

CONCEPTION CEM D'UN APPAREIL ELECTRONIQUE

Werner Hirschi

La compatibilité électromagnétique (CEM) d'un appareil n'est atteinte, de manière économique, que par le respect d'un certain nombre de règles de base lors de la conception de l'appareil. Le présent article donne un résumé des règles essentielles à respecter lors du développement d'un nouveau produit afin de le rendre conforme aux exigences en matière de CEM.

Les appareils électriques et électroniques doivent être construits de telle sorte:

- a) que les perturbations électromagnétiques générées soient limitées à un niveau permettant aux appareils de radio et de télécommunication et aux autres appareils de fonctionner conformément à leur destination;
- b) qu'ils aient un niveau d'immunité intrinsèque contre les perturbations électromagnétiques leur permettant de fonctionner conformément à leur destination.

Telles sont les exigences fixées par la directive 89/336 de la Communauté économique européenne[1]. Les Etats membres de la CEE sont chargés d'adopter les dispositions législatives, réglementaires et administratives nécessaires pour se conformer à cette directive et de les appliquer vraisemblablement à partir de 1996.

Les conséquences de cette nouvelle législation en matière de CEM sont multiples pour le fabricant. Ainsi, les produits développés devront subir des contrôles de perturbations émises et des essais d'immunité avant leur mise sur le marché. La réussite des différents essais dépendra fortement de la conception du produit. Il est impossible de remplir les exigences des normes sans respecter les règles de base

de la CEM. Le fabricant doit donc posséder un savoir-faire spécifique dans ce domaine. Si tel n'est pas le cas, il devra avoir recours aux services de consultants externes.

Le présent exposé donne un aperçu des moyens à mettre en oeuvre lors de la conception d'un produit afin de le rendre conforme aux exigences en matière de CEM.

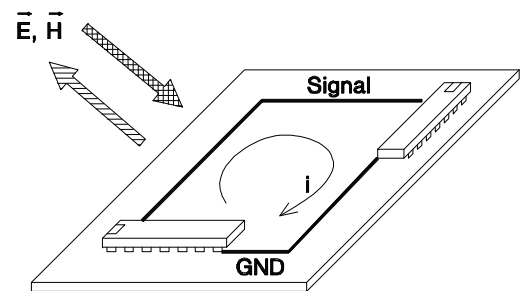


Fig. 1 Modèle pour le rayonnement de mode différentiel en émission et réception d'un circuit imprimé

Les perturbations en mode différentiel ou symétrique apparaissent entre les conducteurs d'aller et de retour d'un circuit

Conception des circuits imprimés

Circuit de masse

Le circuit imprimé doit être conçu de manière à:

- minimiser l'impact des influences perturbatrices (champ et courants) externes (voir fig. 1 et 2)
- éviter l'auto-perturbation du système (chutes de tension dues à la commutation des circuits logiques(voir fig. 3), diaphonie, réflexions, etc.)

- limiter l'émission de perturbations (conduites et rayonnées; voir fig. 1 et 2)

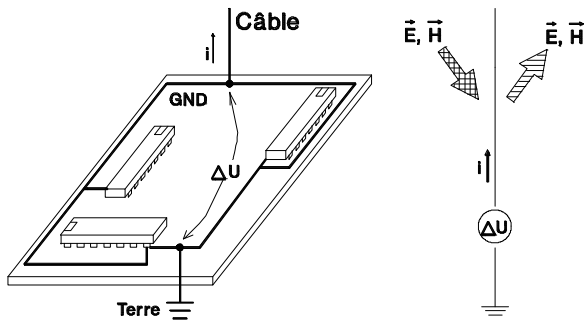


Fig. 2 Modèle pour le rayonnement de mode commun en émission et réception d'un circuit imprimé

Les perturbations en mode commun ou asymétrique apparaissent entre les conducteurs d'un câble et la terre ou masse de référence

Le circuit de masse (désigné généralement par GND ou 0V) constitue le dénominateur commun à ces trois exigences. En effet, une bonne conception du circuit de masse permet de limiter les chutes de tension sur l'alimentation, de réduire le facteur de couplage entre pistes de signal et de minimiser la surface de boucle entre une piste de signal et son retour de masse. La manière de réaliser le circuit de masse d'un circuit imprimé est fonction de la technique utilisée:

a) *Technique digitale*

La masse doit couvrir un maximum de surface. Pour cela toutes les zones dépourvues de pistes de signaux seront constituées en surfaces de cuivre intégrées dans le système de masse.

b) *Technique analogique BF à courants faibles*

Le mode de réalisation à adopter est le même que pour la technique digitale.

c) *Technique analogique BF à courants élevés*

Les liaisons de masse dans lesquelles circule un courant élevé sont à distribuer séparément depuis l'alimentation.

d) *Technique analogique HF*

Un des côtés du circuit imprimé sert exclusivement de masse et les pistes de signaux sont calculées de manière à obtenir des impédances définies.

