

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU
Faculté de Génie Electrique Et d'Informatique

Département de l'Electronique



Mémoire Mémoire

De fin d'études, en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en électronique

Option Instrumentation

Thème

Etude de la compatibilité
électromagnétique des circuits
électroniques

Proposé et Dirigé par :

M^r : KANANE Hocine

Réalisé par :

M^{lle} : BOUABA Sabrina

M^r : MAKOUDI Hamid

M^{lle} : MEZAGUER Fatiha

Promotion: 2011/2012

Remerciements

Bismillah Erahman Errahim

Avant tout, nous remercions Dieu Le Tout Puissant, pour tout ce qu'il nous a donnés surtout : La foi et la persévérance qui nous ont permis d'accomplir ce travail jusqu'à sa finalité.

*Nous tenons également à présenter nos sincères remerciements à notre promoteur **Mr KANANE Hocine** pour ses orientations et également aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant de juger et de critiquer ce modeste travail afin de l'améliorer.*

Enfin, nous tenons à remercier toutes personnes ayant contribués à la réussite de ce travail et qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de notre projet.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail avec tout mon profond respect :

À mes très chers parents.

À mes très chers frères & Sœurs.

À tous ceux qui me sont chers.

*À tous mes amis et ceux qui m'ont aidé durant ma
vie universitaire.*

Fatiha.



Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

*À celle qui m'a transmis la vie et l'amour, à toi chère mère. Toute
ma reconnaissance.*

À mon père, mes frères et sœurs.

À tous ceux qui me sont chers.

À la mémoire des pionniers de la science. Tous mes respects.

Sabrina.





Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A celle qui m'a transmis la vie et l'amour, à toi chère mère. Toute ma reconnaissance.

A ma meilleure amie CHERIFA à mon meilleur ami SMAIL et à toute ma famille. Merci d'être là !

A la mémoire des pionniers de la science. Tous mes respects.



Hamid.

SOMMAIRE

Introduction générale (1)

Chapitre I : les sources de perturbations EM

Introduction..... (4)

I. Définition d'une perturbation électromagnétique (4)

I.1 Perturbations conduites (5)

I.2 Perturbations rayonnées..... (5)

II. Les sources de perturbation..... (5)

• Source naturelles (5)

• Source industrielles..... (6)

II.1 Les sources de perturbation naturelles(6)

II.1.1 La foudre (6)

II.1.2 Les décharges électrostatiques (DES)..... (10)

II.1.3 Le bruit cosmique (12)

II.2 Les sources de perturbation industrielles (12)

II.2.1 Champs créé par les émetteurs radio (12)

II.2.2 Champs créés par les émetteurs radars(13)

II.2.3 Perturbations existant sur le secteur(13)

➤ Les Microcoupures (13)

➤ Les Surtensions impulsionnelles.....(14)

➤ Les tensions harmoniques (15)

➤ Les variations de fréquence..... (15)

➤ Les bruits HF..... (16)

II.2.4 Convertisseurs et générateurs HF..... (16)

II.2.5 Champ de fuite des transformateurs (17)

II.2.6 Les courts circuits (18)

II.2.7 Impulsion électromagnétique nucléaire (IEMN)	(18)
Conclusion.....	(19)
Chapitres II : les couplages.....	(21)
Introduction	(21)
I. Généralités	(21)
I.1 Champ magnétique autour d'un conducteur rectiligne	(21)
I.2 Résistance et inductance d'un conducteur.....	(22)
I.2.1 Résistance d'un conducteur en BF.....	(22)
I.2.2 l'effet de peau	(23)
I.2.3 Inductance d'un conducteur	(24)
I.3 Capacité entre deux fils parallèles	(26)
II. Mode différentiel et mode commun.....	(26)
II.1 Mode différentiel	(27)
II.2 Mode commun.....	(28)
II.3 Conversion du MC en MD	(30)
III. Etude des couplages électromagnétiques	(31)
III.1 Le couplage par impédance commune	(31)
III.2 Le couplage capacitif carte à châssis	(33)
III.3 Le couplage par diaphonie inductive	(35)
III.3.1 Diaphonie inductive en mode différentiel	(36)
III.3.2 Diaphonie inductive de mode commun	(37)
III.4 Couplage par diaphonie capacitive	(38)

III.4.1	Diaphonie capacitive de mode différentie	(40)
III.4.2	Diaphonie capacitive de mode commun	(40)
III.5	Couplage champ à fil	(41)
III.5.1	Couplage champ à fil en BF	(42)
III.5.2	Couplage champ à fil en HF	(43)
III.6	Couplage champ à boucle	(43)
Chapitre III : les remèdes		(46)
Introduction		(46)
I.	Le blindage	(46)
I.1	Notion d'écran électromagnétique	(46)
I.2	Efficacité de blindage d'un écran	(47)
I.3	Mécanisme d'atténuation d'un blindage	(48)
I.3.1	Pertes par réflexion R.....	(48)
I.3.2	Pertes par absorption A.....	(49)
I.4	Le blindage en HF.....	(50)
II.	Le filtrage.....	(53)
II.1	Définition d'un filtre.....	(53)
II.2	Les différents types de filtres	(53)
II.3	Perte d'insertion d'un filtre	(55)
II.4	Critères de choix d'un filtre.....	(56)
II.5	Consignes et précautions d'installation d'un filtre.....	(57)
II.6	Les ferrites.....	(57)

III.	Masses et équipotentialités	(58)
III.1	Définition de la masse	(58)
III.2	Impédance d'une connexion à la masse.....	(58)
III.3	Les différentes façons de mise à la masse.....	(59)
III.3.1	Masses connectées en un seul point.....	(59)
III.3.2	Masses connectées en plusieurs points.....	(60)
III.3.3	Connexions mixtes.....	(61)
III.4	Conseil pratique pour les raccordements à la masse.....	(61)
IV.	Le câblage.....	(62)
IV.1	Les différents types de signaux véhiculés par un câblage.....	(62)
IV.2	Choix des câbles.....	(63)
IV.3	Cheminement des câbles.....	(64)
IV.4	Les connexions.....	(68)
IV.5	Règles de câblage.....	(69)
V.	Réduction des couplages.....	(72)
V.1	Réduire le couplage par impédance commune.....	(72)
V.2	Réduire le couplage par diaphonie.....	(73)
V.3	Réduire le couplage champ à boucle et champ à fil.....	(73)
V.4	Remèdes généraux au mode commun.....	(74)
	Conclusion.....	(74)

Chapitre IV : réglementation et normes..... (76)

Conclusion

I. La directive CEM 89/336/CEE

I.1	Les exigences essentielles de la directive CEM	(76)
I.2	La déclaration de conformité	(77)
I.3	Le marquage « CE ».....	(79)
I.4	Les procédures d'évaluation de la conformité à la directive	(79)
II.	Les normes.....	(81)
II.1	Normalisation	(81)
II.2	Les types de normes en CEM	(81)
➤	Les normes fondamentales	(82)
➤	Les normes génériques.....	(83)
➤	Les normes de familles de produits.....	(83)
➤	Les normes de produits	(84)
III.	La nouvelle directive CEM 2004/108/CE	(84)
III.1	La Nouvelles liste de Normes Harmonisées en CEM.....	(85)
III.2	Normes applicables au titre de la protection des personnes face aux champs électromagnétique.....	(86)
	Conclusion.....	(86)
	Conclusion générale	(87)

Bibliographie

Introduction générale :

Comme tout système physique en activité, Les circuits électroniques ne sont pas isolés de leur environnement. Ils baignent en permanence dans des champs électromagnétiques créés par différentes sources et ils sont soumis, avec une certaine sensibilité, aux perturbations électromagnétiques de ces dernières mais ils sont aussi sources de perturbations électromagnétiques. L'influence d'une perturbation EM sur un circuit électronique peut aller d'un simple dysfonctionnement à la destruction. Un système ou un équipement électronique doit, d'une part, posséder un certain niveau d'immunité suffisamment élevé pour supporter les agressions des perturbations externes, et d'autres parts, avoir un niveau d'émission suffisamment bas pour ne pas nuire aux équipements voisins. C'est ce qu'on appelle la compatibilité électromagnétique. Le décret français concernant la CEM en donne la définition suivante : « L'aptitude d'un dispositif, d'un appareil ou d'un système, à fonctionner dans son environnement électromagnétique de façon satisfaisante sans produire lui-même des perturbations de nature à créer des troubles graves dans le fonctionnement des appareils ou des systèmes situés dans son environnement ».

L'augmentation la plus significative des problèmes de compatibilité électromagnétique est apparue avec l'invention des composants électroniques à haute densité, tel que le circuit intégré dans les années 1960, et les puces à microprocesseur dans les années 1970. Par ailleurs, le spectre fréquentiel utilisé devient beaucoup plus large, dans le but de subvenir aux besoins de plus en plus croissants de transmission d'informations. Il ne faut pas oublier aussi, l'usage de plus en plus répandu de circuits de traitement d'information utilisant des alimentations de faible puissance et des signaux de faible énergie, et de se fait sensibles aux perturbations. En électronique de puissance, l'augmentation des performances des composants de puissance a permis un progrès considérable pour le développement des appareillages grâce à la réalisation de convertisseurs très performants. Cependant, ces derniers sont très polluants du point de vue de la CEM ils sont le lieu de fortes variations de tension et de courant (jusqu'à 10 kV/ μ s et 1 kA/ μ s) à des fréquences de répétition élevées (20 kHz à 1 MHz) qui induisent de fortes perturbations conduites et rayonnées.

Il semble que les progrès réalisés dans le domaine n'ont fait que croître les problèmes de compatibilité électromagnétiques. La multiplication des appareils électriques et l'augmentation des puissances mises en jeu ont amené la mise en place d'une nécessaire réglementation. Depuis le premier janvier 1996, tout appareil électrique mis en vente dans les pays de la Communauté Européenne doit comporter le label "CE" garantissant la conformité aux normes de CEM. Ces normes couvrent différents aspects : elles fixent les seuils minimum de perturbations devant être supportés sans dysfonctionnement, par la définition de signaux de forme et d'amplitude reproduisant l'environnement électromagnétique réel et qui sont utilisés lors des tests de susceptibilité. Elles limitent les niveaux de perturbations maximum pouvant être générés en fonction du type d'appareillages, ainsi que les conditions de mesure à respecter lors des tests de compatibilité.

L'objectif de notre projet de fin d'étude est l'étude de la compatibilité électromagnétique des circuits électronique. Il sera organisé selon le plan suivant :

- Dans le premier chapitre nous allons décrire les principales sources de perturbation électromagnétiques.
- Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude des différents couplages existants en CEM.
- Dans le troisième chapitre nous proposerons les différents remèdes aux problèmes de la CEM.
- Enfin nous terminerons par un quatrième chapitre sur la réglementation et les normes en CEM.

Chapitre I:

*Les sources de perturbations
électromagnétiques*

Chapitre I : Les sources de perturbations électromagnétiques.

Introduction :

Dans ce chapitre nous allons décrire les principales sources de perturbation électromagnétiques et leurs effets. Connaître et comprendre l'origine d'une perturbation EM est essentiel si l'on veut résoudre un problème de CEM.

I. Définition d'une perturbation électromagnétique :

Une perturbation électromagnétique est tout phénomène électromagnétique susceptible de dégrader les performances d'un dispositif, équipement ou système. C'est un signal non désiré. De plus, une perturbation électromagnétique, comme son nom l'indique est composée d'un champ électrique E et d'un champ magnétique H. Un problème de perturbation EM met en jeu trois éléments (**fig 1**) :

- La source de perturbation, qui se caractérise par sa puissance, sa durée et son spectre de fréquence.
- Le vecteur par lequel la perturbation est transmise, on parle de mode de couplage.
- L'équipement victime de la perturbation.



Fig 1 : transmission des perturbations

Les perturbations EM peuvent être classées selon le support de propagation :

Chapitre I : Les sources de perturbations électromagnétiques.

I.2 Perturbations conduites :

Les perturbations transmises par conduction sont caractérisées par les courants engendrés sur les câbles et les tensions induites aux bornes des circuits électroniques. Les parasites ainsi générés, sont d'autant plus importants que les variations par rapport au temps du courant $\frac{di}{dt}$ et $\frac{dv}{dt}$ qu'elles entraînent, sont élevés. Bien évidemment ces courants et tensions parasites circulant dans les câbles ou fils, interconnectant des équipements vont eux même rayonner. De même des perturbations rayonnées vont pouvoir induire des courants et tensions parasites dans les différentes interconnexions. Les perturbations conduites et rayonnées sont donc intimement couplées.

I.3 Perturbations rayonnées :

Les circuits électriques, lorsqu'ils sont soumis à des différences de potentiel donc parcourus par des courants, produisent des champs électromagnétiques dans l'espace. Leurs intensités dépendent de la nature, la fréquence et de la distance par rapport à la source. En basses fréquences, c'est le champ magnétique qui pose problème qu'il soit impulsif ou entretenu, il est habituellement généré au voisinage immédiat des victimes. En hautes fréquences, les parasites sont plus redoutables et leurs effets sont plus inquiétants en transitoire. Le champ électrique s'exprime en V/m, son émission est produite par un circuit électrique à haute impédance soumis à une différence de potentiel élevée. Le champ magnétique s'exprime en A/m. Son émission est engendrée par un circuit basse impédance parcouru par un courant i .

II. Les sources de perturbation :

Il existe deux types de sources de perturbations électromagnétiques :

- **Sources naturelles** : ceux sont des phénomènes naturels (foudre, bruit cosmique...). les perturbations émis par ce type de sources sont des perturbations non intentionnelles.

Chapitre I : Les sources de perturbations électromagnétiques.

- **Sources industrielles :** ces sources sont, en générale, les équipements et installations électroniques ou électriques (secteur d'alimentation, convertisseurs à hautes fréquences...). Les perturbations émises par ces sources peuvent être intentionnel ou non intentionnel.

II.1 Les sources de perturbation naturelles :

Une source de bruit naturelle est définie par son origine. Celle ci peut être terrestre, comme le rayonnement thermique émis par les corps chauds. Elle peut être atmosphérique, comme les décharges orageuses.

II.1.1 La foudre :

La foudre est une décharge électrique se produisant entre un nuage orageux chargé et la Terre.

La foudre est équivalente à un générateur de courant. Le courant est en fait constitué par les charges superficielles du sol qui remontent le canal ionisé du traceur, on observe alors un fait fortement lumineux qui progresse du sol en direction du nuage, avec une vitesse estimée à 108 m/s. c'est « l'arc en retour » ou « return stroke ». La foudre est en général constituée de plusieurs décharges partielles (**fig 2**) s'écoulant par le même canal ionisé. Lorsque la décharge principale est terminée, après une durée environ de 100 ms apparaît une ou plusieurs décharges secondaires.

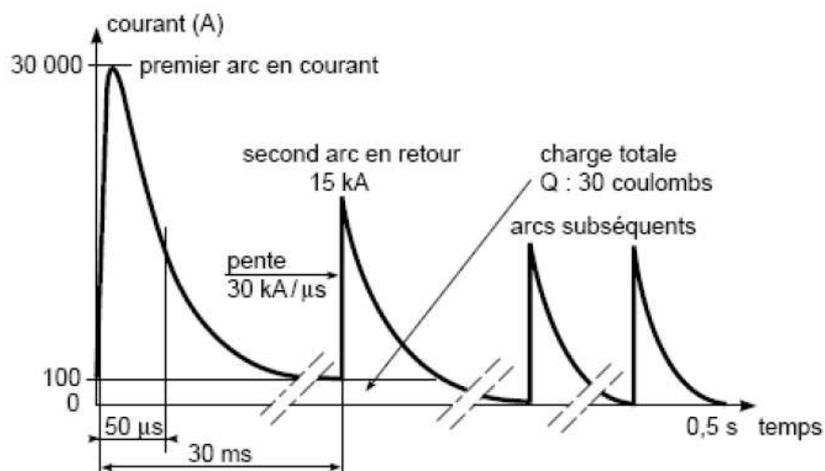


Fig 2 : le courant de foudre

Chapitre I : Les sources de perturbations électromagnétiques.

➤ **Effets de la foudre:**

- **Surtensions directes:**

L'impact direct sur une ligne (électrique ou téléphonique), génère une onde de tension qui se propage sur la ligne (**fig 3**). Comme le courant de la foudre est rarement inférieur à 10kA, et que l'impédance caractéristique d'une ligne aérienne est environ 300Ω , l'onde de tension atteindra 1500 kV.

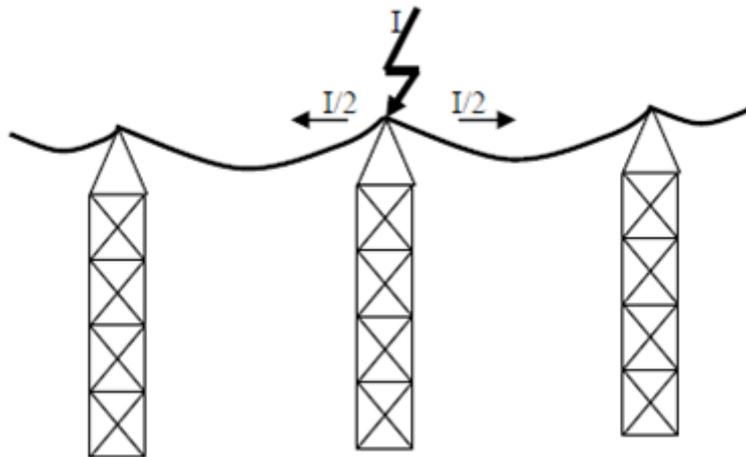


Fig 3 : L'impact direct sur une ligne électrique

- **Surtensions induites (indirectes):**

Le courant de la foudre provoque une variation extrêmement rapide du champ électromagnétique. A cause des ondes électromagnétiques générées par la foudre, des surtensions sont induites dans des conducteurs situés loin du point d'impact (**fig 4**). Ses effets se font sentir à plusieurs centaines de mètres, voire plusieurs kilomètres.

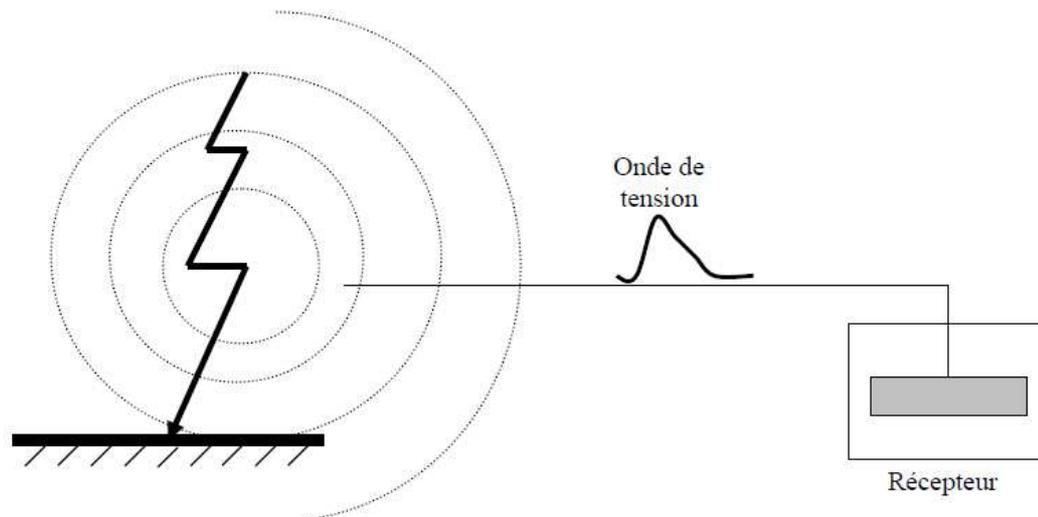


Fig 4 : Surtension induite sur une ligne

Les ondes induites sur la ligne sont similaires en forme et en amplitude à celles obtenues par choc de foudre direct. Leur caractéristique principale est leur front très raide (de l'ordre de la microseconde), et leur amortissement très rapide. Ce rayonnement est d'autant plus important que le front de montée est raide (20 à 100kA/ μ s). Un coup de foudre tombant à proximité d'une ligne développe un champ d'induction magnétique suffisamment important pour y créer une surtension induite, dont l'ordre de grandeur peut être estimé par la formule suivante :

$$U = Z_0 I h / d \quad [9] \quad (I.1)$$

Avec:

Z_0 : l'impédance de la ligne ; $Z_0 = (0,25/\pi) (\sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}) \approx 300 \Omega$.

h : hauteur du conducteur.

d : distance entre la ligne et le point d'impact de la foudre.

I : courant de la foudre.

- **Montée en potentiel de la prise de terre :**

Une élévation du potentiel de terre a lieu lorsque le courant de foudre est écoulé par le sol. Cette variation du potentiel de terre touche les installations lorsque l'impact de la foudre au sol est à proximité de leurs prises de terre. Le courant

Chapitre I : Les sources de perturbations électromagnétiques.

circulant dans la terre peut provoquer la montée en potentiel des équipements par les prises de terre.

