

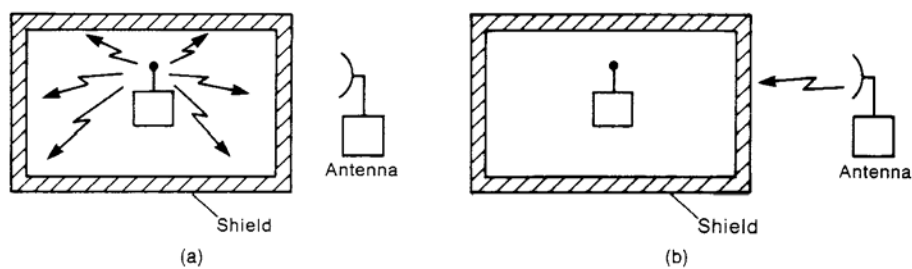
Introduction à la compatibilité électromagnétique (CEM)

5. Blindage

J. Unger – heig-vd – 2006

Définition

- Un blindage est une enveloppe conductrice continue, entourant un circuit
 - Empêche les émissions du circuit de rayonner à l'extérieur (émission rayonnée)
 - Empêche les champs EM de parvenir dans le circuit et d'y créer des perturbations (immunité aux rayonnements)



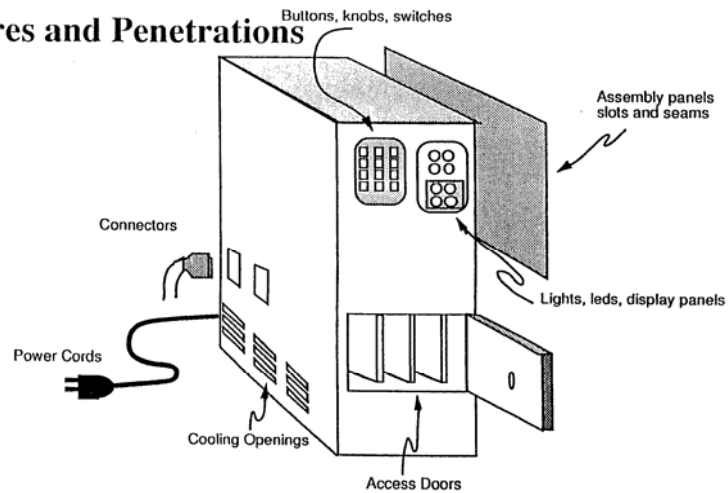
C'est donc le moyen idéal pour éliminer les rayonnements, que ce soit pour respecter les normes d'émission, rendre le circuit insensible (immunité totale), ou encore pour éliminer les auto-perturbations entre les différentes parties d'un système (intégrité des signaux).

Malheureusement, une enveloppe continue, entourant totalement un circuit est impossible à réaliser.

Blindage réel

- Laisse passer une partie des champs
- Toutes les ouvertures dégradent l'effet de protection

Apertures and Penetrations



Un blindage réel ne peut que s'approcher d'un blindage idéal:

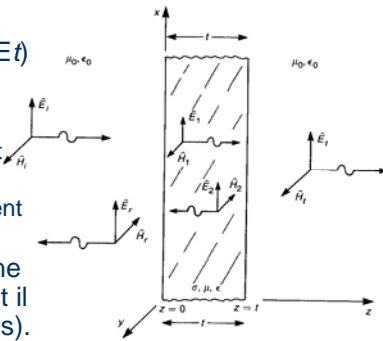
D'une part le matériau du blindage n'a jamais une conduction infinie (ou une résistivité nulle), il laissera donc une partie des champs le traverser.

D'autre part, pour assurer le fonctionnement, il est nécessaire de percer des ouvertures (boutons, affichage, passage de câble, de prévoir des portes et parois démontable pour l'accès aux éléments, ainsi que des ouvertures d'aération, par lesquelles passe une partie importante des champs EM.

Nous verrons plus loin l'effet de ces trous, fentes et passages de câbles, et comment tenter de remédier à leur effet désastreux.

Efficacité d'un blindage - définition

- Rapport entre le champ incident et le champ transmis de l'autre côté *ou*
Rapport entre le champ sans blindage et le champ après introduction du blindage
- $SE = 10 \text{ Log} (P_i/P_t) = 20 \text{ Log}(E_i/E_t)$
 - Champ électrique E : $SE_E = 20 \text{ Log}(E_i/E_t)$
 - Champ magnétique H : $SE_H = 20 \text{ Log}(H_i/H_t)$
 - En champ lointain les deux valeurs sont identiques ($E/H = Z_w = 377\Omega$)
 - En champ proche on utilise généralement la définition pour le champ électrique
 - SE est positif ($E_i > E_t$), il correspond à une « **atténuation d'insertion** » idéalement il tend vers l'infini (pas de champ transmis).



La figure illustre ce qui se passe lorsqu'une onde EM atteint, et traverse une paroi de blindage (supposée infinie), elle n'est utile ici que pour définir les champs incidents (indice i) et transmis (indice t).