Dans les cas où la densité des pistes de signaux est trop importante (par ex. les cartes à micro-processeur) et rend impossible la réalisation d'un circuit de masse répondant aux exigences, il convient d'adopter la technologie multicouche avec les couches d'alimentation (+ et masse) placées au milieu.

"+" de l'alimentation

Dans la mesure du possible, le "+" de l'alimentation est à réaliser selon les mêmes critères que la masse (surfaces et interconnexions de manière à former un grillage).

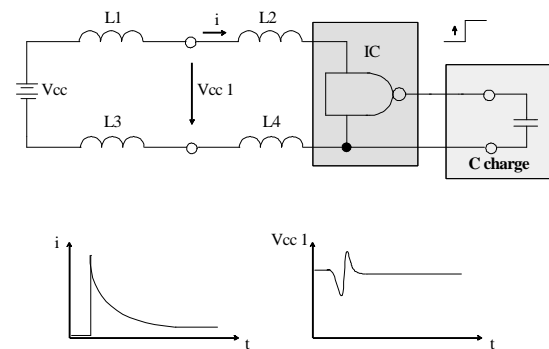


Fig. 3 Auto-perturbation dans les circuits logiques

Le courant i engendre une chute de tension (voir V_{cc1}) lors de la commutation de "0" à "1"

$L1-L4$ inductivités des pistes

Découplage de l'alimentation

Les circuits (digitaux essentiellement) générant des appels de courant transitoires importants lors de la commutation (voir fig. 3) doivent être pourvus d'un découplage constitué de divers condensateurs. La capacité, la technologie et l'emplacement de ces condensateurs sont choisis de manière à ce que, vu du circuit consommateur, le système d'alimentation présente une impédance basse et à caractère capacitif dans le domaine de fréquence 0 Hz à f_{lim} requis (voir

fig. 4 et 5) [2]. f_{lim} [Hz] est fonction du temps de commutation $t_{commutation}$ [s] du circuit consommateur (voir fig. 6) [3] et peut être calculé comme suit:

$$f_{lim} = 1/(\pi \cdot t_{commutation})$$

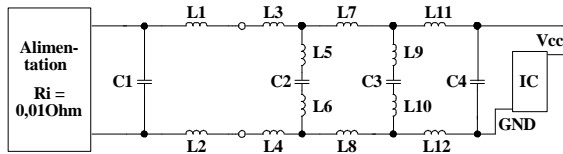


Fig. 4 Découplage de circuits digitaux
Schéma équivalent du système d'alimentation
C1 condensateur électrolytique
C2 condensateur à film plastique
C3 condensateur céramique
C4 capacité du circuit imprimé multicouches
L1-L12 inductivités des pistes du circuit imprimé et des fils de connexions des condensateurs

Entrées/sorties

Les entrées/sorties constituent les "chemins" de couplage privilégiés des interférences. Les deux propriétés suivantes sont principalement responsables de ce postulat:

- Un conducteur électrique de longueur $l_{conducteur}$ [m] se met à travailler comme une antenne lorsque sa longueur dépasse environ le vingtième de la longueur d'onde λ [m] du signal le traversant ou du champ dans lequel il est placé:

$$l_{conducteur} > \lambda / 20 \implies \text{antenne}$$

- La bande passante d'entrée des circuits intégrés à technique digitale dépend de leur temps de commutation $t_{commutation}$ [s]. La fréquence limite f_{lim} [Hz] du spectre peut se calculer de la manière suivante:

$$f_{lim} = 1 / (\pi \cdot t_{commutation})$$

Les câbles, de part leur longueur, présentent généralement des caractéristiques d'antennes nettement meilleures que les pistes du circuit imprimé dans le domaine de fréquences

inférieur à la fréquence limite. Il est donc impératif de filtrer toutes les liaisons d'entrées/sorties et de limiter ainsi leur bande passante à un minimum. Ce filtrage doit avoir lieu aux abords immédiats des connecteurs.

