



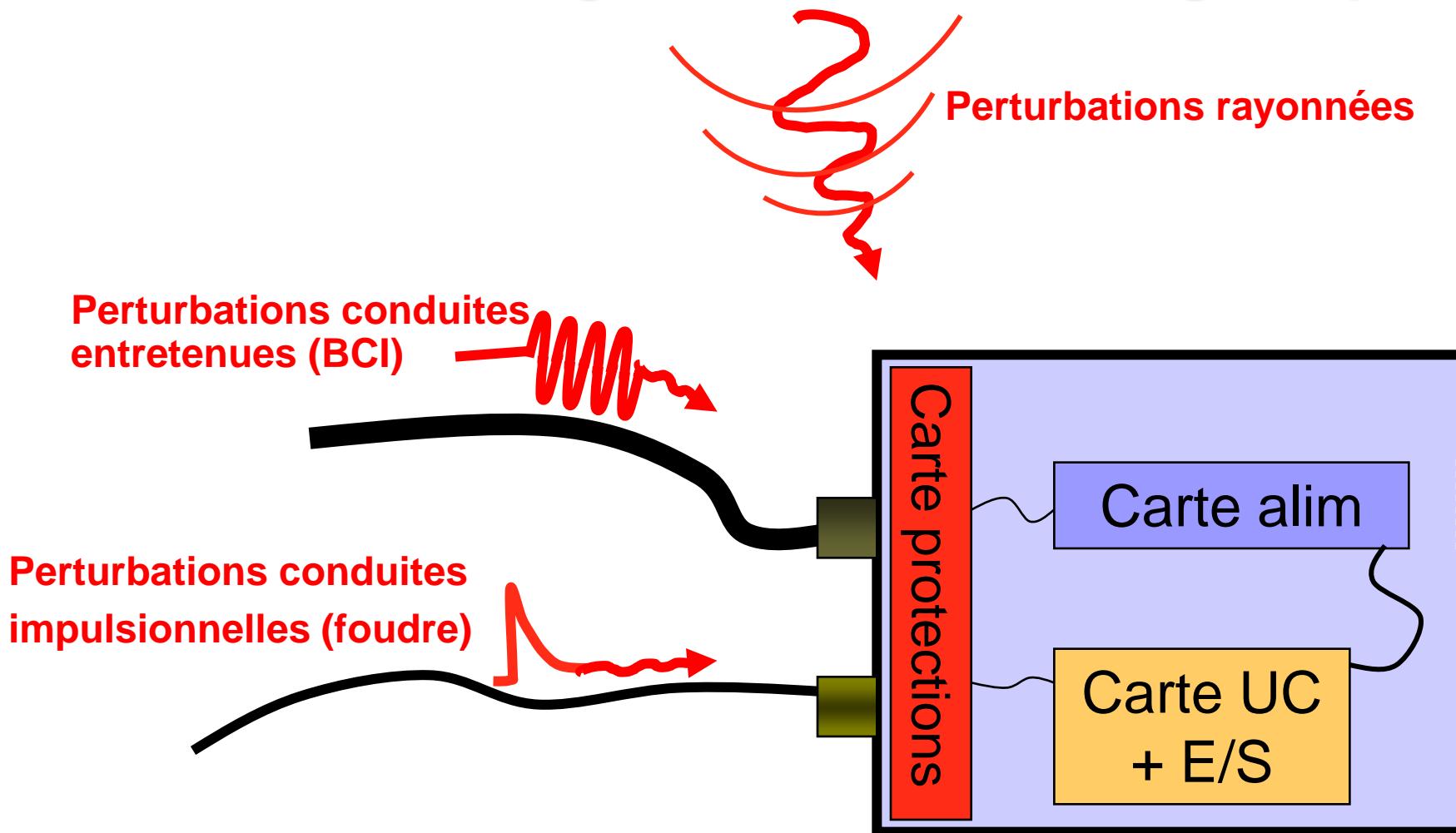
ATELIER TECHNIQUE DU 02/02/2012 JESSICA FRANCE

Les techniques de protection des équipements
vis-à-vis de menaces électromagnétiques

J.C. SUAU



Les trois agressions électromagnétiques





PROTECTION PAR FILTRAGE

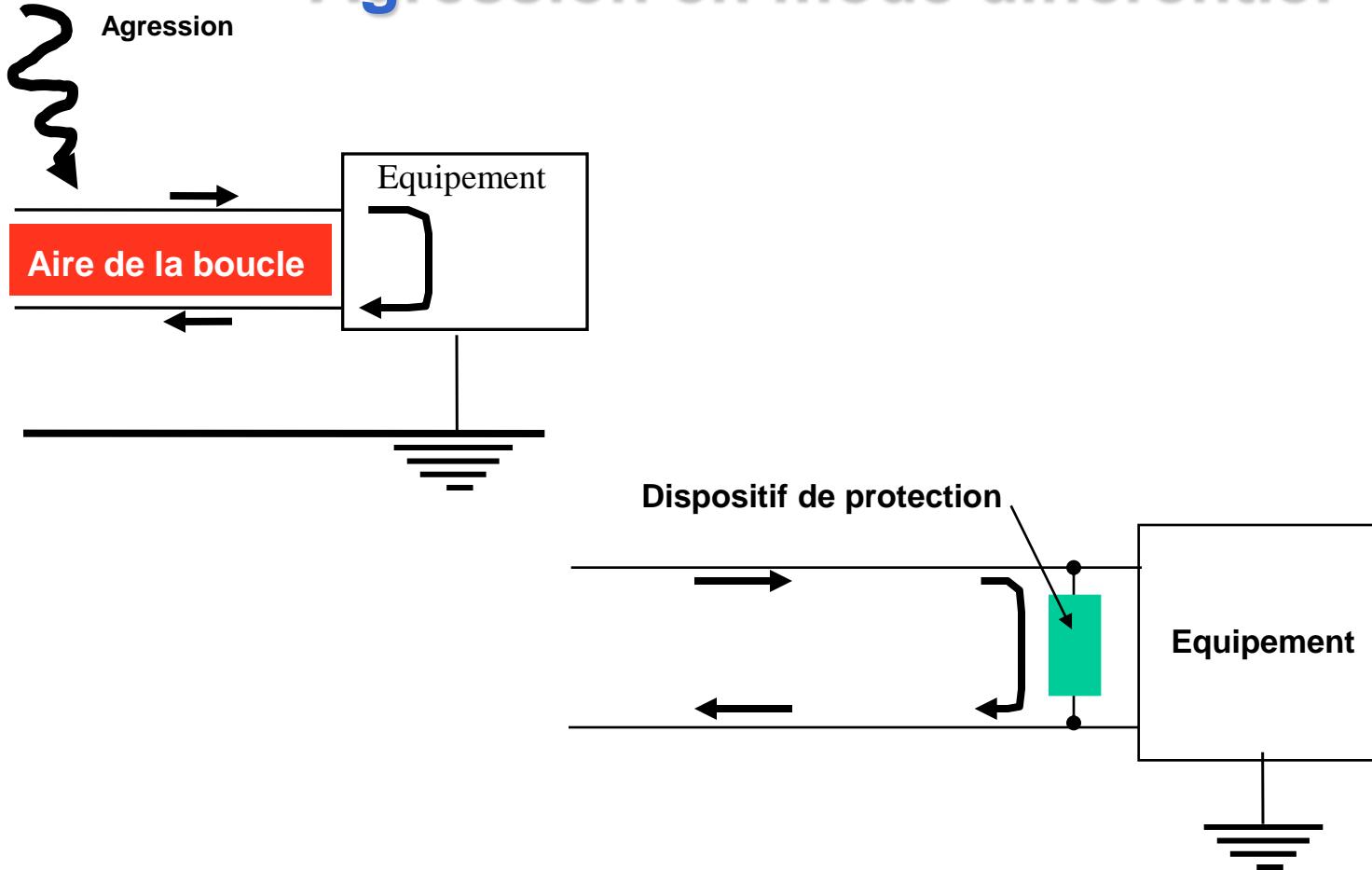


Rôle des dispositifs de filtrage

- Protéger l' équipement contre les perturbations conduites venant de l'extérieur
- Limiter la pollution générée par l'équipement sur le réseau ou sur les liaisons signaux

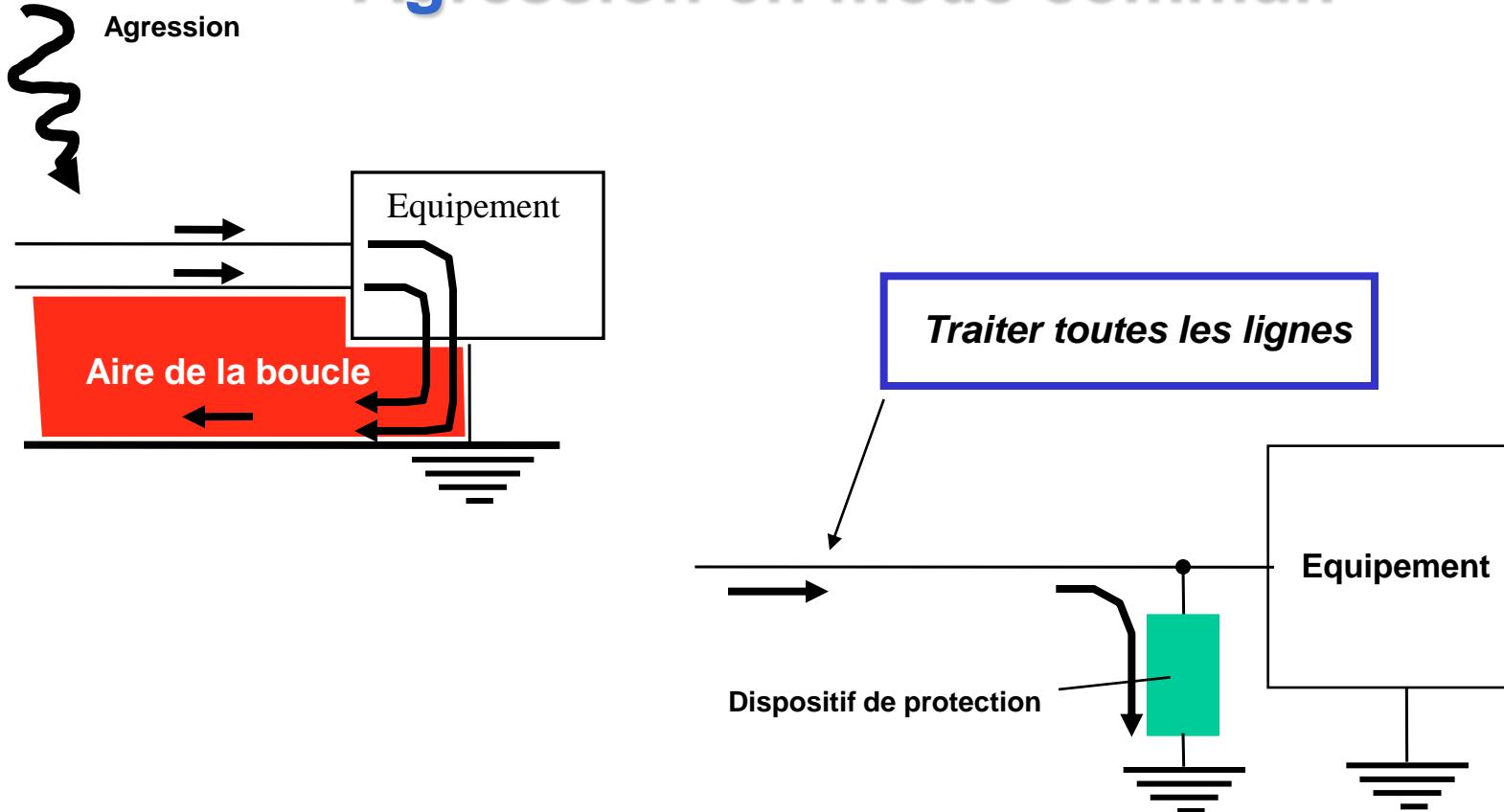


Agression en mode différentiel



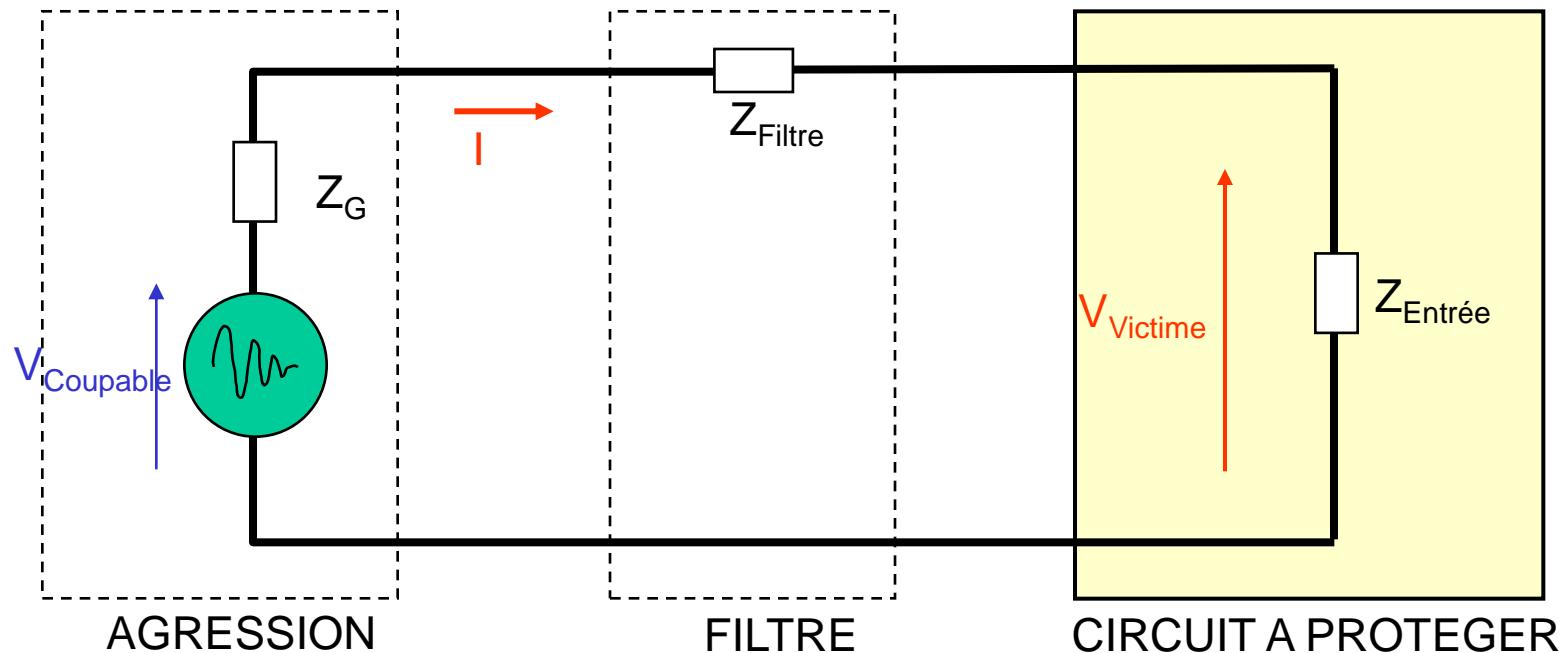


Agression en mode commun





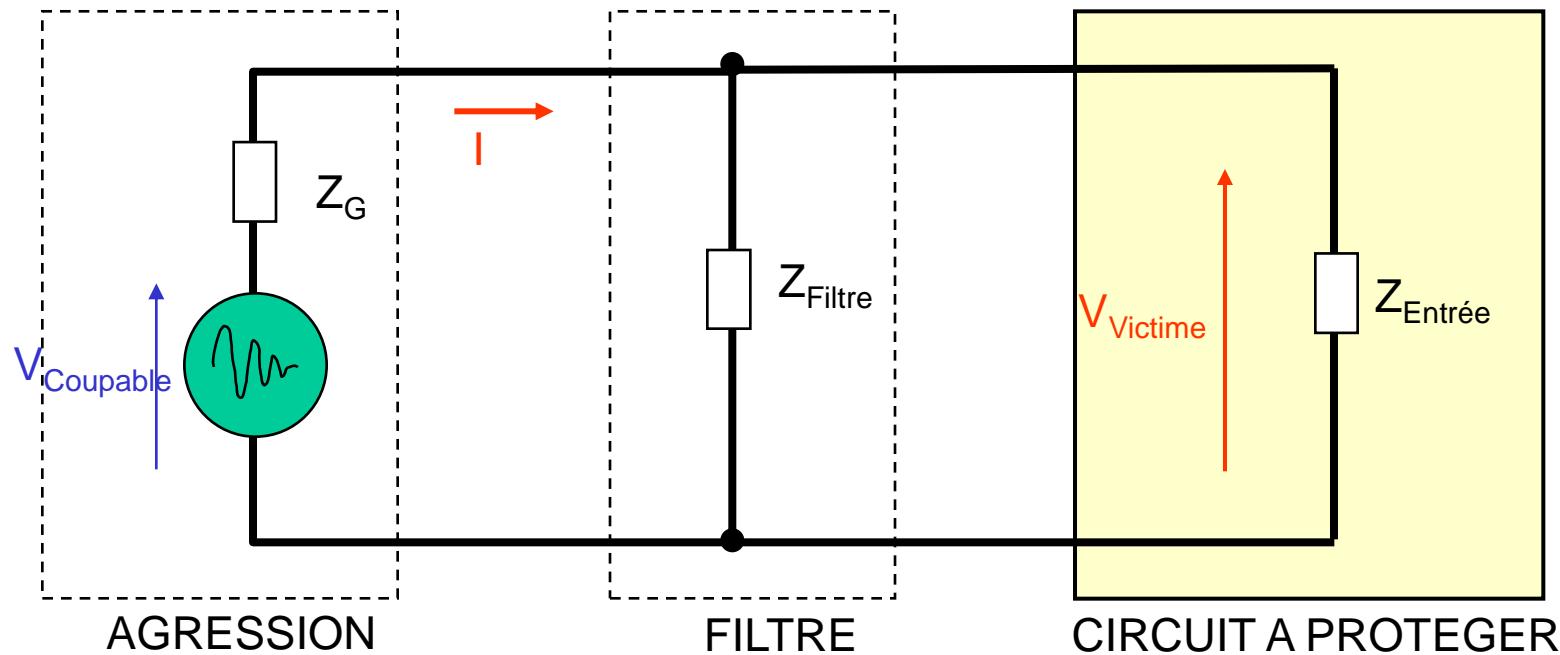
Filtre série



$$V_{Victime} = Z_{Entrée} \cdot \frac{V_{Coupable}}{Z_G + Z_{Filtre} + Z_{Entrée}}$$



