

## Chapitre 4

### Techniques de protection en CEM et réduction des perturbations EM

## 4.1 Introduction

En vue de prendre en considération l'amélioration de la CEM. Il est intéressant de noter que des techniques d'amélioration de la compatibilité électromagnétique (types d'actions) sont utilisées pour assurer l'amélioration en CEM comme:

- **La diminution des sources externes:** pour réduire l'émission électromagnétique, nous pouvons réduire les perturbations dues aux décharges électrostatiques en augmentant l'humidité des locaux, en utilisant un sol antistatique.
- **L'augmentation de la susceptibilité :** pour augmenter l'immunité aux interférences électromagnétiques système électronique peut être durci en choisissant les composants les moins sensibles aux perturbations (différentes familles technologiques : TTL, CMOS).
- **La réduction des couplages :** pour atténuer les chemins de couplage entre agresseurs et victimes; pour une source externe déterminée, le niveau de perturbations reçues par un appareillage dépend des couplages, c'est à dire du chemin de propagation entre la source et la victime.

Nous pouvons distinguer deux méthodes, une première famille consiste à agir directement sur l'origine des perturbations, et la deuxième consiste à modifier le chemin de propagation des perturbations.

Nous présentons dans ce chapitre les différentes les techniques d'amélioration et de protection les plus répandues en CEM. En effet, la majorité des techniques utilisées sont basées principalement sur, les stratégies orientées CEM de conception des circuits (cartes, systèmes électriques/électroniques), l'ajout de composants de filtrage (découplage, blindage) et la validation par des moyens de mesures et de simulations.

## 4.2 Considérations générales

La problématique de la CEM apparaît uniquement lorsque ces trois éléments : source, couplage et victime sont réunis comme montre la figure 4.3 [1, 12, 15, 18,39].

Comme la réduction des perturbations n'est pas toujours possible. En effet, on ne peut pas agir sur des appareils extérieurs car les coûts d'améliorations sont très élevés, ce qui signifie qu'il n'y a aucun rendement, de la même façon que pour cotée victimes il n'est pas toujours possible de distinguer les signaux utiles des perturbations. Il est donc nécessaire d'insister sur le fait de réduire le couplage en agissant sur le couplage (**perturbateur-victime**).

Il ya en général 4 moyens possible [39,41]:

- Disposition et connexion adéquates des câbles et des composants
- Bonne interconnexion des masses et mise à terre
- Blindage
- Suppression des pointes de tension et le filtrage.

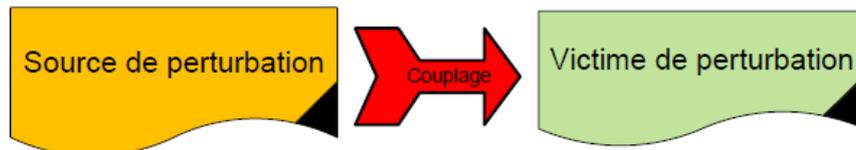


Figure 4.3: Schéma des éléments déterminants de la CEM.

### 4.3 Définitions

a) **La terre:** Connexion liée à la terre, sol de notre planète pris pour certaines applications électriques comme référence conventionnelle de potentiel (0V) et dont la conductivité électrique (très variable) véhicule naturellement ou est utilisée par l'homme pour véhiculer certains courants électriques, dont le symbole est:



**Remarque:** Tout courant circulant dans la terre y est entré et en ressortira pour retourner à sa source.

Parmi les applications de raccordement d'installations à la terre [28, 29,39]:

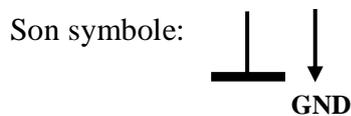
- Répartition dans (l'électrode) sol des courants de foudre directs (décharge électrostatique disruptive atmosphère sol).
- Circulation dans le sol des courants induits par la foudre entre deux points d'une ligne de distribution aérienne.
- En schéma de régime de neutre la portion de terre comprise entre la prise de terre du réseau de distribution et celle de l'installation fait circuler les (faibles) courants de fuite ou de défaut produits par l'installation.
- Les masses des installations sont également raccordées à la terre (équipotentialité terre/sols par rapport aux masses et structures métalliques) pour assurer la protection des personnes (et animaux) contre les risques électriques liés aux contacts indirects.

b) **Les masses:** C'est la carcasse métallique conductrice du système, toute partie conductrice accessible au toucher d'un appareil, équipement ou installation qui n'est pas sous tension en service normal, mais peut le devenir en cas de défaut. Le symbole est comme:

**Exemples de masses :**

- structure métallique du bâtiment (charpente, tuyauterie ...), bâtis de machines,
- armoires métalliques, plaques de fond d'armoire non peintes,
- goulottes métalliques,
- carcasse de transformateur, panier d'automate ...,
- les fils vert - jaune (PE - PEN) de liaison à la terre.