La valeur du potentiel de terre a proximité de l'impact d'une foudre est donnée par la relation suivante :

$$V = \frac{\rho I}{2\pi d} \quad [9] \quad (I.2)$$

Avec :

I : courant de foudre crête, en ampère.

ρ : résistivité moyenne du sol ($\Omega.m$).

d : distance par rapport a l'impact de foudre.

Pour avoir une idée sur les ordres de grandeur nous allons calculer la ddp en les deux pieds d'un piéton à proximité d'un impact de foudre. Pour cela on choisira les valeurs suivantes :

$$I = 50 \text{ kA}$$

$$\rho = 500 \text{ } \Omega.m$$

$$d1 \text{ (distance du pied1 par rapport au point d'impact)} = 100.5 \text{ m}$$

$$d2 \text{ (distance du pied2 par rapport au point d'impact)} = 100 \text{ m}$$

$$V2 = 500 * 50000 / (2 * 3.14 * 100) = 39808 \text{ v}$$

$$V1 = 500 * 50000 / (2 * 3.14 * 100.5) = 39610 \text{ v}$$

$$V2 - V1 \approx 200 \text{ v}$$

La distribution des courants de foudre dans un sol dépend de la nature du chemin parcouru. Dans le cas d'un sol hétérogène, des différences de potentiel dangereuses peuvent s'établir entre deux points voisins. Cette différence est appelée Tension de pas.

Chapitre I : Les sources de perturbations électromagnétiques.

II.1.2 Les décharges électrostatiques (DES) :

On désigne par le terme «décharge électrostatique» les impulsions de courant parcourant un objet quelconque, lors du contact (direct ou indirect) de cet objet relié à la masse, avec un autre objet (souvent une personne) présentant un potentiel élevé par rapport à cette masse (**fig 5**).

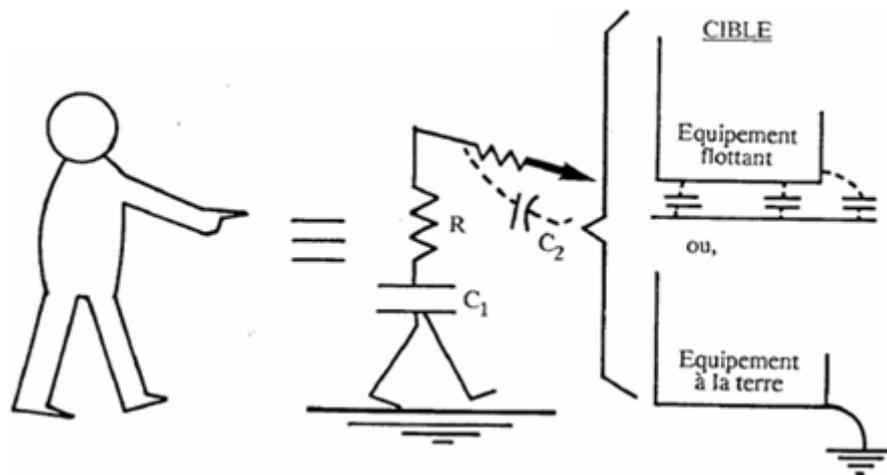


Fig 5 : décharge électrostatique

C1 : (personne-sol) de 100 à 180 pF

C2 : (main-victime) quelque pF

R : 300 à 10K Ω

Les charges électrostatiques résultent de l'échange d'électricité entre les matériaux ou entre le corps humain et les matériaux. Ce phénomène est favorisé par la combinaison de matériaux synthétiques (plastiques, tissu ...) et une atmosphère sèche.

Le processus peut résulter par exemple de la charge d'une personne lorsqu'elle marche sur une moquette (échange d'électrons entre le corps et le tissu), le frottement des vêtements d'un opérateur assis sur sa chaise. Les décharges peuvent se produire entre une personne et un objet ou entre des objets chargés.

Chapitre I : Les sources de perturbations électromagnétiques.

➤ Caractéristiques des décharges électrostatiques :

Les éléments significatifs de ces perturbations sont (fig 6):

- la très faible durée du temps de montée de l'impulsion (0.7 à 1 ns).
- la durée de l'impulsion 60 ns.
- le caractère isolé du phénomène : 1 décharge.
- la tension très élevée à l'origine de la décharge (2 à 15 kV).

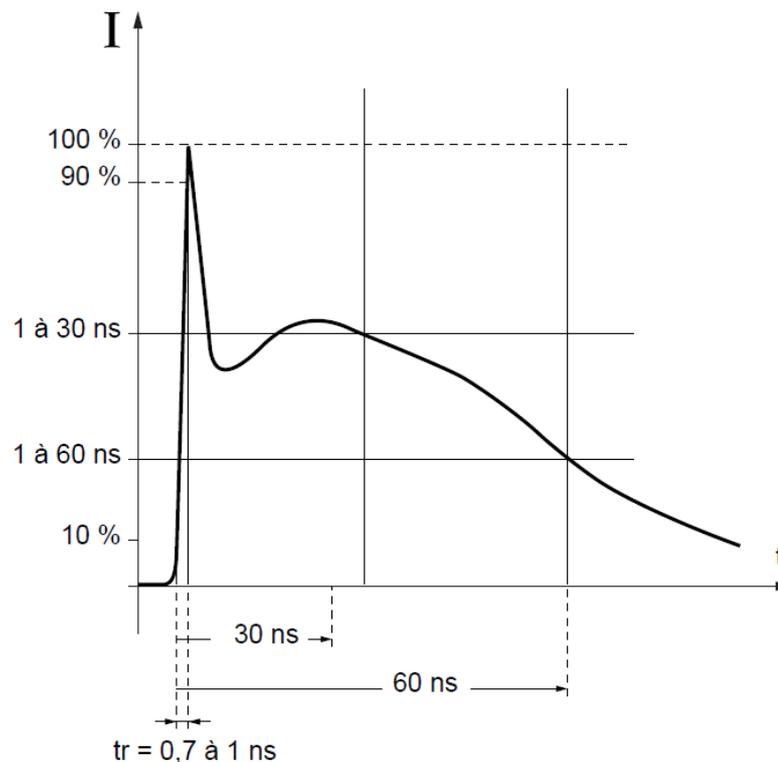


Fig 6 : caractéristique d'une décharge électrostatique

Les perturbations de types décharges électrostatiques sont des perturbations de type haute fréquence «HF» que l'on trouve sous forme conduites, mais qui se couplent facilement sur d'autres conducteurs par rayonnement.

L'effet de la décharge d'un opérateur sur un matériel peut aller du simple dysfonctionnement jusqu'à la destruction du matériel.

Chapitre I : Les sources de perturbations électromagnétiques.

II.1.3 Le bruit cosmique :

Ce bruit est dû aux étoiles qui émettent d'énormes quantités d'énergie, particulièrement le soleil dont l'énergie irradiée se situe dans la bande allant de quelques MHz à quelque GHz. D'autres sources principales de ce bruit sont les centres de toutes les galaxies.

II.2 Les sources de perturbation industrielles :

Ce sont des sources de bruit dues à l'activité humaine elles peuvent être soit intentionnelles, comme les émissions de radiodiffusion ou les radars, ou non intentionnelles, comme les parasites engendrés par les calculateurs, et ceux provenant du secteur d'alimentation....etc.

II.2.1 Champs créé par les émetteurs radio :

Suffisamment loin de l'antenne pour échapper aux phénomènes de champs dans la zone proches, le champ rayonné par un émetteur quelconque (AM, FM, TV, radars, etc.) vaut :

$$E(V/m) = \frac{1}{d} \sqrt{30P \cdot G} \quad [2] \quad (I.3)$$

Avec :

d = distance a laquelle se trouve l'antenne émettrice, en mètres.

P = puissance réelle en sortie de l'émetteur, en Watts.

G = gain de l'antenne, comparé a une antenne théorique isotrope (rayonnement constant dans 360°).

Le produit P x G est appelé « puissance équivalente (ou apparente) rayonnée ».

Chapitre I : Les sources de perturbations électromagnétiques.

II.2.2 Champs créés par les émetteurs radars :

A cause de l'affaiblissement des ondes hyperfréquences, les radars, pour avoir une portée suffisante, utilisent des antennes à très grandes puissances.

La formule (I.3) reste valable, mais on aboutit à des puissances crête (donc des champs pulsés équivalents à une modulation 100%).

Un radar serait donc, a priori, plus perturbateur qu'un émetteur radio ou TV.

Heureusement :

- a) On ne trouve ces radars que dans des endroits particuliers (aéroports, zones portuaires, zone militaire) ;
- b) Des radars de cette puissance ne sont pas braqués vers le sol mais vers le ciel, ou vers une cible bien précise.

II.2.3 Perturbations existantes sur le secteur :

Les principales perturbations existantes sur le secteur sont :

➤ **Les Microcoupures :**

Une microcoupure est une disparition totale de la tension d'alimentation durant moins d'une demi-période (quelques ms). Les microcoupures sont dues à deux causes principales :

- Courts-circuits proches du point de consommation.
- Interruptions de la fourniture dues à la commutation de lignes et déclenchement de protections avec ré-enclenchement automatique.

Effet: Sur des équipements avec des fonctions de mémoire ou de logique, une coupure de l'alimentation (même de courte durée) provoque généralement des dysfonctionnements fonctionnels. Les équipements informatiques sont en général

Chapitre I : Les sources de perturbations électromagnétiques.

très sensibles à ces perturbations qui peuvent entraîner la perte de données très précieuses.

➤ **Surtensions impulsionnelles, unipolaires ou oscillatoires :**

Il s'agit de perturbations transitoires, de fortes impulsions (en tension ou en courant) superposées au secteur, et dont la crête dépasse nettement deux fois la valeur nominale. Leur forme d'onde (**Fig 7**):

- Unipolaire : La forme de cette impulsion est une double exponentielle à montée rapide.
- Oscillatoire : généralement due aux éléments L, C de la ligne, associés à des charges à faible résistance.

Elles proviennent de la commutation rapide des «interrupteurs» mécaniques et surtout électroniques...Lors de la commutation d'un «interrupteur», la tension à ses bornes passe très rapidement de sa valeur nominale à zéro et inversement. Ceci génère de brusques variations de tension (dv/dt) élevées véhiculées dans les câbles.

Les perturbations transitoires sont des perturbations de type haute fréquence «HF». Elles sont conduites dans les conducteurs mais se couplent facilement sur d'autres conducteurs par rayonnement.

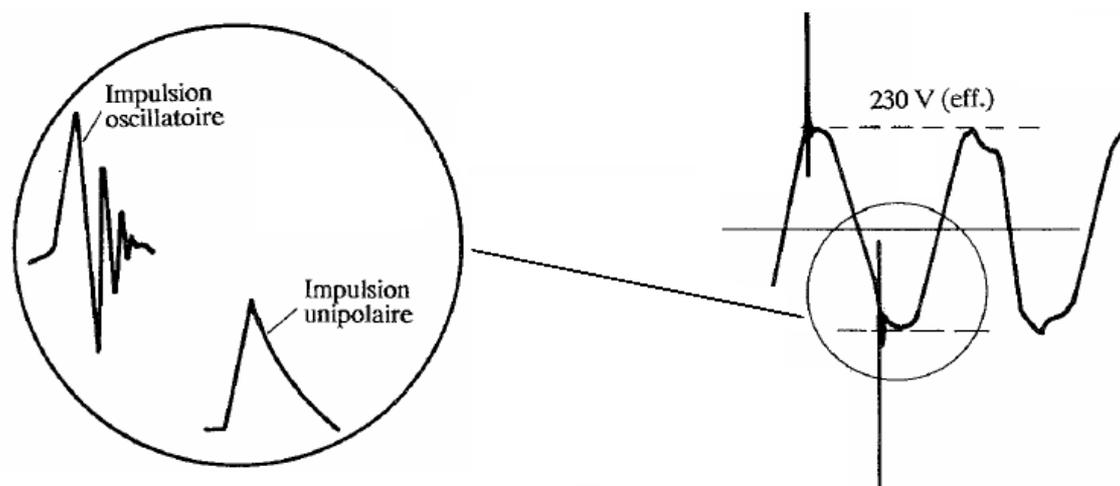


Fig 7 : la forme d'onde des surtensions impulsionnelles

Chapitre I : Les sources de perturbations électromagnétiques.

➤ Les tensions harmoniques :

Le distributeur met à disposition des utilisateurs des tensions sinusoïdales à 50 Hz que certains équipements perturbateurs (électronique de puissance, micro-ordinateurs, ...) peuvent déformer (**Fig 8**). Une tension déformée est la superposition d'une sinusoïde à 50 Hz et d'autres sinusoïdes à des fréquences multiples entières de 50 Hz, que l'on appelle Harmoniques. On dit que la sinusoïde de fréquence 100 Hz est de rang 2, celle de fréquence 150 Hz de rang 3, etc.

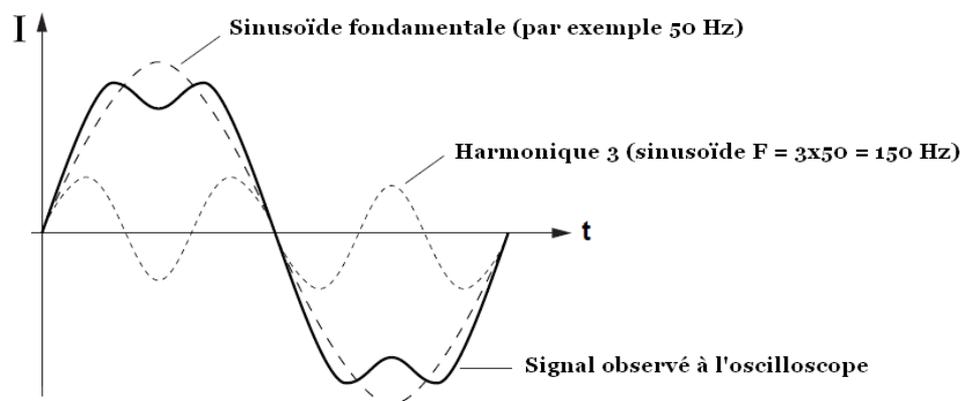


Fig 8 : représentation temporelle des harmoniques

La présence de tensions harmoniques sur le réseau génère des courants harmoniques dans les équipements électriques, ce qui provoque des échauffements.

➤ les variations de fréquence :

L'origine de ce phénomène est les groupes électrogènes dont la fréquence d'entraînement n'est pas régulée.

L'un des problèmes de variation de fréquence est que les harmoniques se déplacent en fréquence avec un décalage proportionnel à leurs rangs, par exemple : une variation de 1 Hz de la source correspond à une variation de 11 Hz de l'harmonique 11. Sachant que tous les matériaux électroniques ne peuvent pas supporter des variations de fréquences de $\pm 4\%$ pendant une durée de 10 ms, sauf le cas de gros systèmes avec

Chapitre I : Les sources de perturbations électromagnétiques.

des transformateurs fonctionnant à la limite de saturation, ils peuvent subir un échauffement excessif par une fréquence faible.

➤ **Bruit HF :**

Dans leurs parcours, les lignes d'énergie sont exposées aux champs de nombreux émetteurs radio, ainsi qu'à la pollution par les consommateurs produisant de la haute fréquence (convertisseurs, hacheurs, soudeuses, appareils HF industriels, matériel médical à fréquences radioélectrique, etc.).

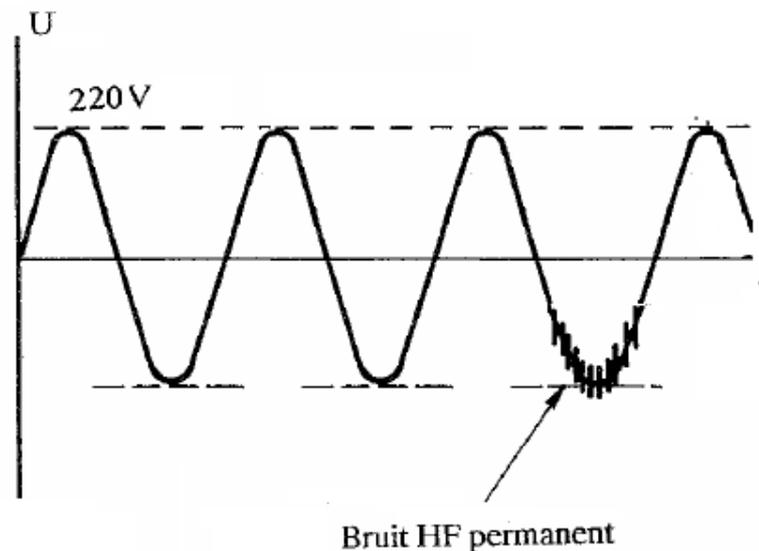


Fig 9 : bruit HF supposé au secteur

On trouve donc couramment des signaux HF superposés au secteur (**fig 9**), souvent modulés aux fréquences AM, FM, TV, etc. Les amplitudes vont de quelques centaines de mV efficaces jusqu'à plusieurs volts pour les cas extrêmes.

II.2.4 convertisseurs et générateurs HF :

De nombreux équipements de puissance utilisent des convertisseurs hautes fréquences :

Chapitre I : Les sources de perturbations électromagnétiques.

- a) Pour la conversion d'énergie :
- Régulateurs de tension à découpage (fréquence de découpage 20 KHz à plusieurs centaines de KHz);
 - convertisseurs de fréquence pour entraînements à vitesse variable ;
 - convertisseurs/onduleurs statiques.
- b) pour utiliser les propriétés de la haute fréquence à des fins industrielles (chauffage, découpage, collage, ultrasons, Ets.) ou scientifiques et médicales. Ces appareils peuvent appliquer des puissances importantes (la dizaine de KW jusqu'à plusieurs MW) à des fréquences qui leur ont été allouées par des règlements internationaux, comme : 6,78 MHz, 13,56 MHz, 27,12 MHz, 40,68 MHz, 915 MHz, 2 450 MHz.

Tous ces équipements superposent en permanence des courants HF sur le réseau d'alimentation. Ils peuvent également rayonner par leurs câbles et leurs capots, puisqu'ils sont assimilables à des émetteurs. A proximité, on peut trouver des champs magnétiques importants (une dizaine d'A/m à une distance de l'ordre du mètre).

II.3 Champ de fuite des transformateurs :

Les transformateurs d'alimentation fonctionnent toujours près de leur saturation. L'induction crête dans le fer dépasse 1.5 T (tesla) et peut même dans certain cas atteindre 2 T. Avec de tels niveaux d'induction, le fer sature (**fig 10**) et le champ magnétique dans l'air dépasse 100 A/m (et peut atteindre 1000 A/m) au voisinage du transformateur.

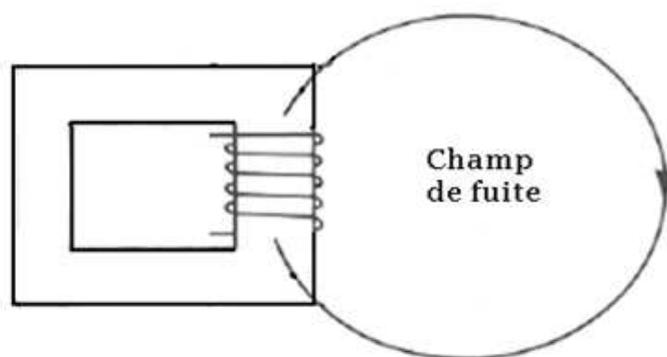


Fig 10 : Champ de fuite au voisinage d'un transformateur

Chapitre I : Les sources de perturbations électromagnétiques.

L'effet le plus fréquent du champ de fuite est la déformation des images de tubes cathodiques. Un tube cathodique classique supporte à peine 3 A/m en basse fréquence. Les autres effets de ce champ sont : l'induction de bruit dans les têtes de lectures (magnétophones, dérouleurs de bande, lecteurs de disquettes...) et dans les boucles de câblage.

Le champ magnétique rayonné par un transformateur, et de manière générale par toute source localisée, décroît rapidement avec la distance.

II.2 Les courts circuits :

Les courts circuits sur les lignes d'alimentation se traduisent par :

- La d.d.p de la ligne qui chute à zéro.
- Le courant de court circuit génère un champ transitoire intense; sur un réseau électrique, le courant de court circuit au voisinage d'un transformateur d'alimentation est de 5 à 50 fois supérieures au courant nominal. Le champ magnétique rayonné durant un court circuit n'est gênant que pour les électroniques sensibles à bas niveau.

II.2.7 Impulsion électromagnétique nucléaire (IEMN) :

L'IEMN est une impulsion de champ électromagnétique intense causée par l'interaction entre les rayonnements (X, gamma, neutrons) émis par l'explosion d'une bombe atomique, et le champ magnétique terrestre. Ce champ est sans effet sur l'être humain et sur les équipements électriques simples, mais toute l'électronique moderne risque d'être détruite.

Si l'explosion a lieu à haute altitude, par exemple entre 40 et 300Km, un territoire immense, sur un rayon de 800 à 2000 km environ est illuminé par ce champ bref, mais très intense.

