



■ Filtrage des alimentation

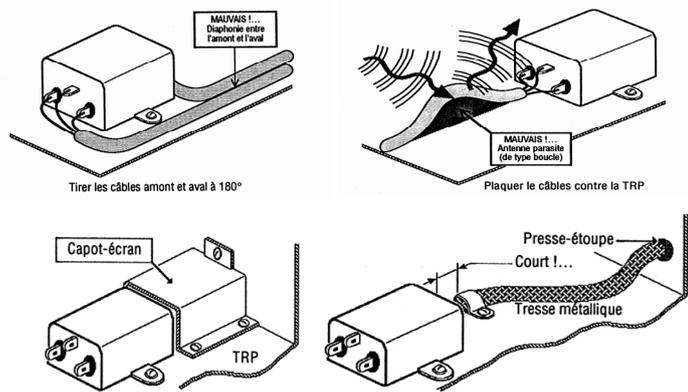
- Mise en œuvre
 - Attention au sens!!!

Atténuation du filtre en fonction de la fréquence



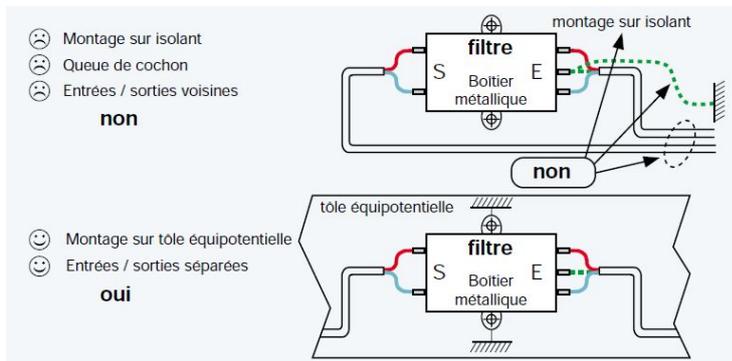
■ Filtrage des alimentation

▪ Mise en oeuvre



■ Filtrage des alimentation

▪ Mise en oeuvre



- ☹ Montage sur isolant
- ☹ Queue de cochon
- ☹ Entrées / sorties voisines

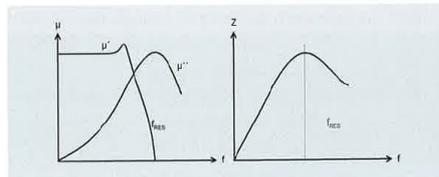
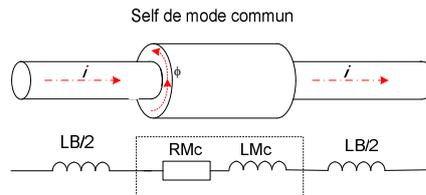
non

- ☺ Montage sur tôle équipotentielle
- ☺ Entrées / sorties séparées

oui

■ Les ferrites

- Augmenter l'impédance des câbles
- Fonctionnement des selfs de mode commun



$$LMc = \frac{\phi}{i}$$

$$LMc = L0 \cdot (\mu' - j\mu'')$$

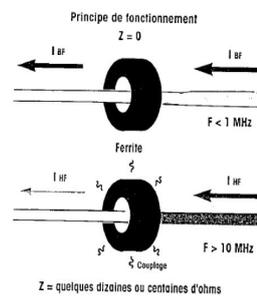
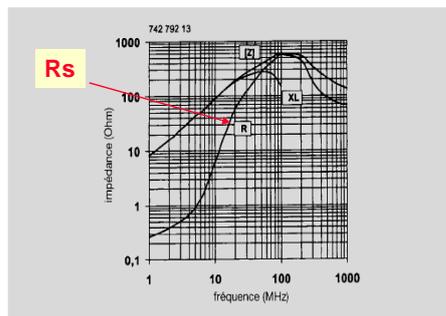
$$Z = j\omega L0 \cdot (\mu' - j\mu'') = \omega L0\mu'' + j\omega L0\mu'$$

$$Z = RMc + j\omega LMc$$

RMc représente les pertes ohmiques qui sont fonction de ω .

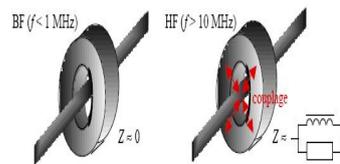
■ Les ferrites

- Augmenter l'Impédance des câbles
- Fonctionnement des selfs de mode commun
- Exemple de caractéristiques relevées chez un constructeur



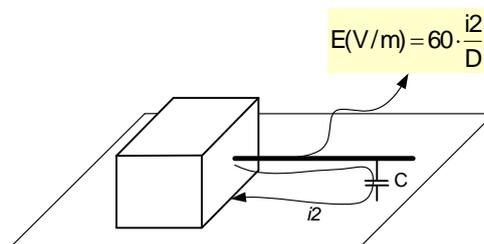
■ Les ferrites

- Augmenter l'Impédance des câbles
 - Différentes formes de ferrites de mode commun.