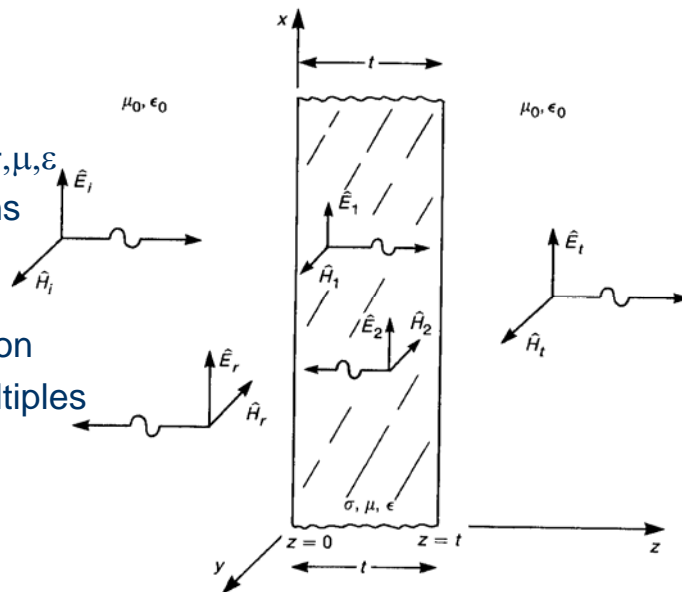
En général la mesure de l'efficacité se fait d'après la seconde définition : mesure(en un point particulier) des champs avec et sans blindage, puis calcul du rapport en dB.

L'efficacité d'un blindage est la combinaison de l'efficacité du matériau du blindage (supposé sans ouverture), et de sa dégradation par la présence des ouvertures. Nous traiterons d'abord l'efficacité du matériau.

Effacité intrinsèque du matériau

$S_i = S_r + S_a + S_m$

- Hypothèses
 - Paroi infinie
 - Epaisseur t
 - Matériau : σ, μ, ϵ
- S_r : Réflexions
 - Entrée
 - Sortie
- S_a : Absorption
- S_m : Réfl. multiples



5 - Blindage

5

La paroi infinie isole complètement la gauche de la droite.

Le matériau est caractérisé par sa conductibilité σ , sa perméabilité μ (en général $\mu = \mu_0$, perméabilité du vide) et sa perméabilité ϵ .

On constate qu'aux changements de milieu (air – matériau puis matériau – air) une partie des champs incidents sont réfléchis en direction de l'émetteur et que seule une partie est transmise dans le nouveau matériau. Le rapport global S_r représente l'effet des réflexions à l'entrée et à la sortie du blindage.

Dans le matériau, l'onde s'atténue par dissipation (pertes par conduction et par hystérèse) si bien qu'elle ne parvient à l'autre face qu'atténuée. Ce facteur est désigné par S_a .

Enfin, l'onde réfléchi à l'interface de sortie, revient (en s'atténuant dans le matériau) vers la face d'entrée où elle subit à nouveau, réflexion et transmission. Si le matériau est mince, on voit que des réflexions multiples entre les deux faces du matériau vont provoquer une légère augmentation du champ transmis, donc S_m sera négatif: le champ transmis est légèrement plus grand que sans les réflexions multiples.

Réflexions : coefficients de transmission

- A l'interface, on passe de l'impédance Z_w à Z_m puis, après traversée, de Z_m à Z_w
- Au passage air - matériau le coefficient de réflexion ρ (rapport entre l'onde réfléchie et l'onde incidente) vaut

$$\rho = \frac{Z_w - Z_m}{Z_w + Z_m}$$

- Le coefficient de transmission, après deux interfaces, se calcule donc :

$$\frac{E_t}{E_i} = \frac{4Z_w Z_m}{(Z_w + Z_m)^2} \cong \frac{4Z_m}{Z_w} \quad \text{Si } Z_m \ll Z_w$$

Que l'on soit à l'interface de deux milieux homogènes (air et matériau du blindage) ou dans un câble de transmission le coefficient de réflexion se calcule à partir des impédances caractéristiques des matériaux considérés. ρ est le rapport entre le champ réfléchi E_r et le champ incident E_i . Le coefficient de transmission ($1 - \rho$) représente alors le rapport entre le champ transmis E_t et le champ incident E_i de part et d'autre de la surface.

Ce qui nous intéresse ici, c'est le rapport entre le champ transmis au champ incident, après 2 interfaces. On fait donc le produit des coefficients de transmission des 2 surfaces successives:

$$(1 - \rho_1) = 1 - (Z_w - Z_m)/(Z_w + Z_m) = 2Z_m/(Z_w + Z_m) \quad \text{et} \quad (1 - \rho_2) = 1 - (Z_m - Z_w)/(Z_w + Z_m) = 2Z_w/(Z_w + Z_m)$$

Pour un câble l'impédance caractéristique est la racine du rapport entre son inductance linéique et sa capacité linéiques (découlant de μ et ε mais également dépendant des dimensions du câble), alors que la 2e impédance à considérer est l'impédance localisée chargeant le câble. Par contre les phénomènes sont identiques.