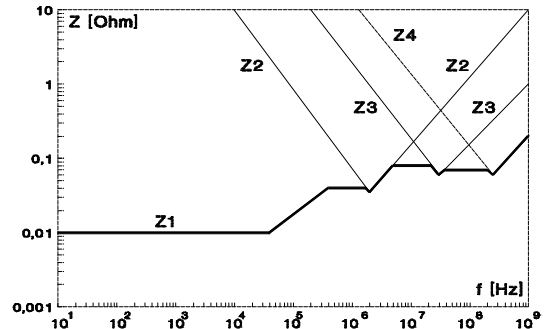


Fig. 5 Impédance (vue du circuit intégré) du système d'alimentation en fonction de la fréquence

Z	Impédance
f	Fréquence
Z1	Impédance globale vue du circuit intégré
Z2	Comportement fréquentiel de l'impédance du condensateur C2 agissant sur l'impédance globale (voir fig. 4)
Z3	Comportement fréquentiel de l'impédance du condensateur C3 agissant sur l'impédance globale (voir fig. 4)
Z4	Comportement fréquentiel de l'impédance du condensateur C4 agissant sur l'impédance globale (voir fig. 4)

Terminaison des bus

Les bus sont généralement parcourus par des signaux très rapides. Des phénomènes de réflexions apparaissent lorsque le temps de propagation du signal sur le bus devient égal ou supérieur au temps de commutation. La longueur maximale l_{max} [m] jusqu'à laquelle un bus ne nécessite aucune précaution particulière est déterminée à l'aide de la formule suivante:

$$l_{max} = t_{commutation} \cdot c / \sqrt{\epsilon_r}$$

dans laquelle c [cm/ns] représente la vitesse de la lumière ($c = 30$ cm/ns), ϵ_r la constante diélectrique (valeur typique $\epsilon_r = 4$) et $t_{commutation}$ le temps de commutation de la famille logique utilisée [ns].



Lorsque la longueur du bus dépasse l_{max} celui-ci doit être terminé aux deux extrémités par son impédance caractéristique.

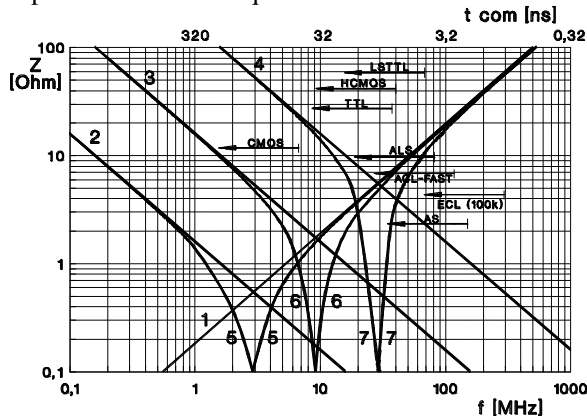


Fig. 6 Temps de commutation et fréquences limites des différentes familles logiques

Z Impédance

f Fréquence

t_{com} Temps de commutation

Les origines des flèches représentent les temps de commutation et les fréquences limites des différentes familles logiques

1 comportement fréquentiel de l'inductivité de connexion de 30 nH (dans le cas optimal) entre le condensateur de découplage et la pastille de silicium

2 (3,4) Comportement fréquentiel théorique de l'impédance d'un condensateur de découplage possédant une capacité de 0.1, (0.01 et 0.001) μF

5 (6,7) Comportement fréquentiel réel de l'impédance d'un condensateur de découplage possédant une capacité de 0.1, (0.01 et 0.001) μF

Séparations galvaniques

Les éléments de séparation galvanique tels que les relais, les optocoupleurs et autres ne représentent aucune barrière face aux perturbations HF (> env. 1 MHz) couplées en mode commun. En effet, tous ces éléments présentent une capacité parasite plus ou moins grande en mode commun entre primaire et secondaire. Il y a donc lieu de leur ajouter un filtrage pour les perturbations HF en mode commun.

L'élément de séparation et son filtrage doivent se trouver à proximité immédiate du connecteur qui doit être placé au bord du circuit.

Conception des appareils

Placement des éléments de filtrage

Les éléments de filtrage doivent être placés immédiatement à l'entrée des câbles dans l'appareil. Le câblage doit être réalisé de telle manière que l'entrée d'un filtre ne puisse pas coupler directement sur la sortie (voir fig. 7).