Chapitre I : Les sources de perturbations électromagnétiques.

S'agissant d'un scénario de guerre, il intéresse surtout les systèmes militaires, mais aussi toutes les installations, vitales au plan national, qui utilisent des calculateurs et des circuits électroniques.

Conclusion :

Nous avons décrit dans ce chapitre les différentes sources de perturbations électromagnétiques. On a mis en évidence quelque source de perturbations fréquentes, en les classant dans deux catégories différentes : naturelles et industrielles.

Chapitre II:

Les couplages

Introduction :

Ce chapitre sera consacré à l'étude des différents couplages existants en CEM. Nous allons définir les six couplages qui permettent aux perturbations de se propager depuis la source jusqu'à la victime. Comprendre les couplages est fondamentale pour remédier à un problème de compatibilité électromagnétique.

I. Généralités :

I.1 Champ magnétique autour d'un conducteur rectiligne :

Si on fait passer un courant d'intensité I dans un fil et si l'on désigne par « r » la distance du point « A » par rapport au fil conducteur, le module de l'induction magnétique B en « A », a pour valeur :

$$B = \frac{\mu}{2\pi} \left(\frac{I}{r} \right) \quad [9] \quad (\text{II.1})$$

Avec :

B en Teslas(T).

I en Ampères(A).

r en mètres (m).

μ : perméabilité magnétique du milieu.

Les lignes d'induction magnétique formées sont des cercles (**Fig 1**). Le sens de l'induction est donné par la règle de la main droite.

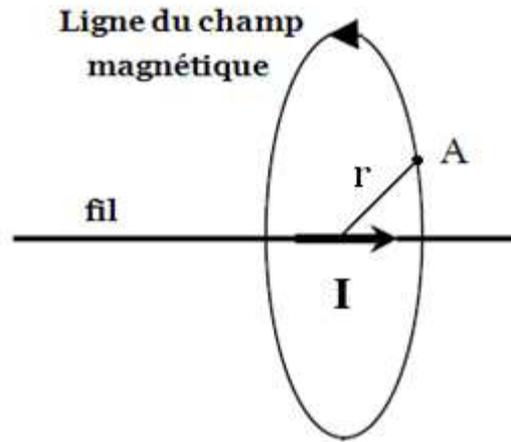


Fig 1 : Champ magnétique autour d'un conducteur rectiligne

I.2 Résistance et inductance d'un conducteur :

I.2.1 Résistance d'un conducteur en BF :

En basse fréquence la résistance d'un conducteur (**Fig 2**) ne dépend que des dimensions du conducteur, elle est donnée par :

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

R : la résistance, en (Ω)

ρ : la résistivité du matériau conducteur, en ($\Omega.m$)

l : la longueur du conducteur, en (m)

S : la section du conducteur, en (m^2)

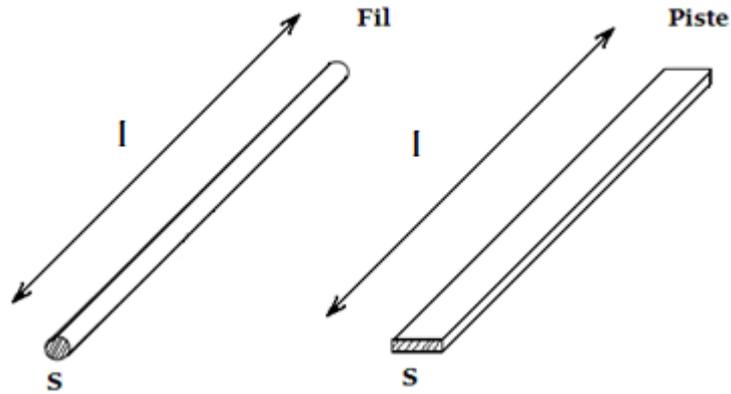


Fig 2 : conducteurs de différentes formes

I.2.2 l'effet de peau :

Aux fréquences élevées, le courant passant le long du conducteur tend à se concentrer sur une partie de la surface (Fig 3) dite profondeur de peau, calculée selon la relation suivante :

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \sigma}} \quad [5] \quad (\text{II.3})$$

Avec :

δ : profondeur de peau

f : fréquence du courant, en (Hz)

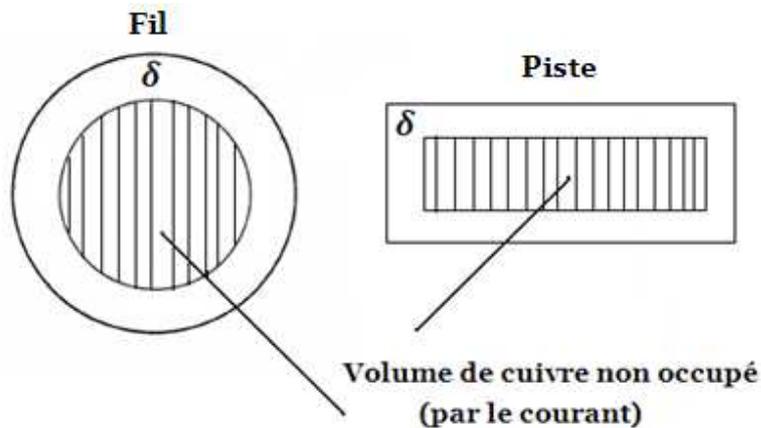


Fig 3 : l'effet de peau

I.2.3 Inductance d'un conducteur :

- L'inductance d'une boucle longue réalisée avec un fil de longueur l et un plan (**Fig4**) est donnée par :

$$L = \frac{\mu}{2\pi} \cdot \ln \frac{4h}{d} \cdot l \quad [9] \quad (\text{II.4})$$

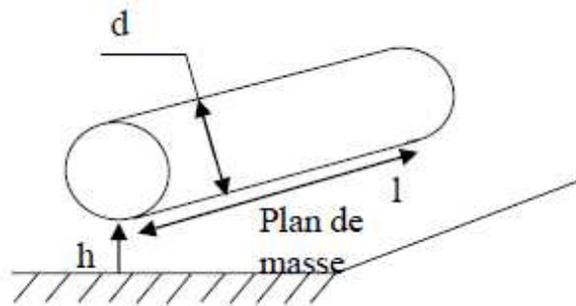


Fig 4 : boucle fil-plan

Avec :

L : l'inductance de la boucle fil-plan

l , d et h : en mètre (m)

- L'inductance d'une boucle longue réalisée avec 2 fils parallèles (**Fig 5**) de longueur l , est donnée par :

$$L = \frac{\mu}{2\pi} \cdot \ln \frac{2D}{d} \cdot l \quad [9] \quad (\text{II.5})$$

Avec :

L : l'inductance de la boucle fil-fil

l , d et D : en mètre (m)

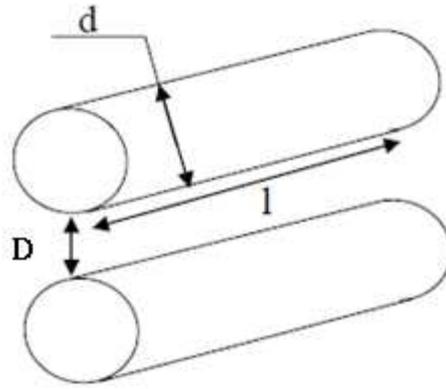


Fig 5 : boucle fil-fil

- boucle longue réalisée avec 2 fils concentriques (**Fig 6**) (câble coaxial, intervalle rempli d'un isolant) :

$$L = \frac{\mu}{2\pi} \cdot \ln \frac{D}{d} \cdot l \quad [9] \quad (\text{II.6})$$

Avec :

L : l'inductance des deux fils concentriques

l, d et D : en mètre (m)

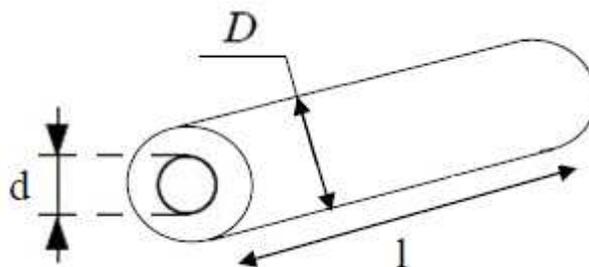


Fig 6 : deux fils concentriques

I.3 Capacité entre deux fils parallèles :

La capacité par unité de longueur, formée par deux conducteurs cylindriques parallèles (**Fig 7**), distend de D est donnée par :

$$C = \frac{\pi \varepsilon}{\log \frac{2D}{d}} \quad [9] \quad (\text{II.7})$$

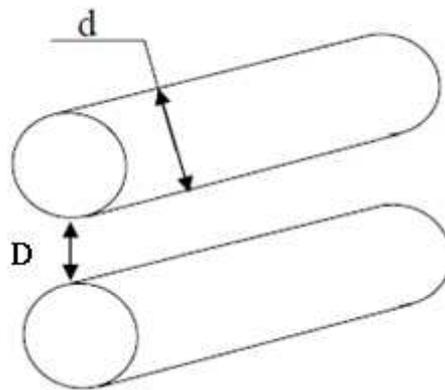


Fig 7 : deux fils parallèles

Avec :

d : rayon d'un fil

D : distance séparant les deux fils

II. Mode différentiel et mode commun:

Les signaux électriques, utiles ou parasites, ont deux façons de se propager en conduction sur une liaison bifilaire : en mode différentiel et en mode commun. Notons que les deux modes coexistent et se superposent.

II.1 Mode différentiel :

Le mode différentiel (MD) est la façon normale de transmettre tous les signaux électriques. On l'appelle aussi **mode symétrique**, **mode série** ou **mode normal** (et parfois encore **mode métallique**, en téléphonie).

Le courant de MD se propage sur l'un des conducteurs et revient en opposition de phase sur les autres conducteurs (**Fig 8**). Les alimentations et tous les signaux électroniques utiles sur deux fils sont transmis en mode différentiel.

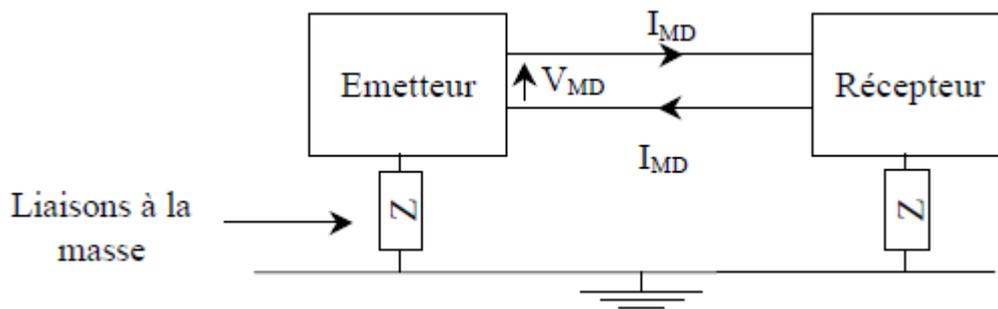


Fig 8 : mode différentiel

La tension de mode différentielle est mesurée entre les fils (conducteurs). En ambiance bruitée, il est possible d'utiliser une sonde de tension différentielle (en BF) ou d'enrouler la sonde d'oscilloscope autour d'un tore de ferrite (en HF).

Le courant en mode différentiel peut être mesuré au moyen d'une sonde de courant parcourue par les fils en sens opposé (**Fig 9**).

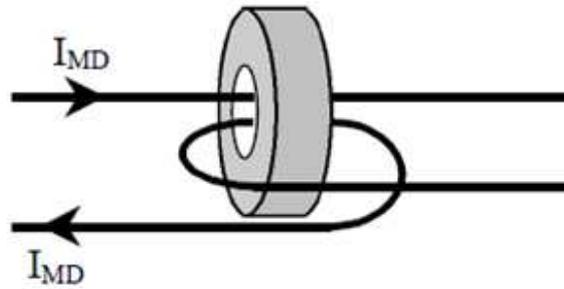


Fig 9 : mesure du courant MD

Les perturbations électromagnétiques ne se couplent que de façon très faible sur les câbles en mode différentiel. Si les conducteurs aller et retour sont très proches et raisonnablement éloignés des conducteurs perturbateurs, on peut négliger les perturbations induites directement en MD.

Puisque les perturbations de mode différentiel sont négligeables pour un équipement raisonnablement câblé, le problème principal en CEM est dans le mode commun. En effet c'est, en pratique, la conversion du MC en MD qui est redoutable.

II.2 Mode commun

Le mode commun est un mode parasite. On l'appelle aussi parfois **mode parallèle**, **mode longitudinal** ou **mode asymétrique**.

Le courant de MC se propage sur tous les conducteurs dans le même sens et revient par la masse. Depuis que la terre n'est plus utilisée comme conducteur de retour par les télécriteurs, pratiquement aucun signal utile n'est désormais transmis en mode commun sur les câbles des signaux (**Fig 10**).

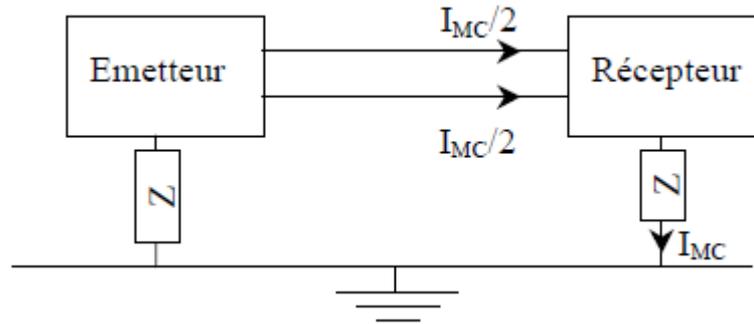


Fig 10 : mode commun

La tension en mode commun est mesurée entre la masse d'une part et le potentiel moyen de tous les fils d'autre part. En absence de masse accessible, il faut poser une tôle au sol qui sert de référence de potentiel. Tous les essais normalisés de CEM, tant en émission qu'en immunité, utilise un plan de sol.

Le courant de mode commun est égal au courant qui s'écoule à la masse. Il peut être mesuré par une sonde de courant traversée par les 2 fils dans le même sens (**Fig 11**).

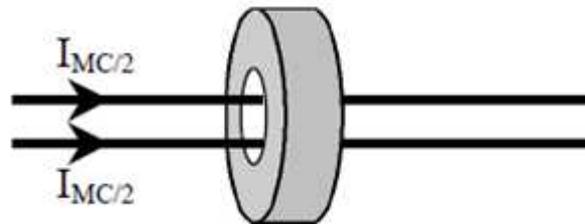


Fig 11 : mesure du courant MC

Les perturbations électromagnétiques se couplent avec efficacité sur les câbles. Tous les mécanismes de couplage en mode commun sont efficaces en HF : impédance commune, effet de main diaphonies inductive et capacitive, champ à câble et champ à boucle de masse. C'est le mode commun qui constitue le problème récurrent de la CEM.

Chapitre II : Les couplages.

Les perturbations HF conduites en mode commun sur les câbles représentent le problème principal en CEM.

II.3 Conversion du MC en MD :

Les perturbations de mode commun sont généralement de bien plus forte amplitude. De plus, elles se transforment très facilement en mode différentiel dès qu'il y a un déséquilibre des impédances d'entrée des systèmes électronique ou une dissymétrie d'extrémité de la liaison (**Fig 12**). En conséquence, ce sont les perturbations de mode commun qui posent le plus de problèmes en CEM.

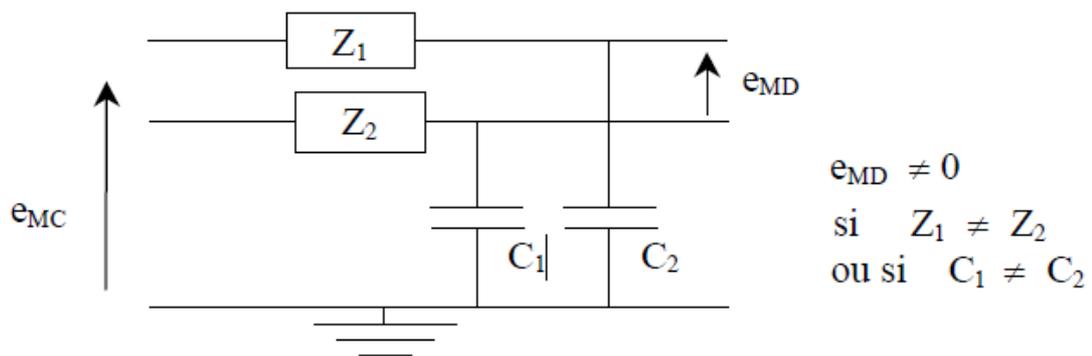


Fig 12 : conversion du mode commun en mode différentiel.

La dissymétrie d'extrémité d'une liaison peut être provoquée par :

- Un déséquilibre électrique, dû à la différence des résistances de terminaison et surtout l'inégalité des capacités parasites.
- Un déséquilibre géométrique, causé par la différence de la longueur du conducteur aller par rapport à celle du conducteur de retour, surtout aux fréquences élevées.

III. Etude des couplages électromagnétiques :

III.1 Le couplage par impédance commune :

L'impédance d'un conducteur électrique n'est jamais nulle. Tout courant (utile ou parasite) qui parcourt un conducteur génère une tension entre ses extrémités. Ceci est particulièrement critique pour les circuits à bas niveau ou rapide (avec peu ou pas d'effet de filtrage en HF).

Ce couplage est réalisé par une impédance Z commune, au circuit coupable et au circuit victime. Il est inévitable, car les pistes de masse ne sont jamais d'impédances totalement nulles (**Fig 13**).

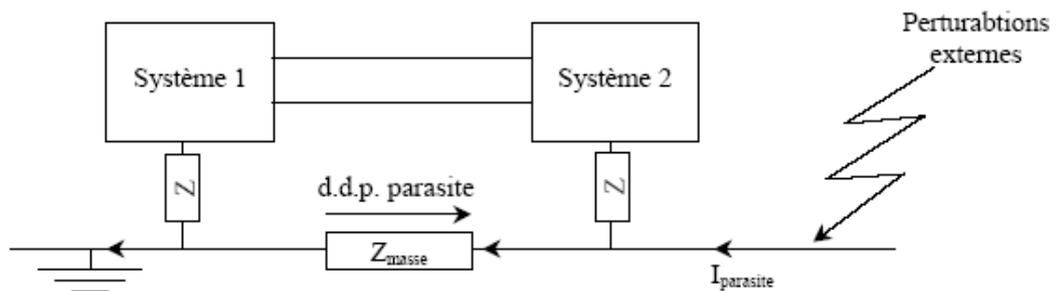


Fig 13 : couplage par impédance commune

La mise en équation de ce couplage est élémentaire. C'est la loi d'Ohm en alternatif :

$$U = ZI \quad (\text{II.8})$$

Avec :

U : tension aux bornes de l'impédance commune, en volts (V).

Z : impédance du conducteur commun entre ces deux points d'extrémité, en ohm(Ω).

I : courant circulant dans le conducteur, en ampère (A).

Chapitre II : Les couplages.

Aux fréquences très basses Z est une résistance, notée R . Pour un conducteur en cuivre (fil) à température ambiante :

$$R = \frac{17L}{S} \quad \mathbf{[1]} \quad \text{(II.9)}$$

Avec :

R : la résistance en milliohms ($m\Omega$).

L : la longueur du conducteur, en mètre (m).

S : la section du conducteur, en millimètres carrés (mm^2).

Pour une piste de cuivre d'un circuit imprimé d'épaisseur courante ($35\mu m$), R se calcule par la formule suivante :

$$R = \frac{0,5L}{D} \quad \mathbf{[1]} \quad \text{(II.10)}$$

Avec :

R : la résistance de la piste, en milliohms ($m\Omega$).

L : la longueur de la piste.

D : la largeur de la piste.

Lorsque la fréquence augmente, l'impédance Z du conducteur, qui était résistive c'est-à-dire constante, devient inductive, c'est-à-dire croissante proportionnellement à la fréquence. Aux fréquences élevées, tout conducteur ne se comporte plus comme une résistance mais comme une inductance. L'impédance d'une inductance est donnée par :

$$Z = 2\pi fL \quad \mathbf{[1]} \quad \text{(II.11)}$$

Avec :

Z : impédance du conducteur en ohm(Ω).

f : la fréquence, en hertz (Hz).

L : l'inductance du conducteur, en henrys (H).

III.2 Le couplage capacitif carte à châssis :

La capacité entre deux conducteurs voisins n'est jamais nulle. Une différence de potentiel entre eux engendre le passage d'un courant parasite, de l'un vers l'autre. Ce phénomène est appelé **couplage capacitif carte à châssis** (Fig 14).