Réflexions : impédances d'onde

- Dans l'air, Z_w a déjà été défini
 - En champ lointain $Z_w = \eta_0 = 120\pi = 377\Omega$
 - En champ proche haute impédance (dipôle électrique, couplage capacitif) $Z_w = \eta_0 \lambda / (2\pi r)$
 - En champ proche basse impédance (dipôle magnétique, couplage inductif) $Z_w = \eta_0 (2\pi r) / \lambda$
- Dans un matériau quelconque $Z_m = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}}$
 - Isolant $Z_m \cong \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$
 - Conducteur $Z_m \cong \sqrt{\frac{\omega\mu}{\sigma}}$

Si l'impédance d'onde en champ lointain est bien connue, les formules données en champ proche ne sont que de grossières approximations.

Dans un isolant σ est négligeable, et généralement son impédance caractéristique est proche de celle du vide. L'atténuation par réflexion sera donc très faible.

Dans un matériau conducteur, au contraire, σ est prépondérant, abaissant l'impédance du matériau à de très petites valeurs. La conséquence en est une forte atténuation par réflexion.

Caractéristiques relatives au cuivre

- Rappel pour le cuivre

$$\sigma = 5.82 \cdot 10^{-7} \text{ S/m}$$

$$\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$$

$$\varepsilon = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

- Les tables donnent les valeurs relatives au cuivre

METAL	σ_r Relative Conductivity	μ_r Relative Permeability at 150 kHz
Silver	1.05	1
Copper-Annealed	1.00	1
Copper-Hard Drawn	0.97	1
Gold	0.70	1
Aluminum	0.61	1
Magnesium	0.38	1
Zinc	0.29	1
Brass	0.26	1
Cadmium	0.23	1
Nickel	0.20	1
Phosphor-Bronze	0.18	1
Iron	0.17	1,000
Tin	0.15	1
Steel, SAE 1045	0.10	1,000
Beryllium	0.10	1
Lead	0.08	1
Hypernick	0.06	80,000
Monel	0.04	1
Mu-Metal	0.03	80,000
Permalloy	0.03	80,000
Steel, Stainless	0.02	1,000

Sr efficacité par réflexion

- Champ lointain
 - Pente -10 dB/déc
 - $F_{\text{limite}} = c/(2\pi r)$ $r = \text{distance source blindage ; } c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
$$Sr = 168 + 10 \text{Log} \left(\frac{\sigma_r}{\mu_r f} \right)$$
- Champ proche haute impédance (couplage C)
 - Pente -30 dB/déc
$$Sr = 322 + 10 \text{Log} \left(\frac{\sigma_r}{\mu_r f^3 r^2} \right)$$
- Champ proche basse impédance (couplage L)
 - Pente +10 dB/déc
$$Sr = 14.6 + 10 \text{Log} \left(\frac{\sigma_r f r^2}{\mu_r} \right)$$

On remplace Z_w et Z_m dans l'expression de l'atténuation par réflexion $S_r = 20 \text{Log}(Z_w/(4Z_m))$, et on met en évidence les termes constants (valeurs du cuivre y compris):

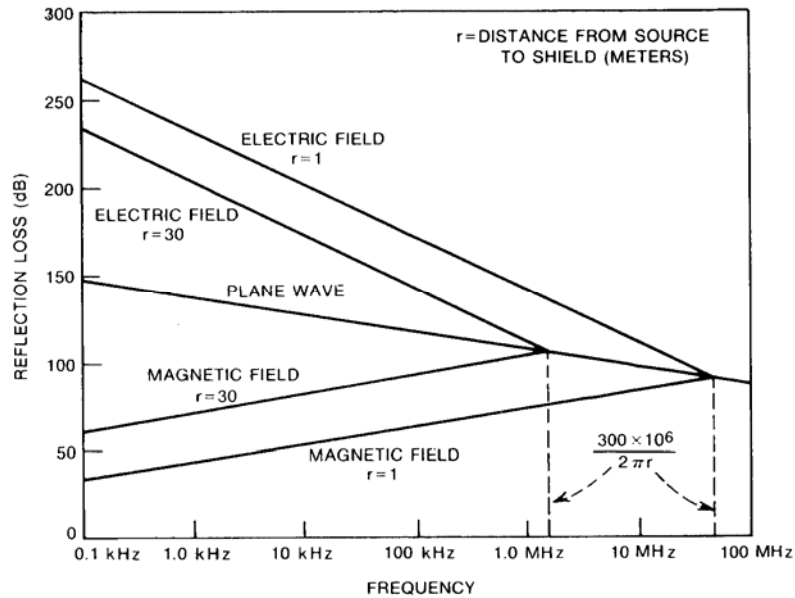
Champ lointain $Z_w = Z_o = 377$; $Z_m = \sqrt{(\omega\mu/\varepsilon)}$

Champ proche haute impédance $Z_w = Z_o \lambda/(2\pi r)$ avec $\lambda = c/f = 3E8/f$

Champ proche basse impédance $Z_w = Z_o (2\pi r)/\lambda$

Remarquons que dans le dernier cas, notre hypothèse $Z_m \ll Z_w$ n'est pas toujours vérifiée.