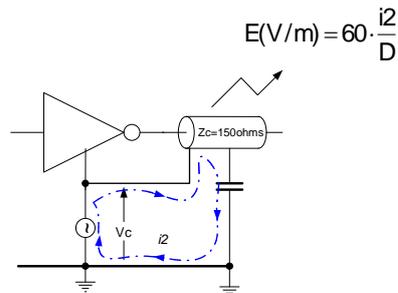
■ Les ferrites de mode commun

- Augmenter l'impédance des câbles
 - diminuer les émissions de mode commun.

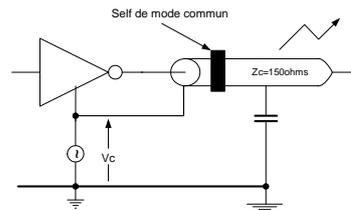


■ Les ferrites de mode commun

- Augmenter l'impédance des câbles
 - diminuer les émissions de mode commun.



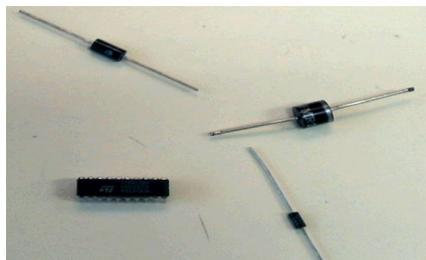
i2 avant ZMc : $i2 = \frac{Vc}{Zc}$



i2 après ZMc : $i2 = \frac{Vc}{Zc + ZMc}$

■ Les parasurtenseurs

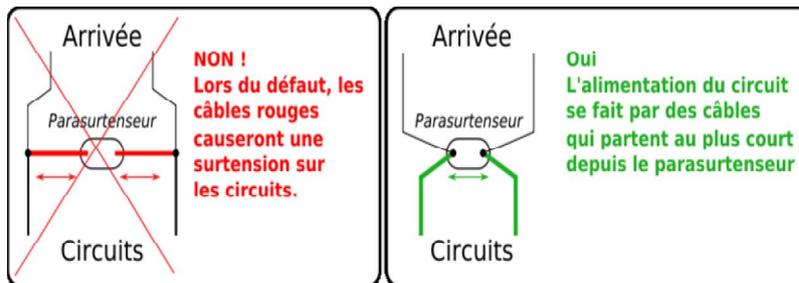
- Objectif, écrêter les surtensions qui arrivent sur les signaux et sur les alimentations.



- Diode, type tranzorb.
- Varistances.
- Eclateurs à gaz.
- Thyristors, triacs.

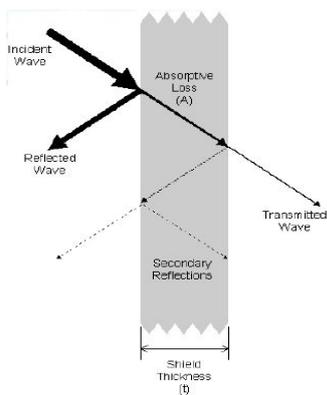
■ Les parasurtenseurs

▪ Câblage.



■ Les blindages

▪ Principe général



$$SE = R + A + B \Rightarrow SE = R + A$$

- R : pertes par réflexion.
- A : pertes par absorption.
- B : pertes par réflexion secondaire.

■ Les blindages

▪ Principe général

$$R_h = 20 \text{Log}_{10} \left[\left(\frac{0.462}{r} \right) \sqrt{\frac{\mu_r}{f\sigma_r}} + \frac{0.136r}{\sqrt{\frac{\mu_r}{f\sigma_r}}} + 0.354 \right]$$

Magnetic Field Reflective Loss

$$R_e = 354 - 10 \text{Log}_{10} \left(\frac{f^3 \mu_r r^2}{\sigma_r} \right)$$

Electric Field Reflective Loss

$$R_p = 168 + 10 \text{Log}_{10} \left(\frac{\sigma_r}{\mu_r f} \right)$$

Plane Wave Reflective Loss

$$A = 0.003338t \sqrt{\mu_r \sigma_r f}$$

Absorptive Loss

where:

t = Material thickness (mils)

μ_r = Material permeability relative to air

σ_r = Material conductivity relative to copper

f = Frequency (Hz)

r = Source to shield distance (inches)