Lorsqu'un filtre comporte des condensateurs destinés à l'atténuation des perturbations en mode commun, il doit être relié au boîtier avec une impédance basse. Pour cela il convient de visser directement le filtre sur le boîtier de l'appareil à un emplacement où un bon contact électrique est assuré. Un bout de fil "jaune-vert" de quelques centimètres tel qu'il est fréquemment rencontré ne constitue pas une liaison de qualité suffisante.

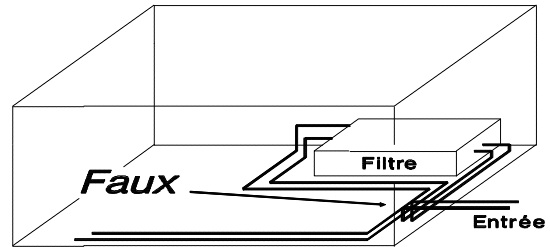


Fig. 7 Câblage erroné d'un filtre

Les câbles d'entrée et de sortie ne doivent pas être juxtaposés

Câbles blindés

En règle générale et à l'encontre de toutes les idées préconçues, les blindages des câbles doivent être reliés à la terre aux deux extrémités. Cette manière de faire offre une protection efficace contre tous les types de couplages -galvanique, capacitif, inductif et par rayonnement- (voir fig. 8) alors que la mise à terre unilatérale du blindage ne protège que contre les effets du couplage capacitif (voir fig. 9)

Il existe cependant trois exceptions à la règle de la mise à la terre aux deux extrémités:

Les liaisons BF avec des signaux de faible niveau: la circulation d'un courant permanent (par ex. à 50 Hz) ou transitoire (par ex. couplé par rayonnement) sur le blindage engendre, par le biais de l'impédance de transfert, une tension perturbatrice entre les conducteurs à l'intérieur du câble et le blindage.

Les liaisons longues (par ex. entre deux bâtiments): des différences de potentiel de terre peuvent provoquer la circulation d'un courant d'équilibrage (par ex. à 50 Hz, à 16 2/3 Hz ou lors de foudroiement) sur le blindage. Celui-ci peut alors subir un échauffement ou être détruit.

Les liaisons dans les environnements à risque d'explosion: les différences de potentiel de terre peuvent donner lieu à l'apparition d'un arc lors du branchement d'un câble. C'est la raison pour laquelle, les blindages de câbles ne doivent pas être reliés à la terre aux deux extrémités dans un tel environnement.

Il est néanmoins possible dans tous les cas de recourir à une des "astuces" suivantes afin de protéger une liaison contre le couplage galvanique, le couplage par induction ou celui par rayonnement dans le domaine HF:

Mise à la terre du blindage à travers un condensateur: le fait de relier un blindage directement à la terre à une extrémité et au travers d'un condensateur à l'autre extrémité procure une bonne protection contre les couplages HF. Les courants d'équilibrage à basse fréquence ne circulent pas avec cette solution. Idéalement, le condensateur devrait être réparti sur le pourtour du blindage.

Utilisation d'un câble avec un double blindage: le principe consiste à relier un des deux blindages à la terre à une extrémité et l'autre à l'extrémité opposée. Entre les deux blindages il y a lieu d'assurer une bonne isolation.

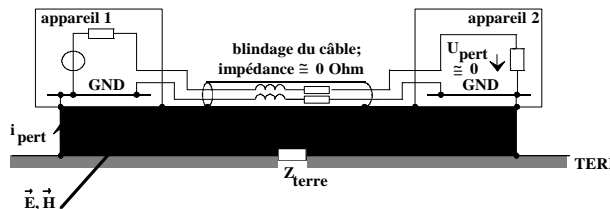


Fig. 8 Blindage de câble relié à la terre aux deux extrémités

Un champ perturbateur induit un courant i_{pert} dans la boucle constituée par le blindage, les boîtiers et la terre. Grâce à l'impédance basse du blindage, ce courant provoque une chute de tension très faible entre les masses des deux systèmes. La tension perturbatrice U_{pert} sur l'entrée du système récepteur est donc pratiquement nulle.

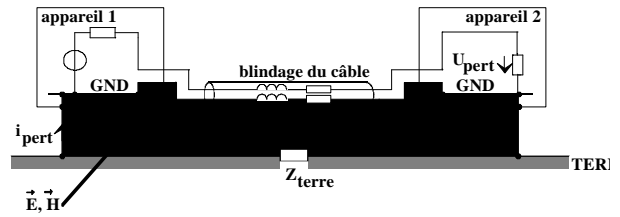


Fig. 9 Blindage de câble relié à la terre uniquement à une extrémité

Un champ perturbateur induit un courant perturbateur i_{pert} sur la liaison de masse entre les deux systèmes. Ce courant provoque une chute de tension entre les masses des systèmes. Il en résulte une tension perturbatrice U_{pert} sur l'entrée du système récepteur.