Sr pour du cuivre d = 1m ou 30m



Plus la source est proche, plus l'intersection de 3 droites se fait à haute fréquence.

En champ lointain l'efficacité par réflexion diminue de 10 dB/décade.

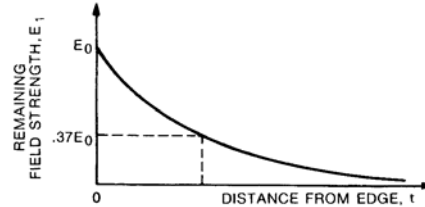
Si la source est à haute impédance, la diminution est de 30 dB/décade, mais l'efficacité reste très importante. En basse fréquence l'efficacité est quasi-totale. Ceci confirme notre raisonnement de protection contre le couplage capacitif: en basse fréquence, l'enveloppe conductrice du blindage devient une équipotentielle. Relier le blindage au point commun, revient à éliminer tout couplage.

Si la source est à basse impédance, on constate que l'efficacité tend vers 0 en basse fréquence, confirmant nos affirmations que le blindage ne protège pas contre un couplage inductif (en BF).

Remarquons que la droite devrait traverser le 0 dB en très basse fréquence. Ceci n'est que la conséquence du fait que notre hypothèse $Z_m \ll Z_w$ n'est plus vérifiée. En pratique, nous nous contenterons de considérer que le blindage n'a plus d'effet (S_r considéré comme nul).

Absorption

- Dissipation de l'énergie par hystérèse et par conduction : l'amplitude des champs décroît exponentiellement avec la profondeur.
- Profondeur de pénétration = distance à laquelle l'amplitude est divisée par e
- Pour un matériau d'épaisseur t le facteur d'atténuation est



$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} = \frac{0.066}{\sqrt{f \mu_r \sigma_r}}$$

$$Sa = 132 \cdot t \cdot \sqrt{\mu_r \sigma_r f} \quad [dB]$$

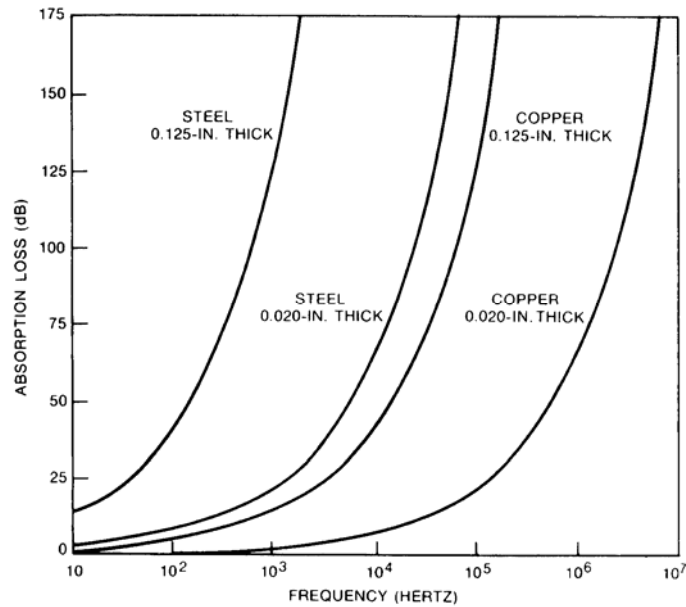
La profondeur de pénétration est également liée à l'effet pelliculaire: en haute fréquence le courant dans un conducteur tend à se concentrer sous la surface de celui-ci.

La résistance HF d'un conducteur cylindrique se calcule, en première approximation, par la résistance DC du cylindre de même diamètre que le fil et d'épaisseur égale à la profondeur de pénétration δ . Soit r_w le rayon du fil de longueur l , en DC on aura $R_{DC} = l / (\sigma \pi (r_w)^2)$, alors qu'en HF : $R_{HF} = l / (\sigma 2\pi r_w \delta)$; elle augmente avec \sqrt{f} dès que $r_w > 2 \delta$

De même l'inductance propre du fil est influencée par δ : $L_{BF} = \mu_0 l / (8\pi)$ et $L_{HF} = L_{BF} 2\delta / r_w$ qui décroît avec \sqrt{f} dès que $r_w > 2 \delta$

On constate alors que dès que l'épaisseur du matériau est grande vis-à-vis de δ , l'atténuation par absorption devient très grande. Dans la partie supérieure du domaine de fréquence CEM, des épaisseurs d'une dizaine de μ m suffisent à protéger le système. Un dépôt de surface conducteur suffit.

Sa : comparaison cu et ac



Une épaisseur de 0.125 inch correspond à environ 3 mm

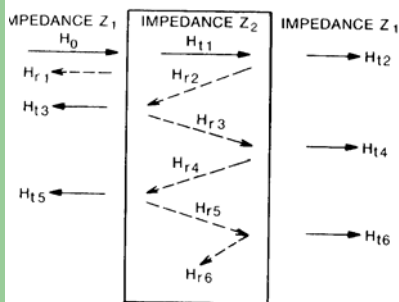
Une épaisseur de 0.02 inch correspond à environ 0.5mm

On constate que déjà pour le cuivre une épaisseur de 0.5 mm assure une bonne protection à partir de quelques MHz.