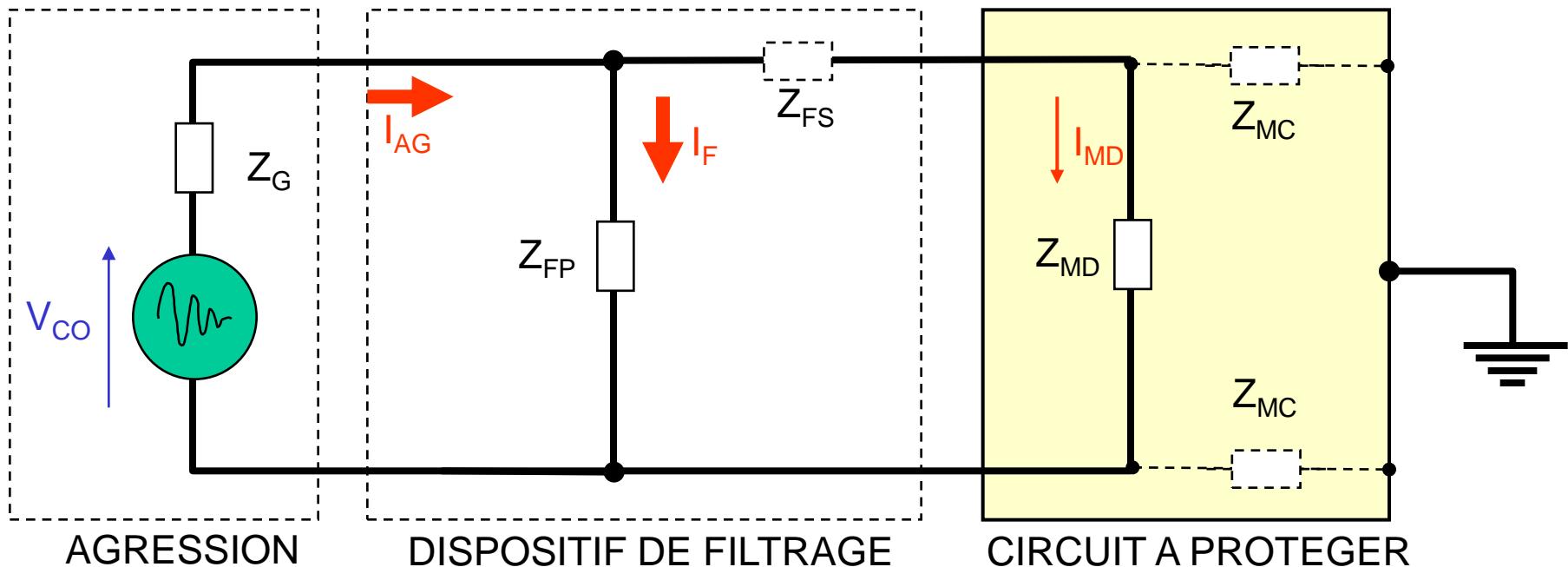
Filtre parallèle



$$V_{Victime} = (Z_{Filtre} // Z_{Entrée}) \cdot \frac{V_{Coupable}}{Z_G + (Z_{Filtre} // Z_{Entrée})}$$



Agression en mode différentiel

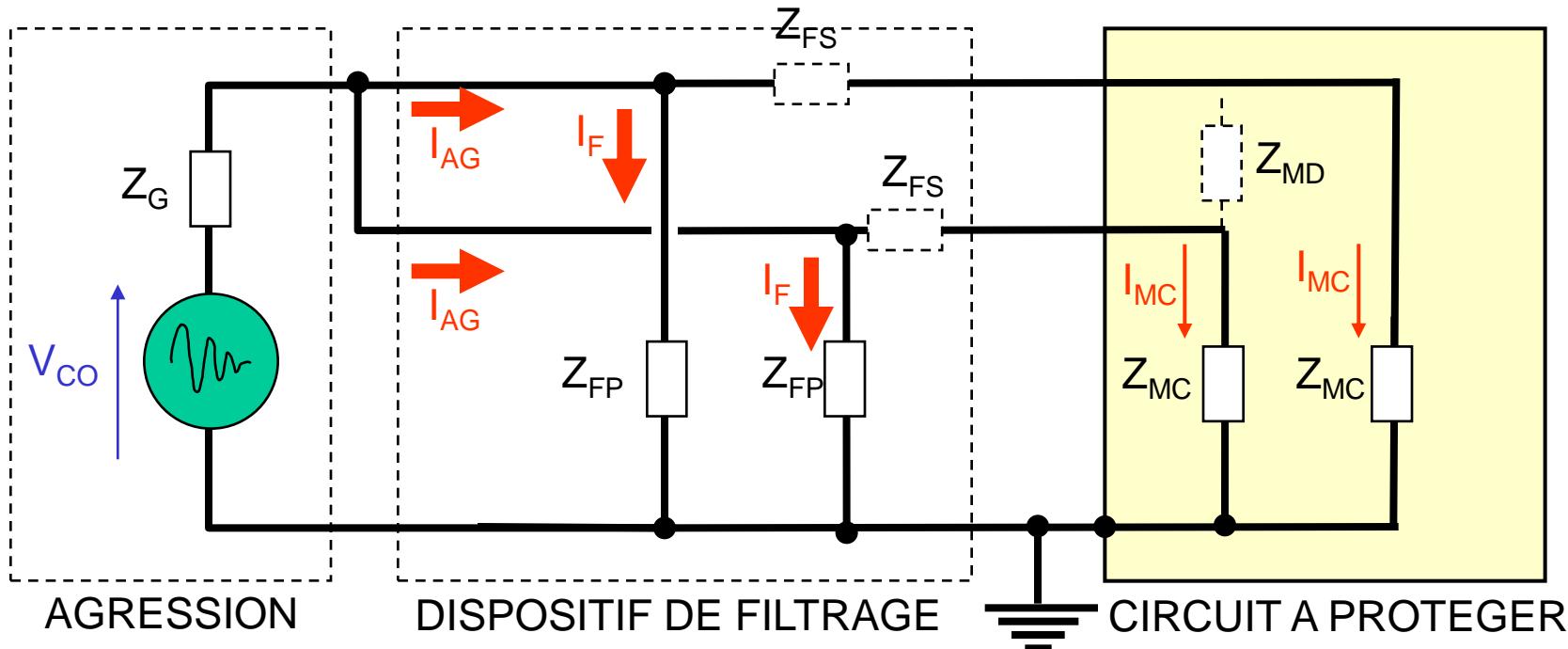


La protection du circuit sera d'autant meilleure que le courant d'agression sera dérivé par le filtre

Il faut donc $Z_{FP} \ll Z_{MD}$ et $Z_{FS} \gg Z_{MD}$



Agression en mode commun



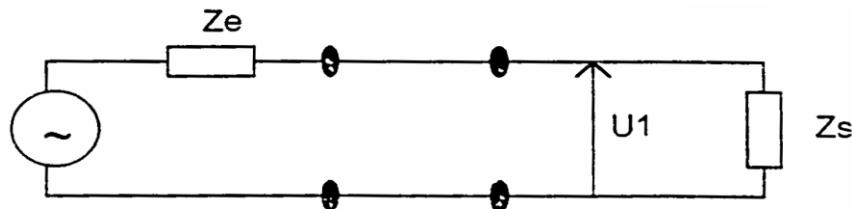
La protection du circuit sera d'autant meilleure que le courant d'agression sera dérivé par le filtre

Il faut donc $Z_{FP} \ll Z_{MC}$ et $Z_{FS} \gg Z_{MC}$

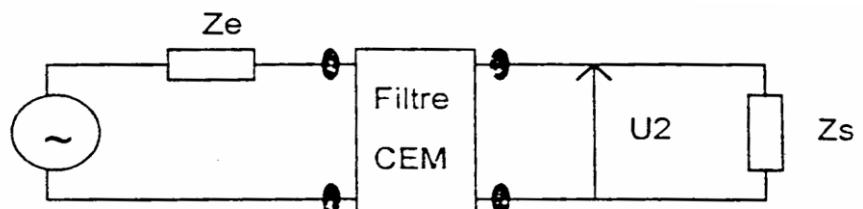


Caractérisation d'un filtre : la perte d'insertion

Mesure d'étalonnage sans filtre



Mesure comparative avec le filtre

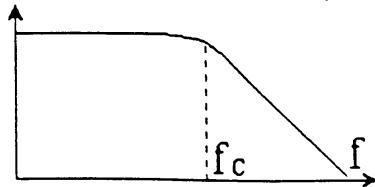
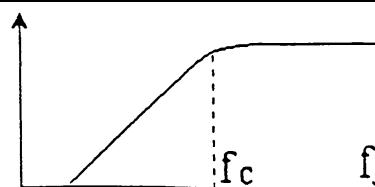
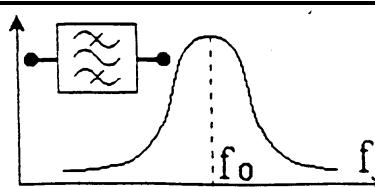
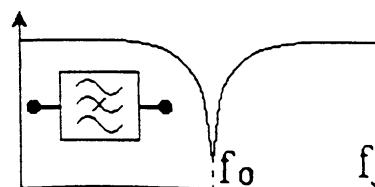


$$\text{Perte d'insertion ou atténuation} = U_2/U_1$$



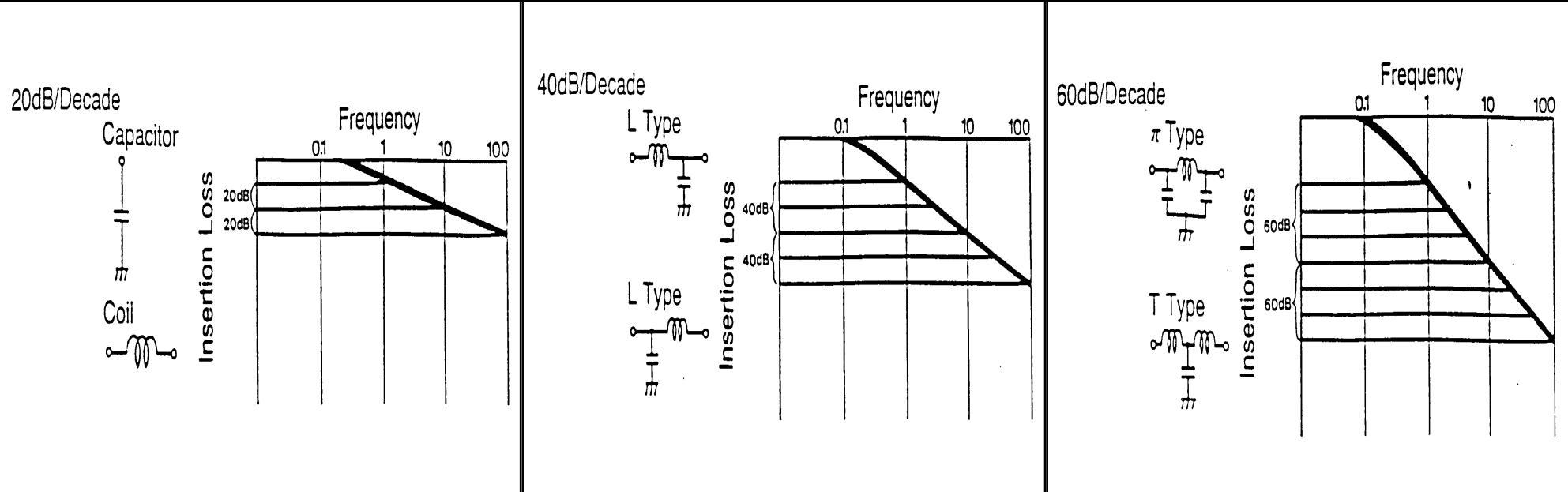
Filtre RLC

➤ Les 4 types de filtre :

<p>↗ Filtre passe-bas</p> <ul style="list-style-type: none">↓ Filtre secteur↓ Filtre alimentation continue↓ Filtre téléphonique↓ Filtre signal	
<p>↗ Filtre passe-haut</p> <ul style="list-style-type: none">↓ Peu utilisé en CEM	
<p>↗ Filtre passe-bande</p> <ul style="list-style-type: none">↓ Filtre d 'entrée de récepteurs radio	
<p>↗ Filtre coupe-bande</p> <ul style="list-style-type: none">↓ Utilisé pour rejeter les fréquences indésirables	



Pertes d'insertion typiques





Filtre passe bas

Filtre en L (Z désadaptée)		
Filtre en π (Z élevée)		
Filtre en T (Z faible)		



Filtrage de mode commun

- **Self de mode commun**
 - Quelques mH pour alim
 - Quelques μ H pour signaux
(ex : 51 μ H bus CAN)
- **Condensateur « Cy » céramique**
 - À piquer
 - CMS
- **Condensateur de traversée**
 - À souder
 - À visser
- **Connecteur filtre**
- **Ferrite**
- **Self en série avec la liaison de terre(pas de Cy matériel médical)**

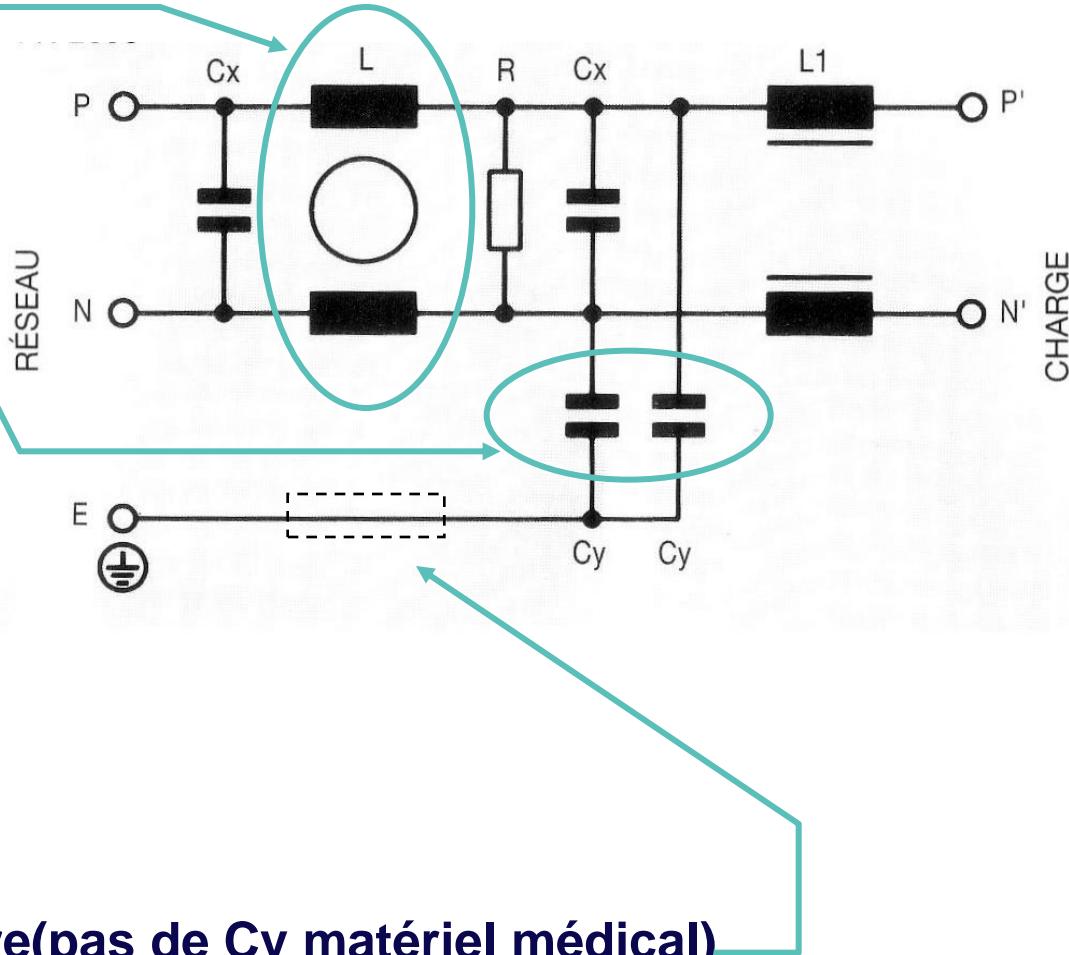
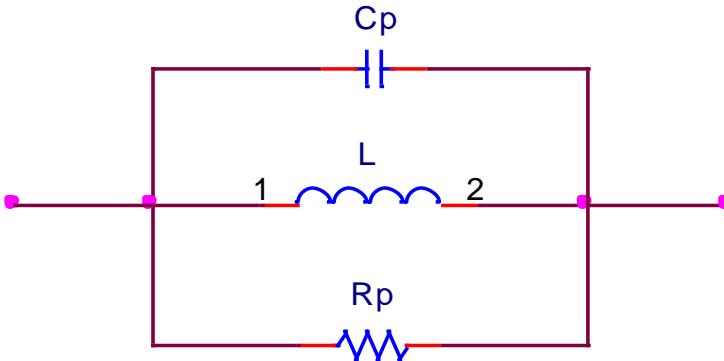




Schéma équivalent d'une self de mode commun



- **L : valeur de la self en mH**
 - attention à la saturation du noyau magnétique
- **R_p : résistance parallèle en kΩ**
 - dépend de L(10 kΩ pour 2.7 mH; 50 kΩ pour 10 mH)
- **C_p : capacité parasite en pF**
 - dépend de L et du courant (15 pF pour 3.3 mH et 4 A)



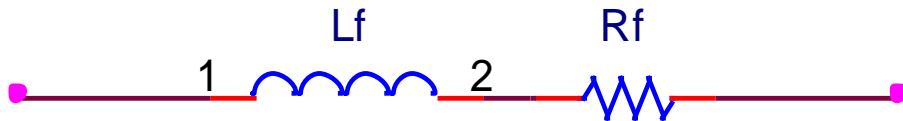
Schéma équivalent d'un condensateur



- **C : capacité nF**
- **Lc : self des fils de connexion en nH**
 - proportionnel à la longueur (1 nH / mm)
- **Rc : résistance des fils de connexion en Ω**
 - dépend de la longueur et de la section (valeur typique comprise entre 0.1 Ω et 1 Ω)



Schéma équivalent d'un ferrite

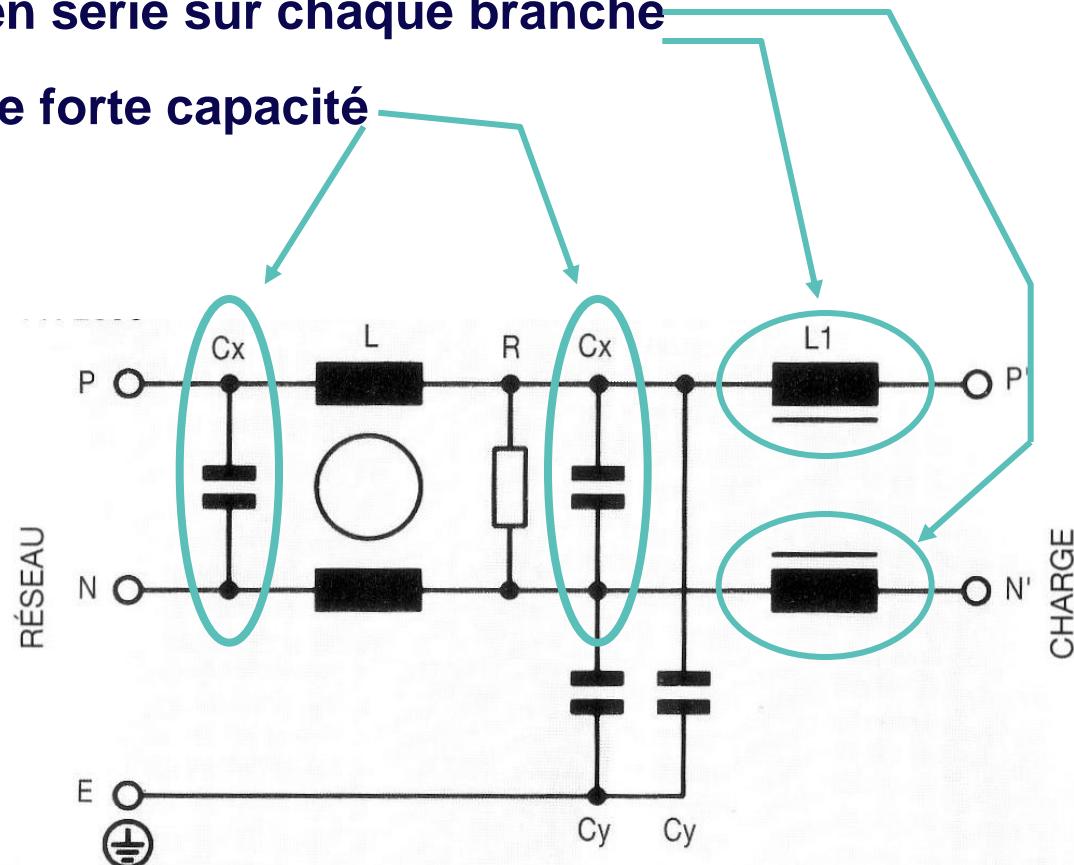


- Z ferrite croît d'environ 10 dB par décade
- Z ferrite $\approx 10 \Omega$ à 1 MHz; 100Ω à 100 MHz