De cette manière, la circulation de courants d'équilibrage BF est empêchée. Par contre, dans le domaine HF, grâce à la capacité parasite entre les deux blindages, l'ensemble se comporte comme une liaison blindée dont les deux extrémités du blindage seraient mises à la terre.

Blindage électromagnétique

Choix des matériaux

L'aluminium et l'acier sont les matériaux utilisés usuellement pour fabriquer les boîtiers d'appareils ou les armoires. Les caractéristiques d'atténuation des champs électromagnétiques de ces deux matériaux sont similaires. L'acier, lorsqu'il est galvanisé ou inoxydable garanti une meilleure protection contre l'oxydation et par conséquent un meilleur contact électrique à long terme que l'aluminium.

Les boîtiers en matière synthétique peuvent être traités par des procédés tels que la métallisation sous vide, la métallisation galvanique ou la laquage avec une peinture conductrice. Ce genre de traitement permet en principe d'atteindre des niveaux d'atténuation intéressants dans le domaine HF.

Réalisation

Les liaisons entre les différents éléments d'un boîtier (plaque frontale, plaque arrière, couvercle, équerres, rails de montage, etc.) doivent être conductrices électriquement. Les traitements de surface tels que la peinture ou l'éloxyage sont à proscrire aux points de contact.

La distance admissible d_{max} [m] entre deux vis de fixation dépend de la fréquence jusqu'à laquelle les propriétés de blindage doivent être conservées. Elle se détermine comme suit:

$$d_{max} < \lambda / 20$$

λ [m] correspond à la longueur d'onde de la fréquence maximale.

Au-delà de la fréquence maximale, la fente constituée par l'espace entre deux vis se met à travailler comme une antenne et provoque une perte d'atténuation.

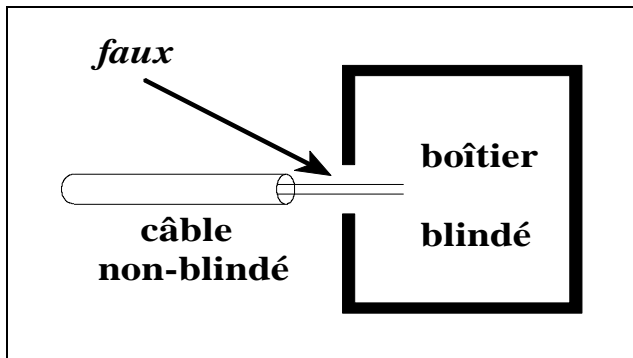


Fig. 10 Introduction de câble inadmissible
L'introduction directe d'un conducteur électrique dans un environnement blindé n'est pas admissible.

Introduction des câbles

Le fait de percer un trou dans un boîtier présentant une atténuation de blindage donnée ne va pas "détruire" cette atténuation. Ceci est valable pour les fréquences dont la longueur d'onde est supérieure à environ 20 fois le diamètre de l'ouverture. Pour un trou de 10 centimètres, la fréquence à partir de laquelle une perte d'atténuation commence à se faire ressentir se situe donc vers 150 MHz. L'introduction isolée d'un conducteur électrique (voir fig. 10) -câble, fil ou tige métallique- dans ce même boîtier au travers du trou de 10 cm va engendrer des pertes d'atténuation importantes à des fréquences bien inférieures à 150 MHz.