Avec un boîtier en ac, la diminution de conductivité σ est largement compensée par l'augmentation de perméabilité μ , et une épaisseur de 0.5 mm protège déjà mieux qu'une épaisseur de 3 mm en cuivre !!

Réflexions multiples

- Si le matériau est plus mince que la profondeur de pénétration δ , alors les réflexions multiples contribuent à une légère augmentation du champ transmis (S_m est négatif):



$$S_m = 20 \text{Log} \left(1 - e^{-2t/\delta} \right) \quad [dB]$$

5 - Blindage

13

L'atténuation sur un aller-retour dans le matériau est $x = \exp(-2t/\delta) < 1$.

La somme des composantes successives à chaque aller-retour vaut Tot
 $= \lim_{i=0..∞} \sum x^i = 1/(1-x)$ (... si $x < 1$)

S_m représente le rapport entre la composante initiale (premier trajet) et la somme des composante (Tot), exprimée en dB

Efficacité intrinsèque

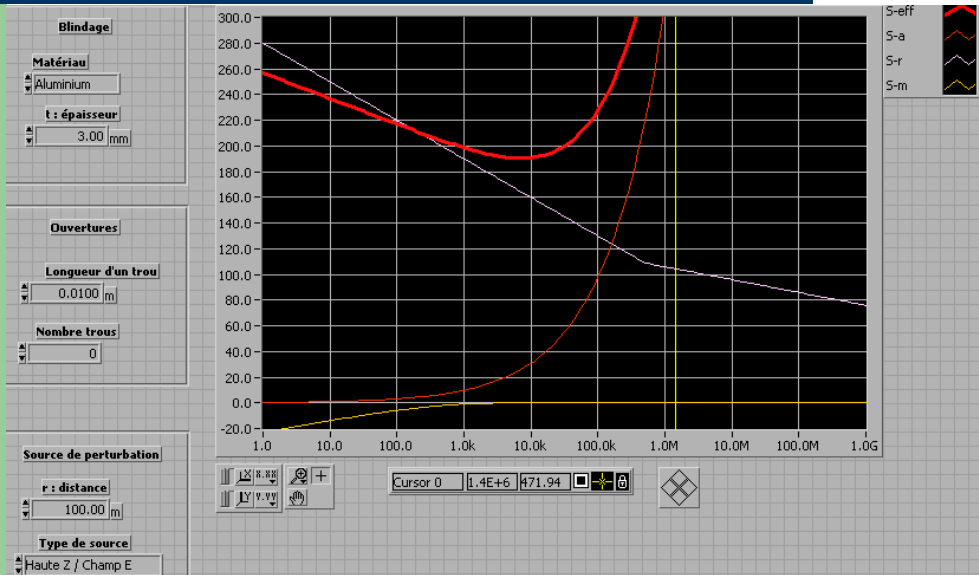
- $S_i = S_r + S_a + S_m$
 - S_r ne peut devenir négatif (les hypothèses ne sont plus vérifiées, cas du champ proche basse impédance)
 - L'effet de S_m n'est visible qu'en basse fréquence
 - A partir de quelques 10 kHz c'est l'absorption qui devient prépondérante
 - En HF (10Mhz – 1GHz) une mince couche suffit, mais tout peut être dégradé par les trous