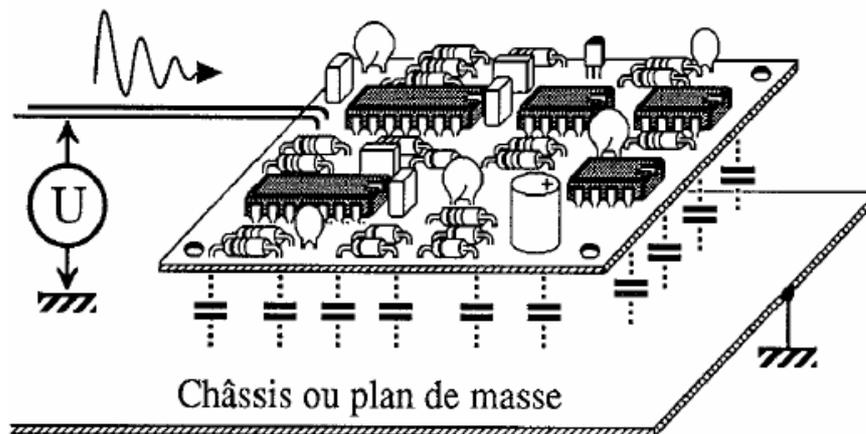


Fig 14 : le couplage capacitif carte à châssis

Le courant total injecté sur le circuit flottant vaut : $I = c \frac{dv}{dt}$, avec c égale à capacité totale entre la carte et son environnement.

➤ Calcul de la capacité totale entre une carte et son environnement :

La capacité totale C_t entre une carte et son environnement est égale à la somme de sa capacité intrinsèque C_i et sa capacité plane C_p :

$$C_t = C_i + C_p \quad [1] \quad (II.12)$$

a. Capacité intrinsèque C_i d'une carte :

La capacité d'une carte posée sur une table en bois par rapport à la terre, n'est pas nulle. Elle est au moins égale à la **capacité intrinsèque**, c'est-à-dire la capacité d'un disque conducteur très loin de toute masse d'un diamètre égale à la diagonale de la carte. Cette capacité, C_i , rend compte des « effets de bords », et elle donnée par la relation suivante:

$$C_i \approx 35D \quad [1] \quad (II.13)$$

Avec :

C_i : capacité intrinsèque, en picofarads (pF).

D : diamètre du disque ou diagonale de la carte, en mètre (m).

Cette relation n'est vraie que pour une carte, de diagonale D , infiniment éloignée des masses (isolée).

b. Capacité plane C_p d'une carte :

Si la carte est proche d'une masse, ce qui est le cas général, sa capacité par rapport à la masse est supérieure à sa capacité intrinsèque. Elle au moins égale à C_p , la **capacité plane** du condensateur plan dans l'air :

$$C_p = 9 \frac{S}{h} \quad [1] \quad (II.14)$$

Avec :

C_p : capacité plane (du condensateur plan équivalent), en picofarads (pF).

S : surface de la carte, en mètre carrés (m²).

h : distance de la carte par rapport au plan de masse, en mètre (m).

III.3 Le couplage par diaphonie inductive:

Le phénomène physique du couplage par diaphonie inductive est simple : un courant dans un conducteur source génère un champ magnétique. Un conducteur voisin se comporte comme une boucle victime par rapport à son propre conducteur de retour. Cette boucle intercepte une partie du champ magnétique généré par le conducteur source. La variation du flux magnétique dans la boucle y induit une tension (**Fig 15**).

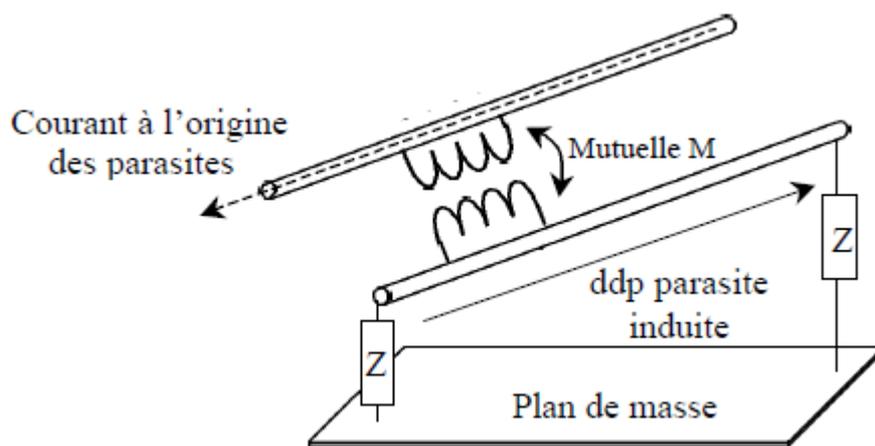


Fig 15 : diaphonie inductive

Chapitre II : Les couplages.

L'introduction de la notion de **mutuelle inductance**, notée M , nous permet de calculer la tension induite dans la boucle victime. Cette tension se calcule par la relation générale:

$$U = M \frac{di}{dt} \quad (\text{II.15})$$

Avec :

U : Tension induite dans la boucle victime, en volts (V)

M : Mutuelle inductance entre le conducteur source et la boucle victime, en henrys (H)

I : Courant source, en ampères (A)

Dans tous les cas la diaphonie inductive est nulle en courant continu. Elle demeure très faible tant que la fréquence du courant source reste dans la gamme des fréquences industrielles. Ainsi, une distribution d'alimentation continue ne bruite pas les liaisons victimes proche par le courant continu qui circule dans les câbles (des dizaines d'ampères) mais souvent par le petit courant HF sinusoïdal amorti superposé (par exemple 200 mA à 5 MHz, se répétant à la fréquence du couplage).

Le cas général se décompose en deux cas particuliers selon que l'on s'intéresse aux perturbations de mode différentiel (boucle de réception entre fil aller et fil retour), ou de mode commun (boucle de réception entre le câble victime et le masse).

Souvent, c'est la diaphonie en MC qui est la plus redoutable.

III.3.1 Diaphonie inductive en mode différentiel :

Dans ce premier cas, la tension parasite est induite entre le fil aller et le fil de retour du circuit victime. Si la distance entre les conducteurs aller et retour est faible, la tension induit sera faible (**Fig 16**).

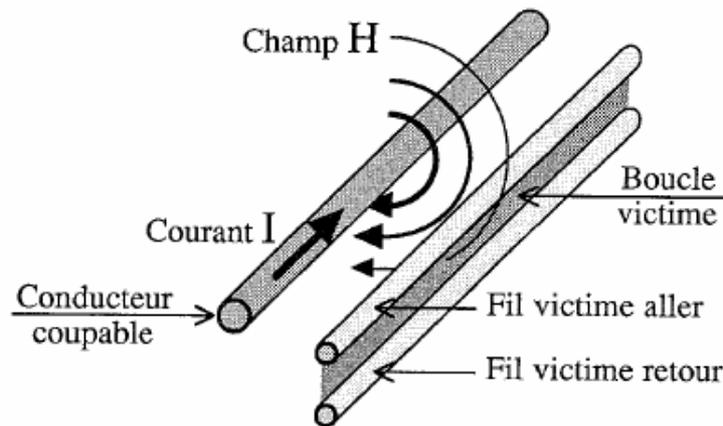


Fig 16 : diaphonie inductive en mode différentiel

La diaphonie dans le pire cas est obtenue quand la longueur commune entre les circuits source et victime est plus grande qu'une demi-longueur d'onde. La diaphonie pire cas se met en équation en pourcentage, c'est-à-dire que la tension victime est une fraction de la tension coupable, ou que le courant dans le circuit victime est une fraction (la même) du courant coupable.

III.3.2 Diaphonie inductive de mode commun :

Pour ce couplage, le champ magnétique est généré par le courant de mode commun sur un câble, et la tension parasite est induite entre un câble parallèle et le conducteur de masse le plus proche. Il est évident que plus la distance entre le câble victime et le conducteur de masse le plus proche est faible, plus la tension induite est faible. Ici encore, la question essentielle est de connaître la géométrie du circuit source par rapport à celle du circuit victime (**Fig 17**).

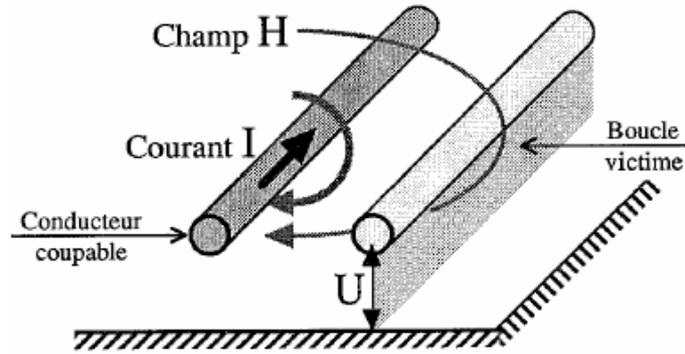


Fig 17 : diaphonie inductive de mode commun

La pire configuration géométrique est le cheminement voisin des deux câbles avec des conducteurs de masse ou un plan de masse éloignés. La diaphonie de mode commun peut alors atteindre 80%.

III.4 Couplage par diaphonie capacitive :

Le phénomène de base est aussi simple que celui de la diaphonie inductive : une tension entre deux conducteurs génère un champ électrique. Un conducteur voisin victime intercepte une partie des lignes de ce champ électrique et collecte par conséquent un courant perturbateur (**Fig 18**).

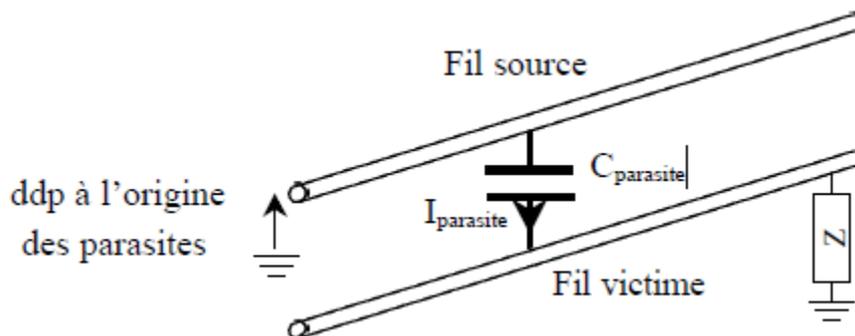


Fig 18 : diaphonie capacitive

Chapitre II : Les couplages.

Ce courant parasite se calcule par la relation suivante :

$$I = C \frac{du}{dt} \quad (\text{II.16})$$

Avec

I : Courant collecté par le conducteur victime, en ampères (A),

C : capacité de couplage entre les deux conducteurs, en farads (F),

U : tension coupable, en volts (V)

Dans tout les cas, la diaphonie capacitive est nulle en continu, et elle demeure très faible tant que la fréquence de la tension coupable reste dans la gamme des fréquences industrielles.

Le cas général se décompose en deux cas particuliers selon que l'on s'intéresse aux perturbations de mode différentiel (courant collecté par le fil aller et se refermant par le fil retour) ou de mode commun (courant collecté par un câble et se refermant par la masse). Comme pour la diaphonie inductive, la diaphonie capacitive en MC est la plus redoutable.

Aux fréquences élevées, la diaphonie capacitive est équivalente en énergie à la diaphonie inductive. Ce phénomène provient de l'effet de ligne qui donne l'illusion, aux premiers instants, qu'une ligne est une résistance : aux premiers instants, l'effet de capacité linéique est égal à l'effet d'inductance linéique. Cette résistance, indépendante de l'impédance au bout de la ligne, est appelée **impédance caractéristique**. Ce la signifie qu'aux premiers instants, c'est-à-dire pendant un aller-retour, l'énergie inductive sous forme de champ H dans une ligne est égale à l'énergie capacitive sous forme de champ E .

III.4.1 Diaphonie capacitive de mode différentiel :

Dans ce premier cas, le courant parasite est collecté entre le conducteur aller et le conducteur de retour du circuit victime (**Fig 19**). Comme pour le couplage inductif, la question est de connaître la géométrie du circuit source par rapport à celle du circuit victime.

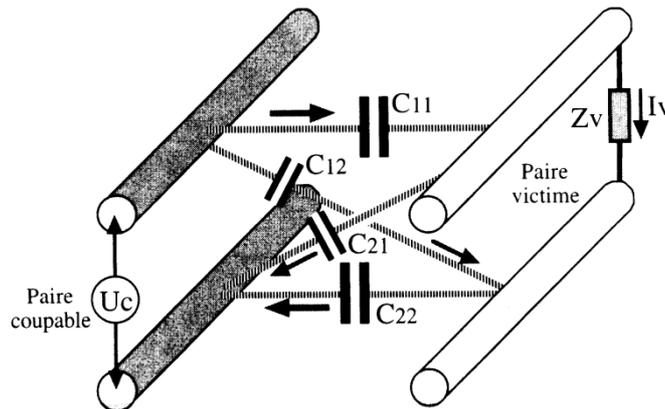


Fig 19 : diaphonie capacitive de mode différentiel

Le pire des cas géométriques est le même que pour la diaphonie inductive. Dans ce cas, la diaphonie maximale (en haute fréquence) peut atteindre 80 %, c'est-à-dire qu'une tension de 1 V à front raide peut induire une tension dans le conducteur voisin de 0,8 V. Si un fil sur deux est connecté au 0 V des deux côtés, la diaphonie maximale chute à 8 % environ.

III.4.2 Diaphonie capacitive de mode commun :

Dans ce deuxième cas, le champ électrique est généré par la tension de mode commun entre un câble et la masse. Le courant parasite est collecté par un câble victime parallèle au câble coupable (**Fig 20**).

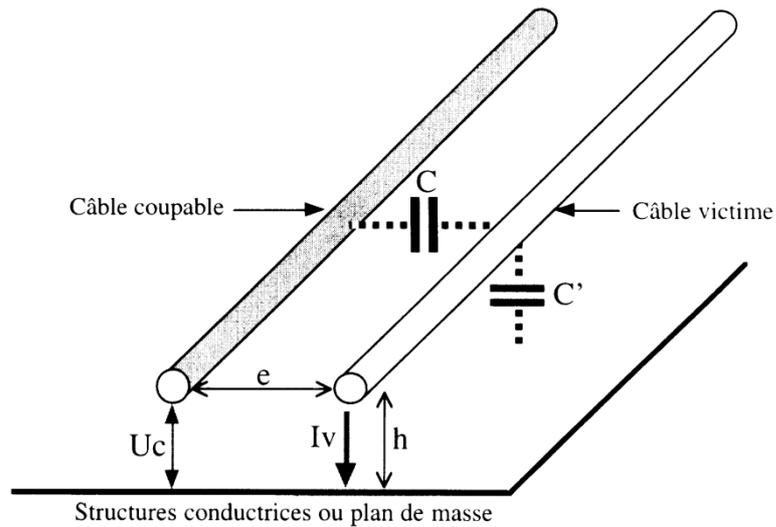


Fig 20 : diaphonie capacitive de mode commun

La diaphonie capacitive de mode commun suit la même loi de décroissance géométrique que la diaphonie inductive. La diaphonie maximale est voisine de 50 %.

III.5 Couplage champ à fil :

Un champ électromagnétique variable illuminant un conducteur, y induit un courant dans le conducteur (**Fig 21**). Ce phénomène est appelé **couplage champ à fil** ou **champ à câble**.

Ce phénomène physique est utilisé par les antennes d'automobiles pour convertir le champ radioélectrique en courant électrique conduit. Un champ électrique qui éclaire un conducteur y déplace un courant. La cause est un champ électrique variable, l'effet un courant induit. Ce conducteur n'a pas besoin d'être en circuit fermé pour que du courant y circule. La capacité électrique entre les extrémités du conducteur suffit à refermer les lignes de courant. Ce phénomène est faible aux fréquences industrielles, mais il devient efficace à partir de la première fréquence de résonance, c'est-à-dire lorsque la longueur du fouet avoisine un quart de longueur d'onde.

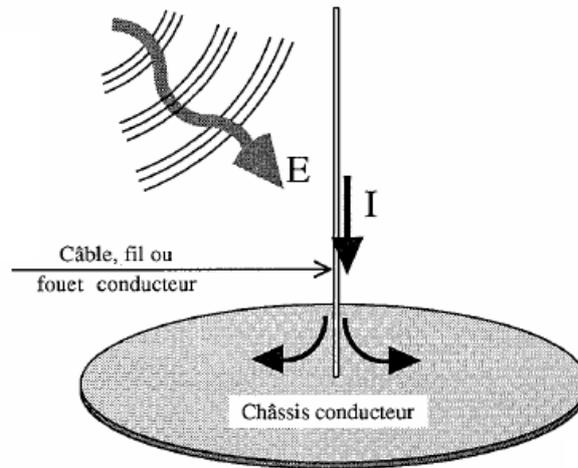


Fig 21 : couplage champ à fil

III.5.1 Couplage champ à fil en BF :

Le modèle le plus simple pour mettre en équation est de considérer une antenne fouet en BF au-dessus d'un plan de masse. Par BF, il faut entendre ici toute fréquence inférieure à la moitié de la fréquence de résonance de l'antenne. Un fouet résonne en $\lambda/4$. Un fouet de 1 m par exemple résonne vers 75 MHz. Le modèle BF est tout à fait valide jusqu'à 35 MHz ou 40 MHz.

Lorsqu'un champ électrique BF éclaire un fouet, le maximum de courant est mesuré à la liaison entre le fouet et le plan de masse. Ce courant d'antenne se calcule par la relation :

$$I \approx \frac{EL^2}{100} \quad [1] \quad (\text{II.17})$$

Avec :

I : Courant collecté par le fouet, en ampères(A)

E : Champ électrique (en absence d'antenne), en volts par mètre (V/m)

L : Longueur du fouet conducteur, en mètres (m)

III.5.2 Couplage champ à fil en HF :

Le modèle du fouet peut encore nous servir en HF. Le courant maximal se calcule par la relation :

$$I = \frac{E\lambda}{240} \quad [1] \quad (\text{II.18})$$

Avec :

I : Courant maximum collecté (à un ventre), en ampères (A)

E : Champ électrique (en absence du câble), en volts par mètre (V/m)

λ : longueur d'onde = $300/f$ (au f est exprimée en mégahertz, en mètre (m)).

III.6 Couplage champ à boucle :

Un champ magnétique variable traversant une boucle y induit un flux magnétique variable. Toute variation de flux crée une tension dite force contre-électromotrice. Ce phénomène est appelé **couplage champ à boucle (Fig 22)**.

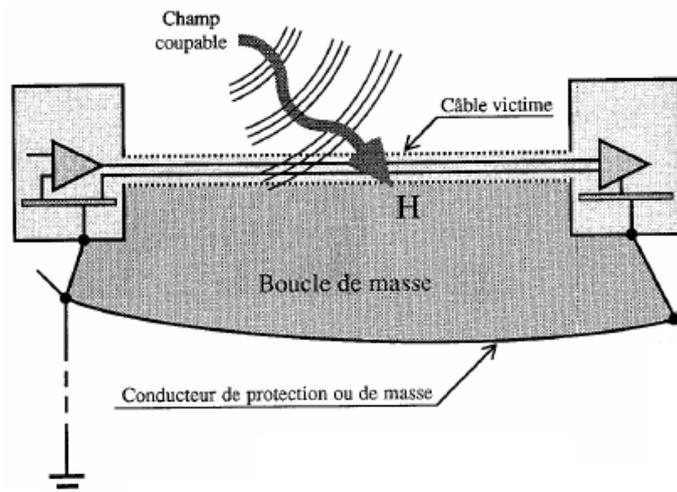


Fig 22 : couplage champ à boucle

Chapitre II : Les couplages.

Le flux d'induction magnétique, ou plus simplement « **flux magnétique** » dans un circuit, se compte en (Wb). C'est le produit de l'**induction magnétique** B par la surface de la spire et par le cosinus de l'angle d'incidence : $\Phi = B S \cos\theta$. L'induction magnétique B , se compte en teslas (T). Dans l'air, B est égale au produit du champ magnétique H (en ampères par mètre, A/m) par $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ H/m.

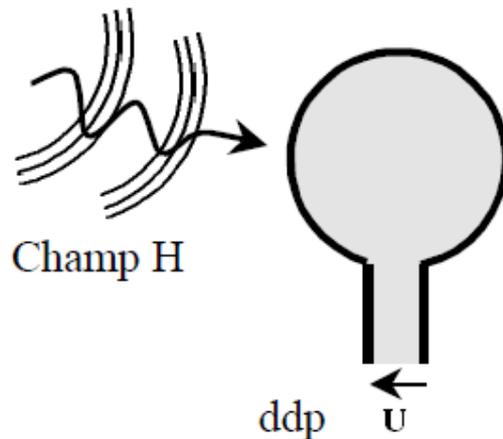


Fig 23 : effet du champ magnétique dans une boucle

La tension induite dans une petite boucle est égale à la dérivée dans le temps du flux d'induction magnétique qui la traverse. Ainsi, pour un angle d'incidence orthogonal, la tension induite dans une boucle d'une seule spire vaut dans l'air :

$$U = S \mu_0 \frac{dH}{dt} \quad (\text{II.19})$$

Avec :

U : tension induite dans la boucle, en volte (V),

S : surface de la boucle, en mètres carrés.