**c) Le commun :** Le référence 0 volt d'un circuit (exemple amplificateur), clairement distinct de la masse dans les circuits flottants c'est-à-dire sans liaison avec la terre, souvent désigné à tort par la masse lorsqu'il est relié à la terre. En CEM, le commun et la masse d'un circuit doivent être réalisés séparément, même s'ils sont reliés en un point

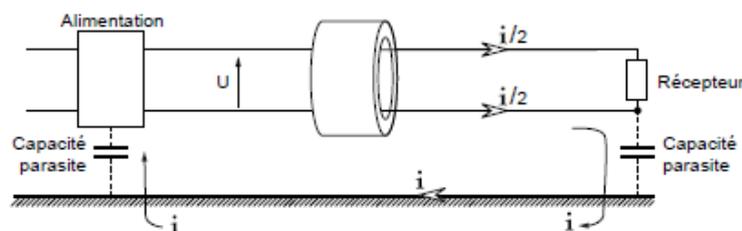


**d) Les ferrites:** Ce sont des filtres de mode commun (figure 4.1) en haute fréquence (HF).

Les ferrites sont constituées de matériaux à forte perméabilité magnétique ( $\mu_r$ ).

La ferrite utilise deux principes :

- ✓ l'inductance de mode commun
- ✓ l'absorption par pertes joules (échauffement) induites des perturbations (HF) de mode commun.



**Figure4.1:** Courant perturbateur en mode commun.

Ces deux principes aboutissent à une impédance de mode commun dont l'efficacité dépend de son rapport en regard de l'impédance du circuit à protéger.

## 4.4 Disposition des composants et du câblage

Le niveau de compatibilité électromagnétique (CEM) dans un équipement est lié aux couplages entre les circuits, ces couplages étant eux-mêmes directement fonction des

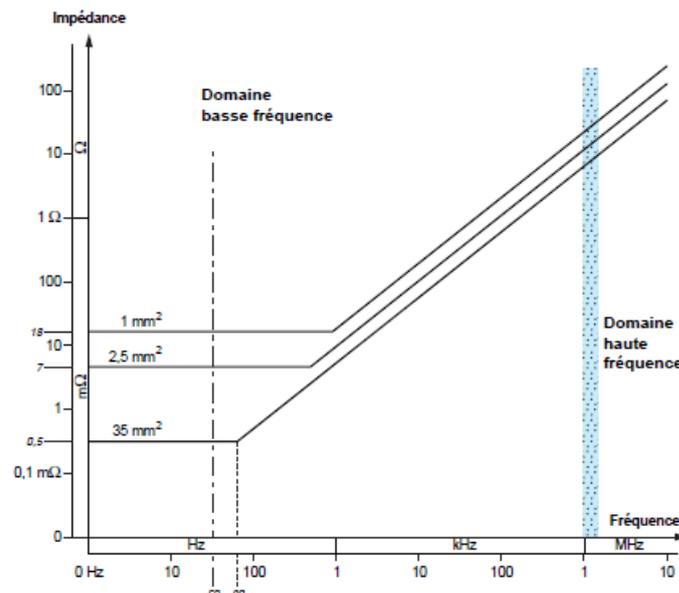
impédances entre ces circuits. Les conducteurs utilisés et leur mise en œuvre sont donc prépondérants dans le comportement électromagnétique de l'installation.

#### 4.4.1 Etude de la disposition du câblage

Au cours de cette étape, on est fréquemment amené à remettre en cause, dans le détail, les premières dispositions du placement. Une bonne disposition du câblage est fondée sur quelques principes et beaucoup de réflexion [7, 39,40]:

- 1) Eviter les tronçons communs entre les signaux de nature différente, ceci pour éviter le couplage par impédance commune.
- 2) Raccourcir le câblage, en se souciant en premier lieu des signaux qui doivent s'éviter : ceux qui sont les plus à même de perturber, vis à vis des plus sensibles aux perturbations.
- 3) Espacer les conducteurs ou les pistes qui concernent ces signaux et au besoin intercaler des zones cuivrées réunies à la masse (pour éviter le couplage capacitif).
- 4) Réduire autant que possible la surface des circuits en boucle, en particulier pour les courants les plus élevés (susceptibles de générer du champ magnétique H) et pour les signaux les plus sensibles.

