



Cours de CEM

Notions élémentaires



Document Libre



*Ce document est protégé par copyright.
Sa diffusion est fondée sur la
CHARTRE DU DOCUMENT LIBRE *
A ce titre, il peut être reproduit sans altérations
et distribué librement dans un but non commercial.*

** www.gesi.asso.fr/documentlibre/document.html*

Copyright Jacques Cuvillier 1999

Modifications et aménagements réservés à l'auteur

Toute suggestion en matière de rectification, d'aménagement ou d'ajout est à adresser à :

Jacques.cuvillier@iut-nantes.univ-nantes.fr

Table des matières

Première partie : Notions de base

1 - Introduction	1
2 - Activités liées à la CEM	2
3 - Historique	2
4 - Définitions	4
5 - Les perturbations	5
6 - Etude des couplages	6
7 - Les effets des perturbations atmosphériques	12
8 - Les techniques de protection en CEM	16
8.1 - Disposition des composants et du câblage	16
8.2 - Les blindages	22
8.3 - Le filtrage	26
8.4 - La protection contre les surtensions	32
9 - Les méthodes d'investigation	38

Appendice

Le marquage CE	57
----------------	----

Annexe A1

Classification des normes	59
---------------------------	----

Annexe A2

 Directive 89/336/CEE concernant le rapprochement des législations des États membres relatives à la compatibilité électromagnétique

COURS DE CEM

1- Introduction

Comme tout système physique en activité, les appareils électriques et électroniques interagissent avec leur environnement. Ils présentent une certaine sensibilité aux phénomènes qui le concernent, et le perturbent à leur tour.

L'utilisation croissante des appareils électriques et électroniques, et l'usage de plus en plus répandu de systèmes de traitement d'information utilisant des signaux de faible énergie, et de ce fait sensibles aux perturbations, a rendu nécessaire une approche nouvelle de cette problématique. Celle-ci est fondée les bases suivantes :

a) Un objectif fondamental :

Les ressources technologiques nécessaires aux différentes activités humaines (activités économiques au sens large) doivent pouvoir fonctionner simultanément, dans de bonnes conditions de sécurité et de confort.

b) L'instauration d'une réglementation :

L'objectif fondamental ne peut être atteint sans que des dispositifs techniques ne soient mis en œuvre, tant pour limiter la gêne que provoque l'usage d'un appareil ou d'une installation, que pour protéger chaque appareil des effets néfastes des autres. Ces dispositifs présentent un coût supplémentaire pour les produits, et donc une pénalité sur le plan commercial. Il était donc nécessaire d'instaurer un régime équitable en adoptant des mesures contraignantes qui s'appliquent à tous.

c) La définition de normes européennes

Une réglementation devait avoir une portée nécessaire à la couverture de l'espace marchand, notamment sur le plan européen. Elle devait reposer avec discernement :

- sur l'état de la technique dans les différents domaines identifiables : télécommunication, appareils domestiques, matériel de soudage...
- sur les critères objectifs de comportement des appareils. (Comment caractériser et mesurer l'effet des perturbations ?)
- sur les usages antérieurs dans les différents pays (synthèse et révision des réglementations en usage)
- sur les consensus ou les compromis entre les partenaires industriels et économiques, quant à la définition –toujours en voie d'évolution – des niveaux acceptables et des dispositifs réglementaires.

Avec les normes, un vocabulaire spécialisé est apparu. Il fallait bien adopter des termes adéquats pour désigner des notions auxquelles elles font référence. Précisons au passage quelques termes et leurs abréviations :

CEM Compatibilité ElectroMagnétique.

EMC : ElectroMagnetic Compatibility, l'équivalent anglais

CE : Communauté Européenne (et non " Compatibilité Electromagnétique" !)

d) La constitution d'un cadre juridique approprié.

2- Activités liées à la CEM

La réglementation CEM, dont le signe lisible pour le consommateur est le marquage CE, est donc loin d'être une seule discipline technologique. C'est le concours d'un certain nombre de secteurs d'activité à un dispositif international complexe, toujours en mouvance. On peut en donner succinctement la liste :

- Activités de recherche et développement menées en milieu universitaire et industriel et qui portent en particulier sur :
 - la proposition de modèles théoriques ;
 - le développement de techniques moins « polluantes » ;
 - le perfectionnement des méthodes d'évaluation et des systèmes de métrologie.
- Activités liées à l'évaluation du comportement des appareils :
 - mesures de CEM en phase de développement des produits, il s'agit surtout d'unités spécialisées au sein des fabricants de matériels et qui effectuent l'essentiel des tests pour les besoins de leurs services de recherche et développement ;
 - mesures de CEM en phase de qualification : ce sont en particulier les laboratoires spécialisés qui agissent pour le compte des entreprises préparant la mise sur le marché de leurs produits.
- Activités de réglementation et de surveillance, activités juridiques.
En relation avec de nombreux partenaires issus des instances publiques, des milieux professionnels (par exemple des groupements interprofessionnels de constructeurs), des experts... il s'agit :
 - d'ériger et de maintenir les structures de concertation ad hoc,
 - de proposer de nouvelles dispositions aux organismes de normalisation,
 - de faciliter l'adaptation et l'harmonisation au plan européen des textes réglementaires.A cela s'ajoutent toutes les activités juridiques inhérentes à l'application de la réglementation et au traitement des situations particulières des assujettis vis à vis de la réglementation.
- Activités liées à la formation et à l'enseignement.

3- Historique

Les notions et les préoccupations du domaine de la compatibilité électromagnétique ne sont pas récentes, bien que vocabulaire spécialisé - que nous utiliserons après quelques définitions indispensables - soit apparu assez récemment.

Dès que les applications de l'électricité se sont étendues au domaine de la transmission d'information, on a dû faire face aux perturbations que pouvaient provoquer l'usage de certains appareils. L'exemple typique est l'impossibilité d'écouter la radio dans de bonnes conditions à proximité d'un moteur en fonctionnement si celui-ci n'est pas muni d'un dispositif « antiparasite ».

Dans les anciens vocables, le terme « parasites » désignait l'effet des perturbations électromagnétiques provoquées en effet par le truchement de signaux parasites, et le terme « antiparasite » désignait un dispositif destiné à combattre leurs effets.

De simples notions de confort, le problème s'est ancré dans la nécessité et la responsabilité juridique, à partir du moment où les installations ont impliqué des ensembles juxtaposés de puissance et de commande automatisée, véhiculant des données cruciales pour la sécurité des personnes et des biens.

L'usage conjoint d'applications de forte puissance, de systèmes de communication et d'organes de traitement de l'information est aujourd'hui généralisé, et les niveaux d'énergie des signaux de ces derniers sont devenus très faibles. Dans ce contexte, la réglementation CEM est devenue en quelque sorte une question de survie technologique.

L'évolution de la réglementation actuelle a été marquée par les étapes suivantes :

3 mai 1989

Le Conseil des Communautés Européennes émet la directive 89/336/CEE qui constitue l'un des premiers fondements de la réglementation. Sa lecture permet de mieux saisir les enjeux de la CEM. (Voir en annexe)

Sur la base de cette directive chaque état membre devait entreprendre la transposition du texte dans sa législation nationale, en abrogeant le cas échéant toute disposition contraire, pour atteindre les objectifs obligatoires de la directive dans un délai fixé. A terme, toutes les installations impliquant des composants électriques et/ou électroniques doivent « *être construits de telle sorte que :*

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

Les niveaux et recommandations pour la CEM sont donnés par une série de normes.

Les appareils déclarés conformes aux exigences de la directive peuvent recevoir la marque CE et être mis sur le marché après qu'une déclaration CE de conformité ait été faite et reste à la disposition de l'autorité compétente pendant dix ans suivant la mise sur le marché des appareils.

28 avril 1992

La directive 92/31/CEE fixe la date d'application obligatoire de la réglementation CEM au 1er janvier 1996.

22 juillet 1993

La directive 93/68/CEE définit le marquage CE proprement dit.

1er janvier 1996

Entrée en vigueur du caractère obligatoire de la réglementation.

Notes

La conformité des appareils qui permet le marquage CE est soumise à plusieurs champs de référence.

- Le principe fondamental est posé par les directives de la communauté européenne. Directives propres à la CEM, mais aussi la directive "basse tension" relative à la sécurité des personnes, des animaux domestiques et des biens.
- La réglementation, harmonisée au plan européen, est reprise au plan national par les lois et décrets
- Les exigences technologiques sont précisées par des normes auxquelles les appareils doivent satisfaire en tous points.

Les normes (voir les définitions en annexe 1) sont classées en trois catégories :

- Les normes *produits* spécifiques à certaines catégories d'appareils
- Les normes *génériques* applicables aux appareils qui n'entrent pas dans une catégorie définie
- Les normes *fondamentales*,

Selon les organismes qui les édictent, les normes sont référencées selon plusieurs systèmes de désignation. Les mêmes éléments peuvent donc se retrouver dans plusieurs textes, sous des références différentes. On trouvera :

- les références CENELEC ENV ou EN exemples : ENV 61000-X-X ; EN 55014 ...
- les références CISPR exemple : CISPR 13
- les références de la communauté européenne : exemple CEI 1000-X-X
- les normes françaises

4- Définitions

Compte tenu de ce qui vient d'être exposé, il semble que la meilleure définition soit à prendre dans les textes de référence. 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 et sans produire lui-même des perturbations électromagnétiques de nature à créer des troubles graves dans le fonctionnement des appareils ou des systèmes situés dans son environnement. »

Par « appareils » il faut entendre : « tous les appareils électriques et électroniques ainsi que les équipements et systèmes qui contiennent des composants électriques et/ou électroniques. »

Note : les textes français emploient le mot « système » alors que les textes européens parlent plutôt « d'installations »

Par « perturbation électromagnétique » il faut entendre : *tout phénomène électromagnétique, notamment un bruit électromagnétique, un signal non désiré ou une modification du milieu de propagation lui-même, susceptible de créer des troubles de fonctionnement d'un dispositif, d'un appareil ou d'un système.*

Deux aspects sont inhérents à cette définition :

- l'aptitude d'un appareil à fonctionner dans un environnement plus ou moins perturbé,
- l'aptitude d'un appareil à fonctionner sans perturber l'environnement de manière excessive.

La notion de Compatibilité électromagnétique naît de la confrontation de ces deux aspects autour d'une ligne de partage, ainsi que l'illustre la figure 1.

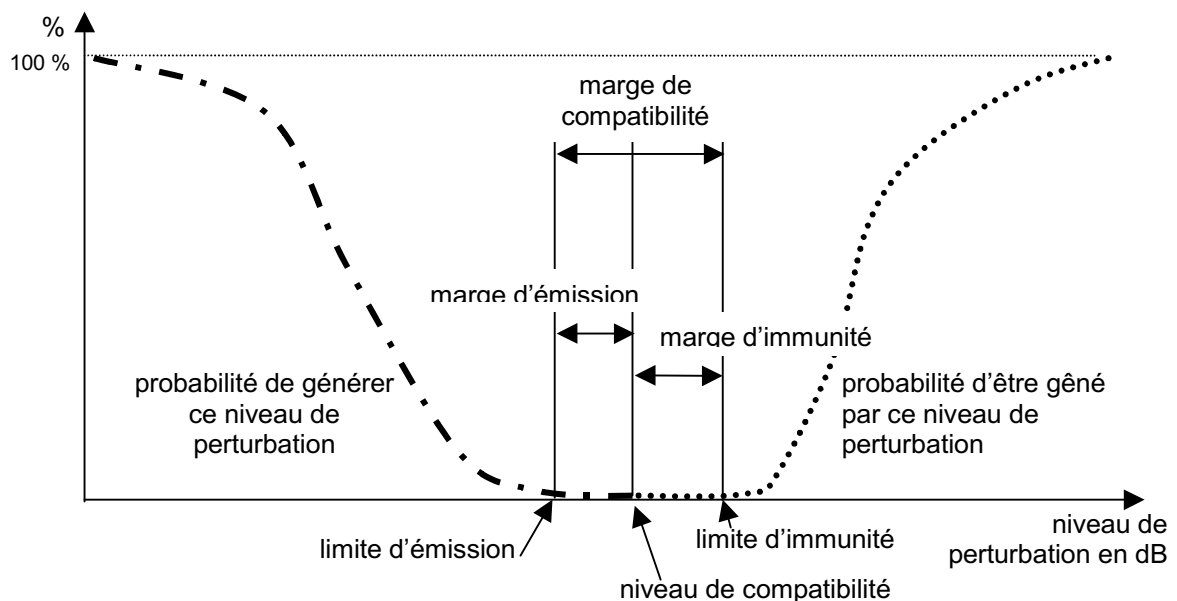


Figure 1

Compte tenu de l'échelle logarithmique du niveau de perturbation, la marge de compatibilité électromagnétique est le *rapport* entre la limite d'émission et la limite d'immunité. De même, la marge d'immunité est le rapport entre le niveau de compatibilité et le niveau limite d'immunité, et la marge d'émission est le rapport entre le niveau de compatibilité et le niveau limite d'émission. On peut aussi exprimer ces marges directement en dB.

Il faut noter que l'approche est probabiliste. Quel que soit le niveau de perturbation envisagé, on ne peut pas affirmer, mathématiquement parlant, que la probabilité d'altération du fonctionnement soit égal à zéro.

En matière de tests, on se contentera aussi de notions statistiques. Les essais de CEM – très coûteux – ne sont bien entendus jamais menés sur l'ensemble d'une production. On fonde la *présomption* de compatibilité sur des spécimens représentatifs, parfois même des prototypes. On sait cependant que des modifications qui peuvent apparaître mineures dans la fabrication peuvent parfois se traduire par des évolutions surprenantes en termes de CEM.