μ_0 : self linéique de l'air $= 4\pi 10^{-7}$ H/m,

ΔH : amplitude à crête du champ H , en ampères par mètre (A/m),

Δt : temps de montée du champ magnétique, de 10 % à 90 %, en secondes (s),

Chapitre IV:

Réglementation et normes

Chapitre III : Les remèdes :

Introduction :

Dans ce troisième chapitre, qui est consacré aux remèdes, nous présenterons les différentes solutions et moyens de protections contre les perturbations électromagnétiques à savoir, le blindage, les filtres, les masses et le câblage. Nous terminerons par quelques conseils pour réduire les différents couplages.

I. Le blindage:

I.1 Notion d'écran électromagnétique :

Un écran électromagnétique (blindage) est une enveloppe conductrice qui sépare l'espace en deux régions, l'une contenant des sources de champs électromagnétiques, l'autre qui en est protégée. Le but d'un écran électromagnétique (blindage) est donc de :

- exclure les émissions rayonnées par des sources se trouvant à l'extérieur de l'enceinte (**Fig 1**).

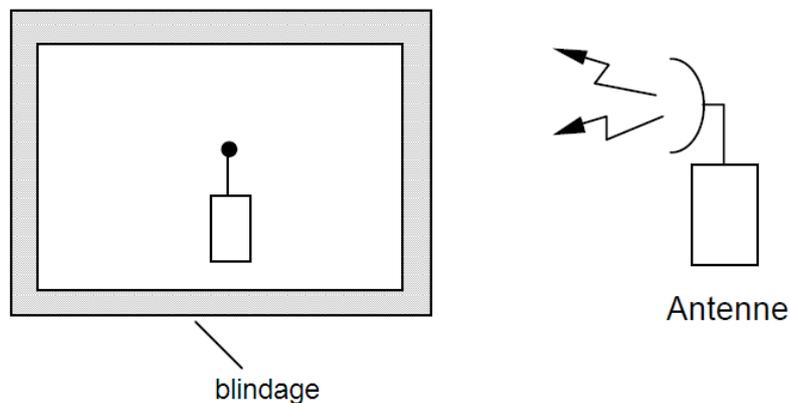


Fig 1 : blindage au niveau de la victime

- contenir les émissions rayonnées à l'intérieur de l'enceinte blindée (l'enveloppe conductrice) (**Fig 2**).

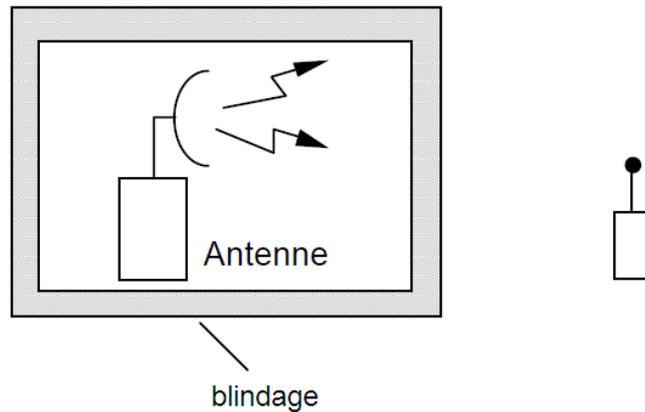


Fig 2 : blindage au niveau de la source

Mais un blindage doit aussi, et surtout, isoler les deux régions en courant. Pour cette fonction essentielle, le rôle d'un blindage est de fournir une référence de potentiel aux câbles externes au coffret et à ses principaux circuits internes. Cependant il n'existe pas de matériaux à conductivité infinie qui permettent de créer un blindage parfait. Il y aura toujours une pénétration de champ électromagnétique à travers les parois par diffusion.

De toute manière, aucun blindage ne peut être une enceinte complètement fermée, sans communication avec l'extérieur. Cette communication est nécessaire pour :

- L'alimentation de l'équipement en énergie électrique;
- Le transfert des informations entre cet équipement et d'autres systèmes;
- La ventilation.

I.2 Efficacité de blindage d'un écran :

L'efficacité de blindage d'un écran, aussi appelée atténuation d'écran, se définit par le champ mesuré en présence du blindage par rapport au champ mesuré sans blindage. Elle est exprimée sous la forme d'une somme de pertes (pertes par réflexion, pertes par absorption pertes de re-réflexion) :

$$SE(dB) = R(dB) + A(dB) + B(dB) \quad [6] \quad (III.1)$$

Chapitre III : Les remèdes :

L'efficacité d'un blindage peut aussi être exprimée sous la forme d'un rapport en dB, entre l'énergie de l'onde incidente sur l'énergie de l'onde transmise. Elle représente l'atténuation de l'onde :

$$SE = 20 \log \frac{E_i}{E_t} = 20 \log \frac{H_i}{H_t} \quad [6] \quad (\text{III.2})$$

I.3 Mécanisme d'atténuation d'un blindage :

I.3.1 Pertes par réflexion R :

Les pertes par réflexion **R** dépendent du rapport entre l'impédance d'onde et l'impédance de la barrière (**Fig 3**). Cette dernière est fonction de la conductivité de la barrière, de sa perméabilité et de la fréquence. Les matériaux très conducteurs comme le cuivre et l'aluminium ont des pertes par réflexion du champ électrique E supérieur à celles de matériaux moins conducteurs comme l'acier.

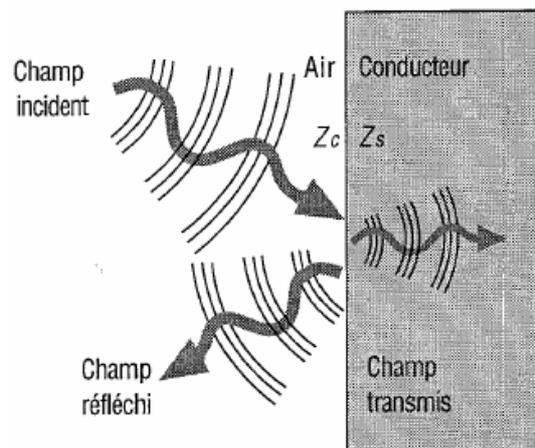


Fig 3 : Pertes par réflexion

Les pertes par réflexion **R**, pour une onde plane, sont données par :

$$R(\text{dB}) = 168 - 10 \log \left(\frac{\sigma_r}{\mu_r f} \right) \quad [6] \quad (\text{III.3})$$

Chapitre III : Les remèdes :

Les pertes par re-réflexion **B** sont insignifiantes dans la plupart des cas. Mais elles deviennent importantes pour les barrières fines en basses fréquences.

$$B \text{ (dB)} = 20 \log \left(1 - e^{-2\sqrt{2}\left(\frac{t}{\delta}\right)} \right) \quad [6] \quad (\text{III.4})$$

t : L'épaisseur du blindage (m)

δ : La profondeur de pénétration (m)

I.3.2 Pertes par absorption :

Les pertes par absorption dépendent de l'épaisseur de la barrière et de son épaisseur de peau (δ) (**Fig 4**). L'épaisseur de peau à son tour dépend des propriétés de la barrière.

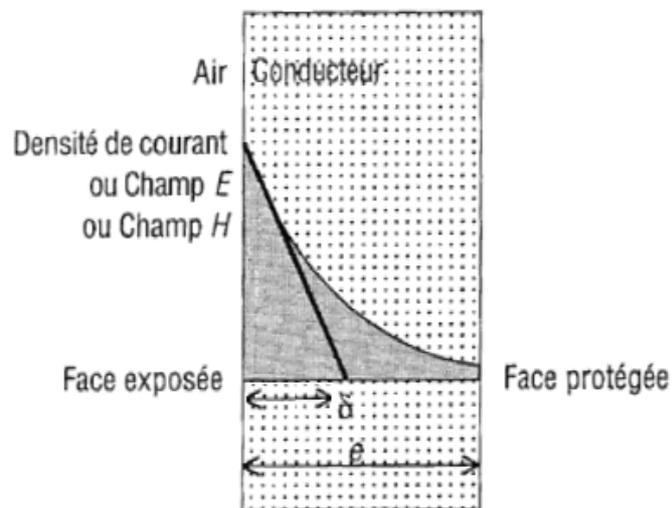


Fig 4 : Pertes par absorption

Pour un blindage d'épaisseur t , le facteur d'absorption **A** est donné par :

$$A = 8.69 \frac{t}{\delta} = 132 \sqrt{\mu_r \sigma_r f} \quad [6] \quad (\text{III.5})$$

Chapitre III : Les remèdes :

δ est la profondeur de pénétration (épaisseur de peau), elle dépend de la fréquence f , de la perméabilité μ_r et de la conductivité σ_r .

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{2\pi f \mu_r \sigma_r}} = \frac{0,066}{\sqrt{\mu_r \sigma_r f}} \quad [6] \quad (\text{III.6})$$

I.3.2 Le blindage en HF :

L'efficacité d'écran d'une enveloppe aux fréquences élevées, disons au-delà d'une dizaine de mégahertz, n'est pratiquement fonction que des ses fuites.

Les ouvertures sont les principales causes de fuites d'une enveloppe en HF (**Fig 5**). Les ouvertures à travers un blindage sont nécessaires pour la ventilation, pour le branchement des connecteurs d'entrées et de sorties, pour la mise en place des appareils de mesure, pour le passage des interrupteurs...etc. Les ouvertures et les discontinuités diminuent considérablement l'efficacité d'un blindage. Pratiquement, excepté en champ magnétique basse fréquence, l'efficacité d'un blindage dépend moins de l'efficacité du matériau en lui même, que de la prise en compte des ouvertures, et des discontinuités.

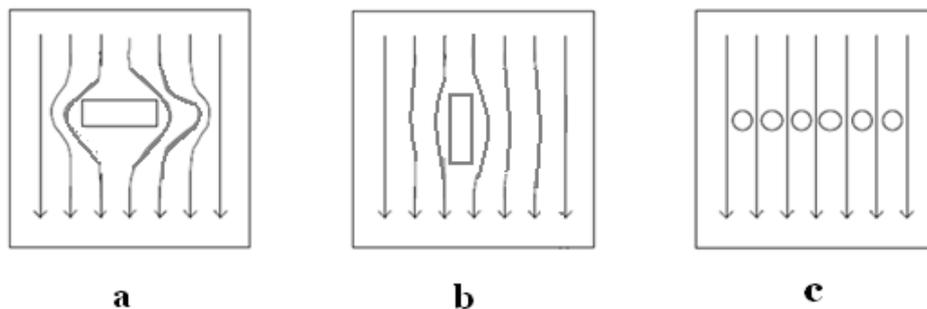


Fig 5 : Distribution des lignes de courants induits

La figure ci-dessus, montre comment les ouvertures modifient la distribution des lignes de courants induits par un champ perturbateur. Si la circulation de ces courants est perturbée par les ouvertures, ou par les discontinuités dans le blindage (la configuration **a**), l'efficacité est réduite. La meilleure configuration à orifices de

Chapitre III : Les remèdes :

ventilation est celle représentée dans (c). La configuration (b) est acceptable car elle perturbe moins les lignes de courant.

Les ouvertures permettent aussi la pénétration des champs électromagnétiques externes à l'intérieur de l'enceinte blindée, selon des lois physiques qui font que :

- les lignes du champ électrique soient perpendiculaires sur un matériau à conductivité infinie (conductivité très élevée dans le cas de la paroi métallique de l'enceinte blindée);
- les lignes du champ magnétique soient parallèles à la surface d'un matériau à conductivité infinie (conductivité très élevée dans le cas de la paroi métallique de l'enceinte blindée).

En obéissant à ces lois, les lignes du champ électrique qui pénètrent par une ouverture dans la paroi d'un blindage, vont s'incurver pour finir d'une façon orthogonale sur la face interne de la paroi ou sur les surfaces métalliques des conducteurs qui passent à proximité de l'ouverture respective. Les lignes du champ magnétique qui pénètrent par une ouverture dans la paroi d'un blindage, vont aussi s'incurver, mais d'une autre manière pour rester le plus possible parallèles aux parois et vont embrasser un conducteur qui se trouve à proximité de l'ouverture et perpendiculaire au plan de la figure.

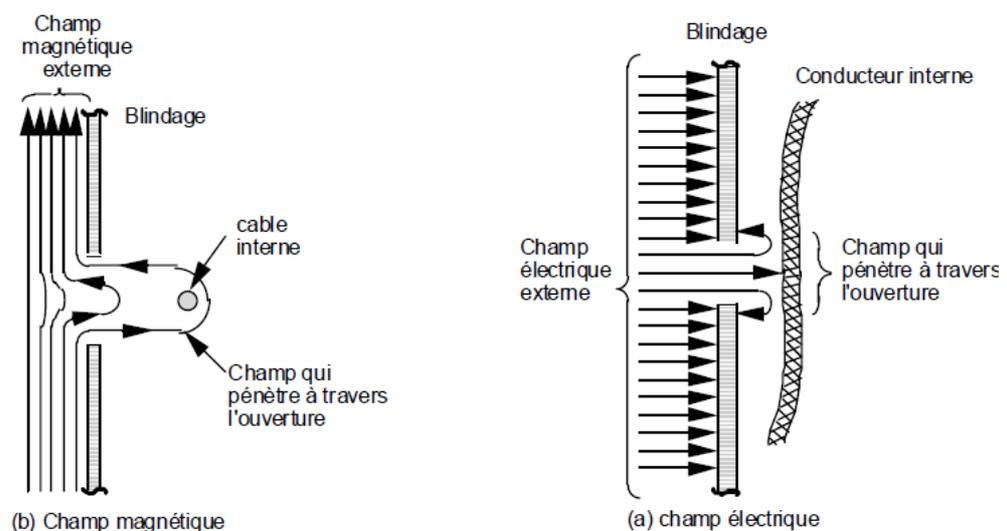


Fig 6 : Pénétration du champ électromagnétique par les ouvertures

Chapitre III : Les remèdes :

Afin de limiter la pénétration du champ électromagnétique, il est possible de réduire le diamètre de l'ouverture sans diminuer la surface totale d'ouverture, ce qui est important par exemple pour évacuer une certaine quantité d'air par ventilation, une solution consiste à découper une grande ouverture en plusieurs ouvertures plus petites mais dont la surface totale est égale à celle de la grande ouverture (fig ci-dessous).

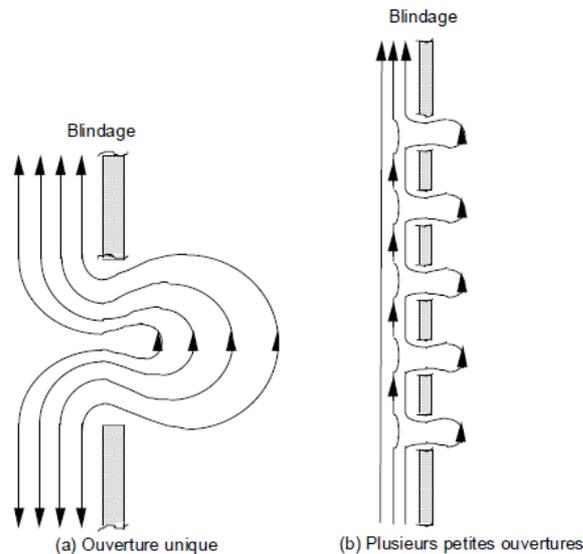


Fig 7 : découper une grande ouverture en plusieurs ouvertures

Les fuites à travers une ouverture dépendent des 3 critères suivants :

- La dimension maximale de l'ouverture.
- L'impédance d'onde.
- La fréquence de la source.

Voici quelques conseils à suivre pour réduire les fuites dues aux ouvertures et discontinuités :

- Il est plus intéressant de faire une multitude de trous qu'un large trou de surface équivalente.
- Pour les ouvertures de grandes tailles, demandées par les afficheurs, il est recommandé d'utiliser un deuxième écran entourant l'afficheur à l'intérieur

Chapitre III : Les remèdes :

- Assurer l'étanchéité des parois de blindage avec des joints électromagnétiques (vis, ressorts de contact,...).
- Tous les fils d'interconnexions doivent comporter des filtres, pour éviter la pénétration des perturbations par conduction, dans l'espace protégé.
- Une meilleure efficacité de blindage peut être obtenue grâce à des barrières épaisses, car une ouverture à travers une barrière épaisse agit comme un guide d'onde.

II. Le filtrage :

I.1 Définition d'un filtre :

Un filtre est un dispositif qui atténue d'une façon sélective les signaux qui le traversent. En principe le filtre électrique agit comme un pont diviseur de tension par rapport à la charge. La sélectivité du filtre repose sur le concept d'adaptation ou de désadaptation de la charge, qui dépend de la fréquence du signal.

Le but du filtrage est d'éliminer les perturbations conduites.

II.2 Les différents types de filtres :

La façon habituelle de classer les filtres est de distinguer les quatre fonctions de base :

- **Filtre passe-bas :**

Les filtres passe bas sont les plus utilisés en CEM (**Fig 8**). Tous les filtres d'alimentation et la plupart de ceux d'entrée-sortie sont des filtres passe bas. Le filtre le plus simple est composé d'un condensateur à la masse. L'efficacité d'un tel filtre est médiocre. Une amélioration de l'efficacité d'un condensateur s'obtient par l'ajout d'une résistance en entrée de carte.

Chapitre III : Les remèdes :

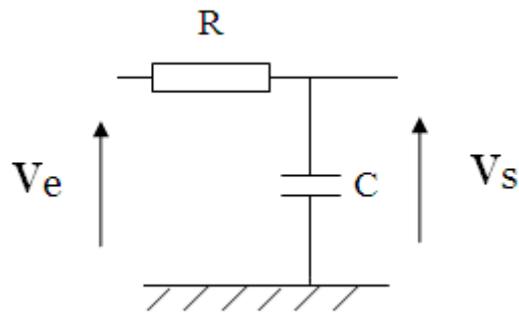


Fig 8 : Filtre passe-bas

- **Filtre passe-haut :**

En CEM les perturbations HF sont les plus difficiles à maîtriser, un câble coaxial mis à la masse aux deux bouts rejette efficacement les perturbations HF, mais en BF il ajoute au signal la ddp entre ses extrémités d'où l'utilité d'un filtre passe haut pour rejeter les perturbations BF (**Fig 9**).

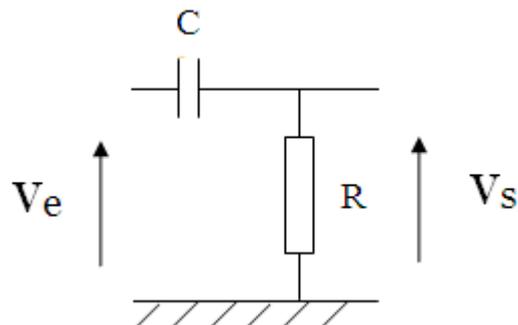


Fig 9 : Filtre passe-haut

- **Filtre passe-bande :**

Ce type de filtre est essentiellement utilisé en émission et réception radioélectrique (**Fig 10**). Un filtre passe bande de réception devrait être placé directement en entrée c'est-à-dire en amont des circuits actifs. A l'inverse, un filtre passe bande en émission radio devrait être installé en sortie en aval des circuits de puissance.

Chapitre III : Les remèdes :

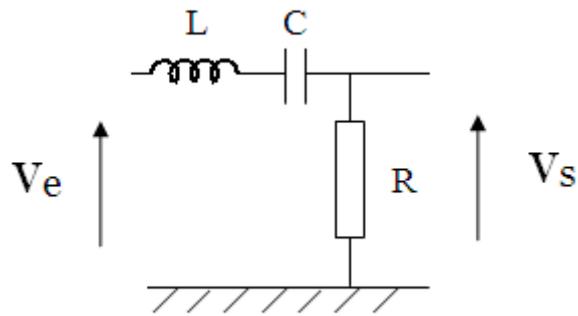


Fig 10 : Filtre passe-bande

- **Filtre coupe-bande :**

Ce dernier type de filtre est aussi utilisé en émission et en réception radioélectrique (**Fig 11**). Un filtre coupe bande sert à rejeter une fréquence parasite ; une fréquence image ou une raie d'un oscillateur local par exemple.

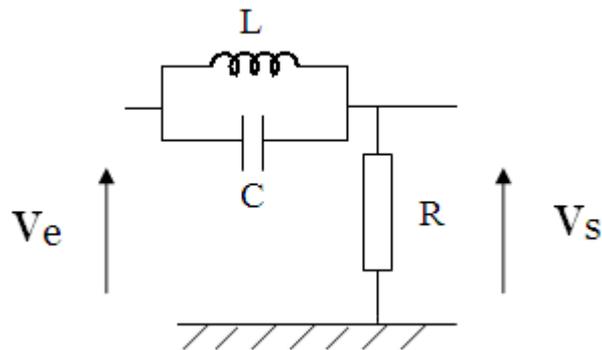


Fig 11 : Filtre coupe-bande

II.3.3 Perte d'insertion d'un filtre :

La perte d'insertion d'un filtre, appelée aussi efficacité d'un filtre, est par définition le niveau résiduel mesuré après la pose du filtre par rapport au niveau mesuré sans filtre (**Fig 12**).