Nous constatons, comme le montre la figure 4.2 à 100 kHz 2 câbles de 1 mm<sup>2</sup> en parallèle sont moins impédants qu'un câble de 35 mm<sup>2</sup> d'où l'intérêt du maillage



**Figure 4.2:** Valeurs caractéristiques de l'impédance (d'un conducteur électrique de longueur L = 1 m).

#### 4.4.2 Comportement en basse fréquence (BF)

En basse fréquence (BF), le courant circule au sein du conducteur alors qu'en haute fréquence (HF) l'effet de peau est prépondérant. La circulation du courant s'effectue à la surface du conducteur. En basse fréquence (BF) (50 Hz - 60 Hz) la section du fil est prépondérante

#### 4.4.3 Comportement en haute fréquence (HF)

En haute fréquence (HF) ( $F > 1$  à 5 MHz)

- ✓ le périmètre de la section du conducteur est prépondérant (effet de peau)
- ✓ la section du conducteur est peu significative
- ✓ la longueur du câble est déterminante

#### 4.4.4 Effets réducteurs et câbles électriques

Il est important de mentionner que les câbles constituent le point faible d'un système du point de vue CEM. Il est donc nécessaire de réduire les émissions ou améliorer l'immunité à toutes les fréquences.

Pour réduire les perturbations collectés par les câbles il importe de réduire les couplages en mode commun. Il est donc primordial de maîtriser des effets réducteurs car c'est une des principales clés de la CEM: efficace et peu coûteuse.

Il y a trois couplages en mode commun en HF [39]:

- a) Couplage par impédance commune que l'on limite par le maillage des masses.
- b) Le couplage champ à câble.
- c) La diaphonie entre câbles.

Toute structure conductrice proche des câbles apporte les deux bénéfices suivants [39]:

- ✓ Un meilleur maillage des masses. Goulottes métalliques, structures métalliques etc. Le maillage des masses est efficace dès le continu ( $f=0$ ), n'est pas un effet réducteur car il n'agit pas comme un blindage. La réduction de l'impédance en mode commun est indépendante de la distance câble et masse.
- ✓ Un effet réducteur proprement dit. Cet effet se cumule avec le précédent. On l'obtient par la connexion de la masse des équipements aux structures conductrices parallèles et proches des câbles. On bénéficie d'un effet de surblindage qui contrairement au

maillage des masses reste efficace en HF. C'est un effet réducteur presque gratuit qui agit par mutuelle inductance.

#### 4.4.5 Définition d'un effet réducteur

L'effet réducteur d'une structure de masses se définit comme l'amplitude de la perturbation en mode commun (tension ou courant) supporté par un câble installé loin des masses par rapport à l'amplitude sur le même câble installé contre la structure conductrice. Par exemple, un effet réducteur d'un facteur 5 signifie qu'un câble qui reçoit une perturbation en MC de 10V (loin des masses) ne reçoit plus qu'une perturbation en MC de 2V dans le cas où le câblage est proche du réseau de masses.

Finalement, l'effet réducteur peut être modélisé par une inductance mutuelle  $M$  entre le câble victime et le plan de masse.

En plus de l'effet réducteur s'ajoute l'effet de maillage des masses. Une cablette de terre améliore l'équipotentielle.

### 4.5 Blindage

**a) Blindage :** synonyme d'écran, matériau élaboré et destiné à réduire l'intensité de rayonnement pénétrant dans une région.

L'armure ou l'écran d'un câble, qu'il soit destiné au transport d'énergie ou d'informations, peuvent constituer des blindages.

Le blindage électromagnétique a pour but de protéger des installations électroniques (ou électriques) contre les effets redoutables de certains couplages électromagnétiques, d'où cette technique de protection reste valable uniquement pour la protection contre les perturbations rayonnées [39].