Blindage Alu 3mm, source E r = 100

5 - Blindage

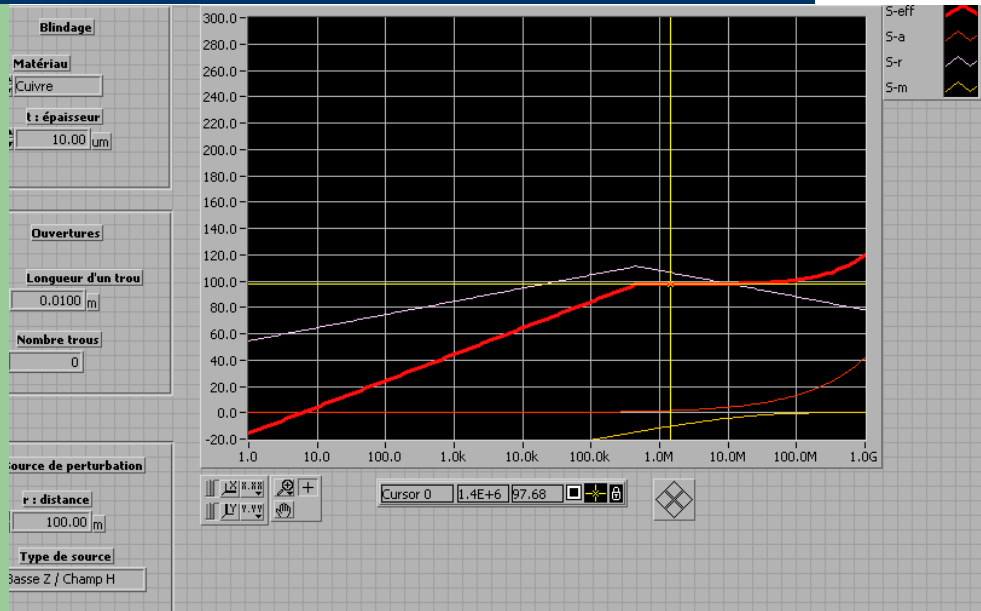
15



Couche Cu 10 μ m source H r = 100

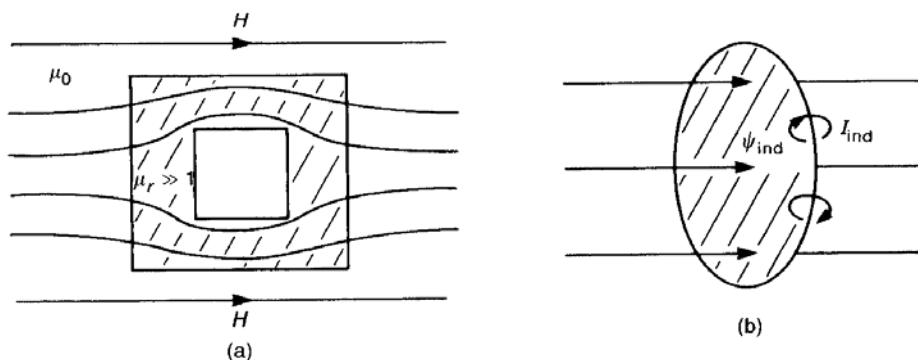
5 - Blindage

16



Réduction du champ magnétique en basse fréquence

- a) Détourner les lignes de champ, avec un matériau haute perméabilité
- b) Annuler le flux par une boucle en court-circuit

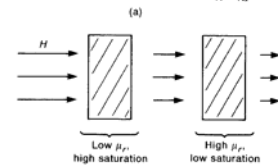
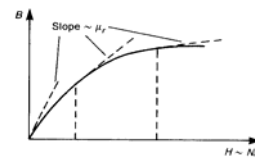
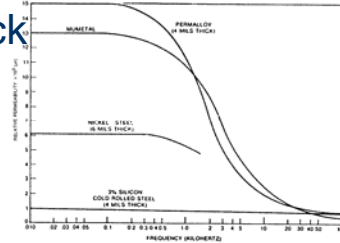


En BF l'efficacité du matériau devient très faible, il faut donc se protéger par d'autres méthodes.

- a) un matériaux à haute perméabilité permet de détourner les lignes de champ, si bien qu'il n'y a presque plus de flux magnétique intercepté par le circuit victime. Dans ce cas on est très vite confronté aux problèmes de saturation magnétique dans le matériaux, ayant pour effet de diminuer la perméabilité apparente, donc l'efficacité de la méthode. De plus ces matériaux sont sensibles aux déformation: plier une tôle à haute perméabilité change ses propriétés et diminue fortement la perméabilité effective de l'enveloppe !!
- b) Une boucle en court-circuit, soumise à variation de flux sera parcourue par un courant induit. Celui-ci génère un champ magnétique s'opposant à celui qui a créé le courant induit. Dans la surface interne de la boucle, le champ magnétique et le flux ont donc tendance à s'annuler. On peut donc chercher à protéger un circuit en plaçant des boucles en court-circuit de par et d'autre de la victime, perpendiculairement aux lignes de champ magnétique perturbant. De même on peut diminuer le rayonnement d'une source de champ magnétique par ce principe.

Matériaux à haute perméabilité

- Mu-métal, Permalloy, Hypernick
- μ_r diminue avec la fréquence
- μ_r diminue avec les grand H (saturation)
 - Nécessité d'utiliser plusieurs couches :
 - grand μ_r , vite saturé
 - faible μ_r , difficilement saturé



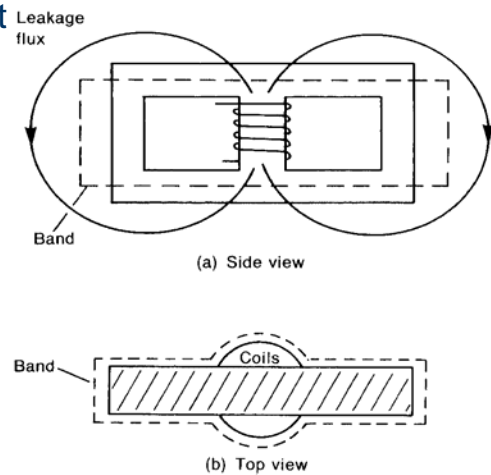
Les propriétés des matériaux hautement perméables sont illustrées ici:

Le fait que la perméabilité diminue avec la fréquence n'est pas très grave: ces fréquences l'efficacité intrinsèque du matériaux est suffisante, et l'on n'a plus besoin de guider et concentrer les lignes de champ dans l'enveloppe.

Par contre l'effet de saturation magnétique peut conduire à des surprises désagréables. L'utilisation de plusieurs couches permet d'assurer une perméabilité minimum, même en présence de grands champs.