5- Les perturbations

La perturbation d'un équipement met en jeu trois éléments susceptibles d'être caractérisés :

- La source de perturbation, qui se caractérise par sa puissance, sa durée, son spectre de fréquence, les champs qu'elle génère,
- le vecteur par lequel la perturbation est transmise, on parle de mode de couplage,
- l'équipement victime de la perturbation.

5.1- Les sources

Ce sont :

- Les sources naturelles
 - phénomènes atmosphériques dont la foudre au sens habituel du terme,
 - le bruit galactique,
 - l'effet des rayons ionisants,
 - les impulsions électromagnétiques dues aux désintégrations nucléaires.
- Les sources électrostatiques qui se constituent en particulier lors de la friction de matériaux en mouvement ou du corps humain sur des matériaux textiles ;
- Les sources électrochimiques et thermoélectriques dues en particulier à la mise en présence de métaux différents en milieu humide (phénomène d'électrolyse) et sous l'effet de différences de températures (effet de thermocouple)
- Les sources technologiques : ce sont tous les appareils dont l'activité électrique est de nature à se propager en partie à l'environnement.

5.2- Les vecteurs de propagation

La transmission d'une perturbation entre la source et une « victime » fait intervenir un ou plusieurs phénomènes physiques que l'on appelle des « *couplages* ». Selon les phénomènes en question, sur lesquels nous reviendrons, on parle de couplage par impédance commune, de couplage capacitif, de couplage inductif, de couplage électromagnétique. Ceci dit, la CEM fait une première classification entre les vecteurs en distinguant :

- **Les perturbations conduites** : celles qui se propagent par les câbles de liaison, et en particulier les câbles d'alimentation ;
- **Les perturbations rayonnées** : celles qui n'empruntent pas de voie matérielle, mais agissent par l'intermédiaire de champs magnétique, électrique, électromagnétique ;
- **Les décharges électrostatiques** consécutives à la mise en contact d'un conducteur chargé électriquement ou à un « amorçage » par ionisation de l'air ;
- **L'impulsion électronucléaire (IEMN)**. Elle évoque le rayonnement électromagnétique ravageur qui serait provoqué par l'explosion en altitude d'une charge nucléaire, et qui pourrait mettre hors d'usage une partie importante des matériels électriques exposés.

6- Etude des couplages

6.1 - Couplage par impédance commune.

Un couplage par impédance commune se produit lorsque deux mailles ont en commun un tronçon dont l'impédance ne peut être considérée comme négligeable.

Le courant circulant dans la maille M1 provoque une différence de potentiel dans la maille M2

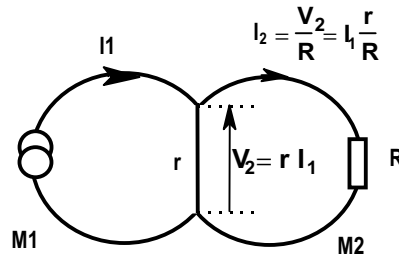


Figure 2

On peut s'en affranchir en agenciant le tracé du circuit de manière à éviter les tronçons communs. On relie alors les masses en un seul point. On appelle cela le câblage étoilé, parfois difficile à réaliser de manière pratique.

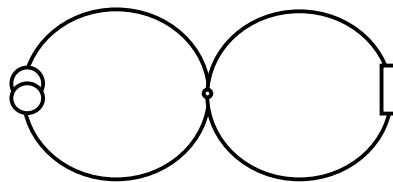


Figure 3

On peut aussi réduire l'influence des tronçons communs en diminuant leur impédance, par exemple en renforçant la section des conducteurs.

Un exemple classique de perturbation d'un signal par impédance commune est illustré ci-dessous :

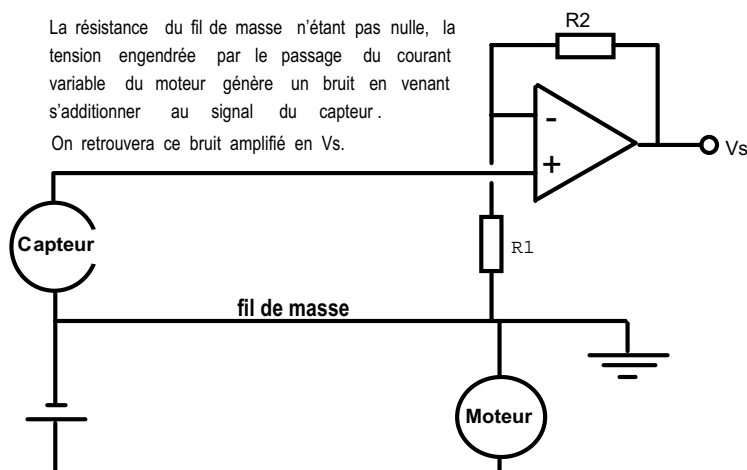


Figure 4

6.2 - Couplage capacitif

Deux conducteurs en présence forment naturellement un condensateur. Le couplage capacitif est dû à la capacité ainsi introduite entre ces deux conducteurs. Il est particulièrement ennuyeux pour les signaux qui doivent être transportés à une certaine distance, en particulier si les conducteurs perturbants sont soumis à des variations rapides de tension, et si les conducteurs perturbés sont reliés à des impédances élevées, ou à des circuits présentant un gain élevé.

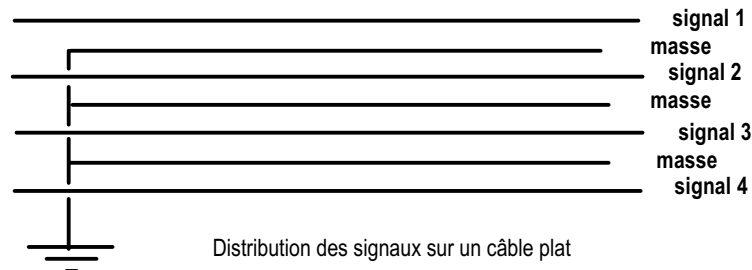


Figure 5

La capacité entre deux conducteurs peut être fortement réduite par la présence d'un écran électrostatique, que l'on réalise plus ou moins bien en plaçant entre eux un conducteur réuni à la masse, mais que l'on réalise (presque) parfaitement au moyen d'une tresse de blindage entourant le conducteur à protéger. La première solution est souvent retenue lorsque l'on transmet des signaux multiples au moyen d'un câble plat.

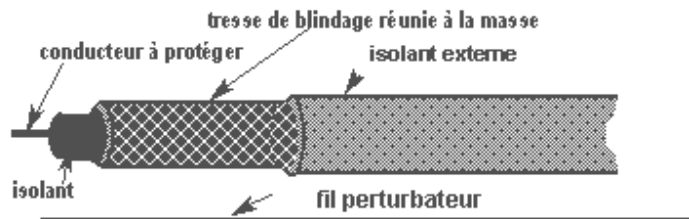


Figure 6

La seconde solution est utilisée pour la transmission de signaux par câble blindé ou ligne coaxiale.

Note : lorsque deux conducteurs en présence concernent un seul et même signal, on ne parle plus de couplage. Lorsque les impédances qui les lient sont significatives et itératives (toujours les mêmes pour un élément de longueur donnée) on dit qu'il s'agit d'une ligne et l'on tiendra compte de son impédance caractéristique.

6.3 - Couplage inductif

6.3.1 - Cas général

Tout conducteur parcouru par un courant s'entoure d'un flux magnétique. A une distance d (m) d'un conducteur parcouru par un courant I (A), le champ H (A/m) est $H = I / 2\pi d$

Lorsque ce flux est variable et coupe d'autres conducteurs, il peut entraîner en ceux-ci une force électromotrice induite. Dans un milieu de perméabilité magnétique donné, le flux produit est fonction de la longueur et de la disposition géométrique de ces conducteurs, et de l'intensité qui les parcourt.

Le cas typique est illustré ci-dessous : deux mailles séparées agissent comme les spires d'un bobinage. Elles s'échangent de l'énergie par induction mutuelle. La tension engendrée dans la seconde par le courant dans la première est susceptible d'être amplifiée et de produire ainsi une perturbation gênante.

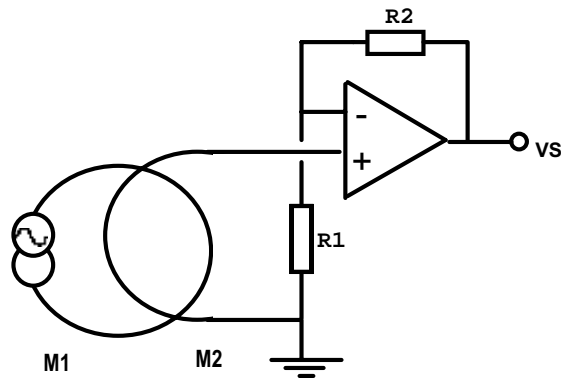


Figure 7

Alors que le couplage capacitif était surtout émis par des conducteurs soumis à des variations rapides de tensions, le couplage inductif est plutôt provoqué par des conducteurs soumis à des variations rapides de courant. Ces conducteurs, surtout s'ils constituent des boucles de surface importante, génèrent du "champ H" ce qui se traduit par un flux magnétique capable d'engendrer des forces électromotrices induites dans les conducteurs environnants.

Pour se protéger du phénomène, on cherche d'abord à réduire autant que possible les surfaces de toutes les boucles, les boucles émettrices comme les boucles réceptrices.

On tente parfois de s'opposer à un champ H en lui présentant une "spire en court-circuit". Mais son influence est toute relative, elle apporte certes une atténuation, mais ne supprime pas le problème.

On peut aussi réduire le couplage par compensation, en présentant au champ une boucle d'une surface donnée suivie d'une boucle de même surface, mais orientée en sens contraire. On donne ainsi au câblage une structure "torsade". L'application la plus typique est le câblage en paires torsadées utilisé en téléphonie (figure 8).

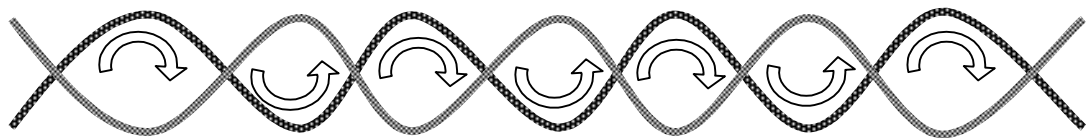


Figure 8

On peut enfin et surtout réduire considérablement le couplage inductif en enfermant la partie sensible ou la partie perturbatrice dans une enveloppe métallique, c'est le blindage que nous étudierons plus en détail dans la partie consacrée à ce sujet.

6.3.2 - Induction mutuelle dans un câble

Dans un milieu de perméabilité magnétique donné, le flux produit est fonction de la longueur du conducteur, et de l'induction engendrée dans le volume qui l'entoure, de sorte qu'une partie non négligeable du flux se situe aux environs immédiats du métal, là où l'induction est la plus forte. Le couplage entre deux fils est donc d'autant plus fort qu'ils sont longs, fins et proches.

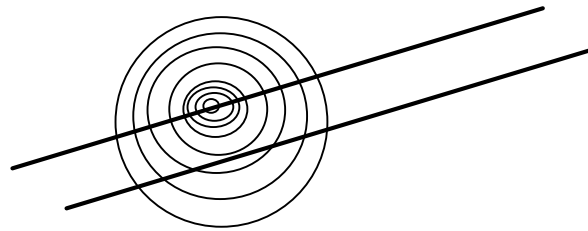


Figure 9

Compte tenu de la réciprocité de l'influence d'un conducteur sur l'autre, un câble bifilaire se comporte à certains égards comme un transformateur de rapport 1/1 (figure 10).

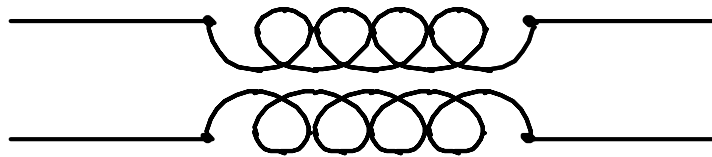


Figure 10

6.4 - Couplage par rayonnement électromagnétique

6.4.1 - Champ proche et champ lointain, impédance d'onde

Les couplages que nous avons présentés précédemment sont fondés sur des champs "*proches*", leur effet étant mesuré à proximité immédiate de la source.

Nous allons maintenant considérer l'effet de ces sources lorsqu'elles émettent des champs périodiques de fréquence f , à une distance suffisante pour que l'on n'en perçoive plus que le rayonnement électromagnétique. Les distances à considérer seront fondées sur la longueur d'onde λ du signal. Elle s'exprime en mètres, et a pour valeur :

$$\lambda = 3 \cdot 10^8 / f$$

Soit une source à proximité immédiate de laquelle on mesure un champ électrique E_p et un champ magnétique H_p . Le rapport E_p/H_p est appelé impédance d'onde. A mesure que l'on s'éloigne de cette source, les champs vont se combiner pour produire une onde plane dont l'impédance dépend des caractéristiques ϵ_0 et μ_0 du milieu de propagation (figure 11). Dans la pratique, une source de champ E "pure" n'existe pas davantage qu'une source de champ H "pure". On a cependant représenté schématiquement sur le graphe, les courbes théoriques de ces deux sources.