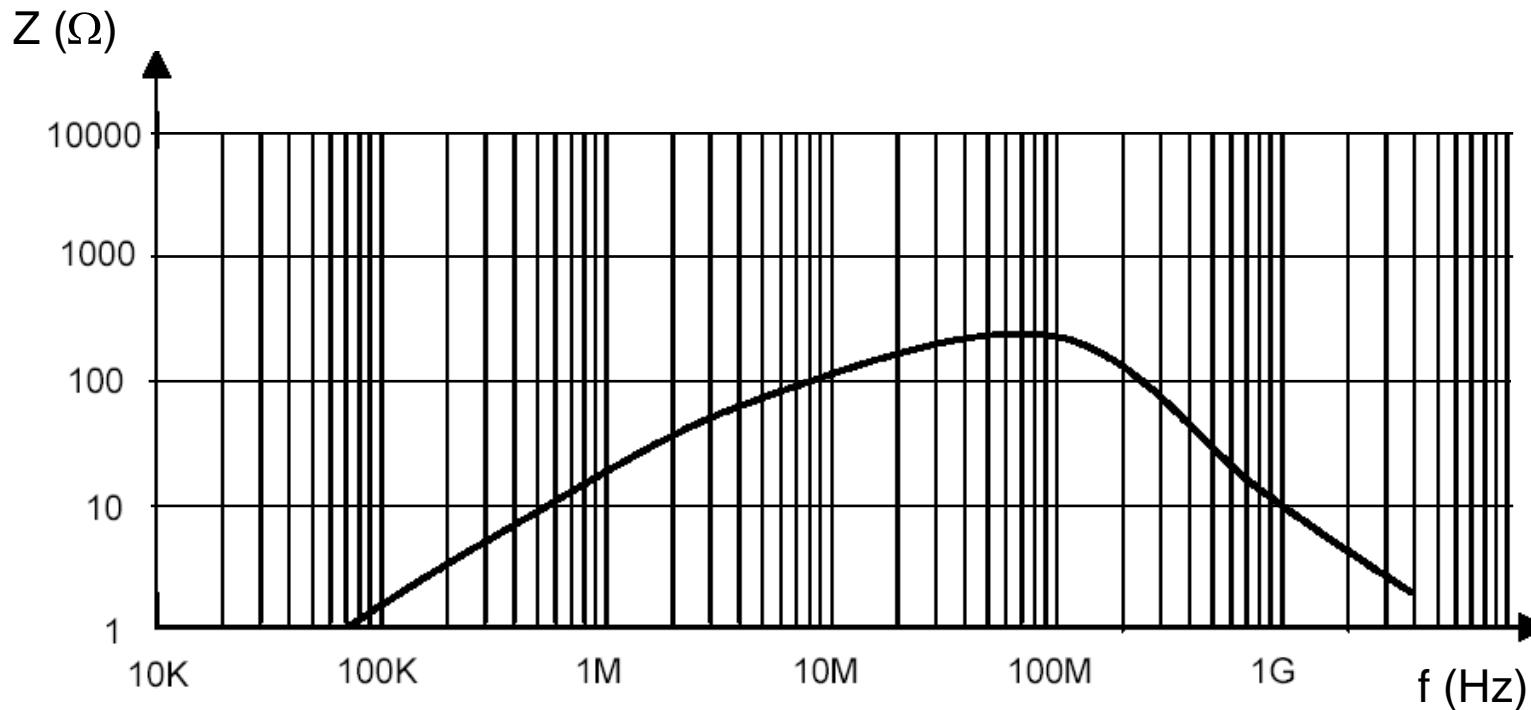
Filtrage de mode différentiel

- Self de mode différentiel montée en série sur chaque branche
- Condensateur « Cx » en général de forte capacité
- Condensateur céramique
 - À piquer
 - CMS





Pièce de ferrite sur câble



Fonctionne en inductance

Absorbe de l'énergie

Attention : Ce dispositif n'agit plus en cas de saturation du ferrite par des courants forts



Isolement galvanique

- **But : limiter le courant de mode commun en B.F. en augmentant l'impédance de la boucle de masse**
 - Efficace en B.F.
 - Beaucoup moins efficace en H.F.(capacité parasite)
- **Dispositifs :**
 - Optocoupleur
 - Relais
 - Transformateur



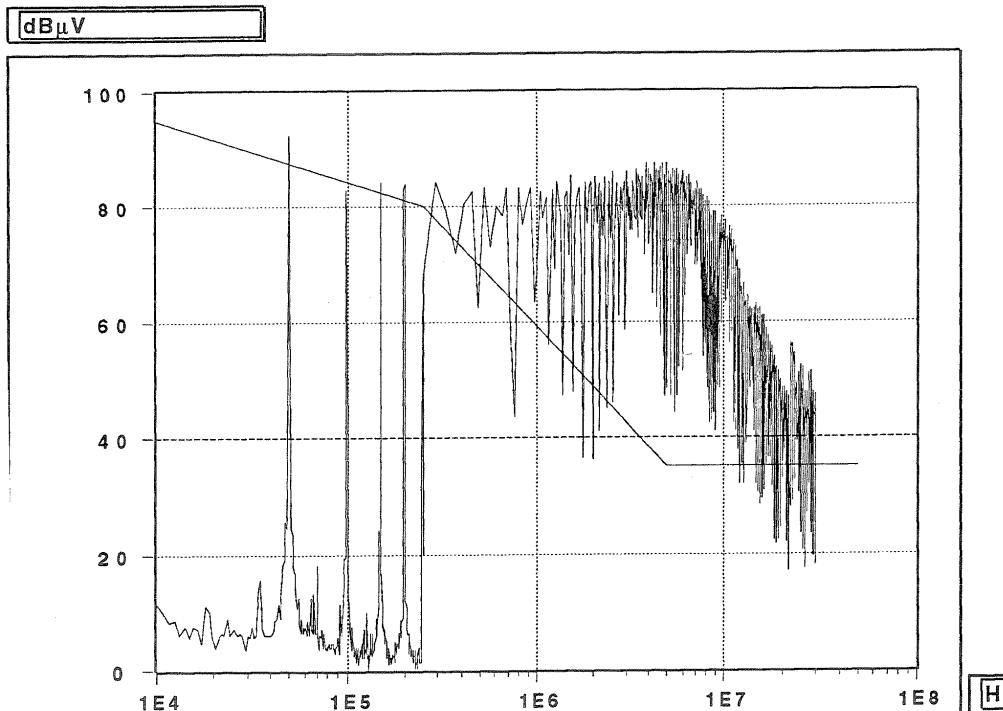
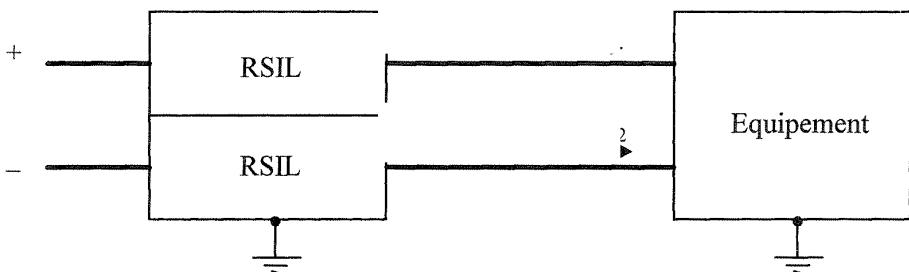
EXEMPLE PRATIQUE



Mesure des perturbations conduites

➤ But de l'exercice :

Le niveau des perturbations conduites générées par le convertisseur doit respecter le gabarit de la norme GAM-EG-13

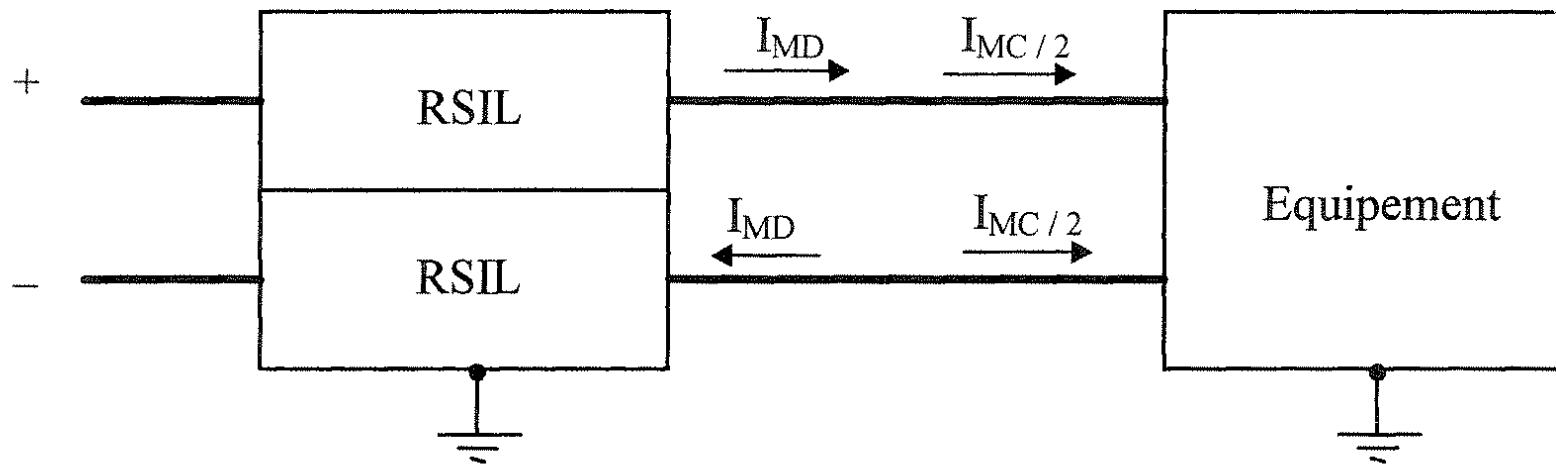




Mesure des perturbations conduites

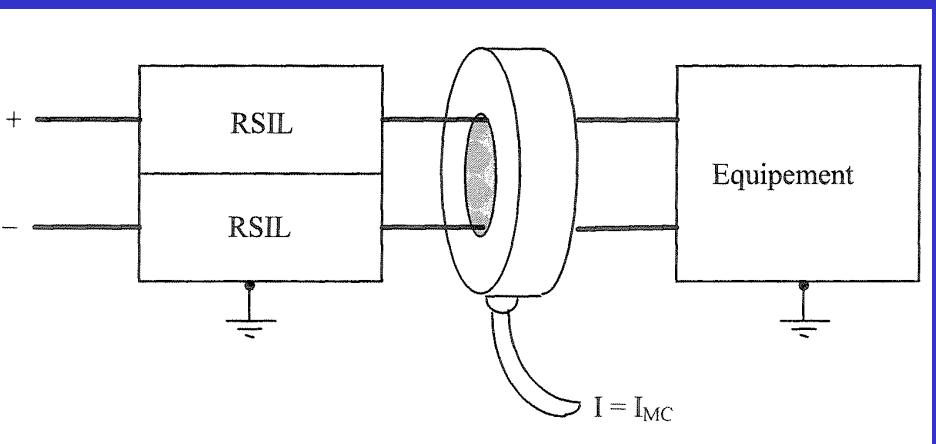
➤ Courant :

- mode différentiel I_{MD} (ou mode asymétrique)
- mode commun I_{MC} (ou mode symétrique)

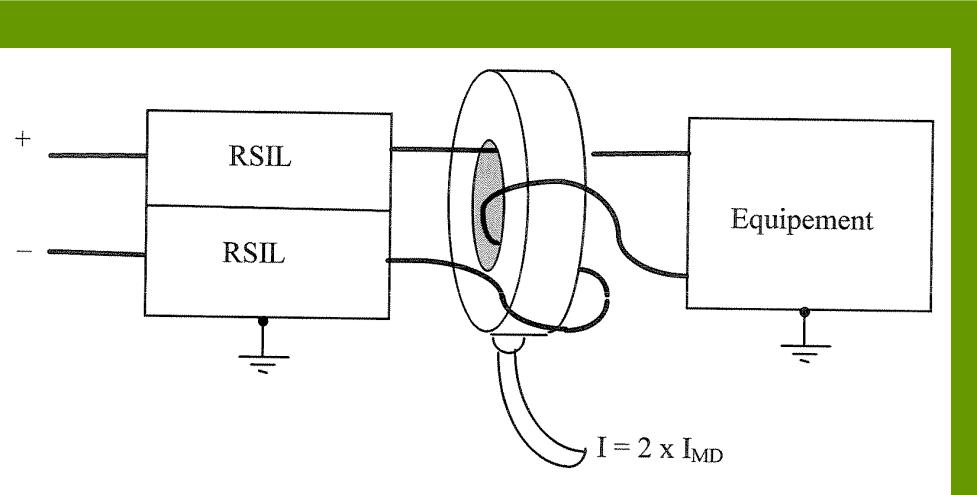




Courant de mode commun ou de mode différentiel?



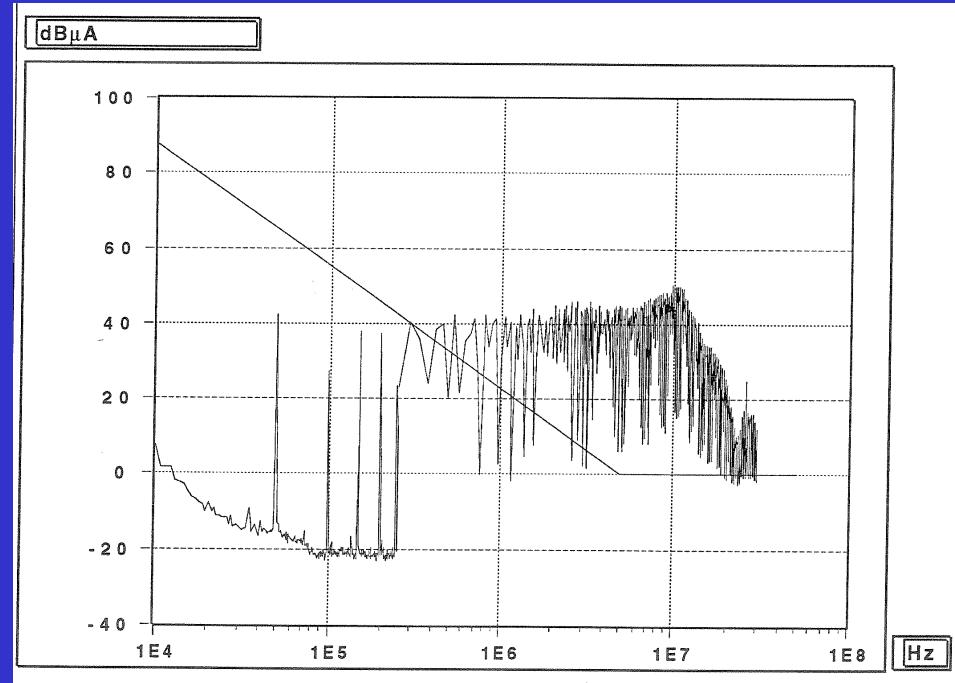
Mesure du courant de mode commun



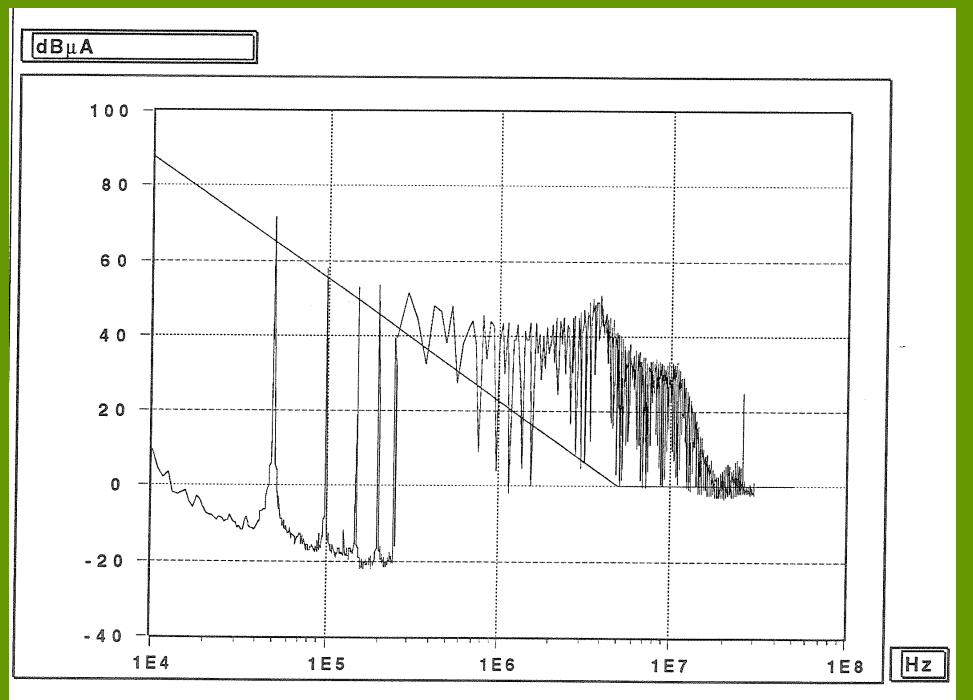
Mesure du courant de mode différentiel



Courant de mode commun ou de mode différentiel?