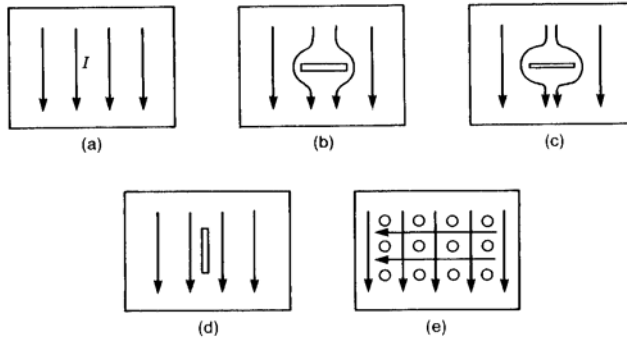
Boucle en court-circuit

- Une bande conductrice est enroulée autour de la source de champ, de manière à intercepter un maximum de flux.
- Le courant induit génère un champ de signe opposé, annulant à l'extérieur les champs rayonnés
 - La présence d'un entrefer peut exiger une 2e boucle orthogonale



Effet des trous

- L'efficacité intrinsèque est généralement complètement dégradée par les trous et fentes
 - Leur présence déforme le trajet des courants induits, si bien qu'un rayonnement existe, dépendant de la longueur du trou et de leur direction.



Les images a) à d) illustre la déformation de courant verticaux par différentes fentes.

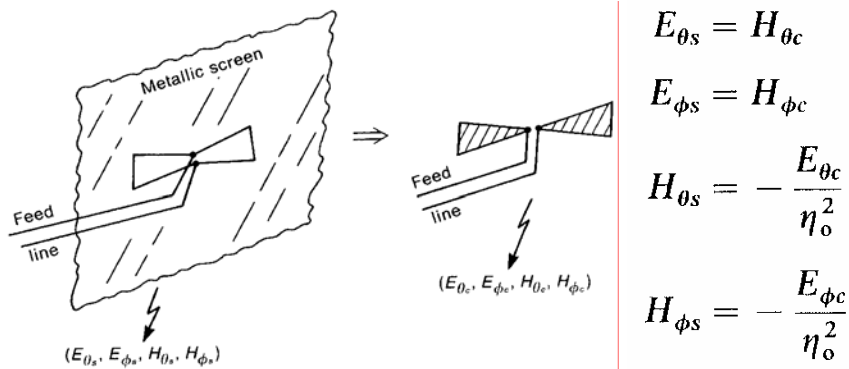
En b) et c) la déformation est quasi la même, presque indépendante de la largeur de la fente.

En d) la fente parallèle aux lignes de courant ne provoque presque pas de déformation.

De même en e) un réseau de petits trous déformera beaucoup moins les lignes de courant (quelque soit leur direction), qu'une ouverture unique de même surface totale.

L'effet de Babinet

- Si l'on remplace un trou dans un écran, excité par une ligne de transmission, par sa structure complémentaire, les rayonnements obtenus sont équivalents.



Cet effet nous permet d'analyser l'influence des trous à partir du rayonnement d'antennes de même forme que le trou.

Ouvertures du blindage

- Le trou ou la fente rayonne donc comme une antenne de mêmes dimensions
- Ce rayonnement est maximum quand la longueur de l'antenne est $D = \lambda/2$
 - D est la longueur maximum de l'ouverture
- Norton indique alors une efficacité de 0 dB. Pour $D < \lambda/2$, il calcule l'efficacité du blindage

$$S_o = 20 \text{Log} \left(\frac{\lambda}{2D} \right)$$

- Indice S_o pour « Ouverture »

On considère ainsi qu'une ouverture dont la plus grande dimension est égale à une demi longueur d'onde, transmet l'intégralité du champ incident. Le blindage ne sert plus à rien !!!

Ce n'est que lorsque la dimension de l'ouverture est faible vis-à-vis de la longueur d'onde que le champ transmis est atténué.

Remarquons que le critère est donné par la plus grande des dimensions de l'ouverture, indépendamment de la largeur de l'ouverture. Par conséquent les fentes de jointure (couvercle, faces avant juxtaposées) sont les plus dangereuses.

Réseau d'ouvertures

- Si un réseau de N fentes est à un pas $< \lambda/2$, alors il y a augmentation proportionnelle à \sqrt{N}

$$S_o = 20 \text{Log} \left(\frac{\lambda}{2D} \right) - 10 \text{Log}(N)$$

- En résumé : L'efficacité globale S_{eff} (matériau avec trous) est donnée par le minimum de l'efficacité intrinsèque et de celle due aux trous

$$S_{\text{eff}} = \min \{ S_i ; S_o \}$$

En présence d'un réseau d'ouvertures, si le pas dans le réseau est inférieur à $\lambda/2$, alors il n'y a plus cumulation des effets de chaque ouverture. Si les ouvertures sont de dimension assez faible on conserve une certaine efficacité.