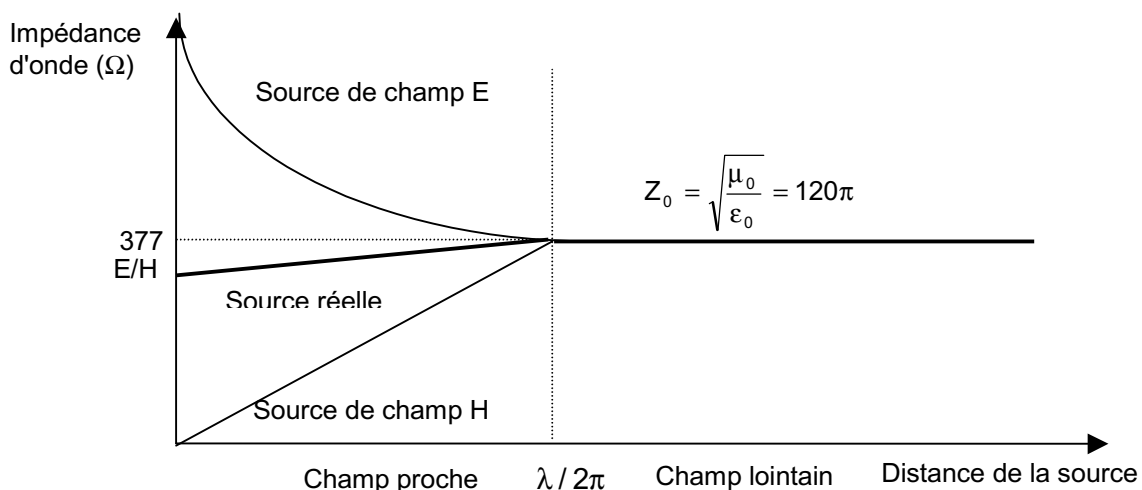


Figure 11

6.4.2 - Les sources de rayonnement électromagnétique

Tout conducteur véhiculant un signal de haute fréquence constitue une source de rayonnement, et tout conducteur non protégé par un blindage efficace peut être influencé par un rayonnement électromagnétique. Dans le cas général d'un montage électrique ou électronique, le courant circule dans un circuit fermé - une boucle - et sa valeur n'est pratiquement pas affectée par la puissance émise par rayonnement. Il arrive cependant de rencontrer un conducteur soumis à un signal dont le spectre comprend des fréquences élevées, et qui n'intervient pas dans une boucle - par exemple un fil qui ne serait pas connecté à une extrémité. On peut alors l'assimiler à une antenne, et la partie réelle du courant qui le parcourt est alors en rapport direct avec la puissance émise par rayonnement.

6.4.2.1 - Petite boucle

C'est une boucle dont la plus grande dimension est très inférieure à la longueur d'onde. Elle constitue la source essentielle dans un montage électronique formé en principe de circuits fermés. Le champ E perçu à une distance d (en mètres) de la source est indiqué dans l'encadré ci-contre. Il est exprimé en Volts par mètre, la longueur d'onde est en mètres, la fréquence en Hertz, la surface S de la boucle en m², l'intensité en Ampères.

- En champ proche, E varie en fonction inverse du carré de la distance à la source.
- En champ éloigné, il varie en fonction inverse de cette distance, et le champ H se déduit de l'impédance d'onde : $H = E / 377$.

$$E = 1,32 \cdot 10^{-14} \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda}{2\pi d}\right)^2} f^2 \frac{S}{d} I$$

en champ proche, $\frac{\lambda}{2\pi d} \gg 1$

$$E = 1,32 \cdot 10^{-14} \frac{\lambda}{2\pi d^2} f^2 S I$$

en champ éloigné, $\frac{\lambda}{2\pi d} \ll 1$

$$E = 1,32 \cdot 10^{-14} \frac{f^2 S I}{d}$$

6.4.2.2 - Antenne

On connaît (voir ci-contre) les formules donnant à une distance d (m) de la source vue selon un angle d'incidence θ , le champ E (V/m) d'un dipôle ou d'une antenne fouet de longueur totale ℓ , parcouru par un courant d'antenne d'amplitude I (A), pour un signal de fréquence f (Hz) produisant dans l'air ou le vide, une onde de longueur $\lambda = 3 \cdot 10^8 / f$. On connaît aussi l'expression de la puissance P (W) émise. Mais, on ne peut les évaluer sans connaître le courant d'antenne dont la valeur incertaine dépend de la géométrie du conducteur responsable de l'émission et de son insertion dans tout un ensemble. On s'en tient donc à l'expérimentation.

$$|E_{(\theta)}| = \frac{60\pi}{\lambda d} I \ell |\sin \theta|$$

$$P = 40\pi^2 \frac{\ell^2}{\lambda^2} I^2$$

On peut cependant insister sur un point : pour rechercher des parties rayonnantes jouant dans un montage le rôle d'antenne, on serait mal inspiré de rechercher ce qui ressemble à une antenne au sens conventionnel du terme (antenne droite, doublet...). A moins que de très hautes fréquences ne soient en jeu, les "antennes" ainsi repérées sont fort mal adaptées, et leur rendement en émission est faible. Bien souvent, ce sont des parties massives (radiateurs de semi-conducteurs par exemple) qui émettent de façon significative. Prenons le

cas de la figure 12. Deux surfaces conductrices sont placées à une distance ℓ l'une de l'autre, et présentent l'une par rapport à l'autre une capacité C. Elles sont réunies électriquement à une source de

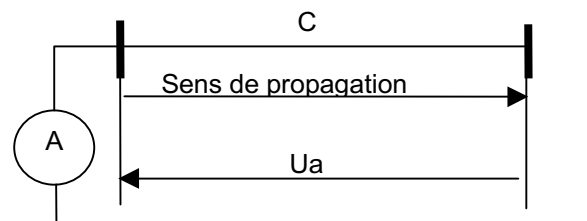


Figure 12

haute fréquence d'amplitude A et de fréquence f (Hz) produisant dans l'air ou le vide, une onde de longueur $\lambda = 3 \cdot 10^8 / f$.

Ce dispositif fait penser au radiateur d'onde expérimental de Hertz. Notons que des capacités existent entre chacune des armatures et la masse, et à ce titre, il forme également une source en forme de boucle. Nous ne tiendrons pas compte de ces capacités pour évaluer isolément l'émission de cette source en tant qu'antenne.

En posant que la vitesse de propagation du signal sur la liaison électrique est de l'ordre de $3 \cdot 10^8$, une tension apparaît entre les deux pièces formant les armatures de C. Elle vaut en principe

$$U_a = A \sin\left(\frac{4\ell}{\lambda}\right)$$

mais si la distance entre les armatures est très inférieure à la longueur d'onde, on a sensiblement :

$$U_a = A\left(\frac{4\ell}{\lambda}\right)$$

Le courant dans la liaison entre les deux armatures, que l'on assimile au courant d'antenne vaut alors :

$$I_a = U_a C \omega = U_a C \frac{6\pi \cdot 10^8}{\lambda}$$

On peut alors établir la formule *approchée* donnant la puissance rayonnée par le dispositif :

$$P = 3 \cdot 10^{-4} A C \left(\frac{\ell}{\lambda}\right)^3$$

Par conséquent, si des parties conductrices de surface relativement importante sont soumises à des signaux de haute fréquence d'une certaine amplitude, il vaut beaucoup mieux qu'elles soient proches l'une de l'autre !

6.4.3 - Protection contre les rayonnements électromagnétiques

On se prémunit contre l'émission ou la réception d'ondes électromagnétiques essentiellement par blindage.

On utilise à cette fin des feuilles de métal, voire dans certains cas des peintures conductrices.

Il n'est pas nécessaire d'adopter des blindages épais. Il a été prouvé que des feuilles de métal très minces (papier d'aluminium) constituaient néanmoins des blindages efficaces. La qualité d'un blindage dépend essentiellement de sa continuité. Une rupture de blindage dans une enceinte a quelque chose qui se compare à un pneu crevé (cf démonstration sur les blindages).

7 – Les effets des perturbations atmosphériques

Nous ouvrons ici un chapitre portant en particulier sur les effets de la foudre. Cela paraît d'autant plus important que ceux-ci sont souvent perçus comme liés à des phénomènes à la fois terribles, mais accidentels et improbables. Cela peut se comprendre si l'on cantonne la foudre à ses effets dévastateurs consécutifs à un impact direct. La position subjective qu'elle inspire est alors comparable à celle d'une population en temps de guerre sous un bombardement : « pourvu que cela tombe ailleurs, mais si cela tombe ici, il n'y a rien à faire... »

La réalité est toute autre. Une trentaine de fois par seconde en moyenne, la foudre frappe le sol habité de la planète, générant pendant quelques micro-secondes des courants typiquement 25000 ampères, mais pouvant atteindre 100 000 ampères et plus. Mais les décharges atmosphériques vers le sol ne sont pas les seuls phénomènes, il y a également les décharges entre des masses d'air (décharges intra-nuages et entre nuages).

Nous allons décrire très succinctement l'apparition du phénomène, et examiner ses effets directs – à proximité du lieu d'impact – et indirects, en particulier du fait de la propagation de fortes perturbations par les lignes électriques.

7.1 – Le coup de foudre

L'atmosphère est en permanence le siège de phénomènes électriques, du fait en particulier du frottement et du télescopage des molécules d'eau entre elles. Par beau temps, le champ électrique au sol est de l'ordre de 100 à 150 volts par mètre. Sous l'influence d'un nuage d'orage, il croît dans de fortes proportions : 10 000, 20 000 volts par mètre. Le champ électrique s'accroît, avec un renforcement à proximité des objets dont la hauteur et la forme facilitent l'effet de pointe. Dans le cas le plus fréquent du coup de foudre descendant, l'amorce se fait dans un premier temps par la formation d'un « traceur », canal ionisé se propageant par bonds de 30 à 50 mètres vers le sol, et qui se ramifie. Les charges du nuage descendent le long de ce canal. A l'approche du traceur, le champ au sol augmente encore, pouvant quelquefois atteindre quelque 300 000 volts par mètre. A partir des points les plus critiques, généralement une aspérité, se développe alors des traceurs ascendants. Celui qui a progressé le plus vite entre alors en contact avec le traceur descendant, formant ainsi un canal ionisé continu par lequel les charges vont brusquement s'écouler. La décharge atteint un pic de l'ordre de 25000 A en quelques microsecondes, dure environ 100 microsecondes, et est suivie de répliques de moins en moins intenses pendant une durée qui peut se chiffrer en millisecondes mais quelquefois aussi en centaines de millisecondes. Entre ces décharges, un courant de l'ordre de 100 A persiste. Les décharges à long courant persistant sont les plus à même de provoquer des incendies.

On assiste donc à un phénomène en deux phases essentielles : une phase électrostatique liée au déplacement de charges, et une phase de décharge accompagnée d'effets thermiques, électrodynamiques, électrochimiques.

7.2 – Effet de la foudre à proximité du lieu d'impact

7.2.1 – Elévation de potentiel du sol

Lorsque la foudre frappe et que la décharge se répartit dans le sol, elle provoque une importante montée de potentiel formant un gradient autour du point d'impact (figure 13).

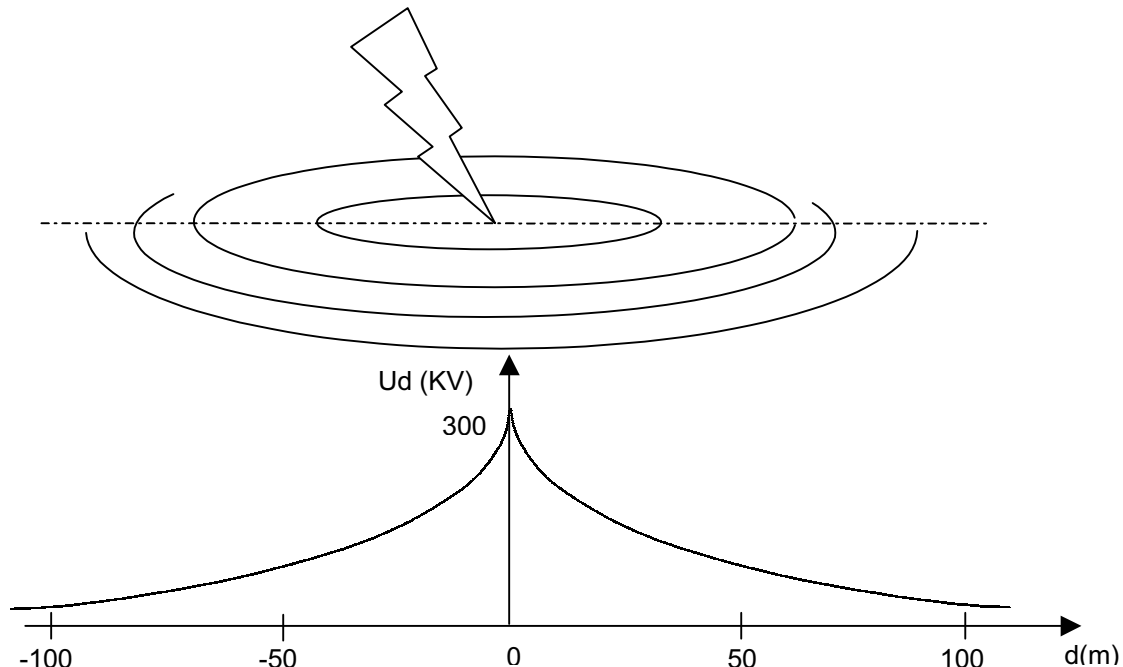


Figure 13

Cela signifie qu'entre deux points proches situés à la surface du sol, va apparaître une différence de potentiel : la tension de pas, responsable de la mort de nombreuses têtes de bétail (une vache peut être électrocutée suite à la tension apparue entre les pattes avant et les pattes arrière).

L'élévation du potentiel peut atteindre plusieurs centaines de kilovolts à proximité du point d'impact, peut encore être très importante à plusieurs dizaines de mètres. Il en découle des différences de potentiel très importantes entre les différentes parties reliées à la terre d'un bâtiment, en particulier si les éléments conducteurs (armatures de béton, tuyaux, éléments de structure) ne sont pas reliés entre eux.