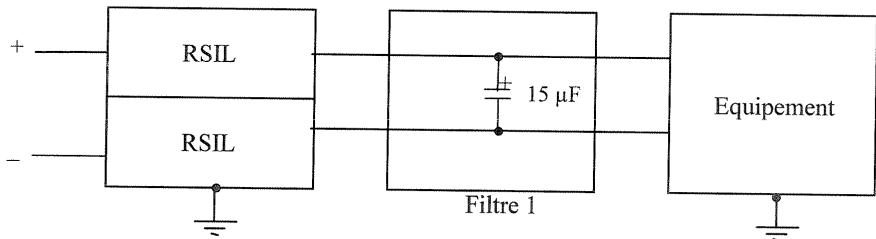
Mesure du courant de mode commun
 $I_{\text{mesuré}} = I_{\text{MC}}$



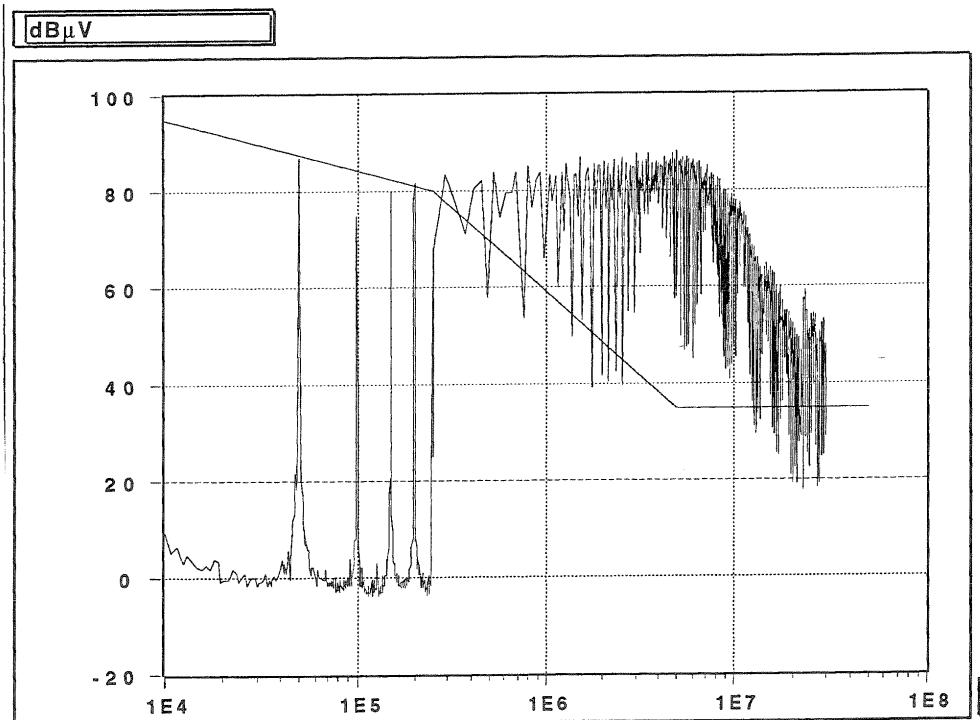
Mesure du courant de mode différentiel
 $I_{\text{mesuré}} = 2 \times I_{\text{MD}}$



Filtrage de mode différentiel

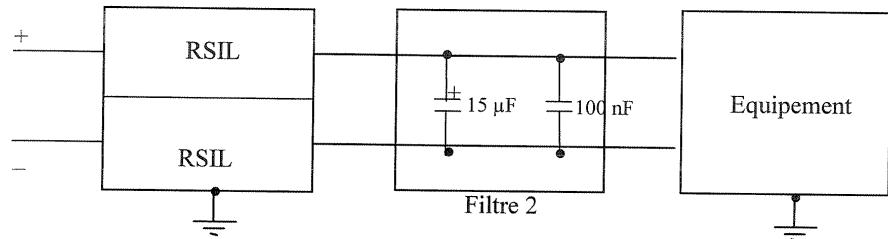


⇒ Atténuation de $\approx 5\text{dB}$ en BF

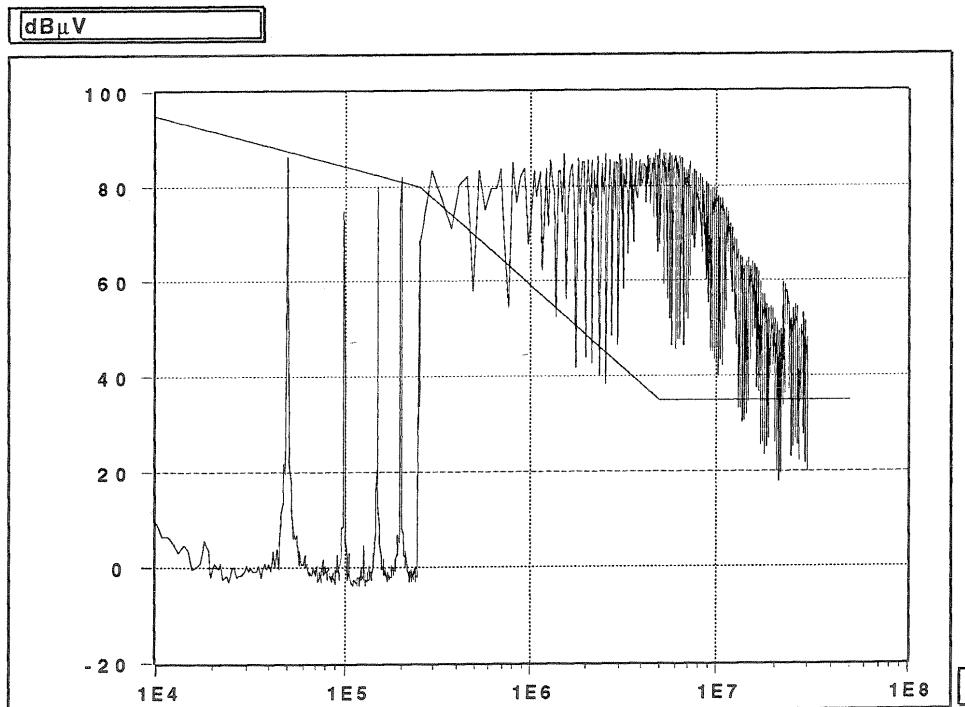




Filtrage de mode différentiel

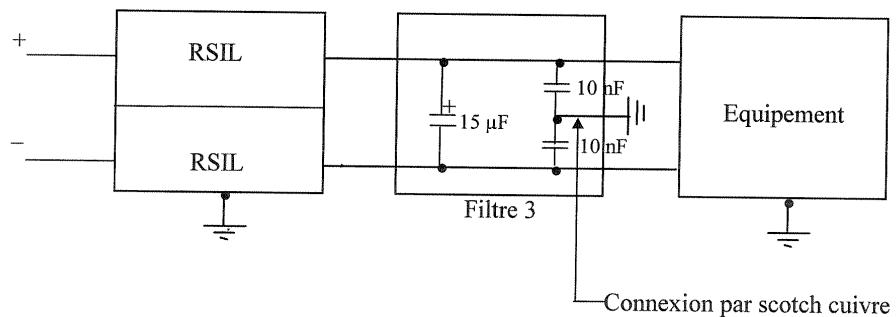


⇒ Pas d'amélioration

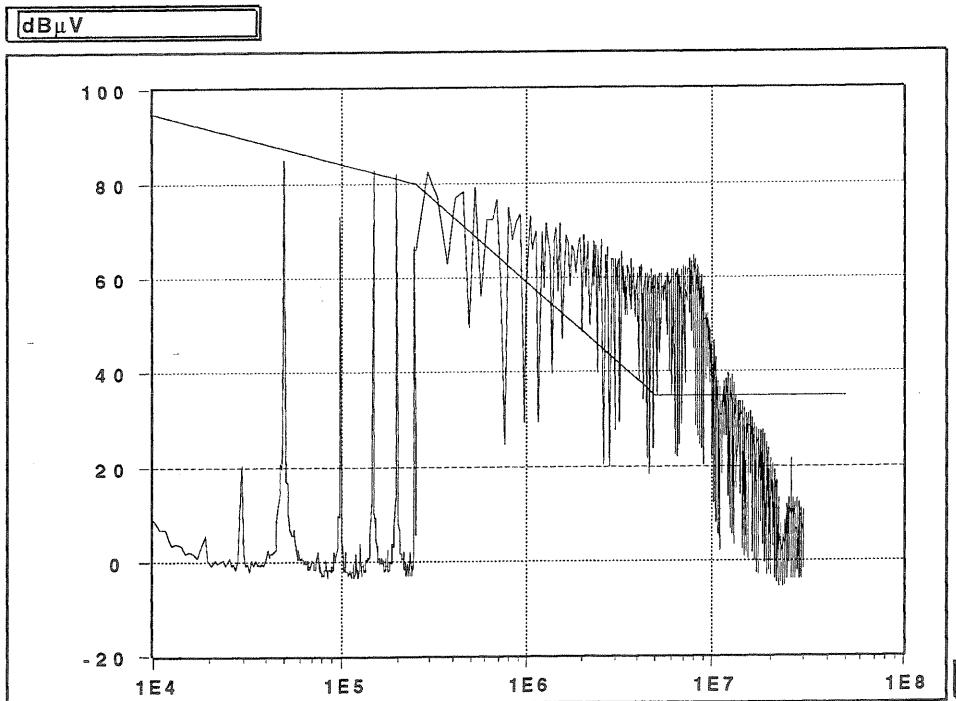




Filtrage de mode commun

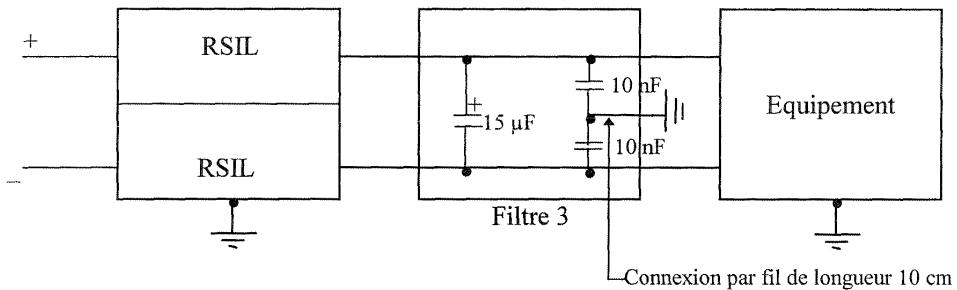


⇒ Efficace à partir de 1MHz

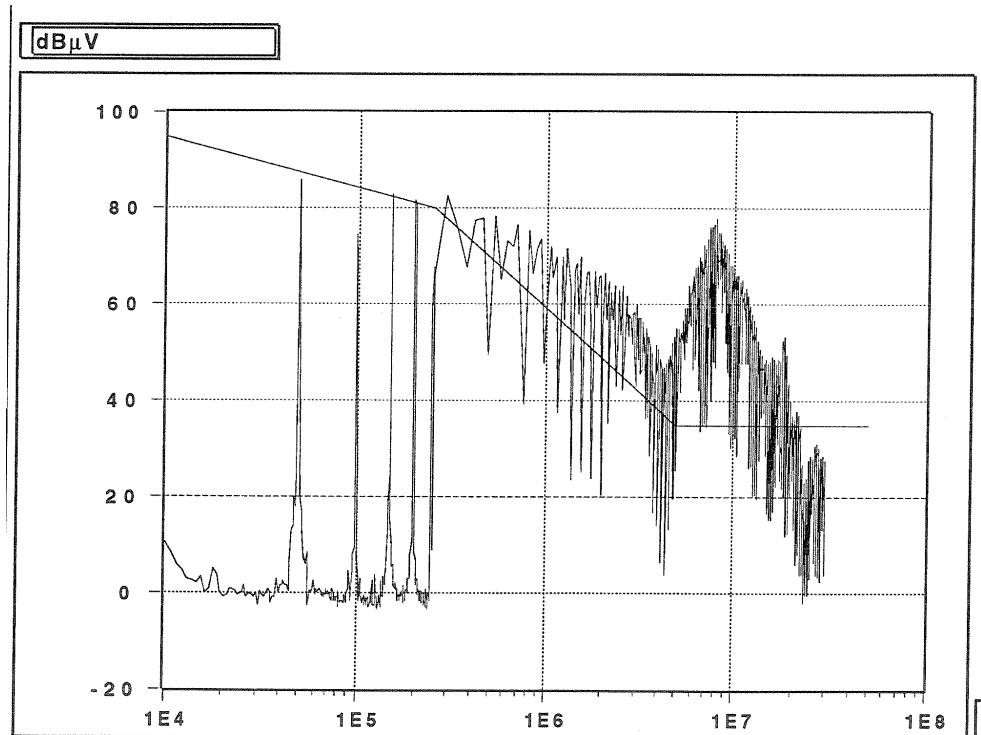




Filtrage de mode commun

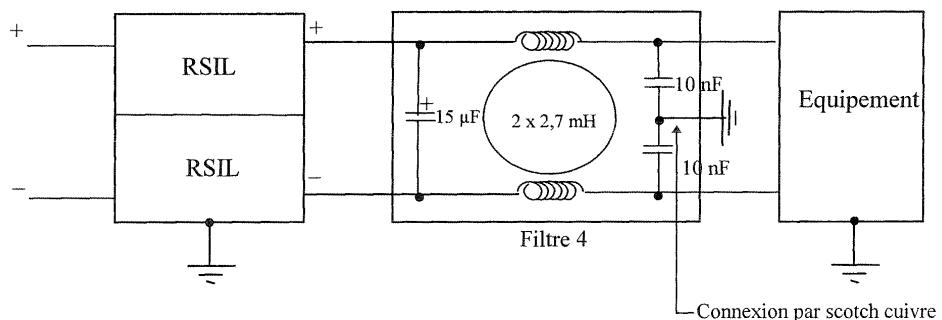


⇒ Dégradation en HF

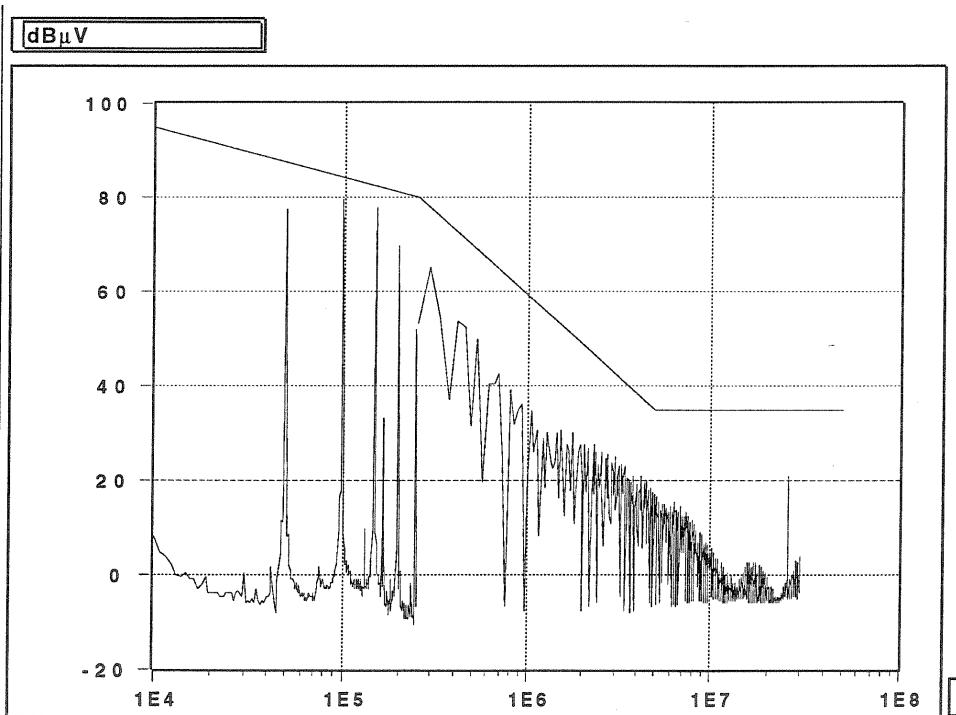




Filtrage de mode commun

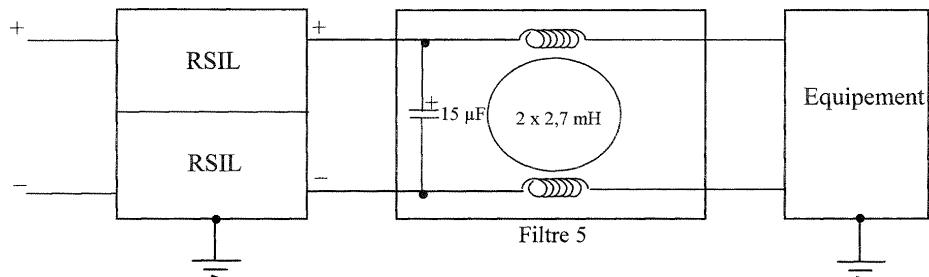


⇒ Amélioration dans toute la bande

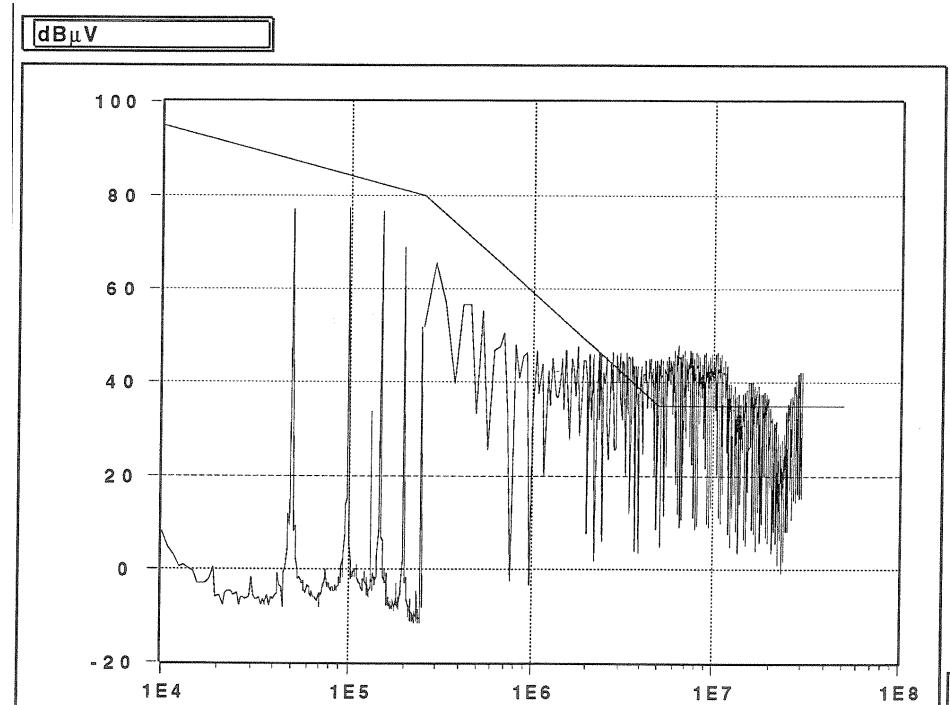




Filtrage de mode commun

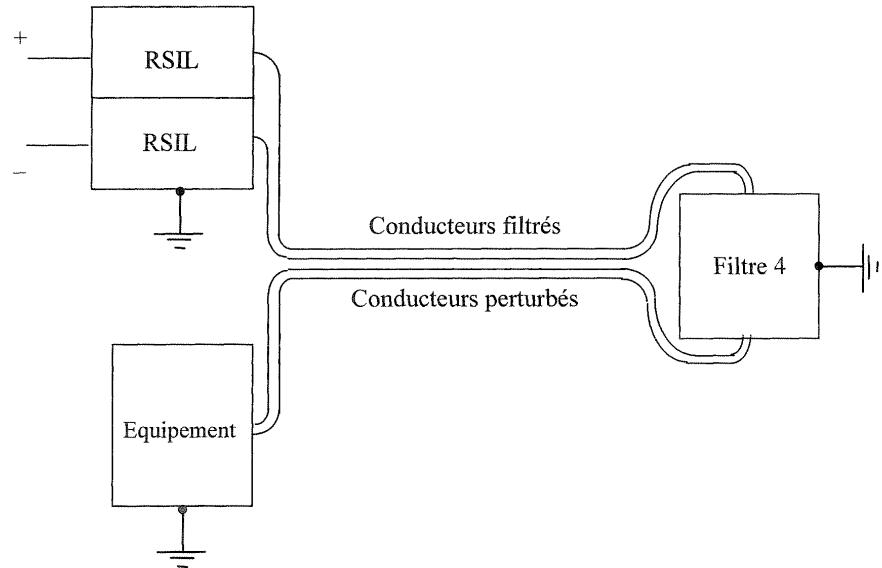


⇒ Atténuation insuffisante

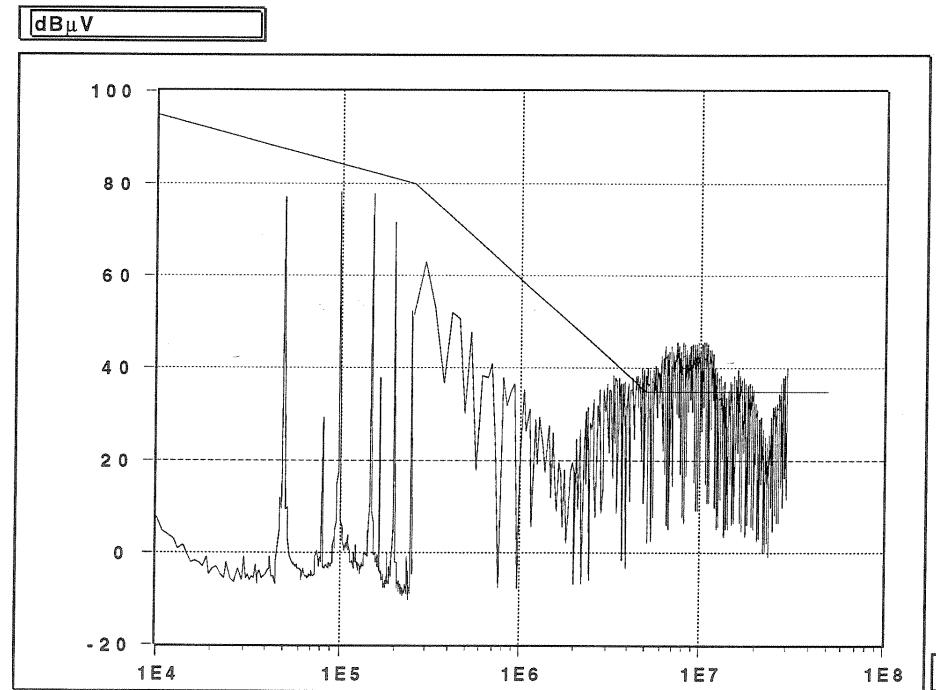




Filtrage de mode commun



⇒ Dégradation en HF





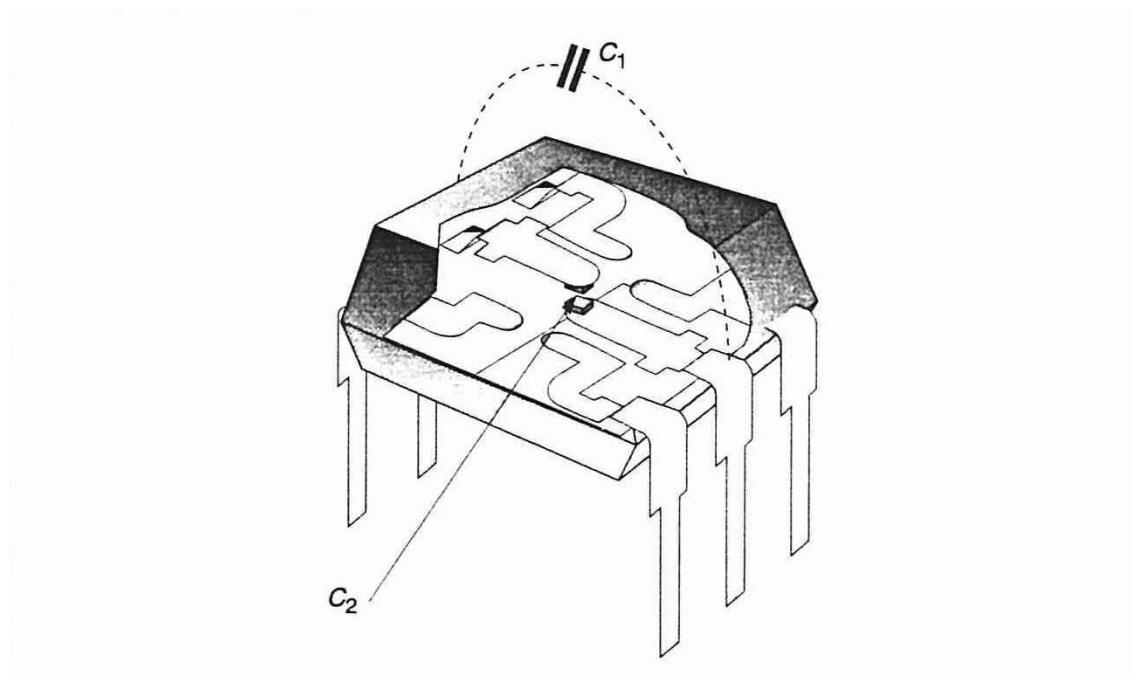
Règles - conseils

- Condensateur : inductance parasite aussi faible que possible ;pour cela :
 - réduire les longueurs des connexions
 - préférer les composants CMS
 - utiliser des condensateurs de traversée
- Inductance: capacité parasite entre spires la plus faible possible
- Transformateur: réduire la capacité parasite entre primaire et secondaire en choisissant un transformateur avec écran entre les deux bobinages qui sera relié au plus court à la structure