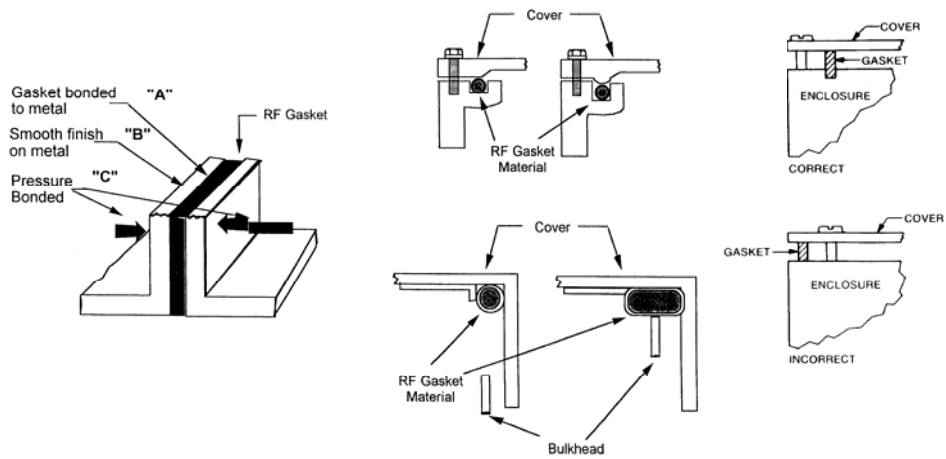
En basse fréquence (grandes longueurs d'onde) on rejoint l'efficacité intrinsèque du matériau constituant le blindage. C'est ce qu'exprime la 2^e formule

Moyens de protection

- Réduire la longueur des ouvertures
 - Joints EMI, comprimés (« Gasket »)
 - Doigts de contact (bronze-béryllium)
 - Réparations avec feuille Cu ou Alu autocollante
- Allonger le chemin de pénétration
 - Tôles recouvrantes,
 - Tube guide d'onde (aérations)
- Matériaux spéciaux
 - Verre conducteur (écrans d'affichage)
 - Plastic à fibre conductrices
 - Métallisation de surface, peinture conductrice

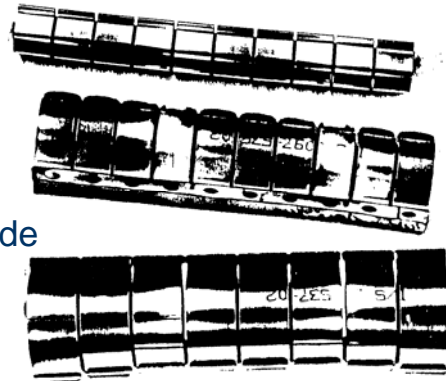
Jointes EMI

- Mousse conductrice ou enrobée d'un tricot conducteur
 - doit assurer le contact à travers l'ouverture, par pression sur des surfaces nues



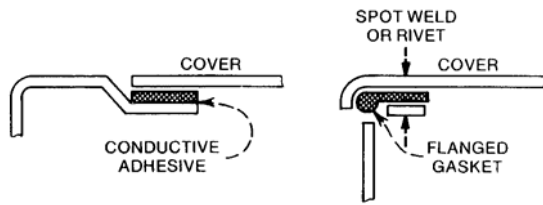
Réseau de doigts de contact

- Lorsqu'un accès fréquent doit être garanti (porte)
- Exige un frottement pour assurer un bon contact
- Risque de rupture ou de pliage (= *ouverture*)
- Doit rester propre (exempt de graisse)
- !! **Entretien régulier** !!

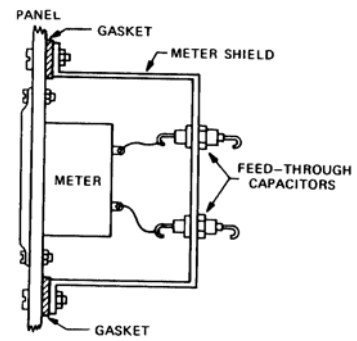


Allongement du trajet

- Tôles avec recouvrement (+ joint EMI)

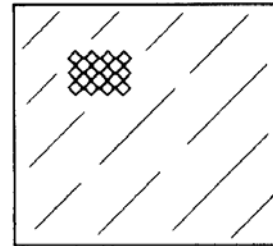


- Blindage interne

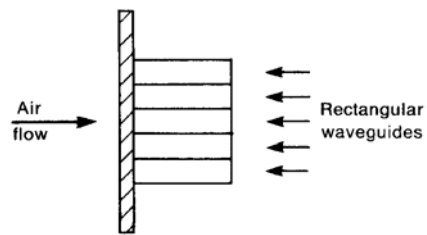


Guides d'onde

- Guide d'onde en dessous de f_c
 - Mode TE₁₀
 - section carrée de côté d
 - Longueur l
 - $f_c = c/(2d)$
 - En dessous de f_c l'atténuation vaut
 - $S = 27.2 (l/d)$
- Aération en nid d'abeille



(a) Front view



(b) Side view

En augmentant la longueur du trajet dans l'ouverture, on a un effet de guide d'onde permettant de prédire une atténuation en basse fréquence.

Cette solution s'emploie pour les ouvertures d'aération.