**b) Ecran :** dispositif utilisé pour réduire la pénétration d'un champ dans une région déterminée.

Plusieurs fonctions sont remplies par cet élément [27, 28, 39]:

- ✓ Créer une surface équipotentielle autour de l'isolant,
- ✓ Prévenir les effets des champs électriques externes et internes,
- ✓ Assurer l'écoulement du courant capacitif ainsi que du courant de défaut terre (court-circuit homopolaire),

- ✓ Assurer la protection des personnes et du matériel en cas de perforation. Pour cela il est généralement métallique et continu (tube de plomb, nappe ou tresse de fils, ou rubans posés en hélice).

Pour les câbles véhicules d'informations, l'écran, plus souvent appelé blindage, est constitué de rubans ou nappes de fils, en cuivre ou en aluminium, enroulés pour réaliser un blindage contre les influences électriques et magnétiques.

Il peut être collectif, pour l'ensemble des conducteurs composant le câble, lorsque les influences perturbatrices sont extérieures.

Il peut être individuel, pour un certain nombre de conducteurs du câble, afin de les protéger des influences des autres conducteurs de ce même câble.

**c) Gaine :** enveloppe ayant pour rôle d'assurer l'étanchéité du câble.

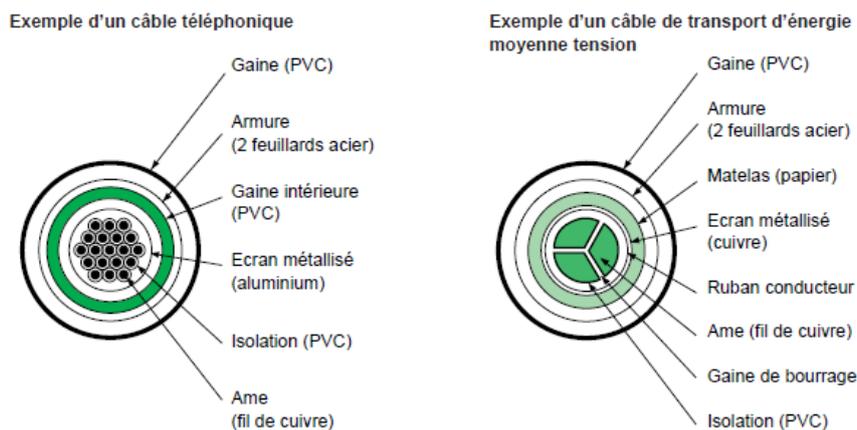


Figure 4.3: Exemple des structures réalisées par blindage [9, 20,21].

On distingue : le blindage magnétique et le blindage amagnétique.

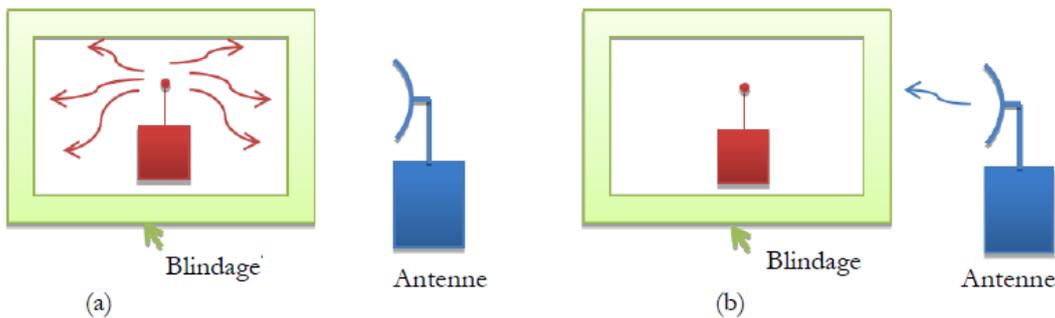
**1) Blindage magnétique :** il est constitué d'un matériau capable d'offrir un chemin de réluctance relativement faible aux lignes de forces issues d'une source de champ magnétique (champ H), et d'en préserver les zones à protéger. Cette technique peut par exemple protéger le tube d'un oscilloscope de l'influence d'un transformateur d'alimentation. En basse fréquence, la protection requiert parfois un matériau noble et coûteux comme le mumétal.

**2) Blindage amagnétique :** il est constitué d'un matériau bon conducteur, cuivre ou aluminium. Il agit de plusieurs manières [7,39]:

- Vis à vis des champs électriques (champs E) à la manière d'une cage de Faraday. Il se comporte comme un écran électrostatique et évite le couplage capacitif entre les conducteurs situés de part et d'autre.