Règles - conseils

- Optocoupleur : réduire la capacité parasite en préférant des boîtiers CMS

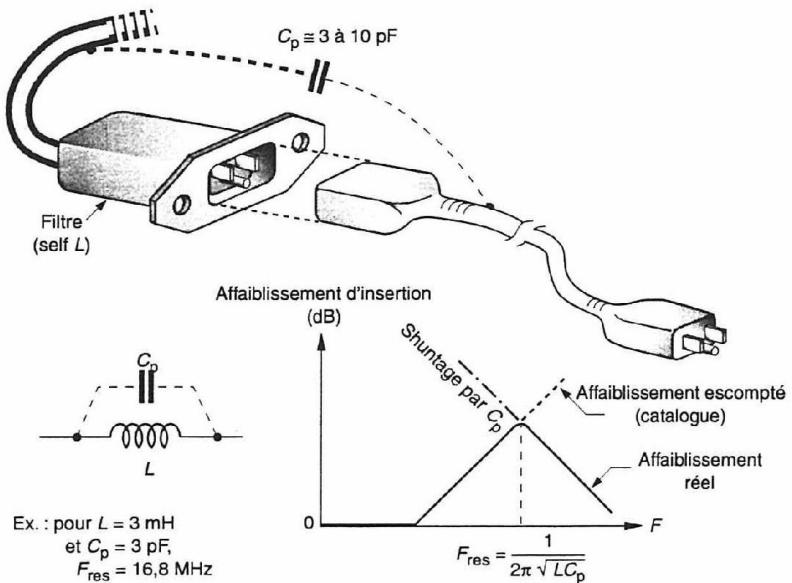




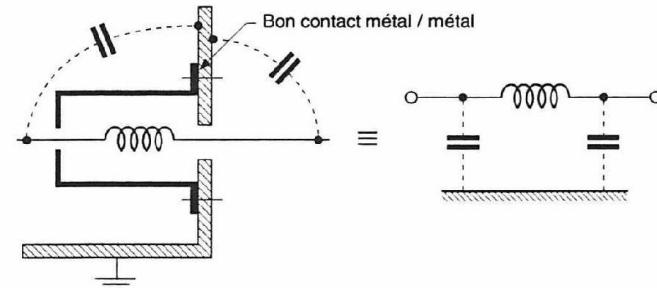
Règles - conseils

➤ Montage des filtres : éviter le couplage entrée-sortie

EFFET D'UN MONTAGE INCORRECT, EN L'AIR



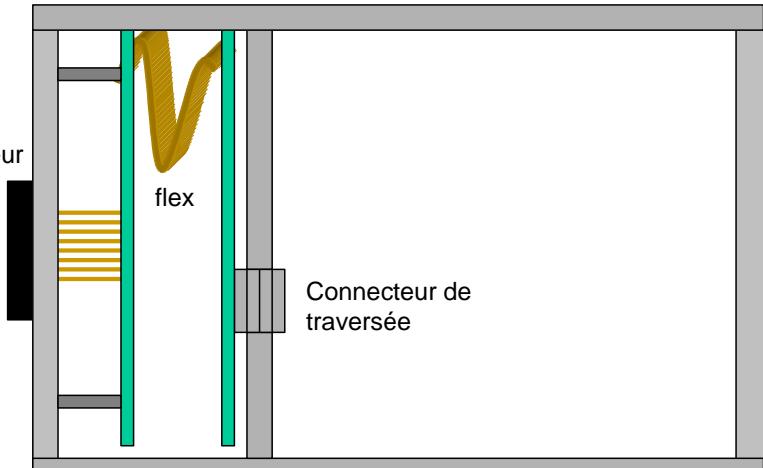
AMÉLIORATION GRACE À UN MONTAGE CORRECT





Exemples d'intégration des protections

Accès extérieur

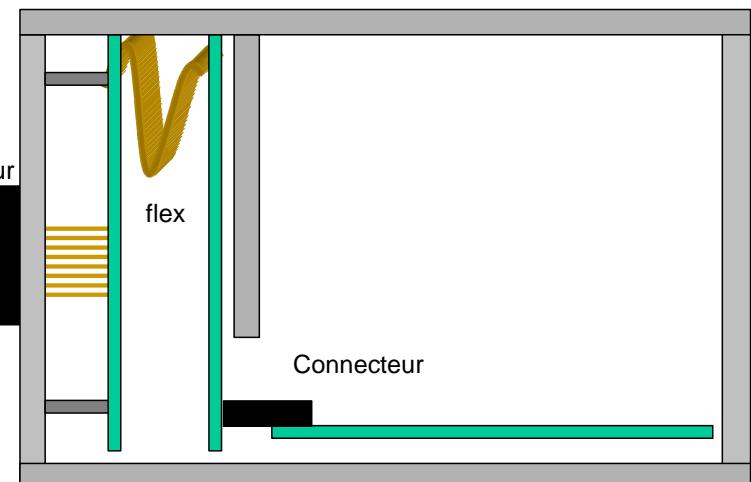


Cartes de protections

Connecteur de traversée

flex

Accès extérieur



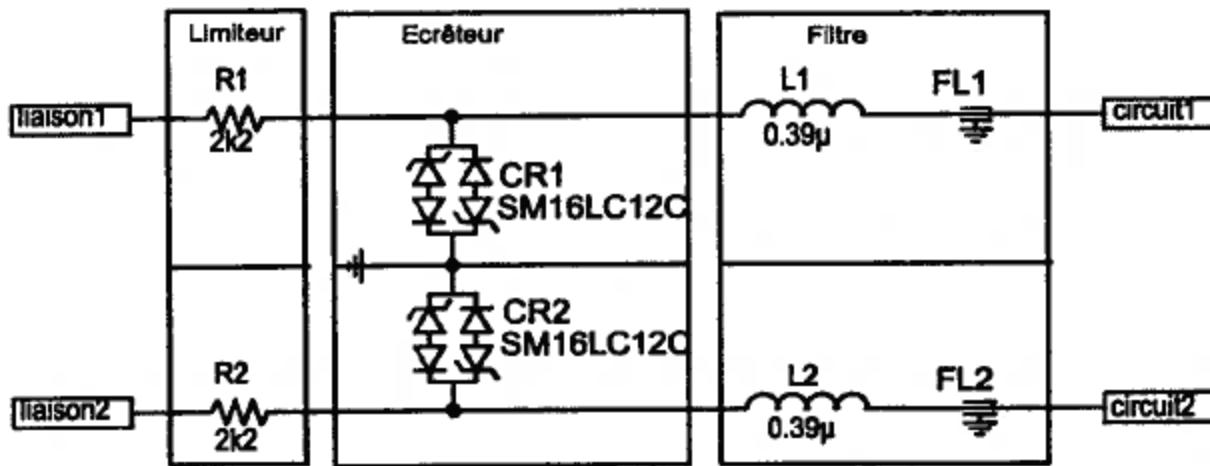
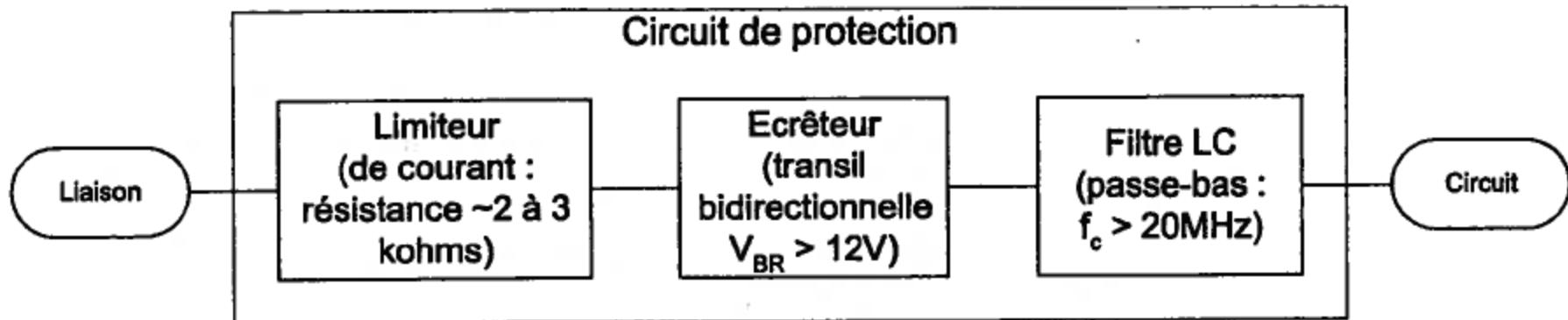
Cartes de protections

Connecteur

flex



Exemple de protection d'un bus RS-422

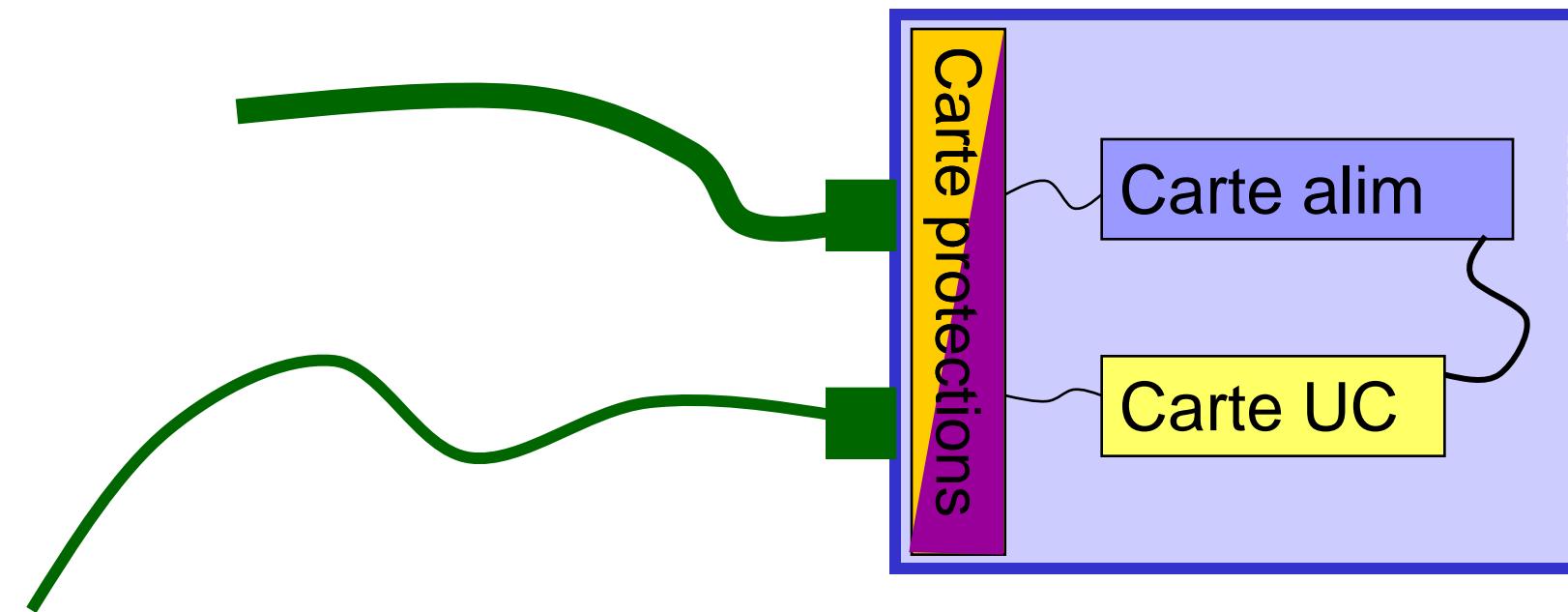




PROTECTION PAR ECRETAGE



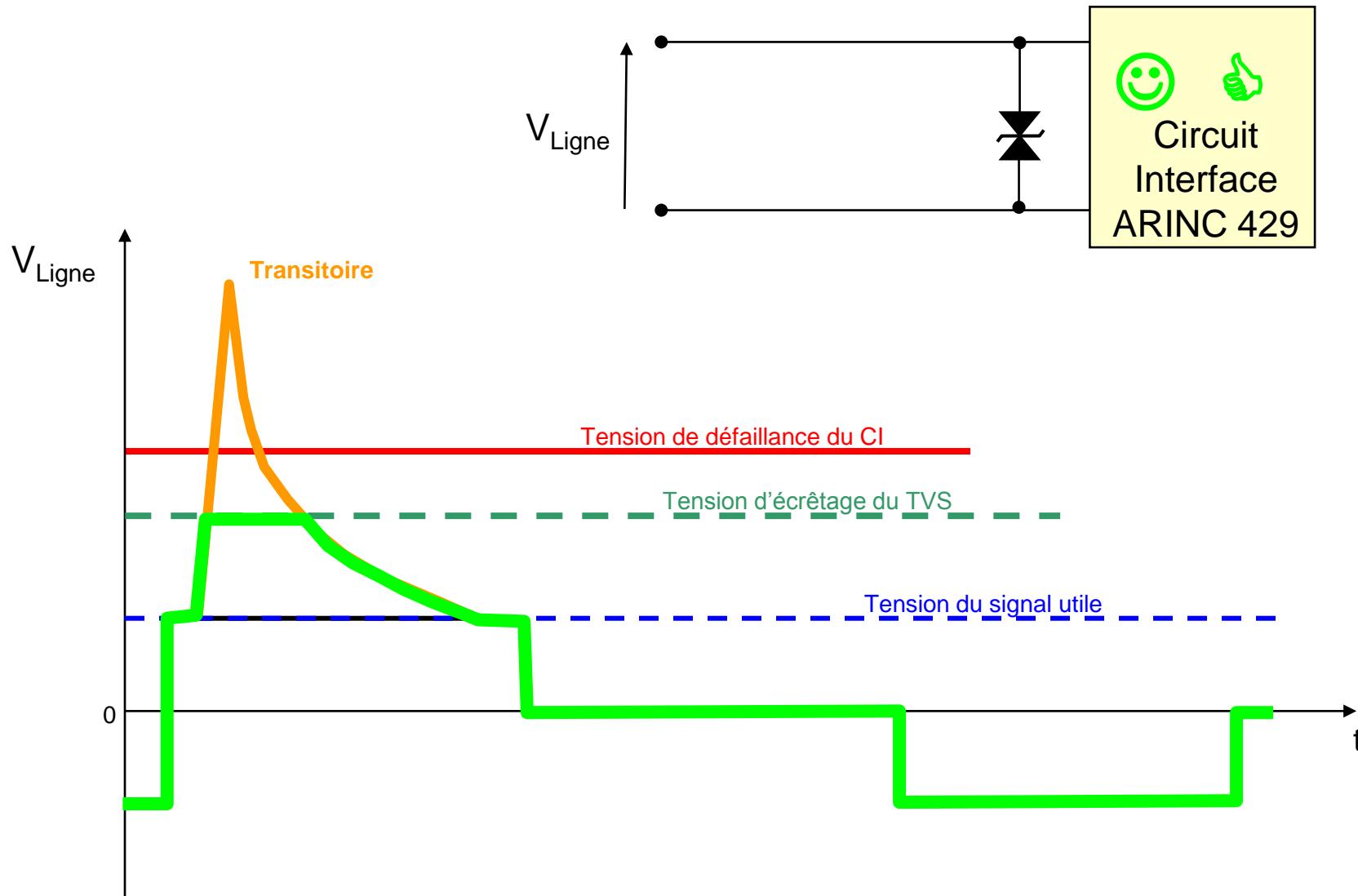
PROTECTION ELECTROMAGNETIQUE DES EQUIPEMENTS