7.2.2 – Surtension sur les structures aériennes et les lignes électriques et téléphoniques

La décharge rapide qui intervient au moment du coup de foudre provoque des variations considérables du champ électrique au dessus du sol. Ces variations agissent par influence sur les conducteurs placés dans ce champ, toitures métalliques, piliers, et les lignes aériennes (réseau électrique, téléphone) qui vont en quelque sorte exporter la perturbation (figure 14). On peut se représenter les éléments en présence, nuage, sol, conducteur victime, comme les armatures de condensateurs chargés de très haute énergie. Ces condensateurs forment un réseau dans lequel ils sont mutuellement couplés. Toute décharge qui modifie subitement le potentiel entre deux armatures de l'un d'eux entraîne donc par couplage capacitif une modification plus ou moins importante des charges sur les autres. Il n'est plus nécessaire dans ce cas que la décharge se fasse entre une masse d'air et le sol pour constater une perturbation. Une décharge dans l'atmosphère peut agir de la même manière. Lorsqu'une ligne électrique aérienne est soumise sur une certaine longueur de son parcours à une variation brutale de champ, elle développe donc par influence une surtension qui va se propager de part et d'autre.

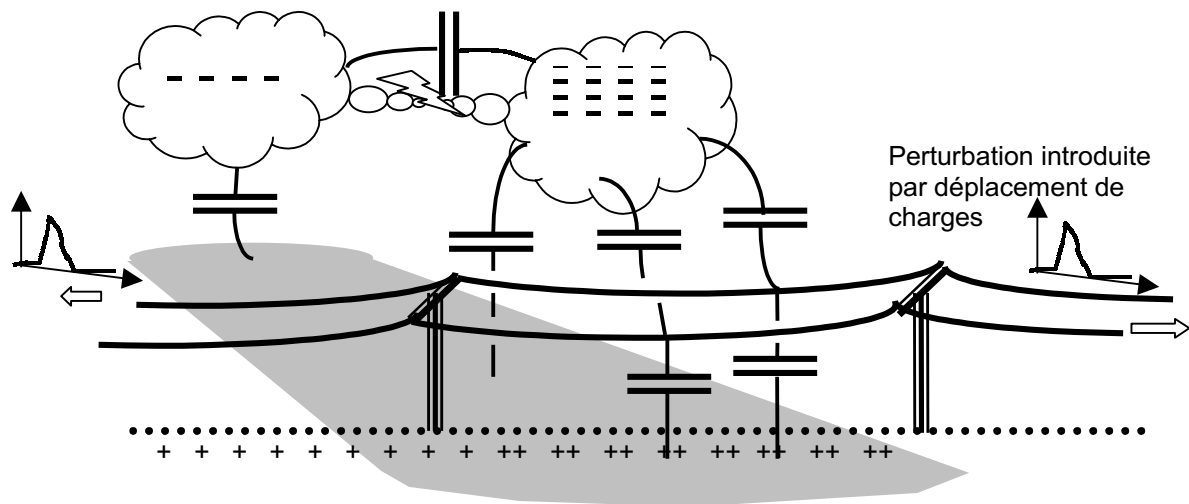


Figure 14

7.2.3 – Perturbations produites par induction

Une décharge entre nuage et sol ou entre nuages entraîne des champs électromagnétiques qui engendrent sur les milieux conducteurs des tensions/courants dans une gamme de fréquence de 100 Hz à 10 MHz. Ces rayonnements peuvent être reçus par tout conducteur formant une antenne plus ou moins bien adaptée, mais c'est sous forme de champ d'induction magnétique «champ H» agissant sur des conducteurs formant une boucle de surface conséquente (voir l'exemple de la figure 15) que son effet est le plus important. Pour une boucle de quelque 50 mètres carrés, la tension induite se chiffre en kilovolts.

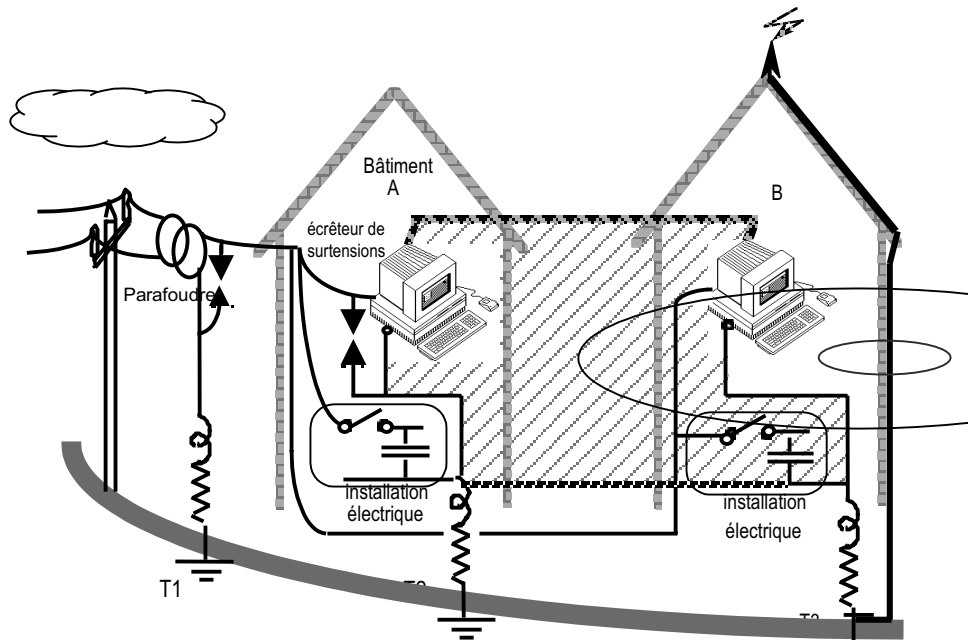


Figure 15

7.3 - Effets de la foudre à distance du point d'impact

Comme nous l'avons mentionné, ce sont les lignes aériennes qui véhiculent les pics de tension consécutifs à la foudre. Sans dispositifs de protection, ils seraient de quelque 10 à 20 KV, et

entraîneraient des avaries ou tout au moins un vieillissement accéléré des composants de distribution électrique. La protection contre les surtensions repose sur l'écrtage des pics par des dispositifs tels que des éclateurs, qui s'amorcent d'eux-mêmes à partir d'une certaine tension et dérivent vers la terre le courant nécessaire à l'écrtage. On reproduit donc localement et à une échelle réduite, un phénomène comparable à celui qui se produit au lieu d'impact. Les pointes de courants ainsi provoquées sont des phénomènes transitoires à variations rapides, vis à vis desquelles les lignes présentent des impédances beaucoup plus élevées que ce que l'on connaît comme valeur ohmique, à cause de l'élévation de résistance par effet pelliculaire et de l'influence des inductances de lignes.

7.4 – Synthèse

L'examen de la figure 15 permet de résumer les effets néfastes de la foudre. Dans la deuxième partie de ce cours, nous reviendrons plus en détail sur la protection des installations et sur les améliorations à apporter.

L'installation peut être mise en danger de plusieurs manières :

- En cas d'impact local sur le paratonnerre :
 - les différentes prises de terre vont être portées à des potentiels très différents, alors que le neutre de l'installation est réuni à l'une d'elles au poste de transformation, et que des liaisons électriques existent d'un bâtiment à l'autre. Sur les appareils non protégés, les pics de tension entre les masses des appareils et les circuits reliés au réseau vont provoquer des claquages (condensateurs de filtrage, transformateurs d'alimentation...). Si certains appareils sont munis d'écrtateurs, il apparaîtra alors un pic de courant dans les lignes de terre et les câbles électriques.
 - les boucles de surface importante (zone grisée) seront le siège d'une induction importante provoquée par le courant dans la descente du paratonnerre. Les tensions introduites (avec un assez large spectre de fréquences) seront largement suffisantes pour entraîner des avaries.
- En cas d'impact distant affectant le réseau électrique, la surtension sera écrtée par le parafoudre, ce qui n'empêchera pas les éventuelles protections des appareils de réagir également. Mis à part la perturbation du réseau déjà capable de déclencher des protections rapides (protections électroniques ou fusibles rapides) ou d'altérer le fonctionnement de différents appareils (plantage d'un ordinateur par exemple), on peut également voir apparaître des pics de tension entre des points normalement équipotentiels (prises de terre) et des pointes de courant dans les lignes.

8 – Les techniques de protection en CEM

L'amélioration de la compatibilité électromagnétique agit du côté des sources en tentant de réduire les perturbations qu'elles émettent, et du côté des victimes en les protégeant des influences extérieures. Bien qu'il s'agisse à première vue de deux approches distinctes, on met en œuvre, dans la pratique, des techniques apparentées. Nous avons vu qu'une source de perturbations atteignait sa victime par le biais d'un couplage. C'est à ce niveau qu'il faut agir. On a recours pour cela à des dispositifs de *découplage*, terme qui existait bien avant que la compatibilité électromagnétique ne figure au vocabulaire.

8.1 – Disposition des composants et du câblage

8.1.1 - Du schéma au montage réel

C'est probablement l'élément le plus important du savoir-faire des concepteurs. Les différents modes de couplage que nous avons étudié en 6 n'impliquent pas des composants physiques, mais essentiellement la position relative de conducteurs.

Nous concevons le fonctionnement d'un circuit électronique au travers d'un schéma utilisant des symboles. La première chose dont il faut avoir conscience, c'est que le schéma ne nous donne qu'une vue idéalisée et incomplète du circuit réel :

- parce que les lignes tracées entre les éléments représentent des conducteurs supposés parfaits, donc d'impédance nulle, sont assimilées à des équipotentielles ;
- parce que seuls les éléments représentés sur le schéma par leur symbole sont sensés être le siège d'un phénomène électrique ;
- parce que la représentation symbolisée des différents éléments est géométriquement sans rapport avec leur disposition réelle, et que les chemins électriques ne sont pas dessinés tels qu'ils seront matérialisés ;
- parce que le schéma électrique ne concerne souvent qu'une partie d'un équipement, et ignore par conséquent la présence des éléments électriquement actifs dans l'environnement du montage.

En réalité, la moindre parcelle du montage est un système à réponse temporelle, d'ordre n , soumis à de multiples perturbations. Bien entendu, l'altération introduite dans le modèle "théorique" du montage est insignifiante dans la plupart des cas. Dans certaines situations cependant, elle prend une importance excessive par rapport à ce que l'on attend du montage, et la qualité de celui-ci s'en trouve dégradée.

Il faut prendre en compte toutes les exigences en matière de CEM dès le début de la conception d'un appareil ou d'une installation si l'on veut satisfaire aux exigences du cahier des charges. Ceci nécessite une démarche méthodique en plusieurs étapes.

Note - Pour ne plus avoir à évoquer par la suite l'objet sur lequel nous raisonnons - montage, appareil, installation... - nous parlerons simplement de *système*. Ce mot est d'usage fréquent dans les textes français traitant de CEM.

8.1.2 - Repérages préliminaires

Il convient tout d'abord de repérer les ordres de grandeur de l'activité électrique des différentes parties du système, en considérant comme il se doit les différences de proportions.

Nous sommes habitués dans la vie, à considérer comme très différentes les grandeurs qui sont plusieurs fois plus grandes ou plus petites les unes que les autres. On passe d'une octave à la suivante dans le rapport 2, un adulte fait 3 fois la taille d'un nouveau-né, un homme est 4 fois moins haut que sa maison, un avion à réaction va 10 fois plus vite qu'une voiture, etc...

Or en électronique, nous manipulons avec désinvolture des ordres de grandeur bien plus grands ! entre les 100 nV qui constituent le signal à l'entrée d'un amplificateur différentiel et les 380 volts de crête sur le cordon secteur à quelques centimètres de distance, il y a le rapport ...3 800 000 000 !

Donc même si un couplage ne transmet qu'une infime partie de la puissance d'un signal perturbateur, la fraction transmise peut ne rien avoir d'insignifiant vis à vis d'un signal de faible niveau.

Le premier travail va donc consister à **identifier et classer les différentes parties du système**, sur la base des signaux qui y sont impliqués : ordres de grandeur, impératifs de précision, spectre de fréquences...

Il faut ensuite **ordonner les sous-ensembles** repérés précédemment en fonction des liaisons qui existent entre eux, en s'aidant d'un organigramme ou schéma synoptique. Ce schéma, qui ne coïncide pas nécessairement dans le détail avec le schéma fonctionnel, fait ressortir tous les canaux possibles de couplage : signaux échangés, alimentation, parties rayonnantes (un transformateur par exemple)

8.1.3 - Recherche d'une stratégie de placement

Cette stratégie est à l'image du jeu d'échecs : on connaît les règles du maniement de chaque pièce, mais il n'est pas possible d'écrire la règle qui fait gagner. Tout dépend du cas que l'on doit traiter. Il y a cependant un ordre logique dans les décisions à prendre. On commence par ébaucher un plan de disposition global que l'on affinera ensuite par une démarche similaire en plusieurs étapes :

1) placer les éléments dont la position est obligatoire (nécessité fonctionnelle, contrainte mécanique ou thermique, réglementation...)

2) placer les éléments, dont la position relative est cruciale pour le bon fonctionnement et pour la CEM (il est rare qu'il y ait antinomie entre les deux aspects) . On fera particulièrement attention :

- aux parties qui doivent être éloignées : celles qui impliquent des signaux les plus incompatibles : par exemple un signal de plusieurs ampères avec un fort dV/dt vis à vis d'un signal de mesure de faible niveau) ;
- aux parties qui doivent être le plus rapprochées, soit parce qu'elles échangent un grand nombre de signaux, soit parce que les signaux échangés sont susceptibles de rayonner (amplitude et rapidité des variations de tension ou de courant, fréquences élevées), soit par ce que les signaux sont sensibles aux perturbations (références de tension, signaux faibles, signaux traduisant des données de précision...)
- aux parties qui devront recevoir un blindage, en répertoriant les conduites qui devront le traverser.

3) assigner des zones de placement pour les éléments restants de manière à résoudre le mieux possible l'acheminement des différentes masses et alimentations, particulièrement si celles-ci sont multiples.