Chapitre III : Les remèdes :

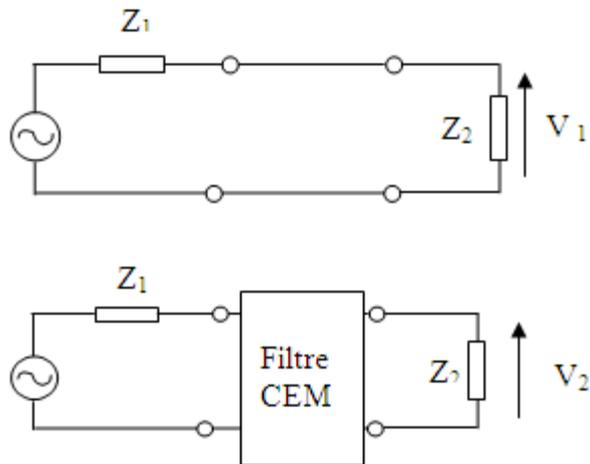


Fig 12 : Calcul de l'efficacité de filtrage

L'efficacité d'un filtre est donnée par :

$$A = 20 \log \frac{V_2}{V_1} \quad [6] \quad (\text{III.7})$$

Avec :

V_1 : la tension mesurée sans filtre.

V_2 : la tension mesurée avec le filtre.

II.3.2 Critères de choix d'un filtre :

Le choix d'un filtre s'effectue selon beaucoup de critères :

- Tension et/ ou courant de service ;
- Fréquence de travail ;
- Efficacité recherchée (pertes d'insertion imposée par le cahier de charge) ;
- Volume et gabarit disponible ;
- Condition d'exploitation (température, chocs, etc) ;
- Conditions électriques imposées : courant de fuite maximum, résistance d'isolement, chute de tension admissible.

Chapitre III : Les remèdes :

II.5 Consignes et précautions d'installation d'un filtre :

Dans le but d'avoir de bonnes performances voici quelques consignes à respecter lors de l'installation d'un filtre :

- Placer le filtre le plus près possible du circuit perturbateur (déparasitage en émission).
- Placer le filtre le plus près possible du circuit perturbé (déparasitage en réception).
- Réaliser des connexions les plus courtes possibles tout en évitant les boucles.
- Utiliser des câbles blindés pour amener les signaux à l'entrée du filtre ou pour transporter les signaux à la sortie du filtre.
- Lors de la réalisation de circuits imprimés, séparer d'une distance convenable les pistes d'entrée par rapport aux pistes de sortie du filtre.

II.6 Les ferrites :

Ce sont des filtres de mode commun en haute fréquence «HF». Les ferrites sont constituées de matériaux à forte perméabilité magnétique « μ_r ».

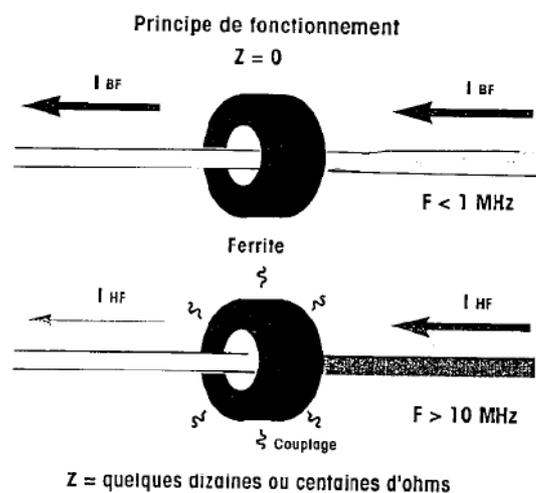


Fig 13 : Principe de fonctionnement des ferrites

Chapitre III : Les remèdes :

La ferrite utilise deux principes :

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

III. Masses et équipotentialités :

III.1 Définition de la masse :

Le plus souvent on dit que la masse est un point ou plan équipotentiel qui sert de référence de potentiels pour un circuit ou un système. Cette définition ne prend pas en compte la circulation des courants par la masse. On peut aussi définir la masse comme conducteur de faible impédance qui assure le retour courant vers le générateur ».

Du point de vue CEM, la fonction de la masse est de réduire au maximum les interférences.

- **Masse idéale :**

C'est un conducteur qui garde son potentiel constant, en dépit des courants qui le traversent. A cause de cette propriété on l'appelle aussi « équipotentiel ».

III.2 Impédance d'une connexion à la masse :

En pratique, la masse est loin d'être équipotentielle, surtout à cause des connexions la reliant aux autres masses du circuit. Ces connexions sont réalisées soit directement (assemblage mécanique) soit indirectement (par des barreaux ou fils métalliques).

Dans le premier cas, l'impédance de transition est négligeable ; dans le second cas, le fil ou le barreau comporte une impédance faible, mais qui n'est pas nulle. Par exemple, lors de l'utilisation d'un fil, l'impédance qui lui est associé est :

Chapitre III : Les remèdes :

$$Z = R + j\omega L \quad (\text{III.9})$$

Où R est la résistance en courant continu ou en courant alternatif. Le terme le plus gênant dans cette expression est l'inductance L qui augmente avec la fréquence.

III.3 Les différentes façons de mise à la masse :

Suivant la façon dont la connexion est réalisée au niveau du plan de masse, on distingue trois manières différentes pour connecter les masses locales d'un équipement électronique à la masse générale.

- masses connectées en un seul point.
- masses connectées en plusieurs points.
- Connexions mixtes.

III.3.1 Masses connectées en un seul point :

Ce premier cas est illustré sur la figure ci-dessous. Les connexions sont réalisées avec des liaisons filaires, où les inductances parasites des fils sont mises en évidence.

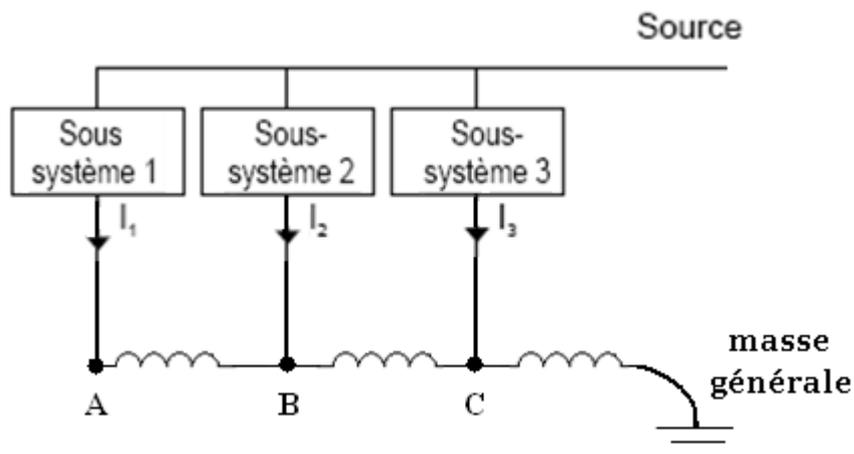


Fig 14 : Masses connectées en un seul point

Chapitre III : Les remèdes :

Les potentiels des points A, B et C sont décalés par rapport au potentiel du point de masse, à cause des chutes de tension produites par les courants I_1 , I_2 et I_3 sur les impédances de connexions.

$$V_A > V_B > V_C$$

Cette inégalité montre que le circuit le plus critique du point de vue susceptibilité électromagnétique doit être placé sur la position C.

Bien que largement utilisé à cause de la commodité de sa réalisation, cette connexion n'est pas très recommandée. Surtout lorsque un des circuits A, B ou C fournit un courant beaucoup plus important que les autres, les variations de ce courant perturbent les circuits partageant la même masse.

III.3.2 Masses connectées en plusieurs points :

Ce type de connexion est souvent utilisé pour les circuits de hautes fréquences ($f > 10$ MHz) ou bien pour les circuits logiques travaillant à des fréquences d'horloge très élevée (Fig 15).

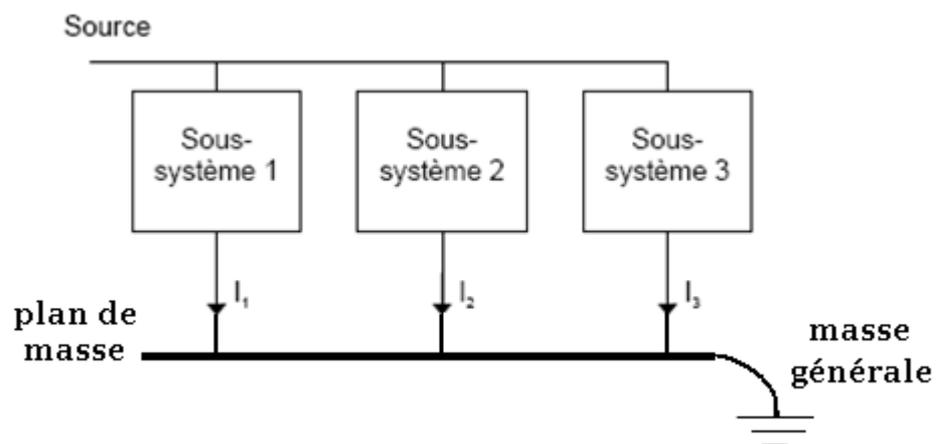


Fig 15 : Masses connectées en plusieurs points

Chapitre III : Les remèdes :

Les avantages sont la séparation des courants et l'utilisation du plan de masse, qui remplace les fils reliant les masses locales à la masse générale donc une inductance parasite plus faible.

III.3.3 Connexions mixtes :

Le montage est une combinaison entre la connexion en un seul point et la connexion en plusieurs points (**Fig 16**). La configuration dépend de la fréquence de travail. Deux possibilités sont offertes :

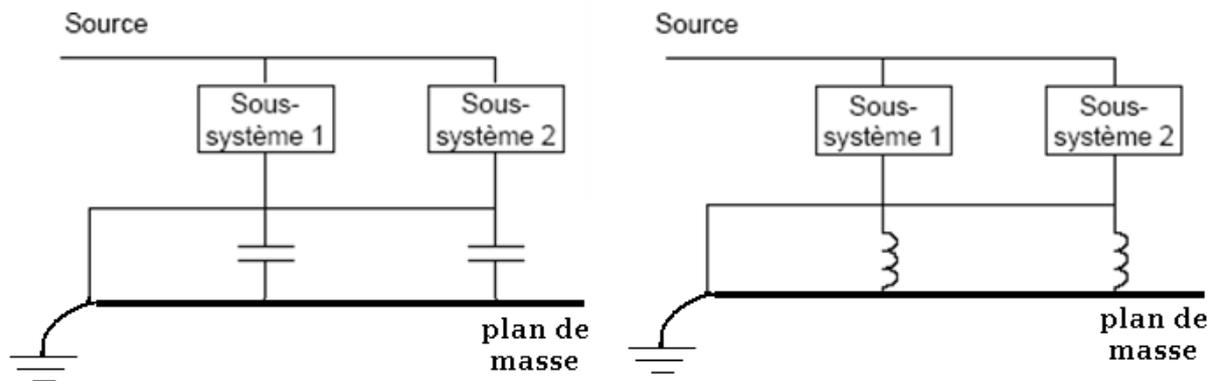


Fig 16 : Connexions mixtes

Les valeurs des condensateurs sont choisies de telle sorte qu'ils se conduisent comme des courts-circuits en HF et les inductances, comme des circuits ouverts en hautes fréquences.

III.4 Conseils pratiques pour les raccordements à la masse :

Voici quelque conseil pour éviter les pièges liés au raccordement à la masse :

- tous les corps métalliques doivent être connectés à la masse. Sinon, lorsqu'ils sont flottants, la mise à la masse se fera par des capacités parasites qui ne sont pas sous le contrôle du concepteur.

Chapitre III : Les remèdes :

- le fil de mise à la masse ne doit pas comporter des boucles pour éviter d'augmenter l'inductance propre.
- le passage de ce fil doit se faire le plus près possible d'un plan métallique de masse.
- les angles droits sont bannis sur les fils de connexion ou les pistes de mise à la masse d'un câblage imprimé, à cause de l'augmentation de l'inductance parasites.
- les circuits logiques sont traités comme des circuits HF, à cause de la fréquence élevée de l'horloge.
- A une fréquence inférieure à 1 MHz un seul point de masse suffit pour relier les écrans et les blindages. En revanche, à des fréquences supérieures à 1 MHz il est nécessaire d'utiliser plusieurs points de masse.

IV. Le câblage :

Le câblage est le dernier élément constituant une réalisation électrique ou électronique, et ce dernier doit être réalisé correctement.

IV.1 Les différents types de signaux véhiculés par un câblage :

Avant de réaliser un câblage, il importe de distinguer les différents types de signaux qu'il va falloir véhiculer. On peut les classer en quatre groupes (catégories) distincts :

- **Groupe 1** : les signaux analogiques bas niveaux tel que les sortie de capteurs analogiques et parfois même aussi les alimentations. Ces signaux ne sont pas perturbateurs mais sont très sensibles aux perturbations.
- **Groupe 2** : les signaux numériques qui sont sensibles aux perturbations mais peuvent aussi être perturbateurs pour les précédents.
- **Groupe 3** : les signaux de contrôle ou de commande à haut niveau (interrupteurs, relais, voyants, etc.). ces signaux sont relativement insensibles aux perturbations mais très perturbateurs aux deux précédents.
- **Groupe 4** : les signaux de puissance (alimentation, commandes de moteurs, découpeur à thyristors, etc.) ces signaux sont aussi insensibles aux

Chapitre III : Les remèdes :

perturbations mais très perturbateurs pour les deux premières catégories et parfois même pour la troisième catégorie.

IV.2 Choix des câbles :

Parmi les câbles compatibles avec les considérations CEM, citons :

- **Le câble coaxial :**

Il comporte un conducteur central ou âme, sur lequel circule le signal utile, et un écran qui sert à la fois de blindage et de chemin de retour pour le signal.

- **Les paires torsadées.**

Il s'agit d'un câble dont le conducteur aller et le conducteur retour sont torsadés afin que les effets d'un champ magnétique sur les deux conducteurs s'annulent.

- **Les câbles blindés.**

Ils comprennent un certain nombre de conducteurs aller et retour et un écran ne sert comme son nom l'indique que d'écran

- **Les paires torsadées blindées**

Ce type de câble cumule les deux aspects présentés ci dessus.

- **Les câbles blindés avec écran ferrite :**

Le blindage ferrite est constitué d'un élastomère chargé de poudre de ferrite. Ce type de câble possède généralement deux écrans :

- ✓ Un écran ferrite extérieur efficace sur les perturbations HF.
- ✓ Un écran classique interne chargé d'arrêter les perturbations BF.

Chapitre III : Les remèdes :

IV.3 Cheminement des câbles :

La qualité de la réalisation du cheminement des câbles doit être irréprochable afin de ne pas briser la chaîne des mesures nécessaires aux règles de la CEM. Seuls les goulottes et chemins de câbles métalliques sont compatibles CEM. Ils seront reliés aux circuits de masse de l'installation afin d'augmenter le maillage global de l'installation et d'améliorer l'équipotentialité. Les parois métalliques de ces cheminements forment un écran vis à vis des perturbations. La répartition des conducteurs dans un chemin de câbles doit tenir compte des zones qui sont protégées et de celles qui sont exposées (Fig 17).

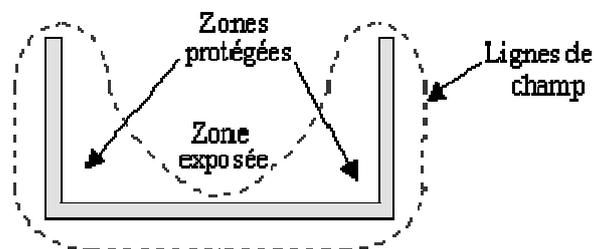


Fig 17 : Les zones protégées contre les perturbations dans une tablette métallique

La répartition des câbles sur les tablettes métalliques se fera en prenant en compte les groupes de signaux. Les câbles pollueurs et les câbles sensibles seront implantés dans les zones protégées afin de ne pas polluer ou être polluer. Il faut veiller à ce que la hauteur des parois soit supérieure à la hauteur des câbles (Fig 18).

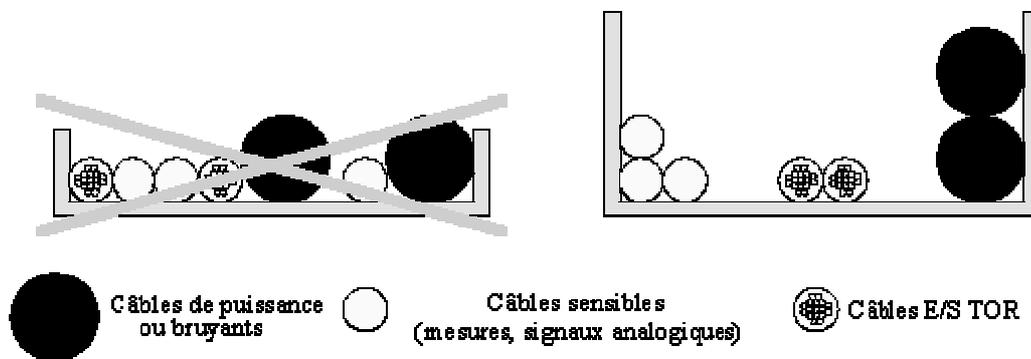


Fig 18 : La répartition des câbles sur les tablettes métalliques

Chapitre III : Les remèdes :

Dans le cadre d'une installation neuve, il est préférable d'utiliser des chemins de câbles cloisonnés, ou mieux des chemins de câbles séparés.

Lorsque des câbles perturbateurs et des câbles sensibles sont installés dans un même cheminement métallique, il est déconseillé de couvrir la goulotte avec un couvercle métallique afin d'éviter la diaphonie entre circuits voisins. Le champ H étant égal à NI/L , s'il y a absence de couvercle, les lignes de champ L sont plus longues réduisant ainsi la valeur de H (**Fig 19**).

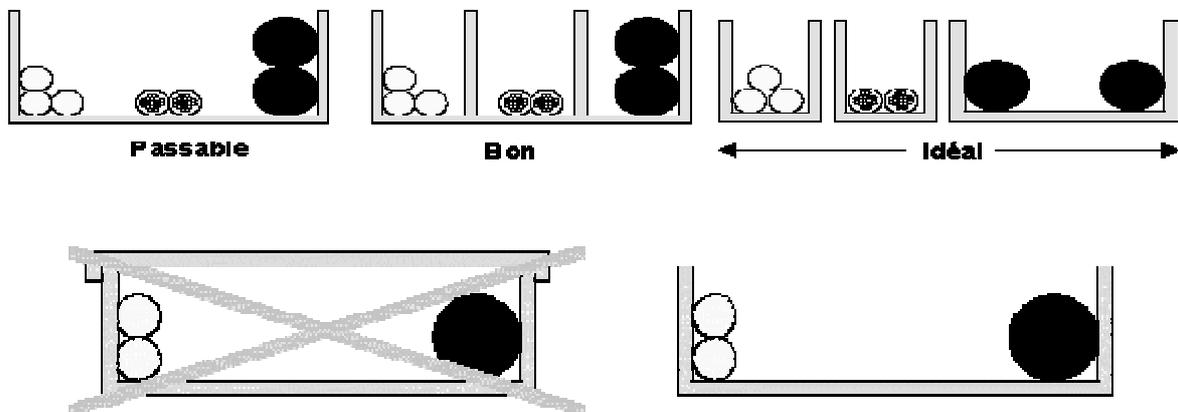


Fig 19 : Protection contre les perturbations internes

Si la pollution est extérieure au cheminement des câbles, l'utilisation d'un couvercle métallique permet au contraire d'atténuer les risques de perturbation (**Fig 20**).

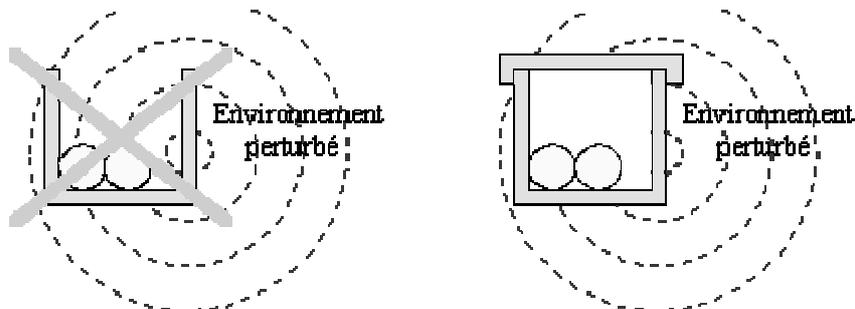


Fig 20 : Protection contre les perturbations externes

Chapitre III : Les remèdes :

Les raccordements des chemins de câbles entre eux doivent être particulièrement soignés. Ce raccordement se fera par soudage, vissage, tresse ou plat de tôle, le simple raccordement par un fil est à proscrire (**Fig 21**).