PROTECTION FOUDRE



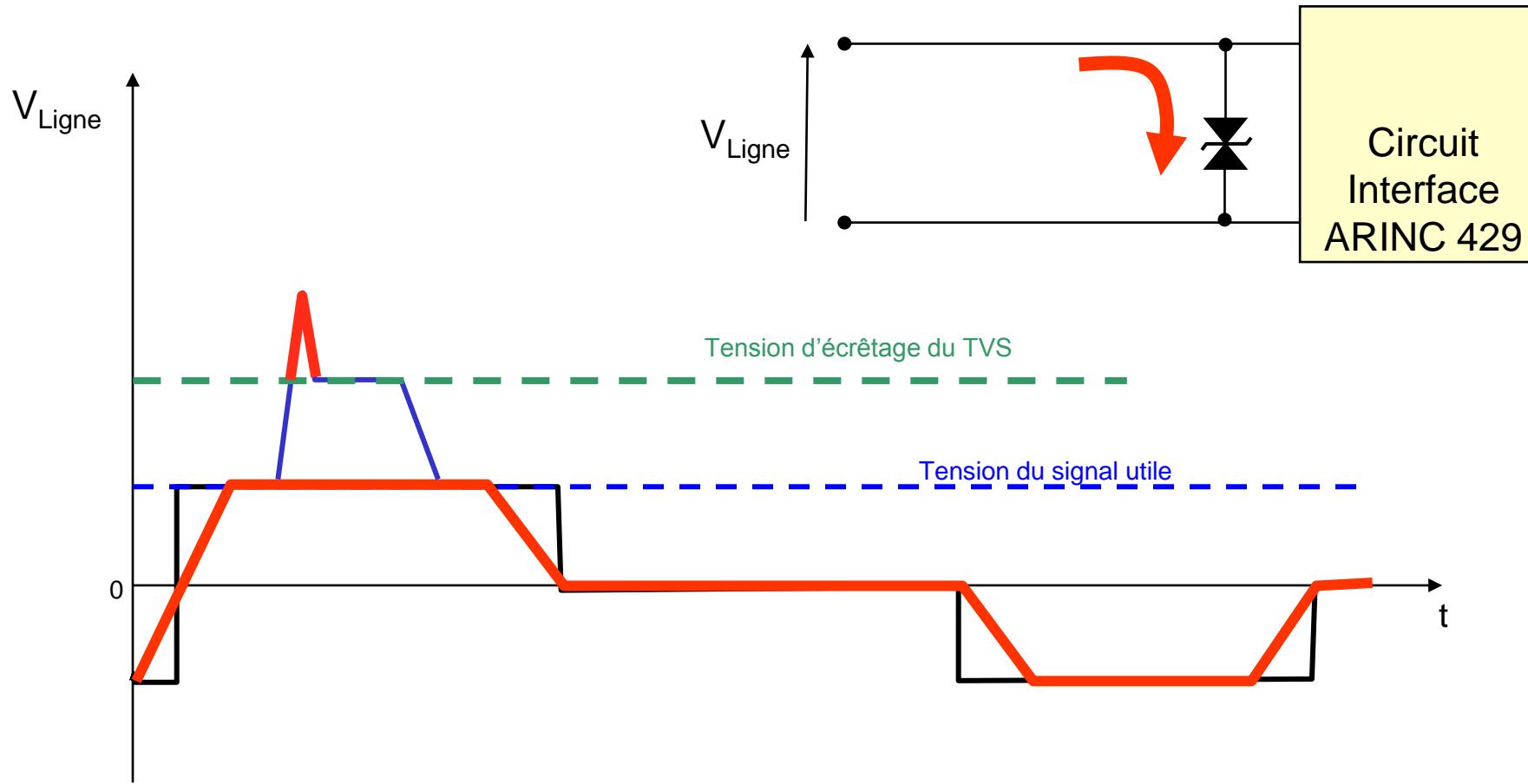
Principe de la protection





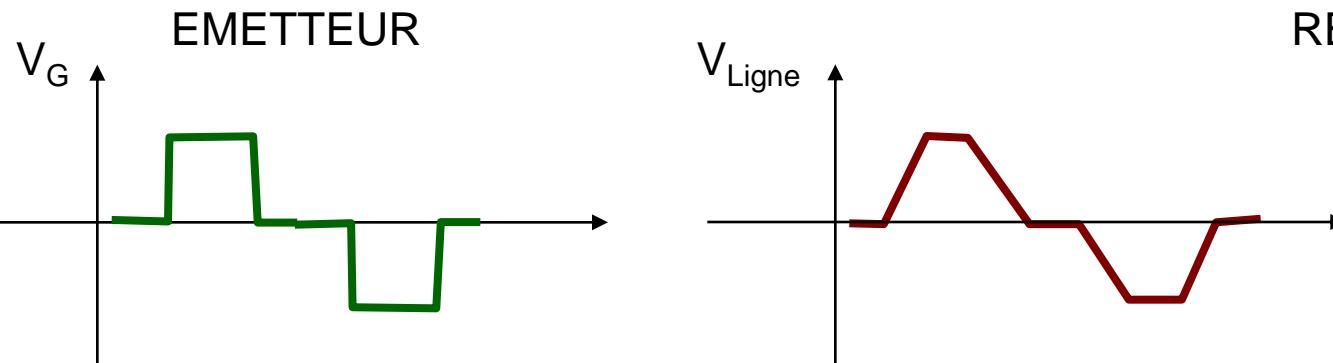
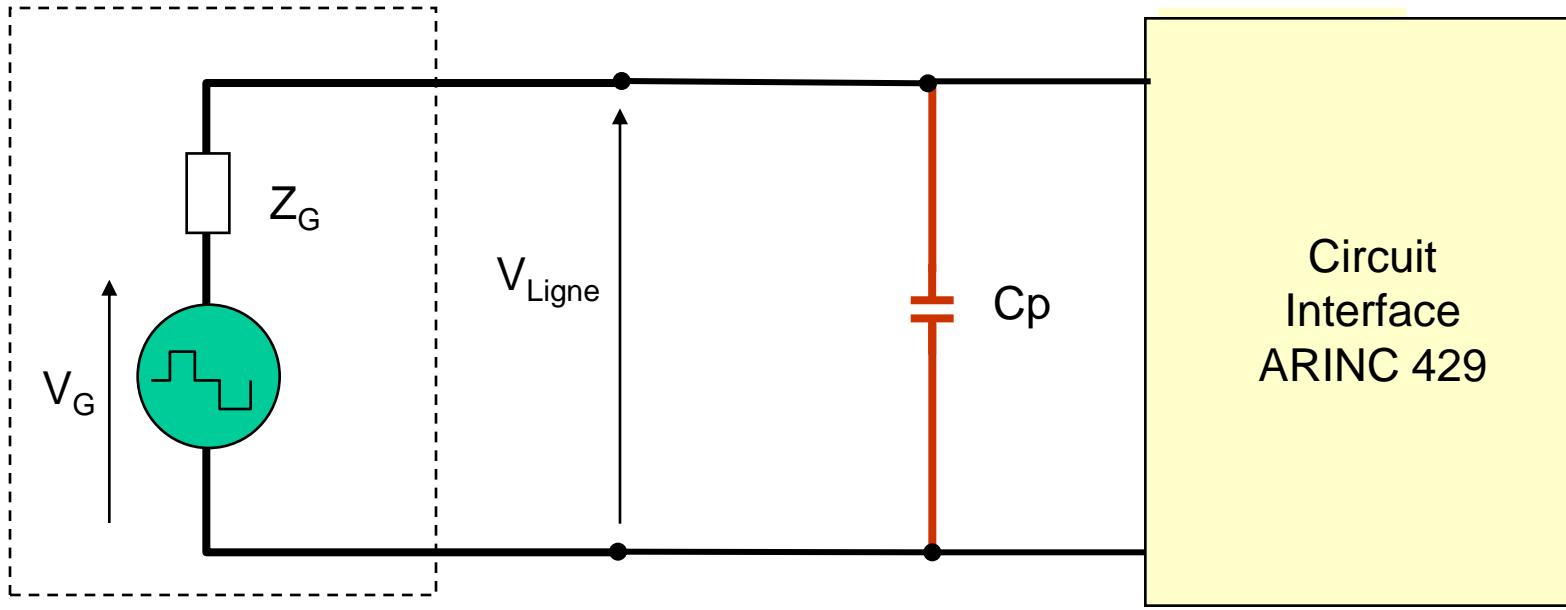
Théorie

Les effets indésirables de la diode de protection



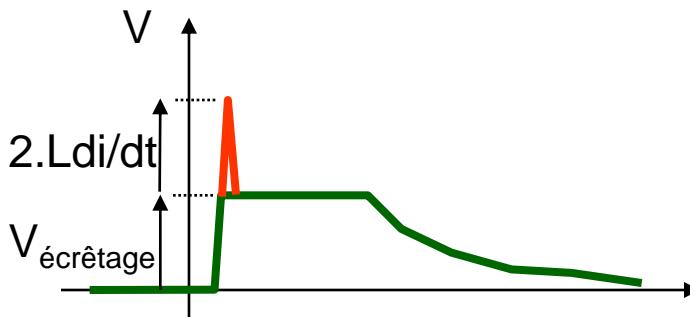
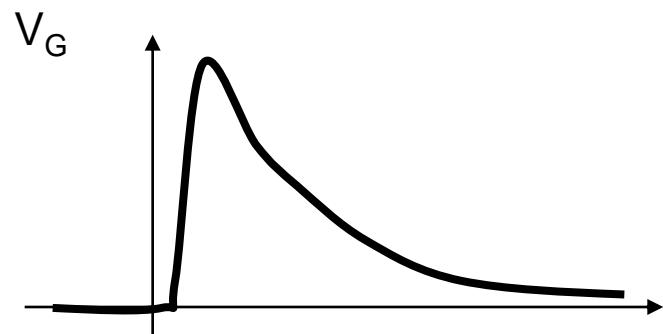
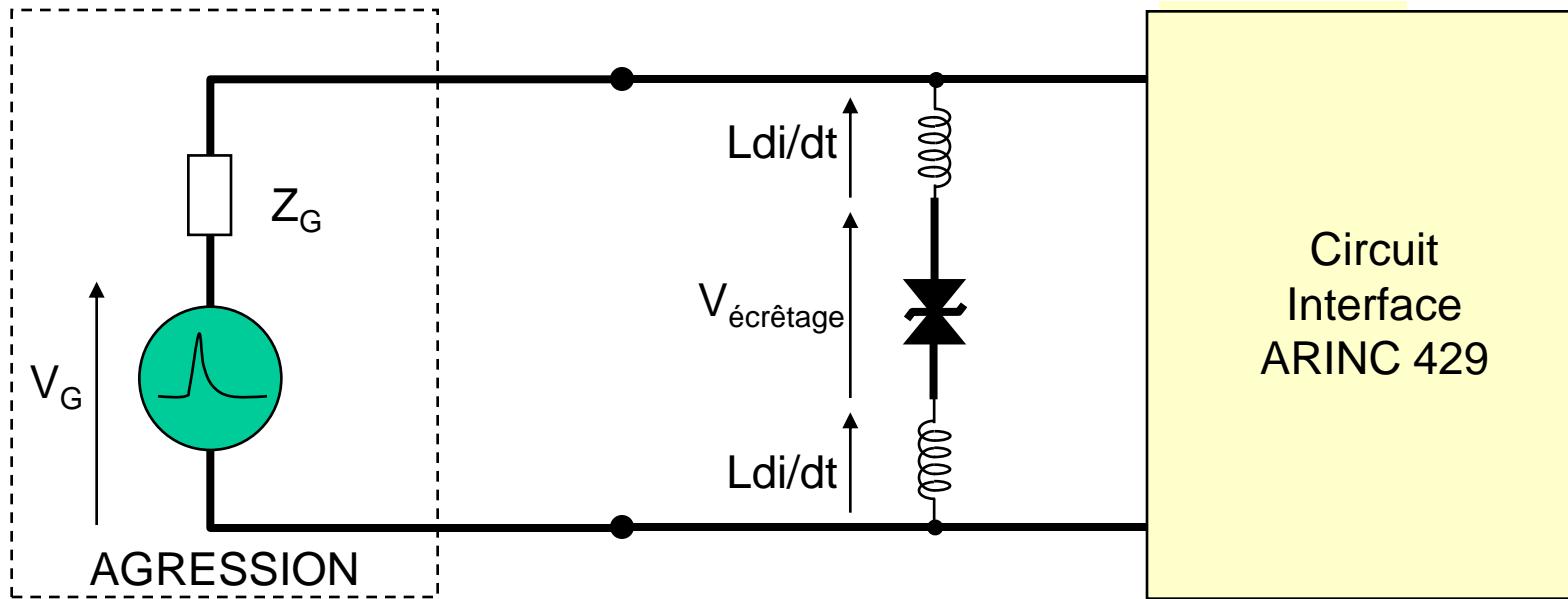


Les fronts se couchent : La diode de protection est capacitive





Présence de surtensions : La diode de protection est selfique



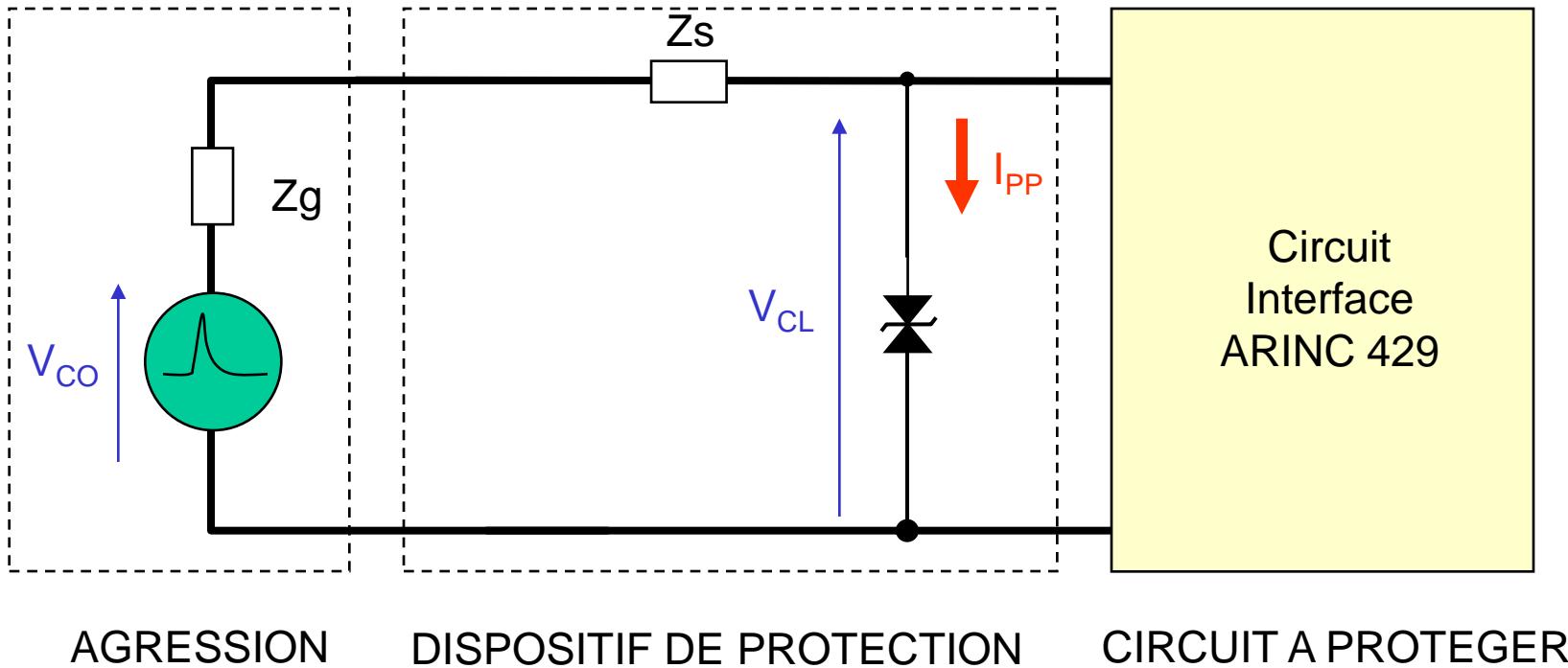


La self parasite du dispositif de protection dépend :

- ***du type de boîtier d'encapsulation de la diode
(10 nH pour un TVS axial; 4 nH pour un boîtier CMS)***
- ***de l'implantation
(largeur et longueur des pistes de dérivation)***
- ***de la reprise de masse de la carte
(10 nH / cm de fil ou de piste; négligeable pour une colonnette)***



Choix de la diode de protection





Choix de la tension d'écrêtage

La tension d'écrêtage doit être :

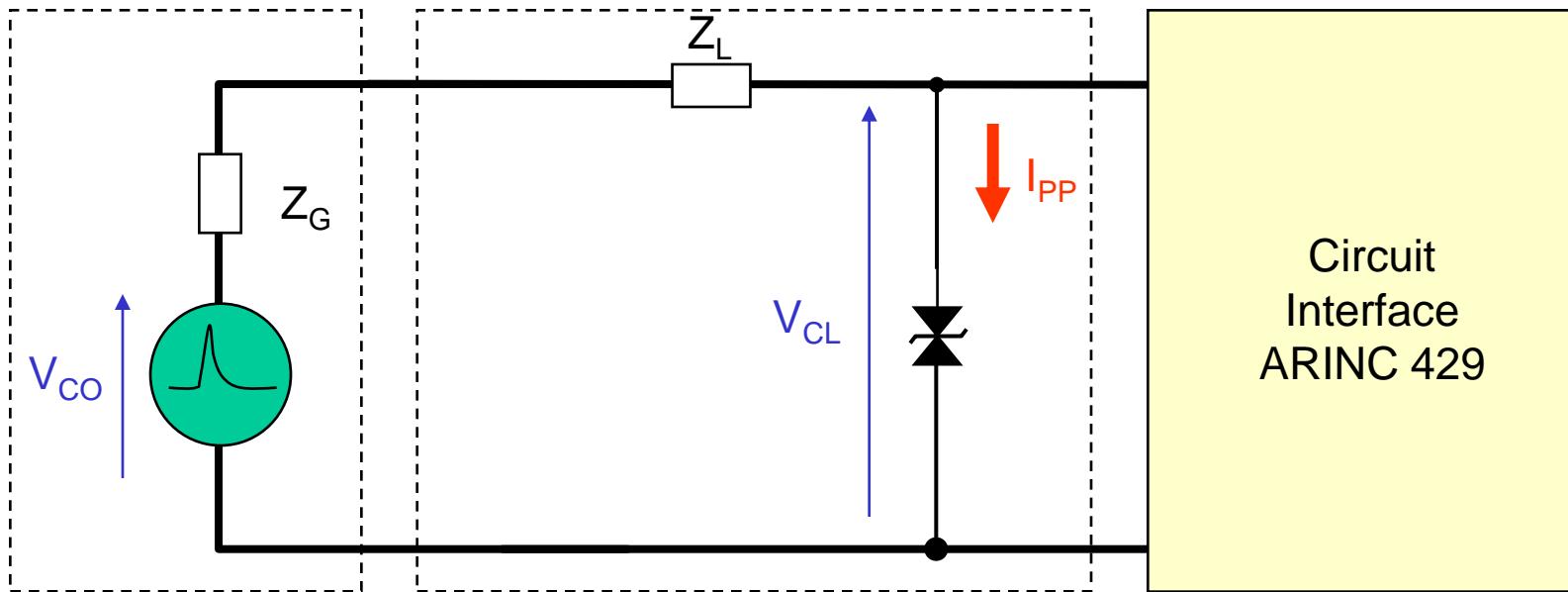
1) supérieure (environ 20%) au niveau max des signaux fonctionnels.

Attention aux lignes d'alimentation qui sont soumises aux essais réseau de la section 16 (surtension anormale : 80V pendant 100ms en CatZ).

2) inférieure à la tension de défaillance du circuit à protéger.