4) placer les éléments de manière à simplifier le câblage en tenant compte des espaces disponibles.

La figure 16 montre ce que peut être le résultat d'une étude de disposition .

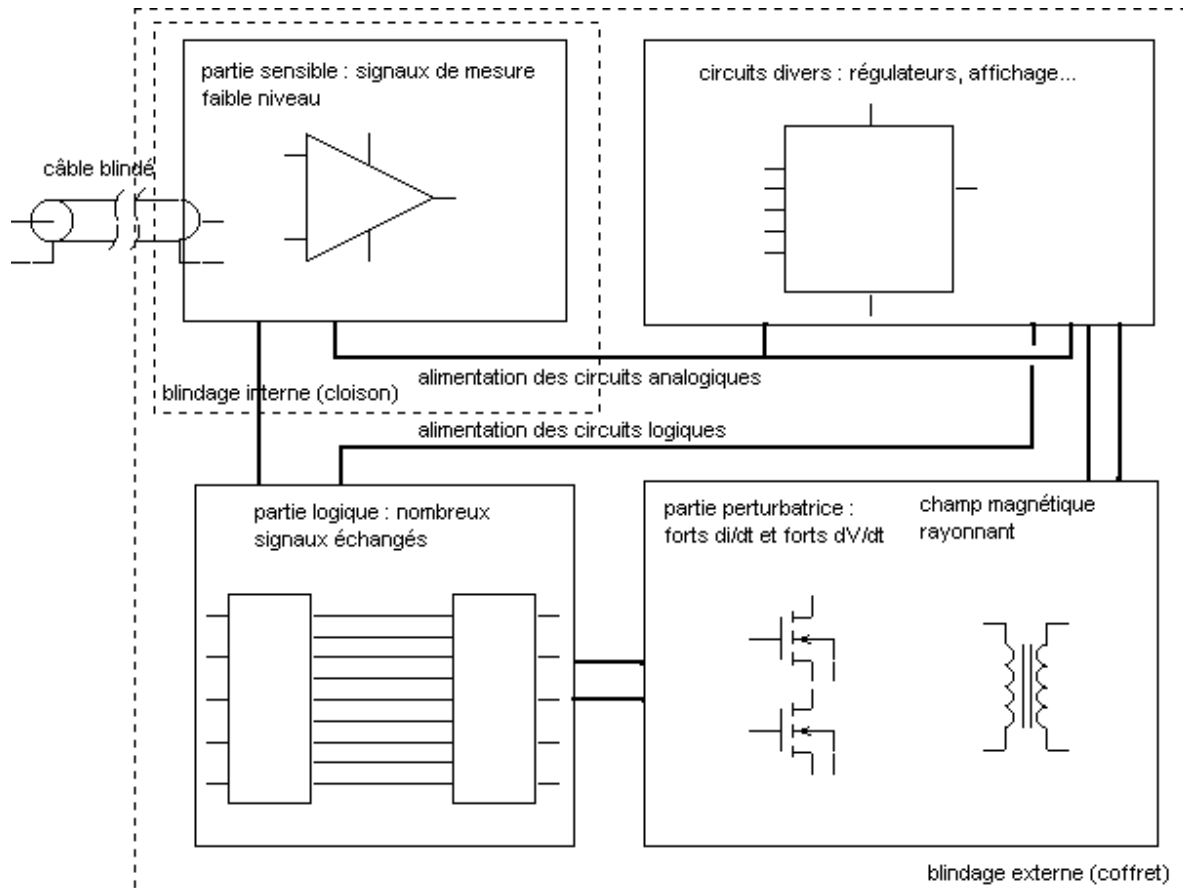


Figure 16

8.1.4 - Etude de la disposition du câblage.

Au cours de cette étape, on est fréquemment amené à remettre en cause, dans le détail, les premières dispositions du placement. Une bonne disposition du câblage est fondée sur quelques principes et beaucoup de réflexion. Citons les principes et illustrons-les par un exemple.

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

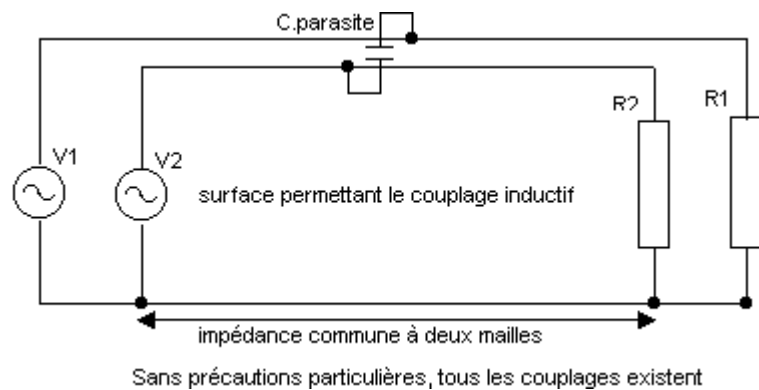


Figure 17

Lorsqu'on fait la synthèse de ces quatre propositions, on remarque qu'elles tendent à ce que tout le câblage soit formé de paires différentielles séparées, chacune faisant passer par le même chemin les conducteurs aller et retour conduisant à un élément donné, générateur ou récepteur. Dans le cas idéal de la figure 18, il n'y aurait ni couplage capacitif, ni couplage par impédance commune, ni couplage inductif (surface de boucle nulle) et peu de perturbation rayonnée, alors que sans précautions particulières (figure 17), tous les modes de couplages existaient probablement à différents degrés.

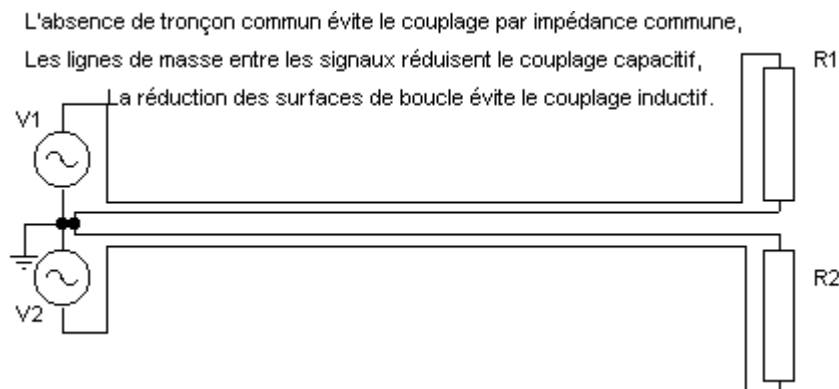


Figure 18

8.1.5 - Etude d'une stratégie d'alimentation.

Lorsqu'on cherche à éviter les couplages dus à un tronçon commun à plusieurs mailles, on se heurte à un obstacle de taille : lorsqu'une source d'alimentation concerne un ensemble de composants, elle constitue un tronçon commun à chacun d'eux (figure 19). Le savoir faire en matière d'alimentation des montages est déterminant sur les performances, d'une manière générale, et sur les qualités CEM en particulier.

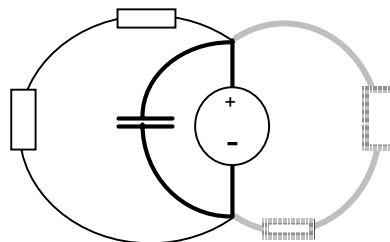


Figure 19

La première méthode qui vient à l'esprit pour limiter les effets qui en résultent, est d'abaisser autant que possible l'impédance interne de la source, et de placer à ses bornes un condensateur de découplage de bonne qualité afin que cette impédance reste faible, même vis à vis des variations transitoires.

8.1.5.1 - Abaisser l'impédance interne de la source d'alimentation

Soit à réduire la chute de tension entre la sortie d'une alimentation stabilisée et l'endroit de son utilisation. Dans le montage de la figure 20, il y aura une chute de tension aussi bien dans le fil amenant le +5V que dans celui par lequel se fait le retour à la masse.

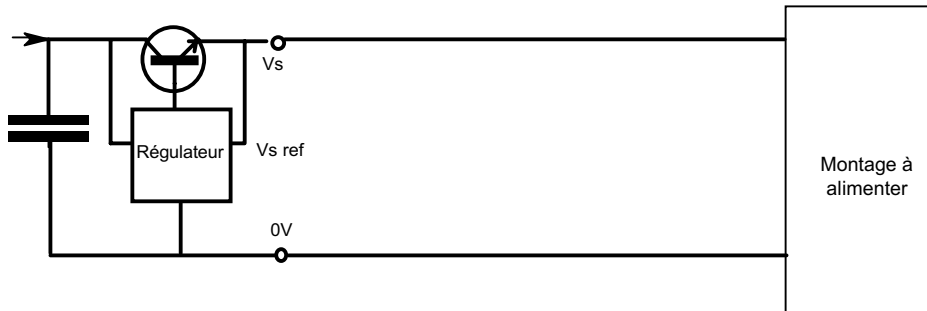


Figure 20

On améliore la qualité de la source en utilisant le montage en «quatre fils» comme le montre la figure 21.

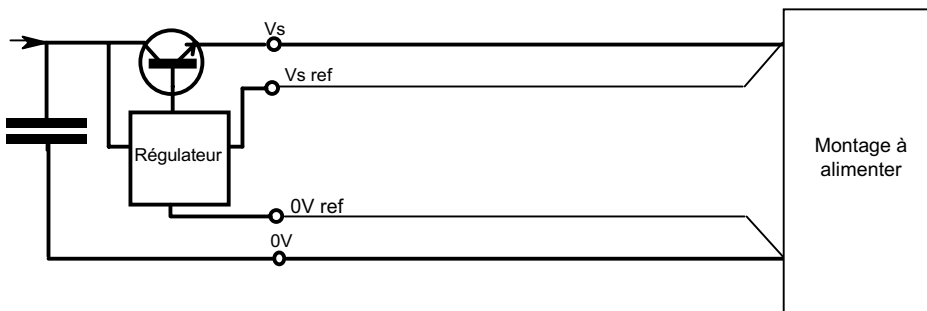


Figure 21

Dans ce montage, la tension prise en compte par le régulateur est mesurée sur le lieu de son utilisation. Il n'est donc pas nécessaire d'augmenter la section des fils au delà de ce qu'impose l'intensité qui les traverse. (on admet couramment 10 A/mm². Les fils de retour de mesure, soumis à une faible intensité pourront être plus fins.

On ne peut cependant, avec un régulateur unique, réguler la tension qu'en un seul endroit du montage. Il sera alors judicieux de prélever la tension renvoyée au régulateur le plus près possible des éléments qui consomment le plus de courant. Sur la figure 22, les points A et B où s'appliquent cette connexion sont appelés "points d'étoile".

On sépare alors les lignes d'alimentation en deux ou trois groupes (voire plus) en fonction des différentes qualités d'alimentation requises dans le montage. On aura par exemple :

- les lignes de référence, que l'on considérera comme equipotentielles sur tout leur parcours. Elles ne concernent que des points de branchement dérivant un courant quasi nul, tels que les entrées différentielles des amplificateurs opérationnels ;

- les lignes «haute qualité», destinées aux éléments les plus sensibles aux variations de la tension d'alimentation;
- les lignes d'alimentation destinées aux éléments consommant davantage, et qui sont bien souvent aussi moins sensibles aux variations, tels les étages de sortie vers des actionneurs, etc...
- les lignes destinées aux circuits logiques.

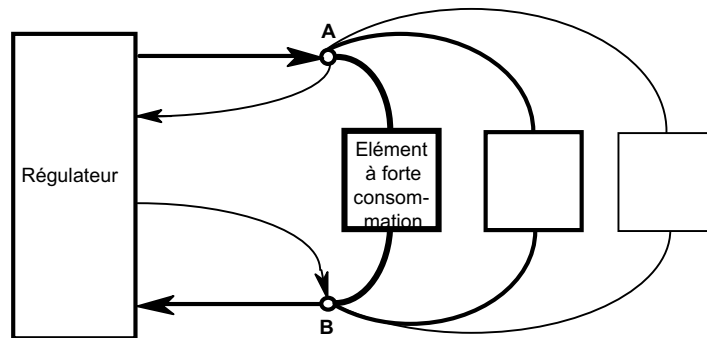


Figure 22

En dehors du point d'étoile, ces différentes lignes n'auront plus de points de contact de l'une à l'autre.

Dans les cas exigeants, on peut aussi améliorer localement l'alimentation de certains composants en utilisant une diode zener, ou même un circuit intégré de régulation supplémentaire.

8.1.5.2 - Abaisser l'impédance de la source d'alimentation vis à vis des variations transitoires

Vis à vis des variations rapides du courant, un régulateur ne peut réagir suffisamment vite. Ce sont donc les condensateurs de découplage qui vont permettre d'abaisser l'impédance de la source. La figure 23a symbolise un circuit d'alimentation perturbé par un composant dont les changements d'état successifs entraînent des variations du courant consommé. Les figures 23b et 23c en donnent un schéma équivalent sous les formes "Norton" et "Thévenin".

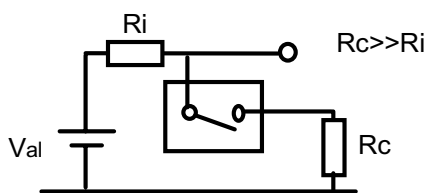


Figure 23a

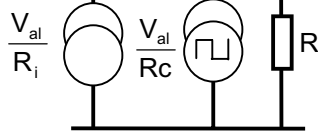


Figure 23b

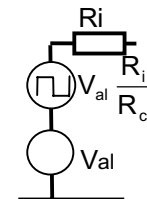


Figure 23c

Le problème se complique un peu lorsqu'on tient compte du fait que la résistance interne du générateur qui représente l'alimentation n'intervient pas seule, mais avec les impédances parasites : inductance série des fils de liaison en particulier, capacités inhérentes au câblage, condensateur de découplage en tant que composant câblé. La position de ce dernier dans le montage va modifier sensiblement les signaux sur les points d'alimentation comme le montrent les figures 24a et 24b. Il en résulte que pour éviter les perturbations de la tension d'alimentation, un condensateur doit être placé aux bornes de chaque composant par des liaisons les plus courtes et les plus "bifilaires possibles. Les figures 25a et 25b montrent une bonne et une moins bonne solution.