Selon l'application et l'environnement visés, on peut utiliser des techniques de blindage pour :

- Atténuer le champ électromagnétique émis par un appareil afin de le rendre conforme aux normes d'émission rayonnée, comme indiqué dans la figure 4.4 (a).
- Atténuer le champ électromagnétique ambiant reçu par les circuits internes de l'appareil, pour le rendre conforme aux normes d'immunité rayonnée, comme montre la figure 4.4 (b).



**Figure 4.4:** Représentation différents types de blindage (a) Empêche les émissions du circuit de rayonner à l'extérieur (b) Empêche les champs EM de parvenir dans le circuit

Le blindage 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).

### 4.5.1 Efficacité d'un blindage

L'efficacité de blindage se définit comme: le rapport entre le champ incident et le champ transmis de l'autre coté ou rapport entre le champ sans blindage et le champ après introduction du blindage. Elle se définit par convention en décibels :

$$\text{Champ électrique E : } SE_E = 20 \log \left( \frac{E_i}{E_t} \right) \quad (4.1)$$

$$\text{Champ magnétique H : } SE_H = 20 \log \left( \frac{H_i}{H_t} \right) \quad (4.2)$$

En champ lointain les deux valeurs sont identiques ( $\frac{E}{H} = Z_c = 377\Omega$ ).

En champ proche on utilise généralement la définition pour le champ électrique.

L'efficacité de blindage (SE) est positif ( $E_i > E_t$ ), il correspond à une (atténuation d'insertion) idéalement il tend vers l'infini (pas de champ transmis).

Cette définition montre 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 (la matière utilisée, son épaisseur, sa géométrie, des ouvertures pratiquées dans ce blindage comme les portes, passages de câbles, zones d'affichage, boutons de commande.

Nous traiterons d'abord l'efficacité du matériau.

#### **4.5.2 Efficacité intrinsèque du matériau**

L'efficacité intrinsèque est déterminée par trois termes [7, 9, 37]: l'atténuation par réflexion à l'entrée du blindage, l'absorption dans l'épaisseur du blindage et enfin l'effet des réflexions multiples engendrées par la réflexion à la sortie du blindage.

Comme montre la figure 4.5

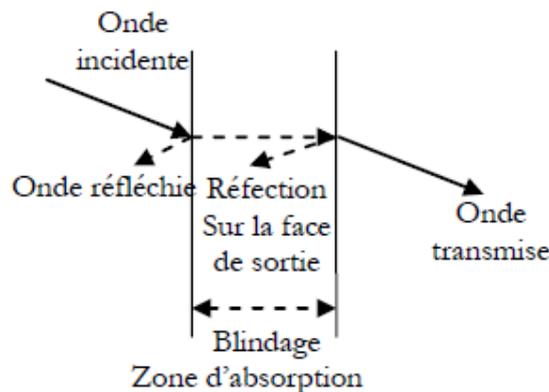
$$S = S_r + S_a + S_m [db] \tag{4.3}$$

Avec:  $S$  : L'efficacité intrinsèque

$S_r$  : L'atténuation par réflexion

$S_a$  : L'absorption dans l'épaisseur du blindage

$S_m$  : La réflexion multiple



**Figure4.5:** Absorption, réflexion et transmission de perturbation dans blindage.

Le matériau est caractérisé par sa conductibilité  $\sigma$ , sa perméabilité  $\mu$  (en général  $\mu = \mu_0$ , perméabilité du vide) et sa permittivité  $\varepsilon$ .

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 réfléchie 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.

Nous pouvons conclure que si nous souhaitons avoir une efficacité de blindage élevée, il faut utiliser un matériau magnétique qui a une perméabilité relative élevée, ce qui est malheureusement limité en fréquence et également augmenter suffisamment l'épaisseur du matériau magnétique pour pouvoir bien canaliser les lignes de champs.

### 4.5.3 Réflexions coefficients de transmission

A l'interface, lorsqu'une onde passe d'un milieu de l'impédance  $Z_w$  à un milieu de l'impédance  $Z_m$  puis, après traversée, du milieu ( $Z_m$ ) au milieu ( $Z_w$ )

Au passage air - matériau le coefficient de réflexion  $\rho$  (rapport entre l'onde réfléchie et l'onde incidente) vaut:

$$\rho = \frac{Z_w - Z_m}{Z_w + Z_m} \quad (4.4)$$

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

$$\frac{E_t}{E_i} = \frac{4Z_w Z_m}{(Z_w + Z_m)^2} \cong \frac{4Z_m}{Z_w} \quad \text{Si } Z_m \ll Z_w \quad (4.5)$$

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.