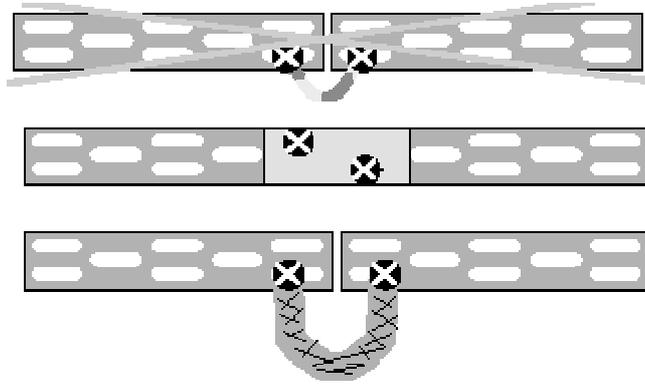


Fig 21 : Raccordement de câble

Les extrémités des cheminements métalliques doivent être boulonnées sur les armoires et coffrets métalliques. L'efficacité apportée par les goulottes et les chemins de câbles métalliques serait neutralisée par le non respect de cette règle (**Fig 22**).

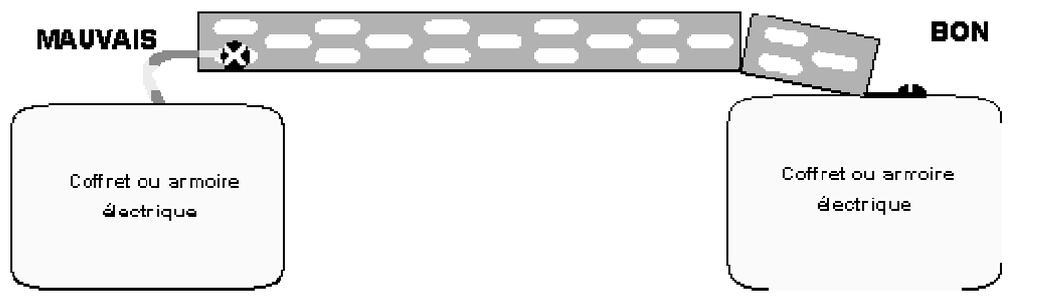


Fig 22 : Exemple d'un bon raccordement

Le passage d'obstacle (murs, ...) par un cheminement métallique doit se faire sans rupture de la continuité du plan de masse.

Chapitre III : Les remèdes :

Lorsque les câbles ne sont pas disposés sur des chemins de câbles métalliques, il est impératif que la distance de séparation entre les câbles sensibles et les câbles perturbateurs soit supérieure à une distance minimum critique dépendant du groupe des câbles (**Fig 23**).

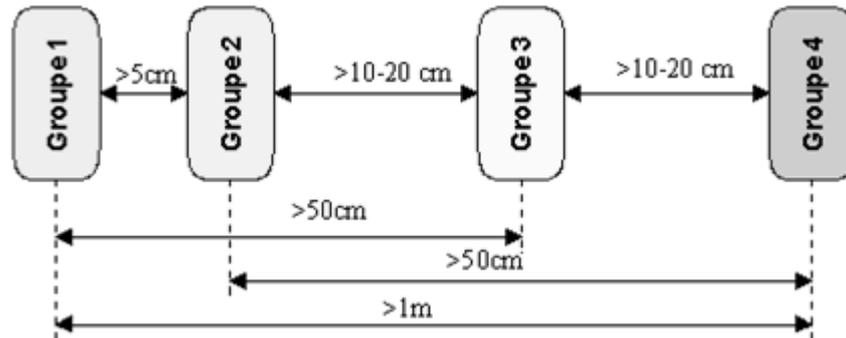


Fig 23 : La distance à respecter entre différents groupes

La distance de séparation des câbles doit être d'autant plus grande que la longueur de cheminement sera importante (**Fig 24**).

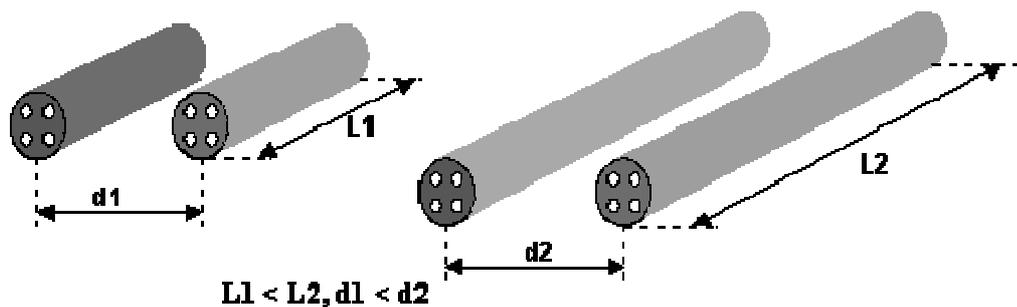


Fig 24 : La distance de séparation entre câbles

Chapitre III : Les remèdes :

Les conducteurs et câbles incompatibles doivent se croiser à angle droit (**Fig 25**).

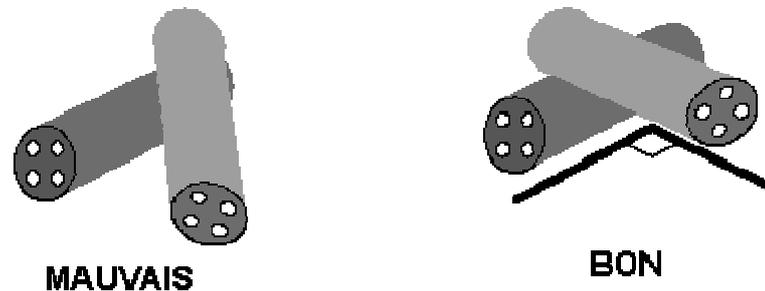


Fig 25 : Le croisement des câbles

IV.4 Les connexions :

Pour assurer une bonne comptabilité électromagnétique, la qualité des connexions est déterminante. Il faudra impérativement assurer un contact "métal sur métal" et une forte pression de contact entre les parties conductrices.

La réalisation des connexions lors du raccordement des masses sur tôles peintes (1) doit être particulièrement soignée. Il est impératif d'éliminer la peinture (2), d'assurer un important serrage par un système "vis - écrou - rondelles" (3) et d'assurer la qualité du contact dans le temps en appliquant après serrage une peinture ou une graisse contre la corrosion (4).

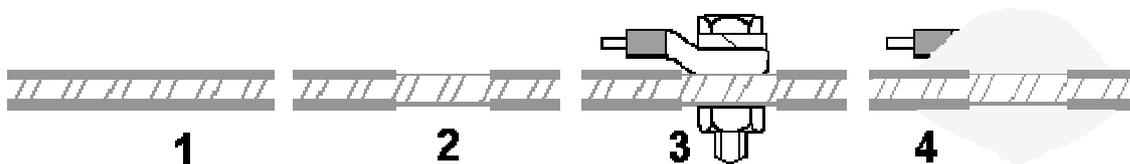


Fig 26 : Raccordement de masses sur une tôle peintes

Le blindage des câbles doit être raccordé soigneusement à la masse, sinon il agirait lui même comme une source de perturbation en captant et en émettant des signaux

Chapitre III : Les remèdes :

parasites. Le raccordement idéal se fait à l'aide d'une presse étoupe métallique en traversée de cloison afin d'obtenir un contact circconférentiel (**Fig 27**).

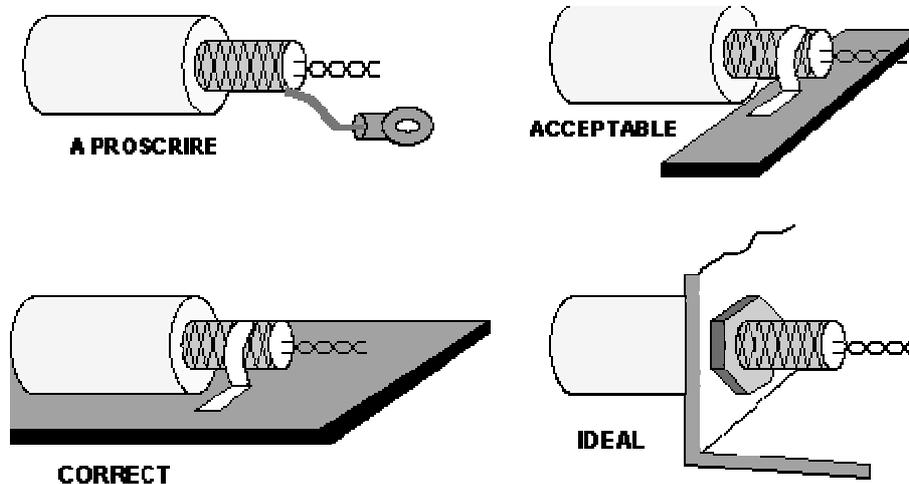


Fig 27 : Raccordement des blindages des câbles à la masse

IV.5 Règles de câblage :

Un câblage réalisé de manière quelconque sera générateur de perturbations. Pour éviter cela, il convient de respecter certaines règles :

- Les cheminements des câbles et filerie devront se faire le long des parois métalliques, en prenant soin de séparer courants forts et courants faibles.

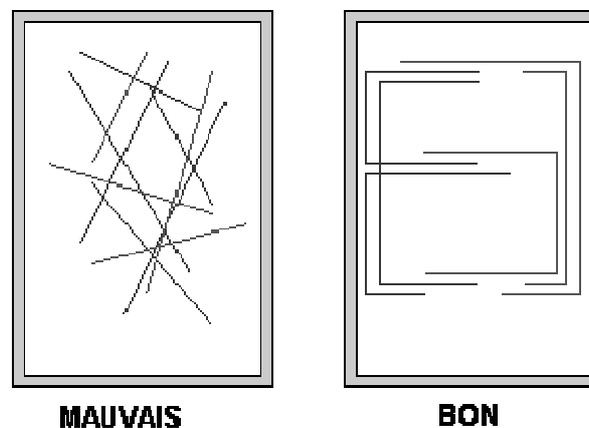


Fig 28 : Cheminement des câbles

Chapitre III : Les remèdes :

- Les signaux des groupes sensibles 1 et 2 et des groupes perturbateurs 3 et 4 ne devront jamais cohabiter dans les mêmes câbles.
- Lorsque des fils de circuits analogiques et numériques doivent être raccordés à un même connecteur (**Fig 29**), il faut les regrouper en catégories (fils de circuits analogiques d'un côté et fils de circuits numériques de l'autre côté) et séparer ces dernières par les fils de masse. Les deux fils d'une même paire devront être côte à côte.



Fig 29 : Placement des câbles dans un connecteur

- Les fils laissés en réserve dans un câble et non reliés à un potentiel de référence peuvent capter et émettre des perturbations. Il est donc conseillé de les relier à la masse afin de fixer leur potentiel (**Fig 30**).

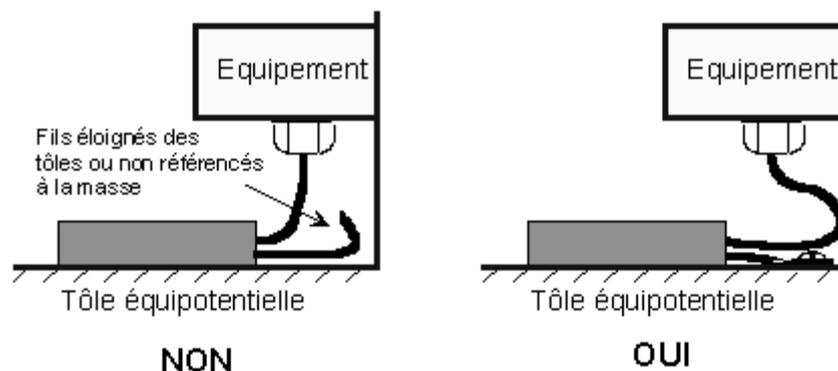


Fig 30 : Raccordement des fils en réserve

Chapitre III : Les remèdes :

- Les longueurs de câble en réserve devront être repliées "en lacet" (**Fig 31**).

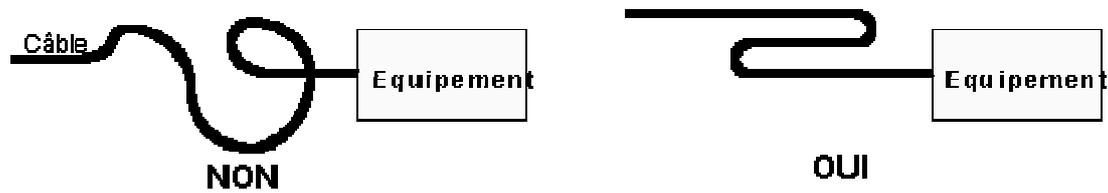


Fig 31 : Repliement en lacet

- Le fil aller (piste) et le fil (piste) retour doivent toujours cheminer ensemble afin d'éviter les surfaces de boucle qui sont susceptibles de capter des perturbations HF (**Fig32**).

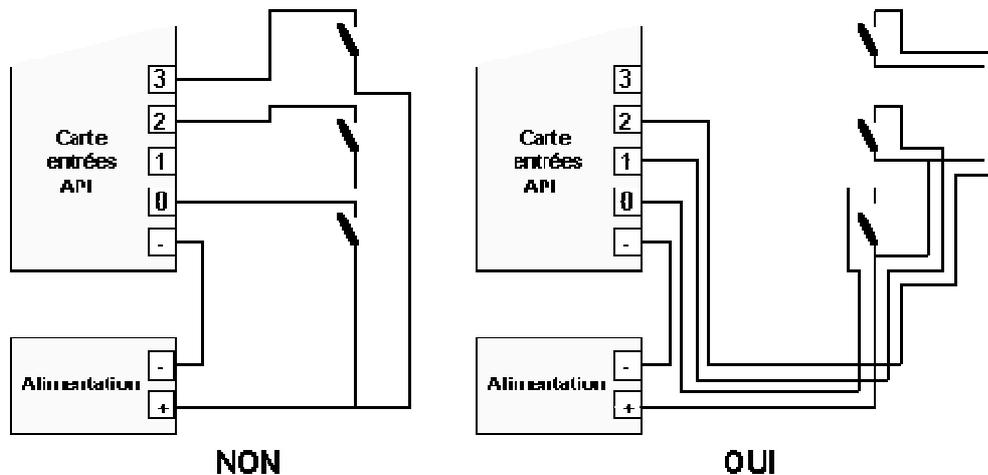


Fig 32 : Cheminement des files aller et retour

- Il faut assurer la continuité du plan de masse entre les équipements avec une liaison équipotentielle. Cette dernière devra accompagner les câbles de liaisons afin de réduire les surfaces de boucle (**Fig 33**).

Chapitre III : Les remèdes :

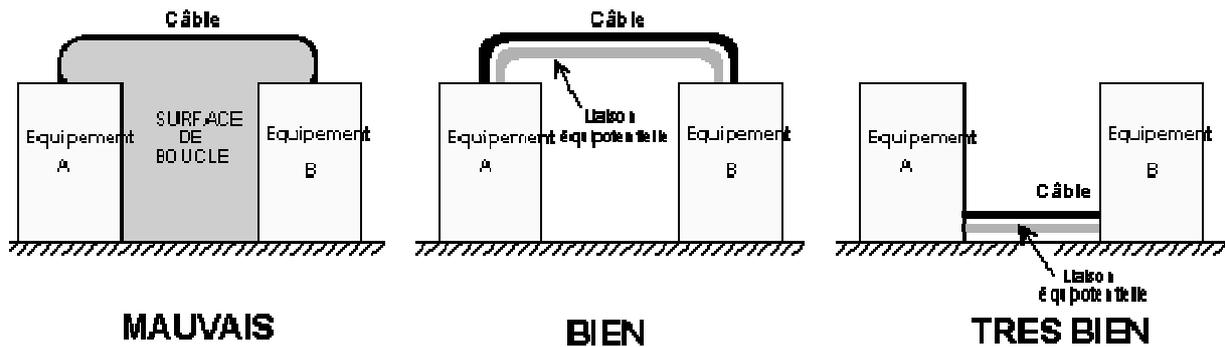


Fig 33 : Une bonne liaison équipotentielle

- Les règles d'éloignement et de croisement des câbles sont identiques à celles vues au " cheminement des câbles.
- Les appareils de traitement de l'information qui communiquent entre eux seront dans la mesure du possible reliés à la même prise de courant afin d'éviter les surfaces de boucle.

V. Réduction des couplages :

Réduire les couplages entre sources de parasites et circuits victimes est souvent la meilleure façon de résoudre les problèmes sur site. C'est plus sûr que de réduire les perturbations émises par toutes les sources, et bien plus facile que de chercher à durcir toutes les fonctions sensibles. Fondamentalement, la réduction des couplages s'effectue par des modifications géométriques.

V.1 Réduire le couplage par impédance commune :

Réduire le couplage par impédance commune consiste :

- A réduire l'impédance commune et limiter les courants parasites:
 - Limiter les parties communes : liaison en un seul point (étoile); pas facile à réaliser en pratique.
 - Réaliser un plan de masse ou, au pire, mailler.

Chapitre III : Les remèdes :

- Utiliser des fils blindés, blindage raccordé des deux côtés.
 - Augmenter la section des fils (vrai en BF uniquement).
 - Diminuer les impédances, par exemple en élargissant au maximum possible les pistes (vrai en BF uniquement).
 - Utiliser des fils plats (tresses) : leur impédance en HF est meilleure que celle des fils ronds.
 - Séparer l'analogique et le numérique.
- A alimenter :
- Les circuits à forte consommation d'abord.
 - Les circuits les plus pollueurs vers les moins pollueurs (possibilité de filtré).

V.2 Réduire le couplage par diaphonie :

- Diminuer la mutuelle inductance et la capacité de couplage en éloignant, si c'est possible, le perturbé du perturbateur.
- Si c'est possible diminuer les variations de courant di/dt et de tension dv/dt .
- Éviter les parcours parallèles de câbles sur de longues distances.
- Mettre le conducteur de retour dans le même câble que le conducteur aller.
- Plaquer les conducteurs victimes et perturbateurs sur la masse.
- Organiser les câbles par catégories.
- Utiliser des câbles en nappe torsadés.
- Mettre un écran (OV) entre coupable et victime
- Blinder les câbles.

V.3 Réduire le couplage champ à boucle et champ à fil :

- Eloigner au maximum les sources de champ, si c'est possible.
- Diminuer au maximum les surfaces des boucles.
- Diminuer l'aire des mailles.
- Réduire la longueur entre deux équipements :
 - Limiter les excédents de câbles.

Chapitre III : Les remèdes :

- Eviter que les câbles soient enroulés (self).
- Diminuer l'effet d'antenne en rapprochant le câble de la masse.
- Sur les cartes électroniques, mettre les pistes sensibles près du 0V, le plan de masse étant l'idéal.
- Utiliser des câbles blindés ou coaxiaux.
- utiliser des fils torsadés : opposition des tensions couplées dans les boucles, qui se neutralisent deux à deux.

V.4 Remèdes généraux au mode commun :

- Bien séparer les câbles qui sortent de l'appareil des pistes bruyantes.
- Diminuer le couplage piste à châssis en connectant le 0V au châssis.
- Si le boîtier n'est pas conducteur, utiliser une TRP.
- Plaquer les câbles sur le châssis.
- Utiliser du câble blindé en assurant un bon report de blindage:
 - En sortie de boîtier (si boîtier métallique).
 - Sinon, sur la TRP.
 - Sinon, sur le plan de masse.
- Utiliser toute la panoplie de filtrage de mode commun:
 - Tores de ferrite.
 - Capacités reliées au châssis ou à la
- Filtres référencés à la masse mécanique en entrée de chaque appareil.
- Éviter la conversion MC/MD par l'emploi de liaisons symétriques.

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes solutions et moyens de protections contre les perturbations électromagnétiques. En générale résoudre un problème de CEM revient à intervenir au niveau des trois éléments suivant :

- la source de perturbation.
- Le couplage.
- La victime.

Chapitre IV:

Réglementation et normes

Chapitre IV : Réglementation et normes

Introduction :

Ce dernier chapitre est consacré à la réglementation en CEM. Nous allons définir la directive CEM 89/336/CEE, ses exigences et les normes résultantes. Nous présenterons aussi les procédures d'évaluation de la conformité d'un produit à la directive CEM. Nous terminerons ce chapitre par la présentation de la nouvelle directive CEM 2004/108/CE.

I. La directive CEM 89/336/CEE :

Cette directive, applicable depuis 1989, est obligatoire depuis le 1^{er} janvier 1996. Son domaine d'application concerne tout équipement électrique ou électronique. Cette directive est une directive « nouvelle approche » : créée afin de garantir un niveau minimum de sécurité, elle consiste à prévoir des **exigences essentielles de santé, de sécurité ou de protection**, tout en laissant au fabricant, son mandataire ou au responsable de la mise sur le marché le choix entre plusieurs procédures d'évaluation de conformité plus ou moins contraignantes selon la sensibilité du produit et appropriées pour atteindre ces objectifs.