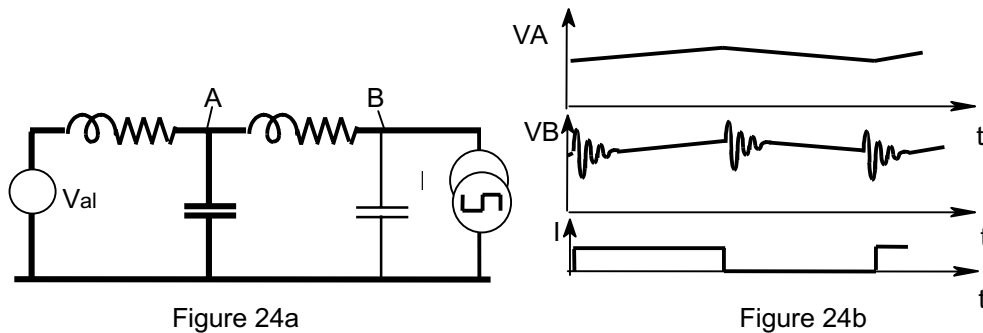


Figure 24a

Figure 24b

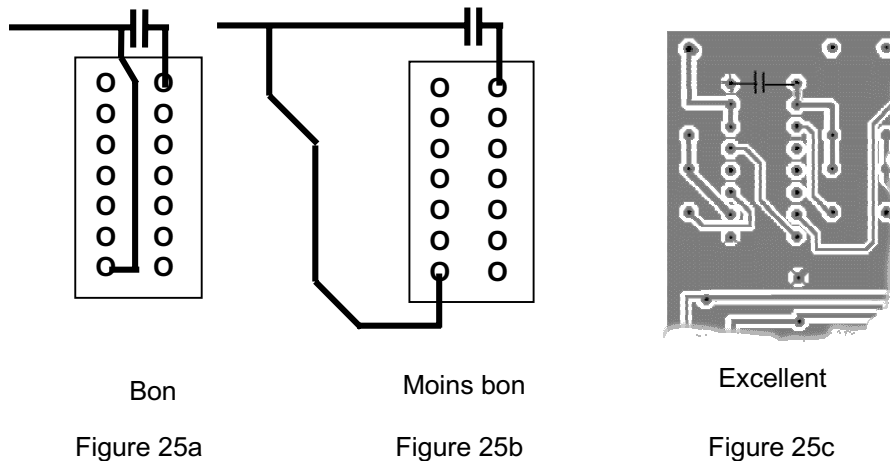


Figure 25a

Figure 25b

Figure 25c

8.1.5.3 - Plan de masse

Pour conserver une référence équipotentielle de bonne qualité entre tous les points de masse, la meilleure solution est de laisser sur la plaque support le maximum de cuivre relié à la masse. Le câblage appliqué sur un châssis métallique offre des performances comparables si les prises de masse sont bien réalisées. Lorsqu'on travaille en circuit imprimé multicouche, on adopte un plan cuivré pour chaque pôle de l'alimentation. Pour être efficace, on fait passer le minimum de connexions en incrustation dans le plan de masse afin de préserver son intégrité. Nous verrons plus loin que le plan de masse fait également office de blindage.

8.1.5.4 - Filtrage d'alimentation

Pour éviter la propagation par les lignes d'alimentation de signaux entre différentes parties d'un montage - typiquement les étages successifs d'un amplificateur pour signaux alternatifs - il arrive, que l'on introduise des impédances en série afin de réaliser des filtres passe-bas (figure 26). Il peut s'agir d'inductances "de choc" ou de résistances. Celles-ci doivent alors être suffisantes pour permettre un filtrage efficace et suffisamment faibles pour ne pas provoquer de chute de tension excessive. La valeur et la *qualité technologique* du condensateur ont une grande influence sur le résultat. On alimente l'ensemble en branchant l'alimentation sur la partie la moins sensible et qui consomme le plus : l'étage de sortie.

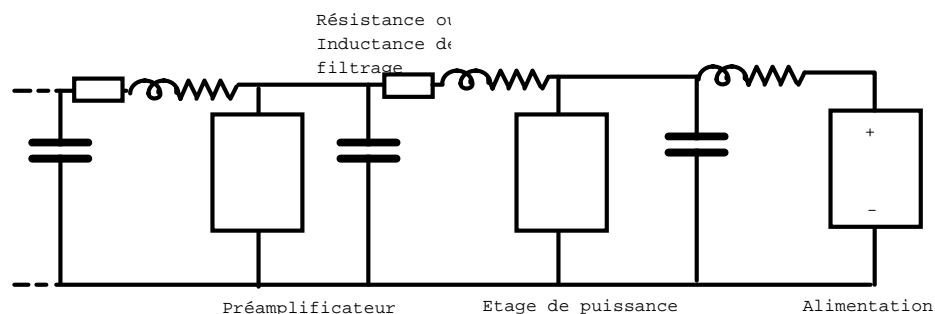


Figure 26

8.2 - Les blindages

8.2.1 - classification

Le blindage est constitué d'une enveloppe conductrice que l'on met en place autour de composants électriques pour constituer une barrière vis à vis des influences électrostatiques, magnétiques, ou électromagnétiques. On distingue :

- le "blindage" magnétique ;
- le blindage amagnétique.

Le blindage magnétique (figure 27) est constitué d'un matériau capable d'offrir un chemin de réductance relativement faible aux "lignes de force" issus d'une source de champ magnétique (champ H), et d'en préserver les zones à protéger. Cette technique peut par exemple protéger le tube d'un oscilloscope de l'influence d'un transformateur d'alimentation. En basse fréquence, la protection requiert parfois un matériau noble et coûteux comme le mumétal.

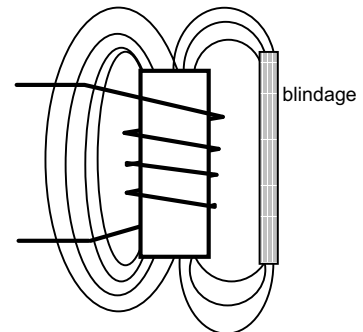


Figure 27

Le blindage amagnétique (figure 28) est constitué d'un matériau bon conducteur, cuivre ou aluminium. Il agit de plusieurs manières :

- Vis à vis des champs électriques (champs E) à la manière d'une cage de Faraday. Il se comporte comme un écran électrostatique et évite le couplage capacitif entre les conducteurs situés de part et d'autre.
- Vis à vis des champs magnétiques (champs H), selon le principe représenté ci-contre. Les "lignes de force" d'un champ H variable indésirable qui tentent de le franchir provoquent dans le blindage, un courant induit dont le champ s'oppose à celui qui lui a donné naissance. On peut voir sur la figure que le courant résultant a tendance à circuler à la périphérie des zones exposées au champ. On blinde de cette manière des transformateurs de moyenne fréquence (quelques centaines de KHz), ou de haute fréquence (des MHz). Lorsqu'on l'utilise à l'encontre de champs en basse fréquence (50Hz par exemple), il est peu efficace vis à vis du fondamental mais le devient vis à vis des harmoniques de rangs élevés. Le blindage n'est pas nécessairement épais, sauf si l'on recherche une certaine efficacité à des fréquences de quelques KHz.
- Vis à vis des ondes électromagnétiques. Les champs E et H ne sont considérés en tant que tels qu'à proximité immédiate des composants. On parle alors de *champs proches*. Nous avons vu (6.4), qu'au delà d'une distance de l'ordre de $\lambda/2\pi$, on considère la perturbation rayonnée comme une onde électromagnétique. Rappelons que la longueur d'onde λ exprimée en mètres, a pour valeur $\lambda = 3 \cdot 10^8 / f$, f étant la fréquence du signal. La figure 29 montre les éléments qui interviennent dans le rôle du blindage. Selon les matériaux utilisés, l'influence relative du coefficient de réflexion et du coefficient d'absorption pourront être très différents. Les blindages sont très souvent en métal, mais vis à vis des hautes fréquences, on peut aussi faire usage de peintures spéciales ou de revêtements absorbants, voir de composés multicouches.

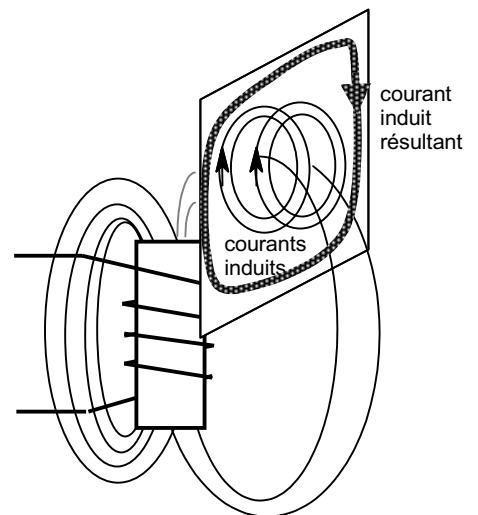


Figure 28

8.2.2 - Efficacité d'un blindage

Elle s'exprime différemment suivant que l'on fait le bilan des champs *avec* et *sans* blindage (champs *avant* blindage n'aurait pas de sens puis qu'il serait une composition de l'onde incidente et de l'onde réfléchie). Suivant que l'on considère les champs E, les champs H ou la puissance de l'onde électromagnétique transmise, on exprime :

$$\text{Rapport des champs E(dB)} = 20 \log \frac{E(\text{sans})}{E(\text{avec})}$$

$$\text{Rapport des champs H(dB)} = 20 \log \frac{H(\text{sans})}{H(\text{avec})}$$

$$\text{Rapport des puissances(dB)} = 10 \log \frac{P_i}{P_t}$$

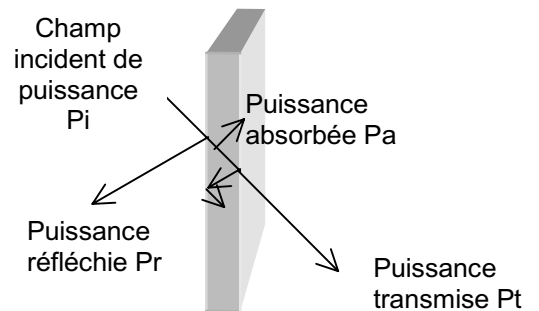


Figure 29

Notons que dans le sens où le rapport est exprimé, on ne parle pas d'atténuation mais au contraire d'efficacité, et le nombre de dB est positif et d'autant plus grand que l'efficacité est meilleure.

La qualité du blindage dépend bien évidemment de la matière utilisée, de son épaisseur, de sa géométrie, mais surtout de ses imperfections. On peut espérer trouver des abaques permettant de dimensionner convenablement un blindage, ou des méthodes de calcul approché, mais le problème est extrêmement complexe, et dans la pratique, il n'y a encore que la mesure qui soit à même de valider son efficacité.

Il n'est généralement pas possible de concevoir un blindage complètement fermé. Des signaux doivent être échangés avec l'extérieur et doivent donc le traverser, on doit souvent ménager des ouvertures pour permettre le passage d'éléments mécaniques de commande ou de réglage, et enfin, il est souvent indispensable de permettre le passage de l'air nécessaire au refroidissement des composants. Par ailleurs, il est nécessairement construit en plusieurs parties, et l'assemblage des différentes pièces introduit une discontinuité dans les parois. Ce sont toutes les imperfections introduites ainsi qui altéreront l'efficacité, il faut donc chercher à en réduire les effets. La figure 30 montre l'allure comparée des courbes d'efficacité d'un blindage théorique et d'un blindage réel percé de quelques ouvertures.

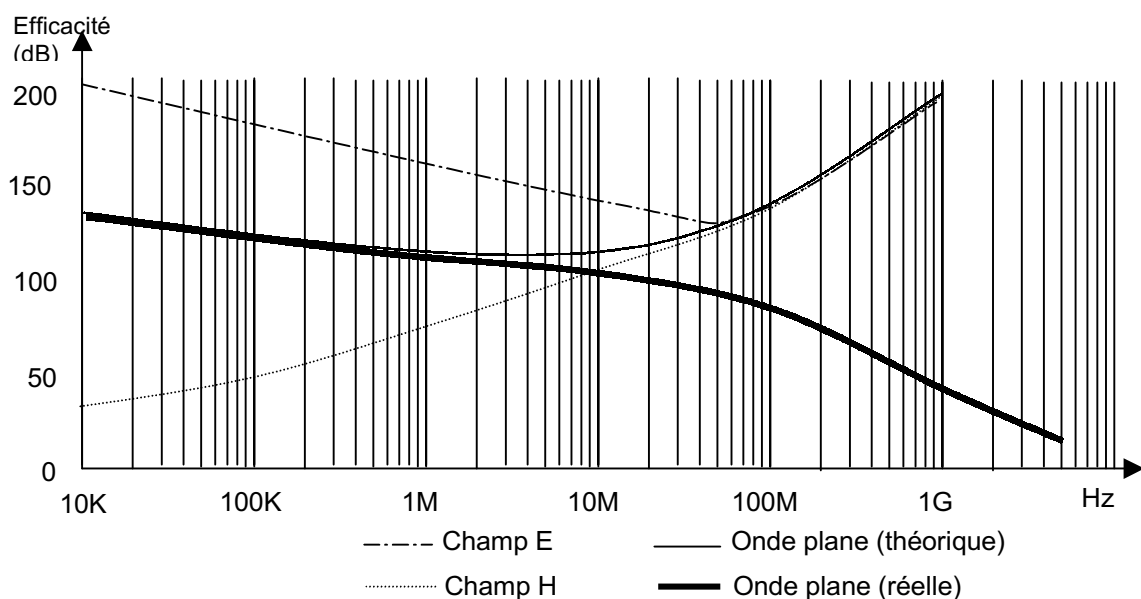


Figure 30

8.2.3 - Les ruptures de blindage

Il y a rupture de blindage chaque fois que la continuité électrique du blindage est interrompue. Ce peut être le fait de l'assemblage des différents éléments composant l'enveloppe, d'une ou plusieurs ouvertures pratiquées par exemple pour la mise en place d'appareils de tableau, ou même de trous d'aération.