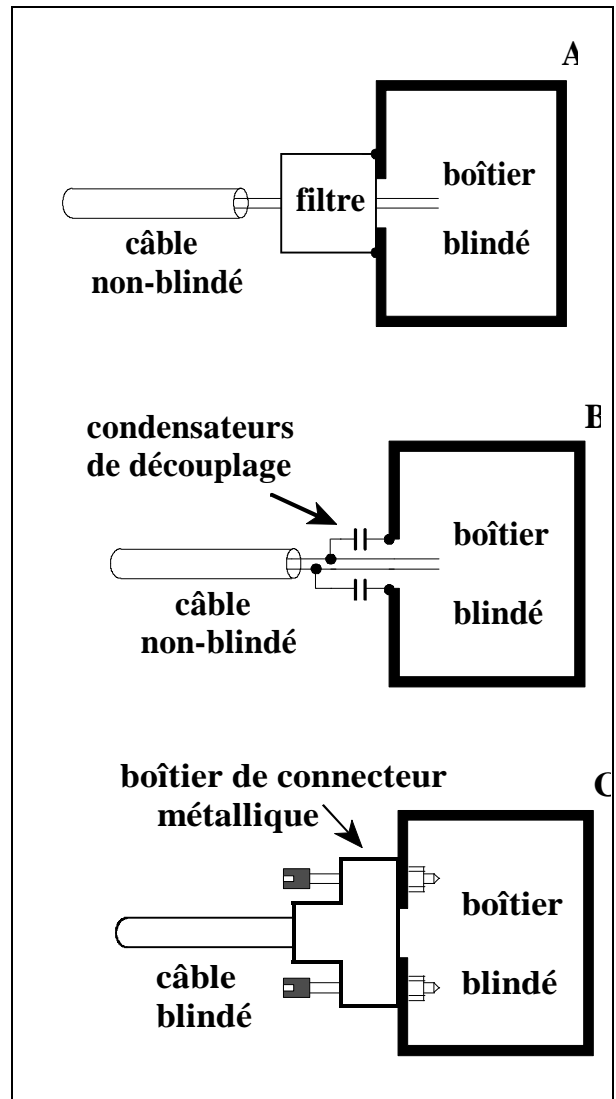


Fig. 11 Introduction correcte de câbles

- A Introduction à travers un filtre
- B découplage de chaque conducteur à l'aide d'un condensateur
- C Introduction d'un câble blindé avec un boîtier de connecteur métallique

On peut dire que les propriétés de blindage du boîtier sont "détruites" par une telle action.

Il existe deux méthodes à adopter pour réaliser l'introduction des câbles dans un boîtier devant garantir une atténuation des champs électromagnétiques:

a) *Le filtrage*

Des éléments de filtrage branchés entre chaque conducteur du câble et le boîtier (voir fig. 11 A et B) permettent d'acheminer les courants induits par les champs électromagnétiques intérieurs ou extérieurs directement vers le boîtier. Par conséquent ces courants ne vont plus engendrer des champs perturbateurs dans le domaine que l'on désire protéger.

b) *L'utilisation de câbles blindés*

Cette solution (voir fig. 11c) s'applique aux liaisons entre deux boîtiers conçus chacun dans le but d'assurer une certaine atténuation des champs électromagnétiques. Le blindage de la liaison doit être relié aux deux extrémités de manière concentrique avec les boîtiers. L'ensemble constitue dès lors une seule enveloppe de blindage.

Câblage

Séparation des divers groupes de câbles

Deux catégories principales de câbles peuvent être répertoriées:

a) *Les câbles perturbateurs*

Il s'agit essentiellement des câbles de "puissance" tels que les câbles d'alimentation secteur et de sorties des convertisseurs statiques.

b) *Les câbles de liaisons sensibles aux perturbations*

Les liaisons de données (ex. RS 232, RS 485), d'entrées/sorties de commandes numériques, de tension de consigne analogique et autres sont généralement très sensibles aux influences perturbatrices. Les raisons principales sont les tensions de service faibles et les bandes passantes élevées des circuits. Ces bandes passantes sont généralement données par la technologie utilisée et doivent être limitées d'une manière générale au strict minimum.

Lors de la réalisation du câblage d'un appareil ou d'une machine, il y a lieu de respecter un certain espacement entre les câbles perturbateurs et les câbles de liaisons sensibles aux perturbations afin de limiter le facteur de couplage entre les deux catégories de câbles. Toutefois, cet espacement ne doit pas être trop grand, faute de quoi la surface de boucle entre les deux catégories de câbles va engendrer une sensibilité élevée face aux champs perturbateurs. Idéalement il devrait correspondre à env. 30 cm. Lorsque les câbles sont fixés le long d'une paroi d'armoire ou dans un canal métallique, une distance plus faible est admissible.

Littérature

- [1] Conseil des Communautés européennes; Journal officiel des Communautés européennes No. 139/19; Directive du Conseil du 3 mai 1989 concernant le rapprochement des législations des Etats membres relatives à la compatibilité électromagnétique (89/336/CEE).
- [2] Franz Leitl: Störsicherheit als Spezialität. Markt & Technik 15/85
- [3] Henry W. Ott: Digital design for electromagnetic compatibility. 7th International Zurich Symposium & Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility: Tutorial Lecture T3; Zürich 1987.