Calcul de la puissance à absorber



$$P_{PP} = V_{CL} \cdot I_{PP} = V_{CL} \cdot \frac{V_{CO} - V_{CL}}{Z_G + Z_L}$$

P_{PP} : Peak Pulse Power

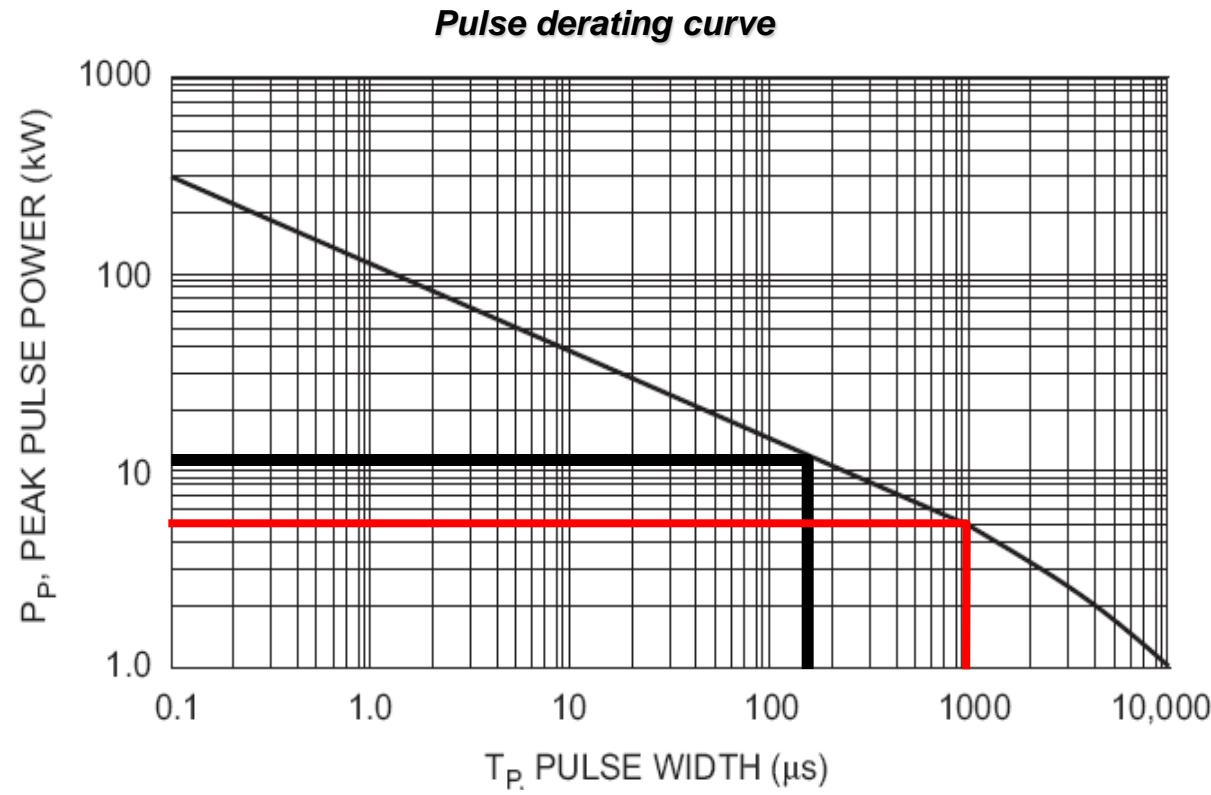
V_{CL} : Clamping Voltage

Z_G : Generator Impédance

Z_L : Line Impédance



Donnée constructeur : P_{PP} pour une onde 10μs/1000μs



Exemple:

$$P_{PP}(10\mu s/1000\mu s) = 5 \text{ kW}$$

Soit

$$P_{PP}(40\mu s/120\mu s) = 13.30 \text{ kW}$$

avec marge :

$$P_{PP}(40\mu s/144\mu s) = 11.65 \text{ kW}$$

$P_{PP}(\text{WF5A}) =$

$$2.33 \times P_{PP}(10\mu s/1000\mu s)$$



Calcul de la tenue en puissance

$$P_{PP}(\text{WF5A soit } 40\mu\text{s}/120\mu\text{s}) = 2.33 \times P_{PP}(10\mu\text{s}/1000\mu\text{s})$$

$$P_{PP}(\text{WF4 soit } 6.4\mu\text{s}/70\mu\text{s}) = 3.30 \times P_{PP}(10\mu\text{s}/1000\mu\text{s})$$

$$P_{PP}(\text{WF3 soit sinus amortie } 1\text{MHz}) = 10.70 \times P_{PP}(10\mu\text{s}/1000\mu\text{s})$$

$$P_{PP}(8\mu\text{s}/20\mu\text{s}) = 6.66 \times P_{PP}(10\mu\text{s}/1000\mu\text{s})$$

$$P_{PP} = V_{CL} \cdot I_{PP}$$



Exemple de calcul

CATEGORY		LIGHTNING DAMAGE TESTING			
Equipment EMH Category	Inputs/outputs category	Long wave Voltage WF5A (1) Fig 22-6 (6)	Long wave Voltage WF4 (1) Fig 22-5	Short wave voltage WF2 (1) Fig 22-3	Oscillatory wave voltage/current WF3 (1) Fig 22-4
Category A Critical equipment	Power supply: Highly Exposed Power supply (Landing Gear route)	NA	1600 V/320 A	1600 V/107 A	1500V/60 A
	Power Supply: Power supply	250 V/50 A (3) 250 V/80 A (4) 250 V/125 A (5)	750 V/150 A	1600 V/107 A	1500 V/60 A
Category B Essential hazardous equipment	Signal: Highly Exposed Area (Landing Gear route)	NA	1600 V/320 A	1600 V/107 A	1500V/60 A
	Signal: Wing/HTP/VTP/S19/ Externally mounted	250 V/50 A (3) 250 V/80 A (4) 250 V/125 A (5)	750 V/150 A	1600 V/107 A	1500V/60 A
Category C Essential major equipment	Signal: Inside composite fuel tank (7)	NA	750 V/150 A	NA	250 V/10 A
	Signal: Belly fairing/Radome	NA	300 V/60 A	750 V/50 A	600 V/24 A
	Signal: Pressurized Area (2)	NA	125 V/25 A	250 V/10 A	250 V/10 A
	Signal: Electronic Bay (2)	NA	NA	100 V/4 A	100 V/4 A

(1) Ref. to EUROCAE ED-14/RTCA DO-160 Section 22.

(2) The connections between two equipment located inside a same Electronic Bay correspond to an "Electronic bay" category.
The connections between two equipment located in different Electronic Bays (i.e. that are located on different decks or that are split by a cargo or a cabin section) correspond to a "Pressurized area" category.

(3) A380 requirement: Applicable to input/output connected to wire gauge 20 to 24.

(4) A380 requirement: Applicable to input/output connected to wire gauge 14 to 18.

(5) A380 requirement: Applicable to input/output connected to wire gauge < 14.

(6) Only applicable for equipment installed inside A380 in Wing/Section 19/HTP/VTP/Externally mounted

(7) These values are for equipment test levels only: for the purposes of intrinsic safety calculations, analysis should be used to derive the actual levels for any given installation/equipment

Table 3.2-2: Lightning environment levels for lightning damage testing Categories A, B and C equipment



Calcul de la puissance à absorber

Cas de la ligne alimentation - WF4 - 750V/150A

Données : $6.4 \mu s / 70 \mu s$; $V_{CO} = 750 V$; $Z_G = 750 / 150 = 5 \Omega$; $Z_L = 0 \Omega$

on choisit $V_{CL} = 100 V$ car il doit être supérieur à 80 V

$$P_{PP} = V_{CL} \cdot \frac{V_{CO} - V_{CL}}{Z_G + Z_L} = 100 \cdot \frac{750 - 100}{5} = 100 \cdot 130 = 13 kW$$

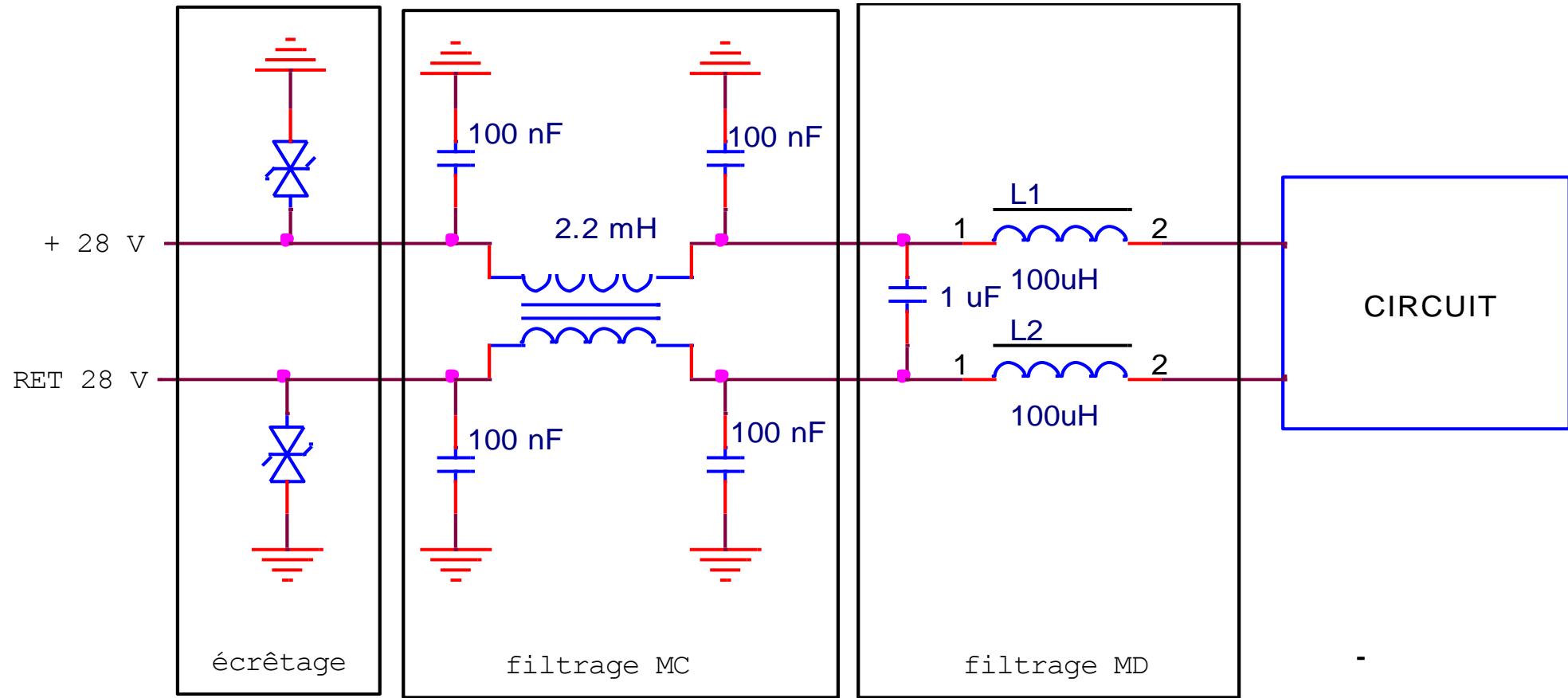
$$P_{PP} (6.4 \mu s / 70 \mu s) = 13 kW$$

$$P_{PP} (10 \mu s / 1000 \mu s) = 13 kW / 3.3 = 3.9 kW$$

Choix : TVS 5 kW

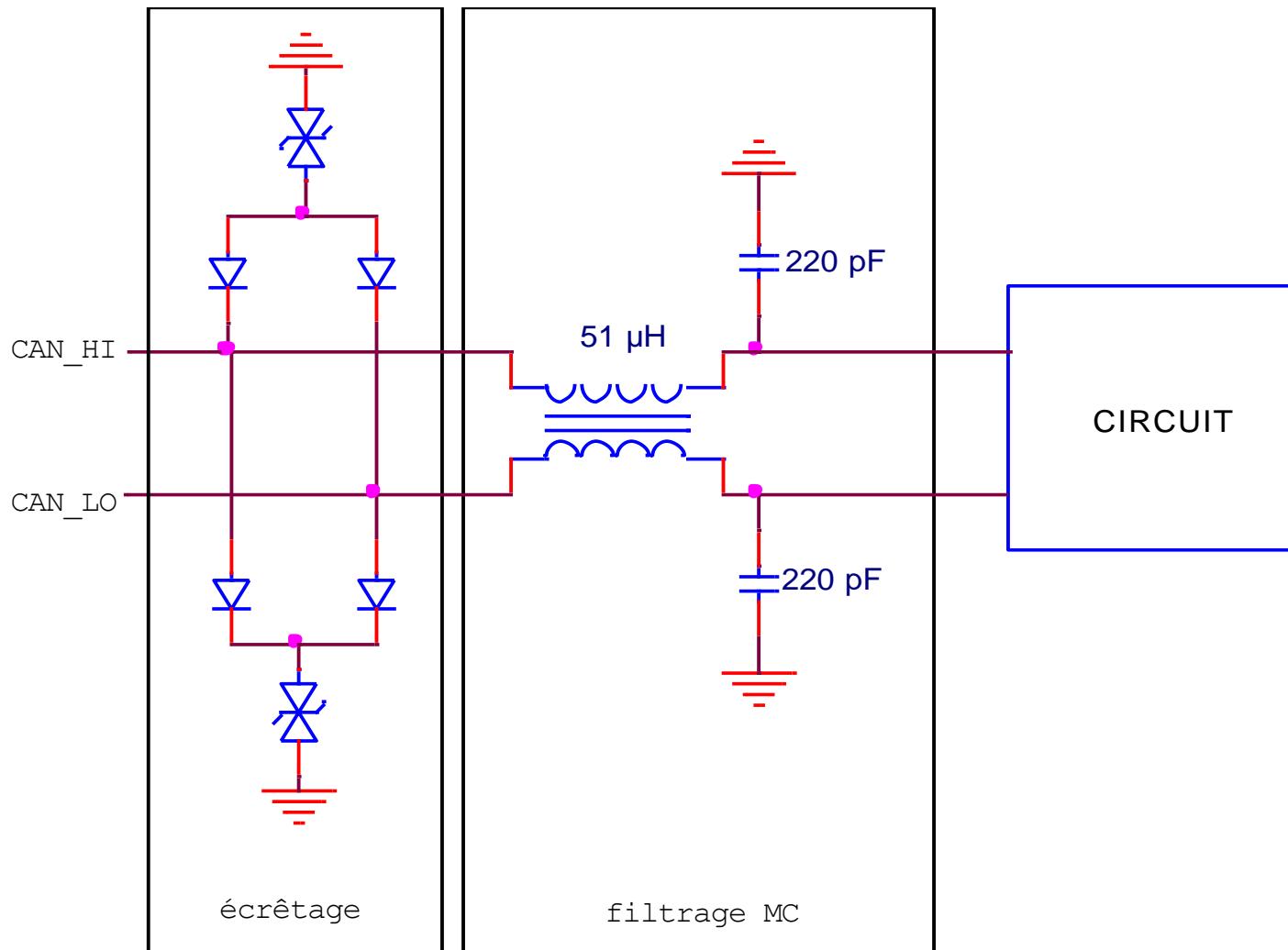


Exemples de schéma de protection réseau alimentation





Exemples de schéma de protection Bus CAN

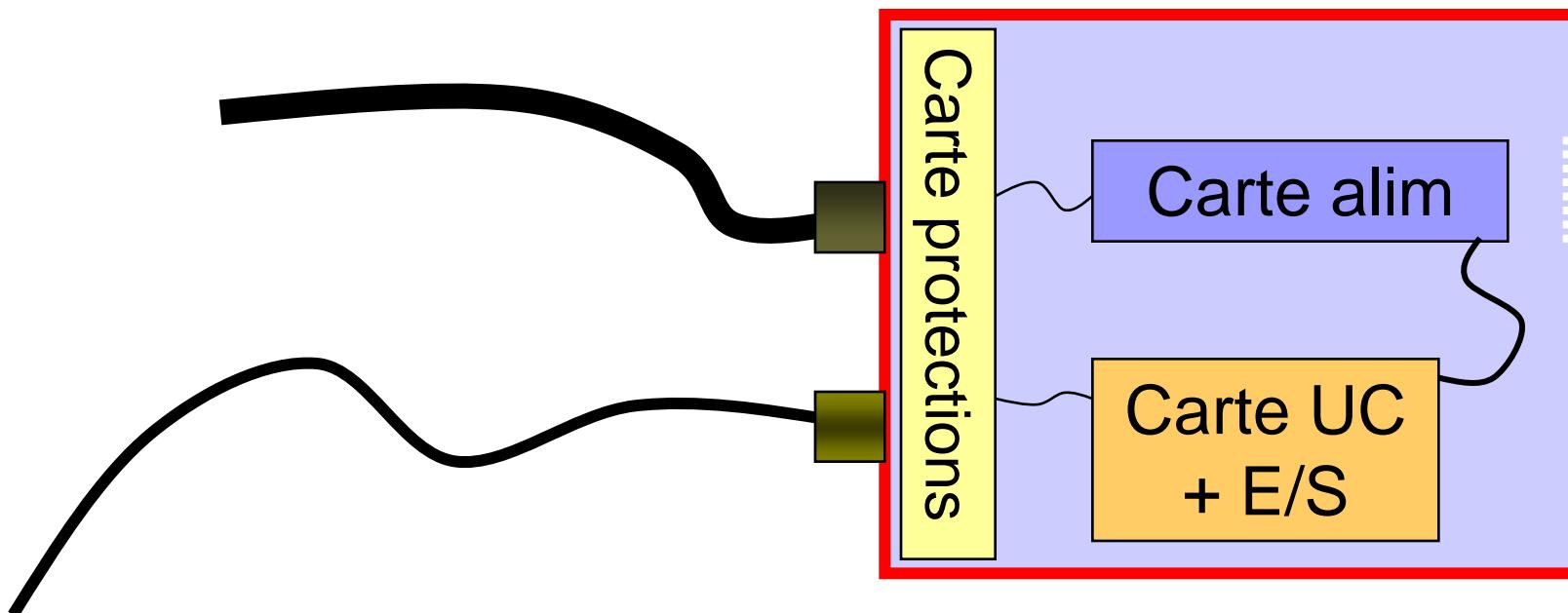




PROTECTION PAR BLINDAGE

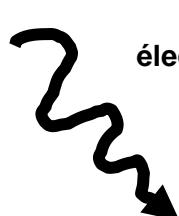


Équipement électronique simplifié

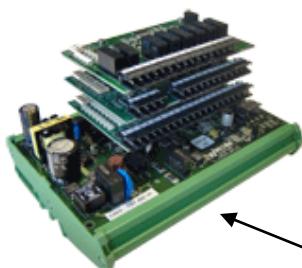




Problème :



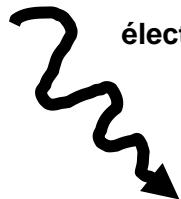
Agression
électromagnétique



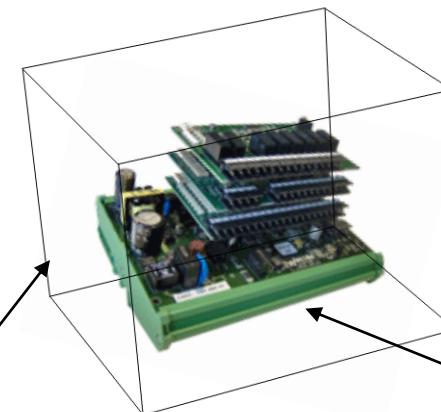
Électronique
sensible

Présence de dysfonctionnements

Solution :



Agression
électromagnétique



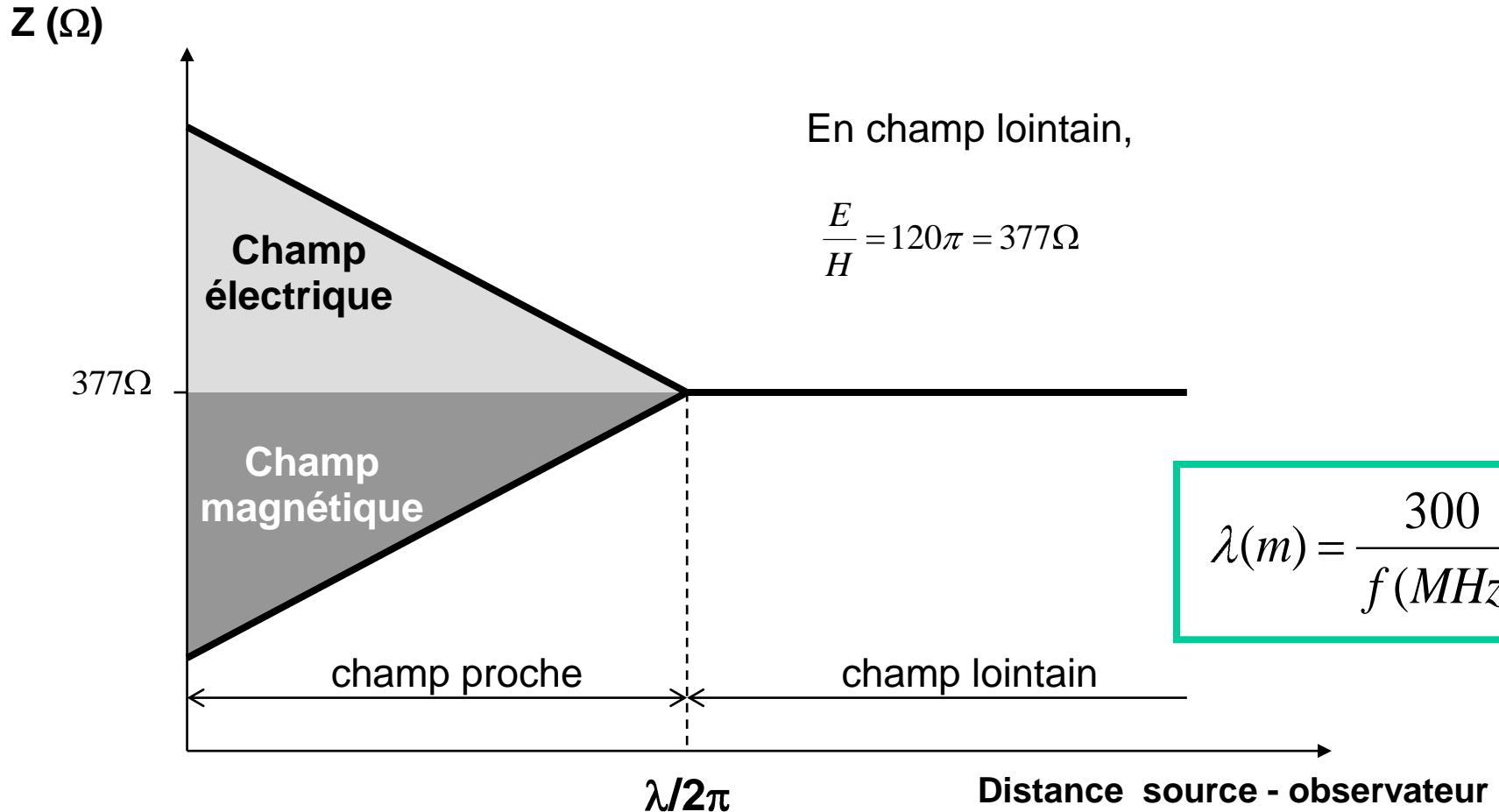
Boîtier
métallisé

Électronique
sensible

Fonctionnement normal



Nature du champ EM





Théorie

Définition :