$\rho$  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 deux interfaces. On fait donc le produit des coefficients de transmission des deux surfaces successives:

$$\begin{aligned} (1-\rho_1) &= 1 - \frac{Z_w - Z_m}{Z_w + Z_m} = 2 \frac{Z_m}{Z_w + Z_m} \\ (1-\rho_2) &= 1 - \frac{Z_m - Z_w}{Z_w + Z_m} = 2 \frac{Z_w}{Z_w + Z_m} \end{aligned} \quad (4.6)$$

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

#### 4.5.4 Réflexions impédances d'onde

Dans l'air,  $Z_w$  a déjà été défini comme:

✓ En champ lointain

$$Z_w = \eta_0 = 120\pi = 377\Omega \quad (4.7)$$

✓ En champ proche haute impédance (dipôle électrique, couplage capacitif)

$$Z_w = \eta_0 \cdot \frac{\lambda}{2\pi \cdot r} \quad (4.8)$$

✓ En champ proche basse impédance (dipôle magnétique, couplage inductif)

$$Z_w = \eta_0 \cdot \frac{2\pi \cdot r}{\lambda} \quad (4.9)$$

Dans un matériau quelconque  $Z_w$  est:

$$Z_m = \sqrt{j\omega\mu/\sigma + j\omega\varepsilon} \quad (4.10)$$

• Pour un matériau isolant:  $Z_m \cong \sqrt{\mu/\varepsilon}$

- Pour matériau conducteur:  $Z_m \cong \sqrt{\omega\mu/\sigma}$

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  $\sigma$  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,  $\sigma$  est prépondérant, abaissant l'impédance du matériau à de très petites valeurs.

La conséquence une forte atténuation par réflexion.

#### 4.5.5 Matériaux utilisés pour le blindage

Nous avons en effet constaté, que la plupart des structures de blindage sont fabriquées par des matériaux standards (non magnétique) et conducteurs ou par des matériaux ferromagnétiques, qui sont souvent utilisés pour leurs propriétés mécaniques plutôt que leur comportement ferromagnétique.

D'ailleurs, il est remarquable que pour la plupart des matériaux ferromagnétiques, la perméabilité magnétique diminue avec la fréquence, généralement pour des valeurs de fréquences dépassant quelques dizaines de kilohertz.

Le tableau 4.1 [7, 9, 39] donne les valeurs de conductivité des matériaux conducteurs les plus communs.

**Tableau. 1.1:** Conductivité des matériaux conducteurs les plus communs

Matériaux conducteurs	Conductivité $\sigma \left[ \frac{S}{m} \right]$
Argent	$6,3 \cdot 10^{-7}$
Cuivre	$5,9 \cdot 10^{-7}$
Cuivre industriel	$5,8 \cdot 10^{-7}$
Or	$4,5 \cdot 10^{-7}$
Aluminium	$3,8 \cdot 10^{-7}$
Aluminium industriel	$3,7 \cdot 10^{-7}$
Fil	$4,8 \cdot 10^{-6}$
Bronze de phosphore	$4 \cdot 10^{-6}$
Bronze de nickel en aluminium	$2 \cdot 10^{-6}$
Étain	$9,2 \cdot 10^{-6}$
Laiton	$1,5 \cdot 10^{-7} - 3 \cdot 10^{-7}$
Acier	$5 \cdot 10^{-6} - 10^{-7}$

### 4.5.6 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.

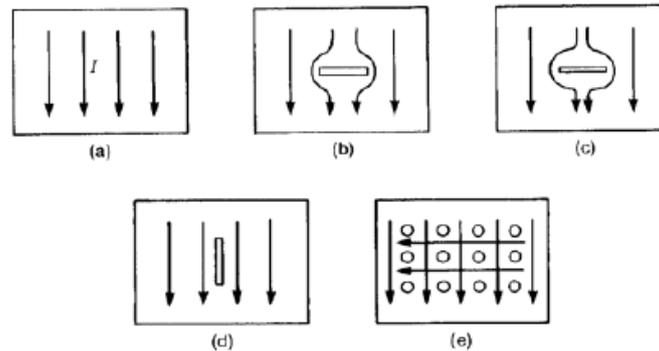


Figure 4.6: Déformation de courant verticaux par différentes fentes.