I.1 Les exigences essentielles de la directive CEM :

La directive a pour but d'assurer la compatibilité électromagnétique des équipements à un niveau adéquat. Deux exigences essentielles ont été élaborées pour atteindre cet objectif. Le respect des exigences est obligatoire pour les équipements concernés. Les exigences essentielles de la directive CEM sont rédigées en termes d'objectifs qualitatifs :

- **Exigence essentielle d'émission :** Les perturbations produites doivent être limitées à un niveau permettant aux systèmes de radio et de télécommunication, ainsi qu'aux autres appareils, de fonctionner conformément à leur destination.
- **Exigence essentielle d'immunité :** Les appareils doivent avoir un niveau adéquat d'immunité contre les perturbations électromagnétiques leur permettant de fonctionner conformément à leur destination.

Chapitre IV : Réglementation et normes

I.2 La déclaration de conformité :

Elle est obligatoire pour la mise sur le marché européen, et elle doit contenir les éléments suivants :

- Description de l'appareil visé.
- Références des directives concernées.
- Références des normes harmonisées par rapport auxquelles la conformité a été évaluée.
- Identification du signataire ayant reçu pouvoir pour engager le fabricant ou son mandataire.
- Le cas échéant, les références de l'attestation CE de type ou du rapport technique délivré respectivement par l'organisme notifié ou compétent

Exemple de présentation :

Déclaration de conformité	
Nous..... (Nom du demandeur)	
..... (Adresse)	
déclarons que le produit	
..... (Nom, type ou modèle, numéro de lot, de série, si possible origine et nombre de pièces)	
concerné par cette déclaration, est conforme aux normes suivantes ou aux documents normatifs.	
..... (Titre et/ou numéro, ainsi que date de publication des normes ou des autres documents normatifs)	
(Au cas où cela est applicable) Conformément aux conditions de la directive	
.....	
..... (Lieu et date de la délivrance) (Nom et signature ou désignation équivalente de la personne autorisée)

Fig 1 : déclaration de conformité exemple de présentation



DECLARATION DE CONFORMITE

T'nB

PA de la Crau – Rue Nicolas Joseph Cugnot
13300 SALON De Provence
FRANCE

Téléphone : +33 04 90 42 38 38
Télécopie : +33 04 90 53 42 20|
www.t-nb.com

Identification du produit :

- Nature : **Multimédia**
- Type : **HPMPEARL**
- Référence commerciale : **HPMPEARL**
- Code article : **3303170049501**
- Autres informations :

Nous T'nB déclarons sous notre entière responsabilité que le produit décrit ci-dessus est en conformité avec les exigences essentielles et autres obligations fondamentales qui relèvent de la directive 2004/108/CE (CEM).

EN 55022 :2006 + A1 :2007

Appareils de traitement de l'information - Caractéristiques des perturbations radioélectriques - Limites et méthodes de mesure.

EN 55024 :1998 + A1 :2001 + A2 :2003

Appareils de traitement de l'information - Caractéristiques d'immunité - Limites et méthodes de mesure

Informations complémentaires :

Organisme notifié consulté : **NA**
Numéro d'identification : **NA**
Procédures suivies (annexes) : **NA**

Le jeudi 29 décembre 2011 à Salon de Provence,
Par Monsieur **BLANCHET Michel** – Responsable Qualité

Tous les droits de copie, de diffusion de ce document sont la propriété exclusive de la société T'nB.

Fig 2 : exemple de déclaration de conformité

Chapitre IV : Réglementation et normes

I.3 Le marquage « CE » :

Il signifie Conformité Européenne. C'est le signe distinctif de la conformité du produit aux diverses directives qui lui sont applicables. Le marquage « CE » doit être apposé sur l'appareil, sur son emballage, dans le mode d'emploi ou dans le certificat de garantie.

I.4 Les procédures d'évaluation de la conformité à la directive :

Il existe 3 procédures possibles (**fig 3**):

- **P'auto-évaluation** : C'est le cas le plus courant et le plus simple qui convient lorsque le fabricant applique les normes harmonisées applicables au produit. Après identification de ou des normes applicables, le fabricant a deux options : Procéder aux essais dans son entreprise s'il en dispose les moyens conformément aux normes ou faire appel à un sous-traitant, laboratoire d'essais, un conseil spécialisé... etc., pour effectuer tout ou une partie des essais. Dans ces deux cas, le fabricant devra engager sa responsabilité sur la base des résultats fournis. Le passage par un laboratoire accrédité n'est pas obligatoire. C'est la procédure dont le coût est le plus faible.
- **Le certificat de conformité** : Ce certificat est délivré par un organisme dit compétent Ce recours s'impose lorsque le fabricant n'applique pas les normes harmonisées pour des raisons techniques, commerciales, ou autres. Le fabricant doit constituer un dossier technique de construction et le soumettre à l'organisme compétent de son choix .Celui-ci s'en servira pour définir une procédure adaptée à l'évaluation de la conformité du produit (essais à réaliser). Un certificat de conformité ou un rapport technique sera remis à l'issue de l'étude.
- **P'examen « CE de type »** : Le fabricant a le choix de l'organisme notifié et doit fournir à cet organisme un exemplaire représentatif du produit ainsi que la documentation (technique, fabrication, fonctionnement) nécessaire à l'évaluation du produit. L'organisme notifié fait effectuer les essais nécessaires et délivre, si le produit est conforme à la directive, une attestation CE de type. Sur la base de cette attestation, le fabricant établit la déclaration de conformité certifiant que les produits fabriqués en série sont conformes au type décrit dans l'attestation. Un système d'assurance qualité est requis.

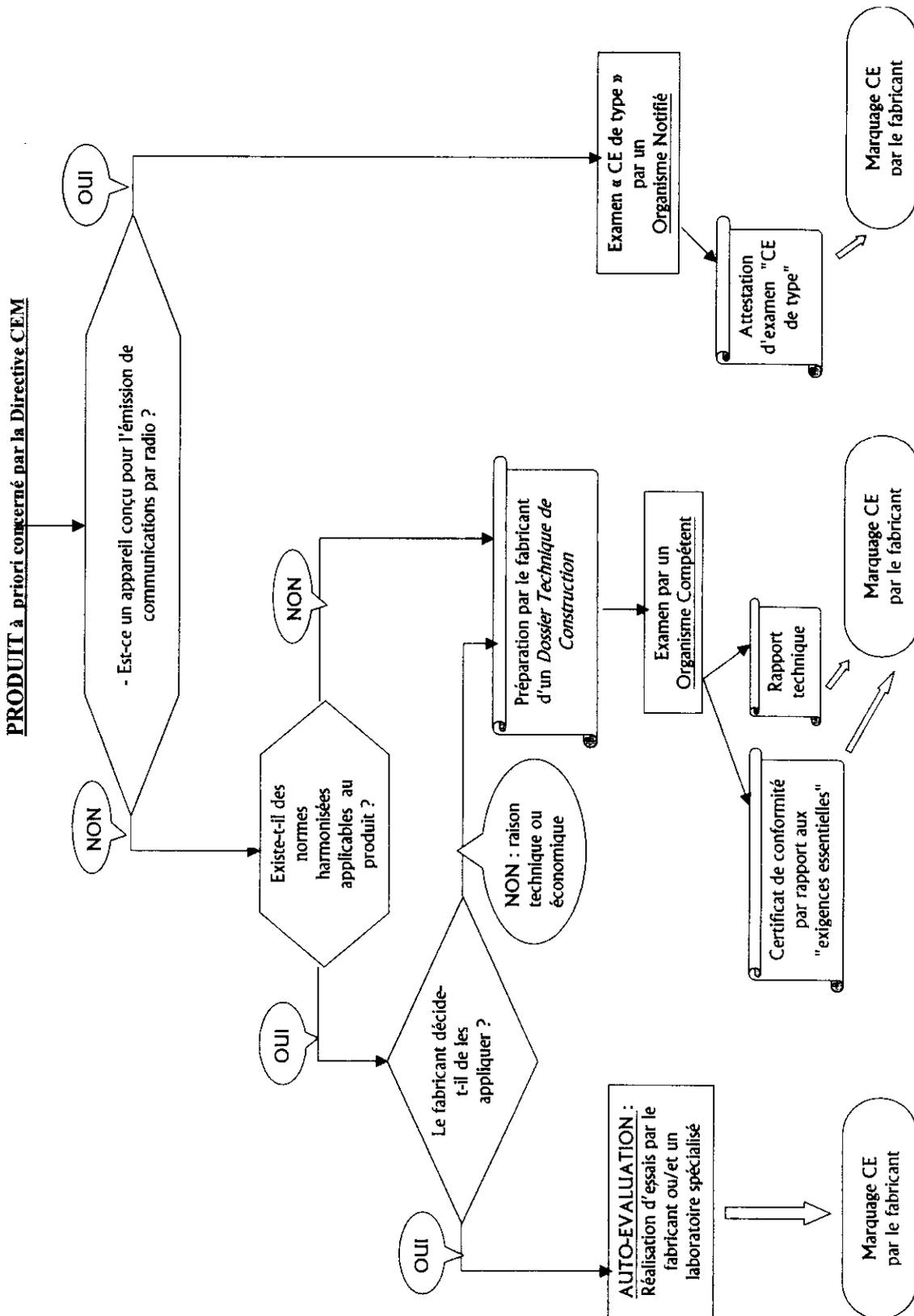


Fig 3 : Procédures d'évaluation de la conformité à la directive

Chapitre IV : Réglementation et normes

II. Les normes :

La directive CEM, définit les principes généraux. C'est les organismes normalisateurs qui s'occupent de la normalisation et préparent les normes. Les principaux organismes normalisateurs sont :

CISPR : Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques.

CEI : Commission Electrotechnique Internationale à Genève.

CENELEC : Comité Européen de Normalisation Electrotechnique à Bruxelles,

Les références des documents commencent par les lettres EN, ENV, HD...

II.1 Normalisation :

La normalisation est l'ensemble des processus qui permettent de donner à des documents de référence le statut de norme et de les publier comme telles. La décision de publication d'une norme repose sur la constatation finale d'un consensus autour du document proposé. La normalisation comporte deux étapes :

- Une phase technique.
- Une phase de décision par la démonstration de l'existence d'un consensus.

Une norme est une donnée de référence résultant d'un choix collectif raisonné, en vue de servir de base d'entente pour la solution de problèmes répétitifs. Une norme fait partie des règles de l'art. Elle doit répondre aux besoins du marché et éliminer les obstacles techniques à la libre circulation des produits.

II.2 Les types de normes en CEM :

En CEM il y'a quatre types de documents de normes :

- les normes fondamentales.
- les normes génériques.
- les normes de familles de produits.
- les normes de produits.

Chapitre IV : Réglementation et normes

➤ Les normes fondamentales :

Elles donnent les règles et les conditions générales pour réaliser la CEM et servent de référence pour les comités de réglementation. Elles concernent :

- La terminologie
- La description des phénomènes électromagnétiques.
- Les niveaux de compatibilité : limites d'émission.
- Les spécifications générales de niveaux d'immunité.
- Les techniques de mesures et d'essais.
- La classification de l'environnement.

Voici quelques exemples de normes fondamentales (référence CENELEC) :

EN 61000-4-1 : Vue d'ensemble sur les essais d'immunité.

EN 61000-4-2 : Immunité aux décharges électrostatiques.

EN 61000-4-3 : Immunité aux champs rayonnés.

EN 61000-4-4 : Immunité aux transitoires rapides en salve.

EN 61000-4-5 : Immunité aux ondes de choc (impulsions à haute énergie sur le secteur, jusqu'à 4Kv).

EN 61000-4-6 : Immunité aux perturbations conduites.

EN 61000-4-7 : Mesure d'harmoniques et interharmoniques.

EN 61000-4-8 : Immunité au champ magnétique à la fréquence du réseau.

EN 61000-4-9 : Immunité au champ magnétique impulsionnel.

EN 61000-4-10 : Immunité au champ magnétique oscillatoire amorti.

EN 61000-4-11 : Immunité aux : creux de tension, coupures brèves et variations de tension.

Chapitre IV : Réglementation et normes

➤ Les normes génériques :

Elles concernent un environnement particulier, elles spécifient un ensemble de prescriptions essentielles, de procédures d'essais et de critères de performance généraux applicables à tous les produits ou systèmes en service dans cet environnement. Actuellement, les deux environnements concernés sont l'environnement domestique, commercial et industrie légère d'une part et l'environnement industriel d'autre part. Exemples de normes génériques :

EN 50081-1 : Norme générique d'émission.

Partie 1 : Environnement résidentiel, commercial et industriel léger.

EN 50081-2 : Norme générique d'émission.

Partie 2 : Environnement industriel.

EN 50082-1 : Norme générique d'immunité.

Partie 1 : Environnement résidentiel, commercial et industriel léger.

EN 50082-2 : Norme générique d'immunité.

Partie 2 : Environnement industriel.

➤ Les normes de familles de produits :

Elles contiennent des prescriptions et des méthodes d'essai spécifiques à une famille de produits particulière.

Une famille de produits est un groupe de produits, systèmes ou installations similaires pour lequel on applique les mêmes normes. Ces normes indiquent les conditions d'installation et de fonctionnement appropriées en donnant les critères d'acceptation précis en fonction du matériel considéré. Elles doivent utiliser les normes fondamentales en y faisant référence pour les méthodes d'essais et les mesures détaillées et être coordonnées avec les normes génériques.

Les normes de familles de produits ont prééminence sur les normes génériques mais les normes génériques s'appliquent si le matériel considéré n'est couvert par aucune norme de famille de produits.

Chapitre IV : Réglementation et normes

➤ Les normes de produits :

Elles ne concernent qu'un type de produit, système ou installation particulier. Les règles concernant les familles de produits en CEM s'appliquent aux produits.

Les normes de produits ont une précédences sur les normes de familles de produits. Les principales normes produites sont :

EN 55011 : Limites et méthodes de mesure des caractéristiques de perturbations électromagnétiques des appareils industriels, scientifiques et médicaux à fréquence radioélectrique.

EN 55013 : Limites et méthodes de mesure des caractéristiques de perturbations radioélectriques des récepteurs de radiodiffusion et de télévision et équipements associés.

EN 55014 : Limites et méthodes de mesure des caractéristiques de perturbations radioélectriques des appareils électrodomestiques, des outils portables et des appareils électriques similaires.

EN 55015 : Limites et méthodes de mesure des caractéristiques de perturbations radioélectriques des lampes à fluorescence et des luminaires.

EN 55022 : Limites et méthodes de mesure des caractéristiques de perturbations radioélectriques des appareils de traitement de l'information.

EN 55020 : Immunité aux perturbations radioélectriques des récepteurs et des appareils associés.

III. La nouvelle directive CEM 2004/108/CE :

La « nouvelle » directive relative à la compatibilité électromagnétique (CEM), directive 2004/108/CE est entrée en vigueur depuis le 20 Juillet 2007 et remplacera définitivement la directive CEM 89/336/CEE le 20 Juillet 2009.

A compter du 20 Juillet 2009, les fabricants et leurs représentants devront se conformer aux prescriptions de la nouvelle directive CEM 2004/108/CE dont les principaux changements sont :

Chapitre IV : Réglementation et normes

- Exigences essentielles pour les installations fixes
- Procédure d'évaluation de la conformité des équipements aux exigences essentielles simplifiée (consultation volontaire des organismes Notifiés)
- Responsabilité accrue des fabricants et mandataires (documentation technique détaillée obligatoire)
- Surveillance du marché améliorée.

III.1 La Nouvelle liste de Normes Harmonisées en CEM

Le Journal Officiel de l'Union Européenne (JOUE) a publié le 4 Novembre 2008 une nouvelle liste des normes harmonisées au titre de la directive 2004/108/CE qui remplace la liste précédente publiée en Septembre 2007.

Les principales modifications par rapport à la liste de Septembre 2007 sont les suivantes :

➤ Normes CENELEC

- Evolutions de normes
- Ajout de nouvelles normes :

EN 60947-5-9 (2007) : Appareillage à basse tension (Appareils et éléments de commutation pour circuit de commande – Détecteurs de débit

EN 61557-12 (2008) : Sécurité électrique dans les réseaux de distribution basse tension de 1000V (AC) et 1500V (DC).

EN62026-1 (2007) : Appareil à basse tension.

EN 62135-2 (2008) : Matériels de soudage par résistance.

EN62310-2 (2007) : Systèmes de transfert statique (STS).

➤ Normes ETSI

- Suppression de la norme : EN300386-2 V1.1.3

➤ La Nouvelle CISPR 22 : une montée en fréquences !

La norme CISPR 22 ed 5.2 (03-2006) définit les limites et méthodes de mesure pour les Appareils de Traitement de l'Information (ATI).

Chapitre IV : Réglementation et normes

III.2 Normes applicables au titre de la protection des personnes face aux champs électromagnétique :

L'exposition du public et des travailleurs aux champs électromagnétique est au centre des préoccupations actuelles dans le domaine de la santé. Afin d'évaluer ce danger potentiel sur le corps humain, des réglementations européennes existent :

- La recommandation européenne 1999/519/CE relative à la limitation de l'exposition du publique aux champs électromagnétique (de 0 Hz à 300 GHz) définit les paramètres à évaluer suivants :
 - Les restrictions de base
 - Les niveaux de référence
 - Les courants de contact et courants induits dans les membres
- Une directive travailleurs 2004/40/CE fixe les obligations des employeurs quand à l'évaluation des niveaux de champs et des risques, les informations et le suivi du personnel, ainsi que les précautions à prendre. Son application prévue en 2008 est reportée en 2012.
- De plus en plus de normes sont publiées et harmonisées dans le cadre de la prise en compte de l'exposition aux champs EM :
 - Par la directive basse tension 2006/95/CE émis par des équipements et systèmes spécifiques et
 - Par la directive R et TTE 1999/05/CE en ce qui concerne les émetteurs hertziens

Conclusion :

Nous avons illustré dans ce chapitre, les différents concepts liées à la réglementation et aux normes. Cette réglementation est indispensable afin de pouvoir d'une part vérifier qu'un matériel ne perturbe pas son environnement et d'autre part n'est pas trop sensible aux agressions électromagnétiques.

Conclusion générale :

L'objectif de ce travail est l'étude de la compatibilité électromagnétique des circuits électroniques. Nous y avons énuméré les principaux concepts de la CEM, à savoir les sources d'émission des perturbations EM, les modes de couplages de ces dernières et leurs effets sur les circuits victimes.

On peut constater que la CEM est globalement un sujet en forte expansion dans le monde du fait du développement sans précédent des applications radioélectriques et de l'intégration énorme de l'électronique dans la vie quotidienne soumise à des perturbations électromagnétiques nombreuses. La mise en application obligatoire du 1 Janvier 1996, dans la CE, de la directive européenne sur la CEM a été un facteur positif tendant à sensibiliser le plus grand nombre d'acteurs économiques à ces aspects encore confidentiels, il y a quelques années.

Sujets parfois controversés, de nombreuses interrogations subsistent et demandent plus d'efforts de recherche européenne et internationale (effets biologiques), de normalisation (CEM et ingénierie des fréquences). La prise de conscience des différents volets de la CEM et de ces enjeux est indispensable à tous les niveaux, afin d'aboutir, dans les meilleures conditions technico-économiques, à la satisfaction des clients à travers une bonne qualité de service et un minimum de nuisances en terme d'effets électromagnétiques gênants.

Ce travail est un complément pour notre formation. Il nous a permis d'enrichir nos connaissances sur les phénomènes électromagnétiques, et nous espérons qu'il apportera un plus pour les étudiants qui le consulteront dans l'avenir.

Bibliographie :

[1] Alain Charoy (DUNOD 1992) : Parasites et perturbations des électroniques.

- **Tome 1** : source-couplages-effets
- **Tome 2** : terres-masses-câblage
- **Tome 3** : blindage-filtres-câbles blindés
- **Tome 4** : alimentations-foudre-remèdes

[2] Michel Mardiguian (LAVOISIER 2003) : Manuel pratique de la CEM.

[3] Tim Williams (PUBLITRONIC 1999) : CEM de la conception à l'homologation.

[4] Yvan Mori (LAVOISIER 2007) : CEM une introduction.

[5] Etude générale de la CEM des systèmes électroniques (thèse d'ingénieur ELN 2002 UMMTO).

[6] Etude de la CEM des cartes de circuits imprimé (thèse d'ingénieur ELN 2009 UMMTO).

[7] Etude des couplages en CEM des systèmes électroniques (thèse d'ingénieur ELN

[8] Etudes des remèdes en CEM (thèses d'ingénieur ELN 2003 et 2006).

[9] Sites internet :

<http://rapidlibrary.com/files/cours-cem-geii>

http://www.iufmrese.cict.fr/catalogue/2001/CEM_Lardelier/couplage_perturbatio.pdf

http://sitelec.org/download_page.php?filename=cours/cem.pdf

<http://cmrt.centrale-marseille.fr/electromagnetisme>

www.gesi.asso.fr/cours/cem2.pdf