Ces ouvertures sont nocives :

- parce qu'elles laissent passer des ondes électromagnétiques, (figure 31a)
- parce que les courants qui circulent dans le blindage (courant de peau en haute fréquence), génèrent du champ H aux abords des discontinuités (figure 31b)

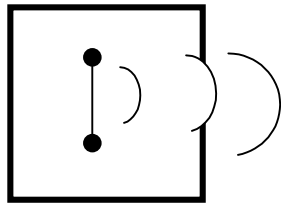


Figure 31a

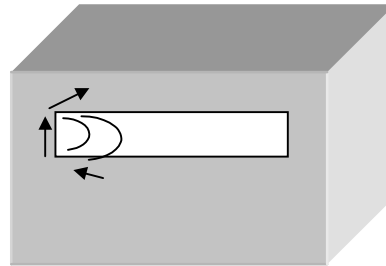


Figure 31b

C'est la plus grande des dimensions d'une ouverture qui détermine sa capacité à laisser passer les ondes électromagnétiques. Elle doit être extrêmement petite devant la longueur d'onde de la plus haute fréquence à contenir. En matière d'aération, des perforations circulaires valent donc bien mieux que des fentes ! Si on a recours à un grillage, il faut le choisir à mailles fines.

8.2.4 - Traitement des joints d'assemblage

Si l'on veut conserver une bonne efficacité du blindage en hautes fréquences, il convient de parfaire la continuité du blindage le long des joints d'assemblage. Si l'assemblage est définitif, la soudure est la meilleure solution. Si l'on veut permettre l'ouverture ou le démontage, on utilise un joint conducteur, par exemple du tricot métallique, de la tresse, un vernis conducteur, ou des lamelles de jonction (figure 32). Celles-ci supposent évidemment que le métal soit à nu et que les surfaces restent propres (exemptes d'oxydation ou de corrosion par effet galvanique). De nombreuses solutions existent pour résoudre ce problème, l'une des plus simples étant l'usage de vis ou de rivets régulièrement répartis.

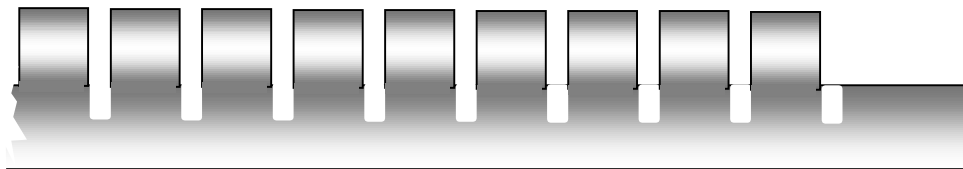


Figure 32

8.2.5 - Traitement des traversées

Tout conducteur traversant le blindage est une antenne de part et d'autre. Celle-ci peut par exemple collecter des ondes radio à l'extérieur du blindage et les réémettre à l'intérieur (figure 33). Un fil traversant constitue donc en quelque sorte une rupture de blindage.

Plusieurs techniques permettent de traiter ce problème :

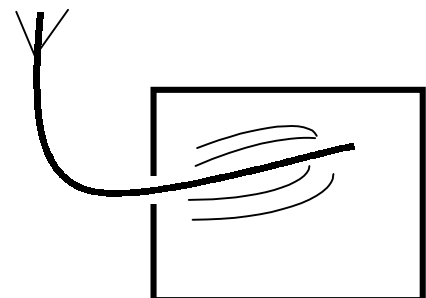


Figure 33

- Le filtrage, par l'interposition d'un filtre au point de traversée (voir, ci-dessous 8.3)
- La continuité de blindage qui nécessite un câble blindé. Il ne suffit cependant pas d'utiliser un tel câble pour régler le problème. Celui-ci doit être employé pour assurer *effectivement* la continuité du blindage.

La figure 34a illustre le cas classique d'une "masse vicieuse" : le blindage est traversé par un câble coaxial - donc blindé lui aussi - et pour des raisons de simplicité et d'esthétique, la mise à la masse de sa tresse a été faite à l'intérieur, un lien de part et d'autre réalisant la liaison au blindage et d'autre part à un organe situé à l'intérieur du blindage.

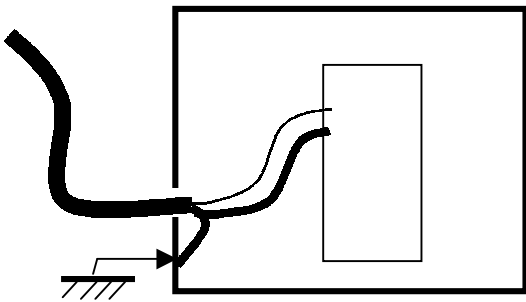


Figure 34a

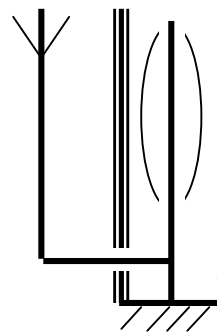


Figure 34b

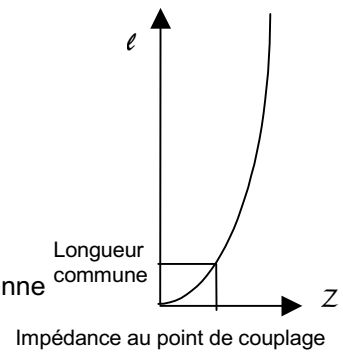


Figure 34c

Dans cette disposition - aussi courante que désastreuse - on réalise à peu près le schéma de la figure 34b qui montre deux antennes couplées à proximité de leur pied. De même qu'une corde de guitare peut très bien être pincée à proximité de sa fixation, le couplage entre les antennes externe et interne se fait en un point d'impédance faible (figure 34c), mais il existe bel et bien.

La mise à la masse des câbles blindés revêt donc une grande importance. La figure 35 montre la bonne et les moins bonnes solutions.

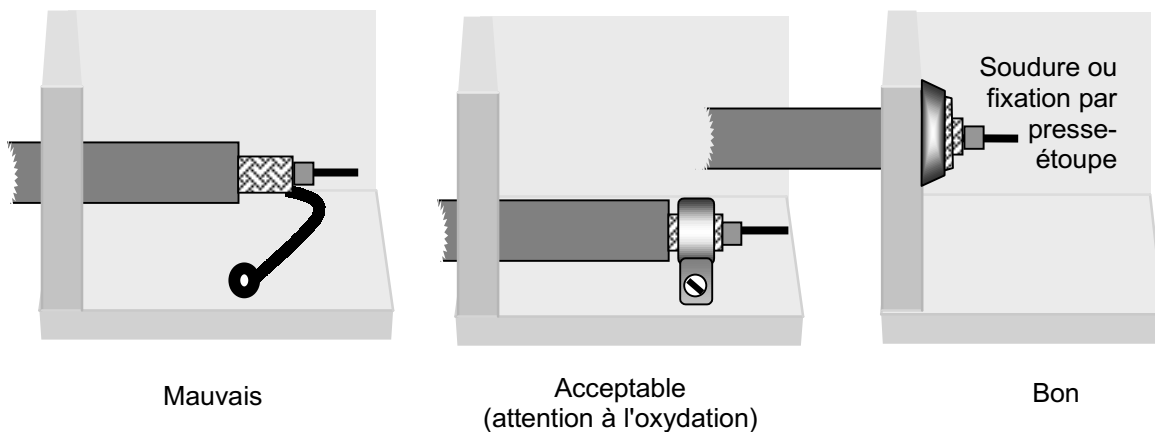


Figure 35

8.3 - Le filtrage

Il permet en CEM d'éviter de propager des perturbations par les fils de liaison entre les appareils, et en particulier par le cordon secteur. Lors des essais, elles seront perçues de différentes manières : perturbations conduites si elles sont transmises de point à point par les conducteurs proprement dits, perturbations rayonnées si elles sont le fait d'une émission par les câbles faisant antenne. C'est la raison pour laquelle la longueur et la position des câbles est réglementée lors des essais. Il faut considérer dans chaque cas le domaine de fréquences qui concerne le type de perturbation.

On distingue parmi les perturbations conduites, les harmoniques qui affectent le réseau de distribution, typiquement les harmoniques jusqu'au 40^e rang (norme 60555-2), les signaux jusqu'à 148.5 KHz¹ (norme NF50065-1) et les perturbations conduites de haute fréquence de 150KHz à 30MHz (norme EN 50081...). Les perturbations rayonnées mesurées par des antennes réceptrices concernent les fréquences de 30Mhz à 1GHz (normes EN50081... EN55...).

8.3.1 - Inductance de choc

Pour prolonger dans un premier temps les notions introduites sur les blindages, intéressons-nous d'abord au second cas. Lorsqu'on souhaite limiter le couplage qui intervient par l'intermédiaire des parties externe et interne d'un câble non blindé, il est maintenant d'usage de l'entourer à proximité du franchissement du blindage, d'un tore de ferrite ou une pièce de ferrite choisie parmi les différents modèles disponibles (figure 36). On peut de cette manière entourer globalement un cordon secteur ou une nappe de fils, on peut aussi utiliser des accessoires de connecteurs qui forment une plaque percée d'autant de trous qu'il y a de broches au connecteur, de manière à entourer chaque fil individuellement.

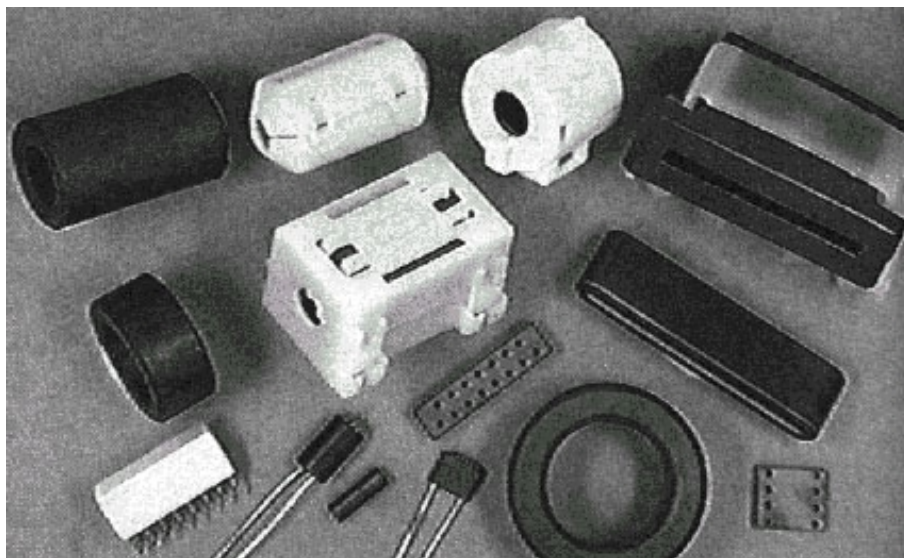


Figure 36

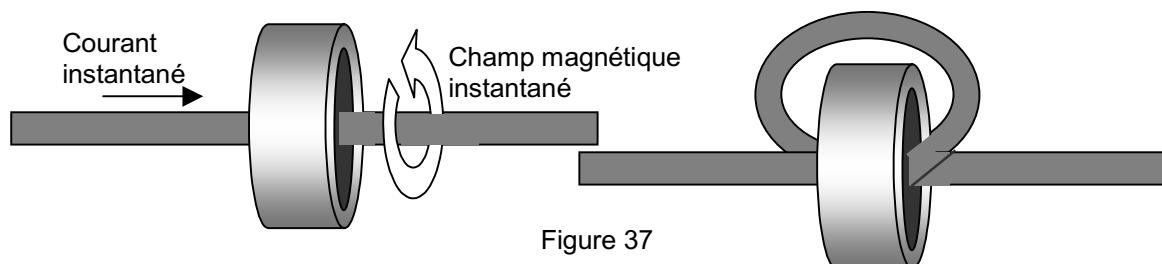


Figure 37

¹ Chaque fois qu'une valeur (fréquence, niveau) sera donnée dans ce cours, elle doit être considérée comme indicative, afin de présenter des ordres de grandeur. Seules les normes appliquées à chaque catégorie d'appareil sont à prendre en compte.

Un tel dispositif agit essentiellement dans la bande des 100 MHz (figure 38). On observe sur ce graphe une partie montante : la ferrite est assimilée à une inductance pure. Elle ajoute en série avec le câble une impédance de quelques dizaines à quelques centaines d'ohms, mais absorbe très peu d'énergie. Dans la partie descendante, la ferrite absorbe de plus en plus d'énergie, en particulier à cause des pertes par hystérésis. La CEM tire parti des deux modes de fonctionnement.

L'anneau de ferrite permet souvent de rendre acceptable au niveau des tests un appareil "un petit peu juste", mais *à lui seul*, il ne permet pas de faire des miracles. On peut améliorer son efficacité de deux manières :

- en adoptant une ferrite plus grosse ou en plaçant plusieurs éléments les uns derrière les autres ;
- en faisant plusieurs tours de câble, puisque l'inductance est égale au carré du nombre de spires.