La figure 4.6 de (a) à (d), illustre la déformation de courant verticaux par différentes fentes. Dans la figure 4.6 (b) et (c) la déformation est quasi la même, presque indépendante de la largeur de la fente.

Dans la figure 4.6 (d) la fente parallèle aux lignes de courant ne provoque presque pas de déformation.

De même dans la figure 4.6 (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.

### 4.5.7 Ouvertures du blindage

Le trou ou la fente rayonne donc comme une antenne de mêmes dimensions.

Il est important de mentionner que ce rayonnement est maximum quand la longueur de l'antenne est  $D = \frac{\lambda}{2}$ .

Avec:  $D$  c'est la longueur maximum de l'ouverture.

Norton indique alors une efficacité de 0 dB.

Pour :  $D < \frac{\lambda}{2}$ , il calcule l'efficacité du blindage par:

$$S_o = 20 \log \left( \frac{\lambda}{2D} \right) \quad (4.11)$$

Avec:  $\alpha$  c'est l'indice 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.

Dans ce cas 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 juxtaposée) sont les plus dangereuses.

Nous constatons que pour le réseau d'ouvertures:

Si un réseau de ( $N$ ) fentes est à un pas  $\prec \frac{\lambda}{2}$ , alors il y a augmentation proportionnelle à  $\sqrt{N}$

L'efficacité du blindage se calcule par:

$$S_o = 20 \log \left( \frac{\lambda}{2D} \right) - 10 \log(N) \quad (4.12)$$

L'efficacité globale  $S_{eff}$  (matériau avec trous) est alors donnée par le minimum de l'efficacité intrinsèque et de celle due aux trous, comme:

$$S_{eff} = \min \{ S_i, S_o \} \quad (4.13)$$

En présence d'un réseau d'ouvertures, si le pas dans le réseau est inférieur à  $\frac{\lambda}{2}$ , alors il n'y a plus de 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 deuxième formule

Comme moyens de protection il est tout à fait recommandé de [19, 20, 37, 38] :

- Réduire la longueur des ouvertures par : joints EMI, comprimés (Gasket) , doigts de contact (bronze-béryllium), réparations avec feuille Cu ou Alu autocollante
- Allonger le chemin de pénétration par: tôles recouvrantes, tube guide d'onde (aérations),
- Utiliser des matériaux spéciaux comme: verre conducteur (écrans d'affichage), plastic à fibre conductrices, métallisation de surface, peinture conductrice.

## 4.6 Filtrage

Pour obtenir ou améliorer la compatibilité électromagnétique, une autre solution qui envisagée est d'insérer des filtres CEM.

Un filtre CEM est caractérisé par sa perte d'insertion, aussi appelée (efficacité du filtre). C'est par définition le niveau résiduel mesuré après la pose du filtre par rapport au niveau mesuré sans filtre. La perte d'insertion d'un filtre dépend des impédances des circuits amont et aval. Les filtres ont pour fonction de laisser passer les signaux utiles et de supprimer la partie indésirable du signal transmis.

Du point de vue technologie, nous pouvons distinguer deux filtres: les filtres passifs et les filtres actifs. Dans cette partie de ce chapitre nous nous sommes intéressés à l'étude de ces filtres insérés dans convertisseur statique.

### 4.6.1 Filtrage passif

Cette technique permet de modifier avantageusement le chemin de propagation des perturbations dans le but de gêner leur circulation. Les filtres peuvent être placés en amont (côté réseau), ou en aval du variateur (côté moteur). Cette solution peut réaliser en mode commun du convertisseur statique.

#### a) Filtre de MC en amont du convertisseur statique

Comme montre la figure 4.7, le filtre est imposé en face du réseau [7, 8, 10, 13] cette technique est largement utilisée par les nouvelles générations de variateurs de vitesse. La combinaison de chemins fortement impédants (inductance) et faiblement impédants (capacités) permet d'aiguiller les courants perturbateurs selon des chemins ne perturbant pas le réseau. Ce type de filtre est particulièrement efficace pour l'aspect normatif. Mais malheureusement, il n'y a aucune action sur les surtensions du moteur et aussi il ne permet pas de réduire les courants de mode commun circulant dans le moteur.