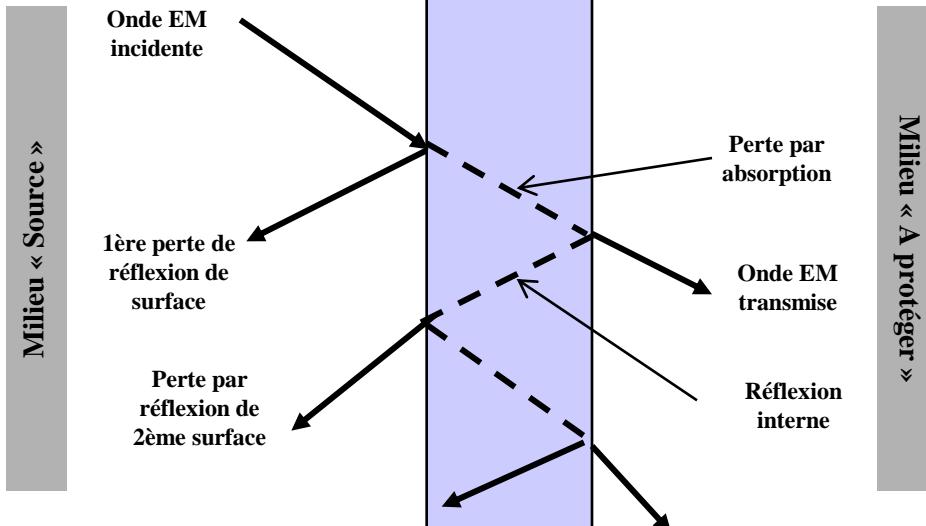
EB (Efficacité de Blindage) ou Atténuation d 'écran

$$EB(dB) = 20 \log \left(\frac{\text{Champ sans écran}}{\text{Champ avec écran}} \right)$$



Théorie

Plaque conductrice infinie



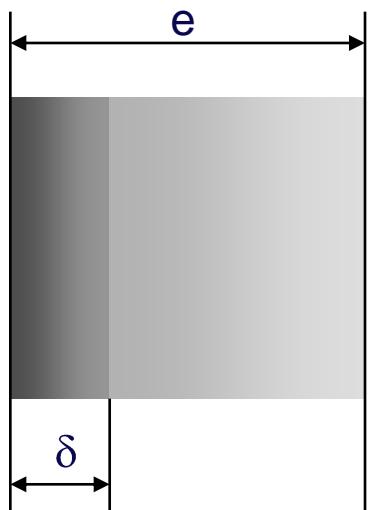
$$EB(dB) = A (dB) + R (dB) + B (dB)$$

- EB (dB)** = Atténuation d 'écran (en dB)
- A (dB)** = Pertes par absorption (en dB)
- R (dB)** = Pertes par réflexion (en dB)
- B (dB)** = Coefficient de re-réflexion (en dB)



Effet de peau

Les courants circulent préférentiellement en surface des conducteurs: c'est l'effet de peau



- ◆ e = épaisseur de la paroi (en m)
- ◆ δ = épaisseur de peau (en m)

- ◆
$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot \mu \cdot \sigma \cdot f}}$$
 ou encore

$$\delta(\text{mm}) = \frac{66}{\sqrt{\sigma_r \cdot \mu_r \cdot f(\text{Hz})}}$$

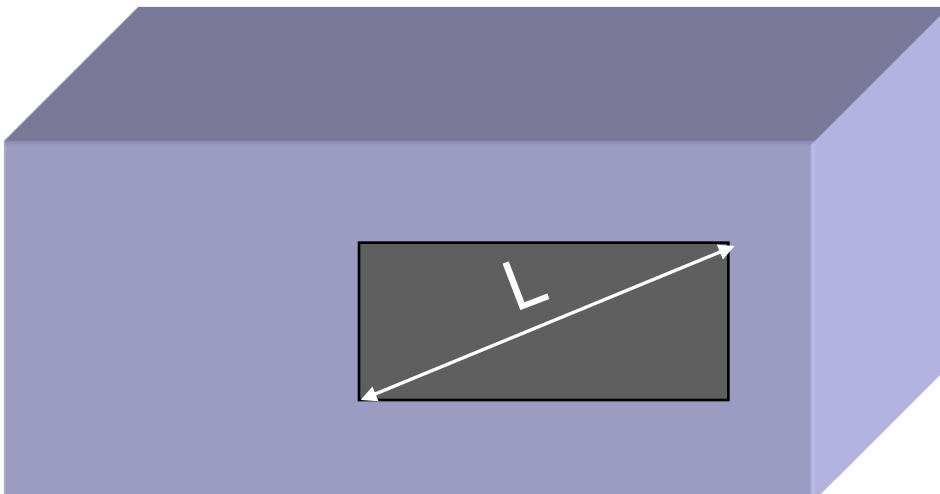
- ◆ f = fréquence en Hz
- ◆ μ = perméabilité absolue du matériau = $\mu_0 \cdot \mu_r$
- ◆ σ = conductivité du matériau = $\sigma_r \cdot \sigma_{cu}$
- ◆ σ_{cu} = conductivité du cuivre = $5,82 \cdot 10^7$ siemens/m



Calcul de l'atténuation d'une ouverture

Ouverture unique :

$$EB(dB) = 20 \log \frac{\lambda}{2L}$$



$$EB(dB) = 20 \log \frac{150}{f(MHz).L(m)}$$

Avec L : plus grande dimension de l'ouverture



Calcul de l'atténuation d'un guide d'onde

Arrivée fluide :

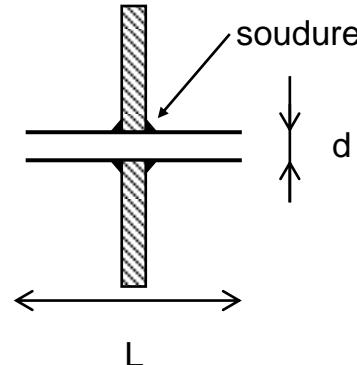
- Traversée de paroi de fluide isolant

$$f_c = \frac{176}{d}$$

- Atténuation

$$EB(dB) = 0,182 \cdot L \cdot f \cdot \sqrt{\left(\frac{f_c}{f}\right)^2 - 1}$$

- En pratique, on prend $L \geq 5 d$



f_c = fréquence de coupure **en MHz**

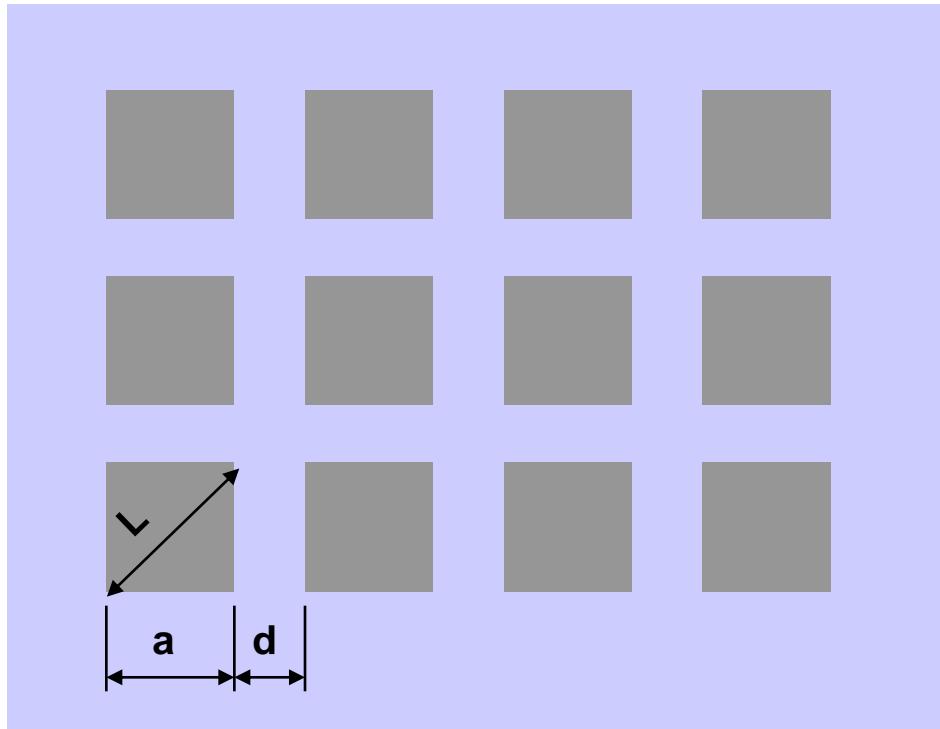
d = diamètre **en m** interne du tube

f = fréquence **en MHz**

L = longueur totale du tube **en m**



Calcul de l'atténuation d'une grille



pour $d \leq a/2$

$$EB(dB) = 20\log\frac{\lambda}{2L} - 10\log(N)$$

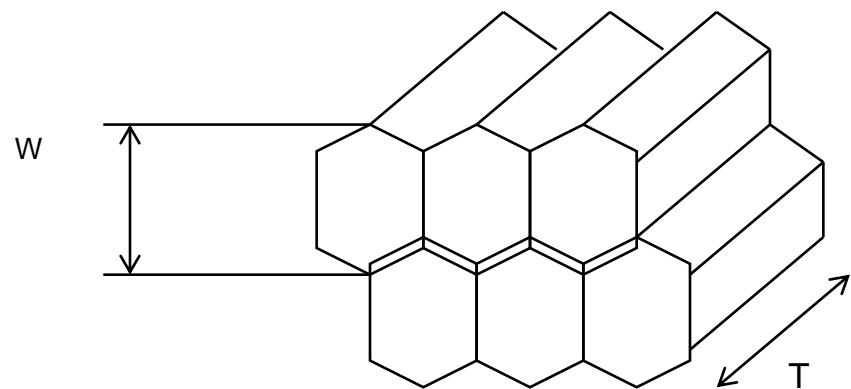
Avec N : nombre d'ouvertures



Calcul de l'atténuation d'un nid d'abeille

Formule approchée :

$$EB(dB) = 27.2 \frac{T}{W} - 10\log(N)$$



- ◆ Cher
- ◆ Montage : soudé ou boulonné
- ◆ Pertes en charge minimisée

N = nombre de cellules



Traitement des ouvertures optiques

- ◆ Écrans blindés:
 - Grillage à mailles fines(mesh)
 - inconvénient : effet moirage
 - avantage : meilleure atténuation au champ magnétique
 - Verre recouvert de pellicule métallique
 - inconvénient : effet miroir
 - avantage : meilleures performances optique(transparence et contraste)
- ◆ Dans tous les cas, la reprise du blindage doit être périphérique.



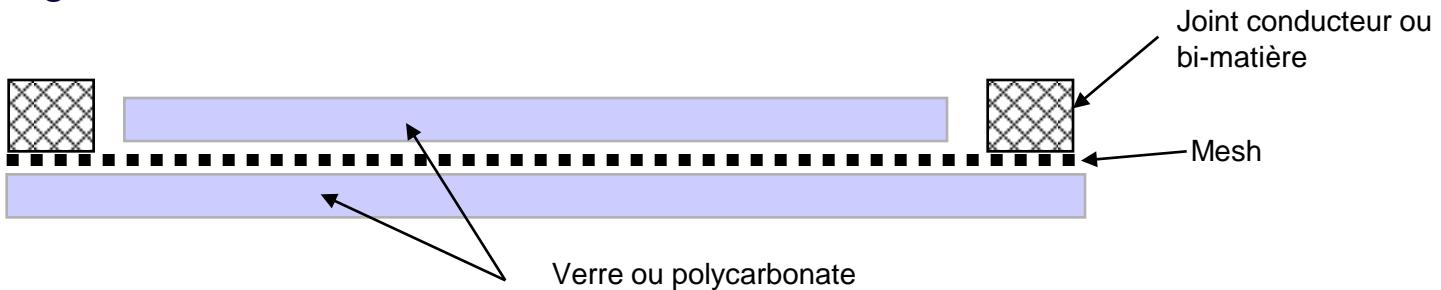
Vitre grillagée

- ◆ Caractéristique du tissu : en OPI(Openings Per Inch) ex: 125 OPI
- ◆ Caractéristiques du fil : diamètre, matériau et traitement ex: fil monel noirci diamètre 0.05 mm
- ◆ Atténuation électromagnétique : En champ lointain ,

$$EB(dB) = 20 \log \frac{1,5 \cdot 10^5}{g(mm) \cdot f(MHz)}$$

g : pas du grillage en mm

- ◆ Technologie:





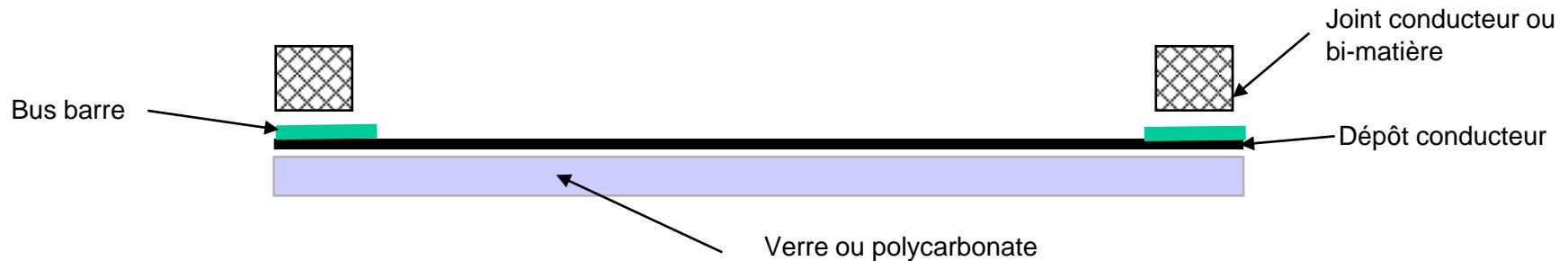
Vitre coating

- ◆ Caractéristiques du coating (dépôt) : matériau ex ITO (Indium Tin Oxyde), épaisseur, transmission optique, résistance de surface en Ω / \square ex: $5\Omega / \square$
- ◆ Atténuation électromagnétique : En champ lointain ,

$$EB(dB) = 20 \log \frac{94}{R_s}$$

Rs : résistance de surface en Ω / \square

- ◆ Technologie:



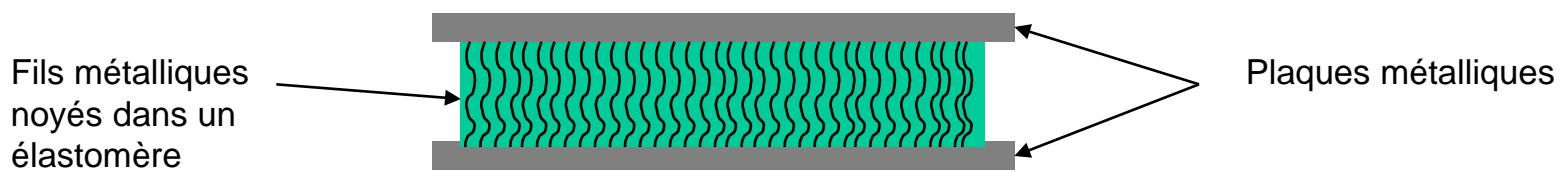


Joint

❖ Joints tricotés :

- fils métalliques tricotés avec ou sans âme élastomère
 - fil monel
 - fil cuivre étamé
 - fil aluminium étamé
 - fil acier cuivré étamé
 - fil acier inox particules nickel

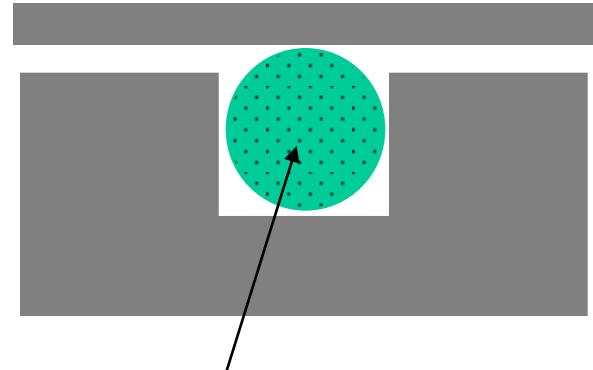
❖ Joints à fils orientés





Joint

- ❖ **Joints en élastomère chargé**
 - particules cuivre argenté
 - particules argent
 - particules nickel
 - particules verre argenté
 - particules carbone
- ❖ **Joints ressorts métalliques**
cuivre au beryllium



Particules conductrices noyés dans un élastomère

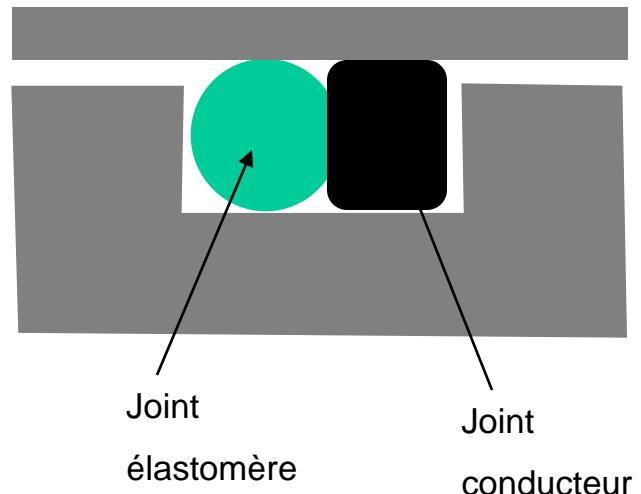


Joint

❖ **Joint bi-matière**

2 fonctions :

- étanchéité aux fluides
élastomère
- étanchéité électromagnétique
tricot métallique
élastomère chargé
joint à fils orientés
ressorts métalliques (rare)





FARADISATION DES BOITIERS

Conception des boîtiers

Résumé :

- ◆ Utiliser des boîtiers conducteurs (métal ou plastique métallisé)
- ◆ Fente ≡ fuite (caractérisée par la plus grande dimension de la fente)
- ◆ Limiter les fuites à proximité des connecteurs
- ◆ Éloigner les cartes et les câbles et des fuites potentielles (fentes, aération, ...)
- ◆ Attention aux déformations mécaniques
- ◆ Attention à la corrosion
- ◆ Attention au vieillissement