■ Les blindages

▪ Principe général

Freq (Hz)	Aluminum (60 mils)			Cold Rolled Steel (60 mils)			Copper (3 mils)		
	Magnetic (dB)	Electric (dB)	Plane (dB)	Magnetic (dB)	Electric (dB)	Plane (dB)	Magnetic (dB)	Electric (dB)	Plane (dB)
10k	58	>200	141	125	>200	>200	45	>200	129
100k	101	>200	165	>200	>200	>200	57	186	121
1M	>200	>200	>200	>200	>200	>200	74	162	118
10M	>200	>200	>200	>200	>200	>200	106	154	130
100M	>200	>200	>200	>200	>200	>200	184	193	188
1G	>200	>200	>200	>200	>200	>200	>200	>200	>200

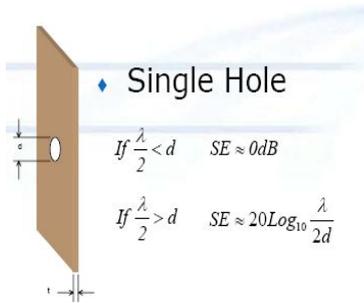
r=12"

μ_r = 1 (Aluminum), 180 (Cold Rolled Steel), 1 (Copper)

σ_r = 0.6 (Aluminum), 0.17 (Cold Rolled Steel), 1 (Copper)

■ Les blindages

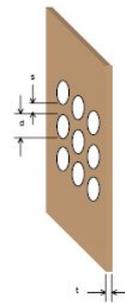
- Ouverture et trous $d < t$



◆ Single Hole

If $\frac{\lambda}{2} < d$ $SE \approx 0dB$

If $\frac{\lambda}{2} > d$ $SE \approx 20Log_{10} \frac{\lambda}{2d}$



◆ Multiple Holes

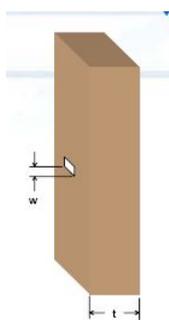
If $s < \frac{\lambda}{2} > d$ and $\frac{s}{d} < 1$

$SE \approx 20Log_{10} \frac{\lambda}{2d} - 10Log_{10} n$

where:
 t = Material thickness
 n = Number of Holes
 s = edge to edge hole spacing

■ Les blindages

- Ouverture $W > t$



$\lambda_c = 2w$ Cutoff wavelength

$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_c} \sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}$ Absorption factor of WG below cutoff

$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_c} = \frac{\pi}{w}$ For frequencies well below cutoff

$A = 8.686\alpha t = 27.3 \frac{t}{w}$ Absorption loss

t/w	Loss
8	>200
6	164
4	109
2	55

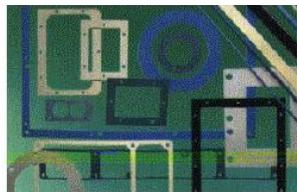
■ Les blindages

▪ Exemples



Fingerstock (≈ 100 dB @ 2GHz)

- Large Selection (shape, size, plating)
- Wide mechanical compression range
- High shielding effectiveness
- Good for frequent access applications
- No environmental seal



Conductive Elastomers (≈ 80 dB @ 2GHz)

- Provides both EMI and Moisture Seal
- Lower SE than all-metal gaskets
- Mechanically versatile – die cut or molded

■ Les blindages

▪ Fenêtres de ventilation et fenêtres blindées



Air Ventilation Panels



Shielded Windows



EMC Switch Shield

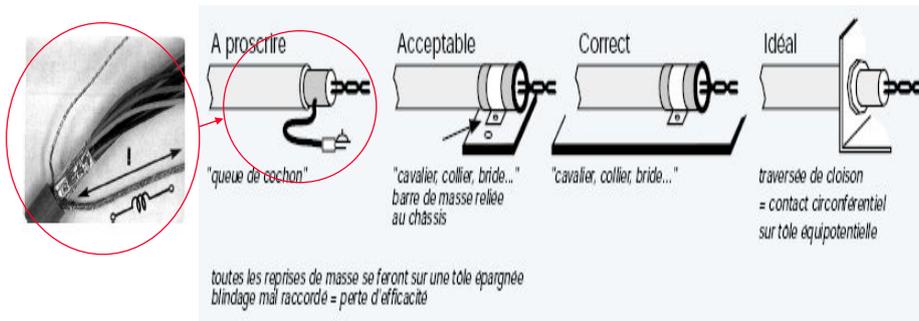
■ Les câbles blindés

- Objectif, protéger les signaux utiles par écran métallique connecté à la masse générale. L'écran ou blindage écoule à la masse les perturbations rayonnées.



■ Les câbles blindés

- Mise en oeuvre



■ Les joints

▪ Description



- Les tricots conducteurs.
- Les textiles conducteurs.
- Les élastomères chargés de poudres ou de fibres métalliques.
- Les ressorts de contact.