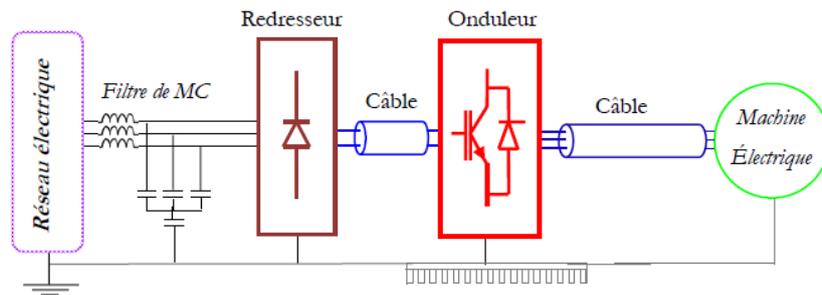


Figure 4.7: Filtre de mode commun à l'entrée du redresseur.

### b) Filtre de MC en aval du convertisseur statique

Comme montre la figure 4.8, le filtre est déposé juste à la sortie de l'onduleur [7, 8, 10] cette solution permet d'atténuer les variations de la tension de mode commun à l'entrée de l'ensemble câble-machine. Et par conséquent, la durée de vie de la machine est améliorée par réduction du courant dans le moteur. Les émissions rayonnées par les câbles sont également atténuées.

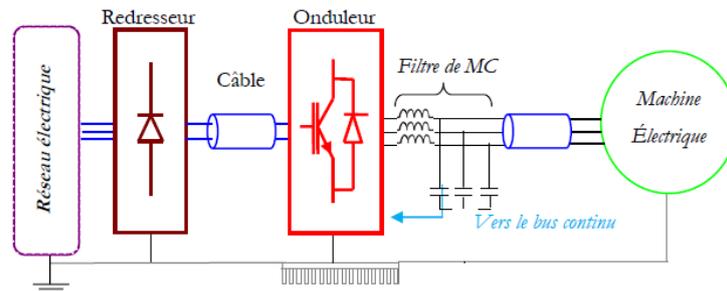
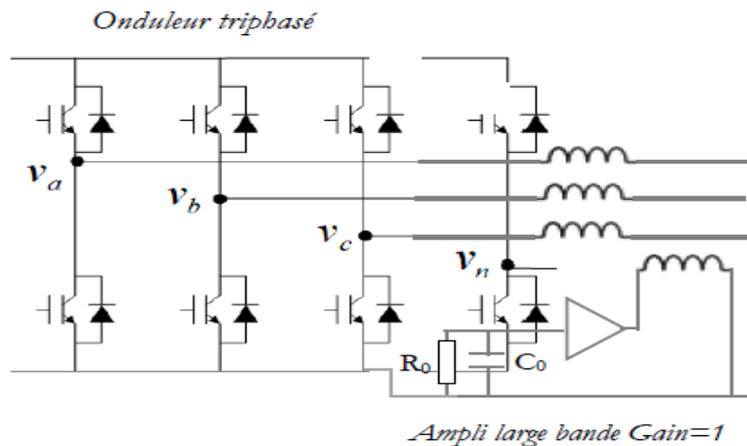


Figure 4.8: Filtre de mode commun en sortie de l'onduleur.

### 4.6.2 Filtrage actif

Dans le but de réduire les perturbations électromagnétiques de type conduites en mode commun et différentiel (le plus souvent en mode commun), un filtre CEM semble à une solution adéquate.

L'une de ces solutions actives proposées dans le but de contrebalancer la tension de mode commun générée par l'onduleur, est le filtre actif, qui consiste à injecter une tension opposée à la tension de mode commun, comme montre la figure 4.9 [7,10], en utilisant un transformateur de mode commun. Il permet jusqu'à quelques MHz de limiter les courants circulant dans l'ensemble câble-machine et donc de protéger ces derniers.



**Figure4.9:** Filtrage active par injection de courant de mode commun.

## 4.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié les différentes les techniques d'amélioration et de protection les plus répandues en CEM, nous avons présenté une synthèse des principales techniques de réduction des interférences utilisées actuellement dans le domaine de la CEM, comme les effets réducteurs, l'étude de la disposition du câblage et leurs comportement en (HF) et en (BF). De plus, nous avons étudié le blindage, ainsi l'utilisation des filtres pour étudier la réduction des perturbations électromagnétiques conduite en électronique de puissance.