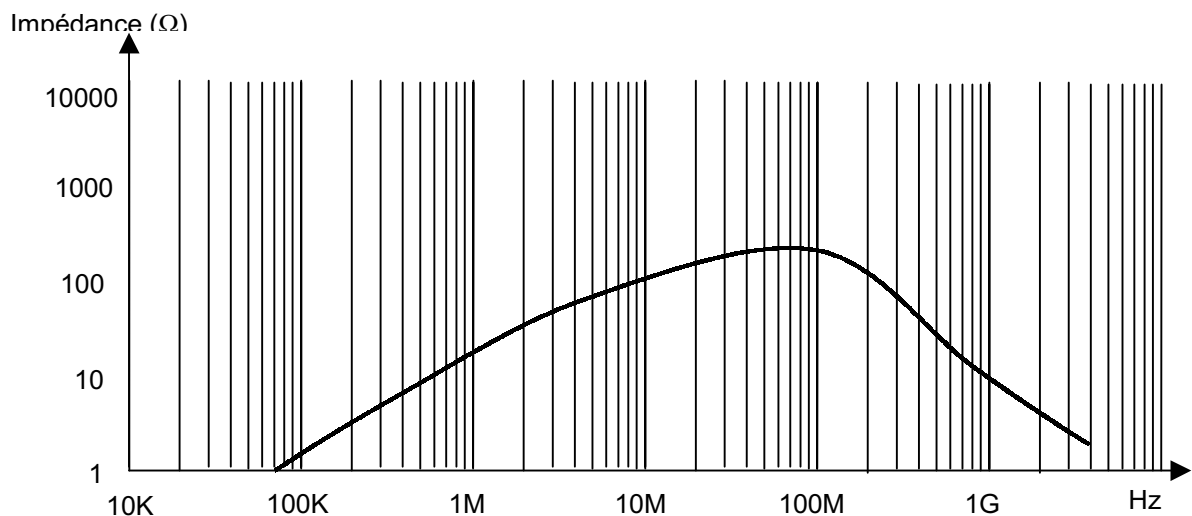


Figure 38

Attention :

Ce dispositif perd brutalement son efficacité si la ferrite vient à se saturer du fait d'un important courant de mode commun ou d'une impulsion de haute énergie. L'énergie qui peut être emmagasinée dans une pièce de ferrite d'induction maximum B_{\max} (à la limite de la saturation), de perméabilité relative μ_r , est donnée par la formule :

$$W_{\max} = \frac{B_{\max}^2 V}{2\mu_0\mu_r}$$

Augmenter le nombre de tours de fil ne change en rien cette valeur. On atteint seulement l'induction limite avec un courant plus faible.

On serait tenté d'attendre beaucoup d'une inductance série "de choc" vis à vis des impulsions de haute énergie, et c'est justement à ce moment là qu'elle risque de ne pas agir. Il ne faut donc pas lésiner sur le dimensionnement de ce composant. On peut envisager l'utilisation d'une bobine à air (pas de saturation) dans un logement blindé, mais aussi utiliser la ferrite conjointement avec un écrêteur de tension qui fera barrage aux impulsions de haute énergie (voir en 8.4). On trouve des composants combinés.

8.3.2 - Les filtres de l'alimentation secteur

8.3.2.1 - Mode commun et mode différentiel

Deux sortes de filtrage sont à considérer lorsqu'on envisage un filtrage secteur :

- le filtrage "en mode commun"
- le filtrage "en mode différentiel".

L'un et l'autre sont destinés à lutter contre les perturbations conduites. Celles-ci peuvent atteindre un appareil essentiellement de deux manières différentes selon que les perturbations

- sont additionnées au signal d'alimentation comme si le générateur de perturbations était en série avec le générateur qui constitue la source d'alimentation (figure 39a)
- sont additionnées entre la référence des tensions d'alimentation et la terre (figure 39b).

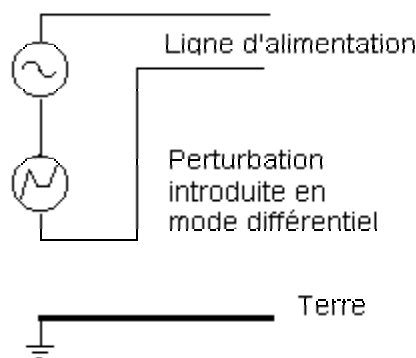


Figure 39a

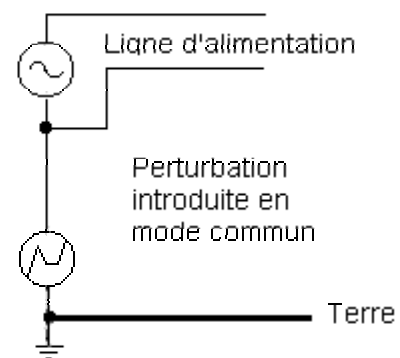


Figure 39b

Le filtrage en mode différentiel a pour but de réduire les courants de perturbation qui circulent dans les fils d'alimentation, alors que le filtrage en mode commun cherche à réduire le courant de perturbation qui circule dans la boucle formée par la référence (terre) et la ligne multifilaire d'alimentation.

Le courant de mode commun peut être vu de deux manières (figures 40a et 40b).

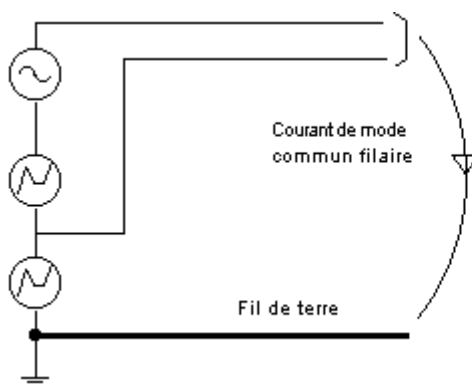


Figure 40a

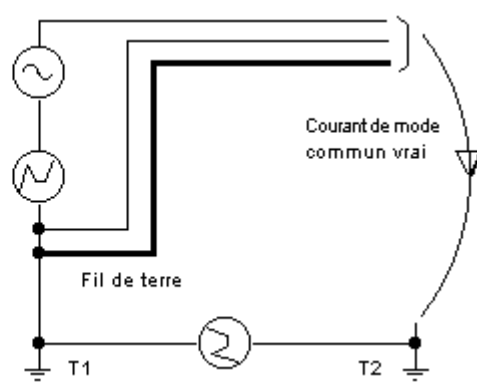


Figure 40b

Le mode commun est dit "*filaire*" lorsque le courant de mode commun circule conjointement dans les lignes d'alimentation (phases, neutre) et s'en retourne par le fil de terre. La perturbation de mode commun est alors introduite entre les parties électriques d'un appareil et une liaison d'équipotentielle, telle le fil de terre (figure 40a).

Le mode commun est dit "*vrai*" lorsqu'il circule conjointement par tous les fils d'un câble, y compris éventuellement le fil de terre (figure 40b), et s'en retourne par une autre voie de mode commun : sol, bâti de machine, mises à la terre des enceintes des appareils en des points distincts. Il faut ici distinguer deux cas :

- Le fil de terre n'accompagne pas l'alimentation secteur (cas d'appareils ménagers à double isolation par exemple), on a dans ce cas un courant de mode commun vrai consécutif au couplages - notamment capacitifs - entre les parties électriques de l'appareil et l'environnement (sol).
- Le fil de terre relie toutes les masses des appareils : le courant de mode commun altère alors la liaison équipotentielle dont l'impédance n'est jamais nulle (figure 41). Il introduit en fait un courant de mode commun de type filaire.

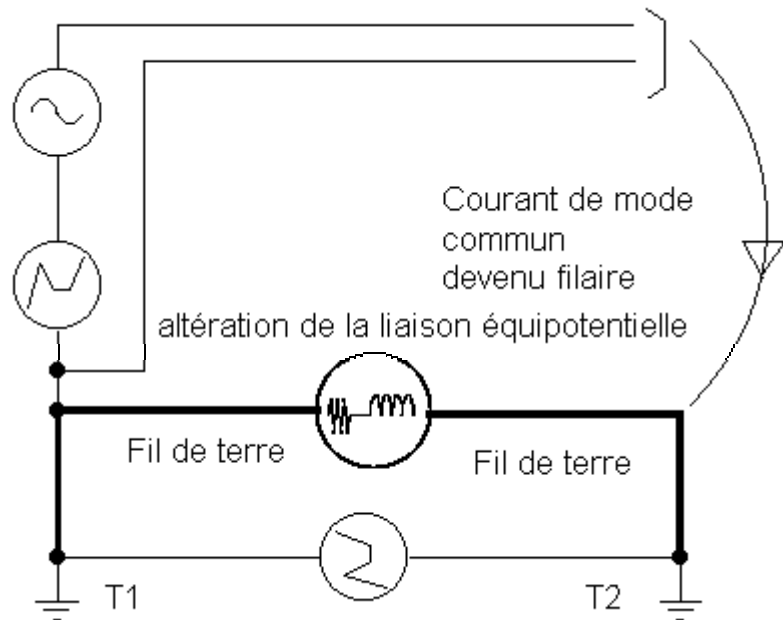


Figure 41

Les perturbations en mode différentiel, et en mode commun coexistent généralement. On considère que la grande majorité des problèmes de perturbation réseau sont le fait des courants de mode commun, le mode commun vrai, dont la cause est souvent extérieure à l'appareil, étant de loin le plus difficile à maîtriser.

On peut lutter simultanément contre les perturbations sous tous ces aspects en introduisant des inductances indépendantes (sans inductance mutuelle de l'une à l'autre) comme indiqué sur la figure 42.

Cette disposition qui a l'avantage d'être simple n'est pas toujours retenue :

- parce que les perturbations différentielles et de mode commun n'ont pas toujours les mêmes caractéristiques, en particulier dans le domaine fréquentiel, et par conséquent un dispositif spécifique est à concevoir pour chaque cas ;
- parce que le courant d'alimentation va circuler dans chacune des bobines, et aura tendance à saturer le noyau magnétique. Il faudrait donc concevoir les inductances pour pouvoir supporter le courant maximal dans les lignes d'alimentation.
- parce que pour le même nombre de spires, les deux inductances en série auraient un encombrement supérieur et une inductance moitié de ce que permettraient des inductances mutuellement couplées.

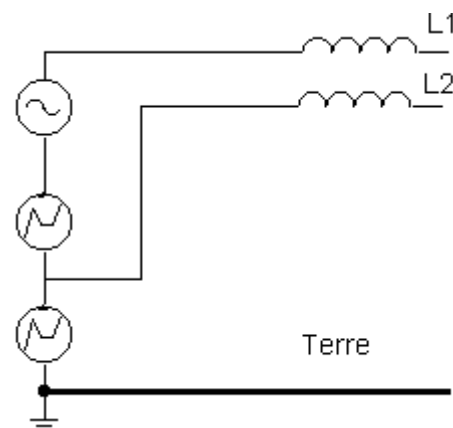


Figure 42

On préférera donc souvent utiliser des filtres fondés sur des transformateurs de rapport 1/1. Les figures 43a et 43b montrent les transformateurs utilisés respectivement pour le filtrage en mode différentiel et pour le filtrage en mode commun. Remarquez leurs différences en ce qui concerne le sens des enroulements.

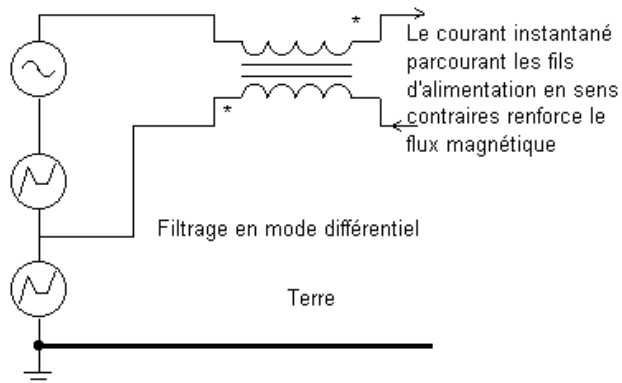


Figure 43a

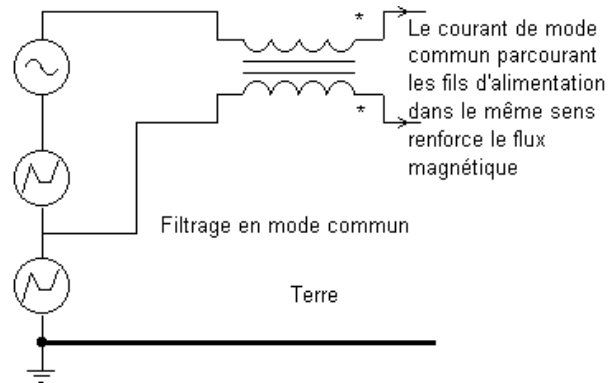


Figure 43b

Dans le cas du filtrage en mode différentiel, le courant de mode commun réparti dans les fils d'alimentation génère des ampères-tours qui s'annulent dans le noyau magnétique, tandis que dans le cas du filtrage en mode commun, ce sont les ampères-tours du brin "aller" et du brin "retour" qui s'annulent. Les deux modes de filtrage sont donc exclusifs. On peut cependant utiliser les deux dispositifs au sein d'un même appareil.

8.3.2.2 - Filtrage de basse et de haute fréquence

Les filtres de basse fréquence (des centaines de hertz) sont destinés à corriger les formes d'onde de courant dans le réseau. Ils doivent être à même de stocker et de restituer une énergie conséquente, en rapport avec la puissance de l'installation. On a largement utilisé les filtres passifs en mode résonnant - accordés sur certains harmoniques à traiter particulièrement, mais ils tendent actuellement à être d'usage exceptionnel. Les filtrages de basse fréquence nécessitant une importante énergie de correction sont de plus en plus réalisés par des éléments actifs utilisant des composants d'électronique de puissance, ainsi que les systèmes de calcul et de commande associés. Ce sont les filtres actifs, capables de s'adapter automatiquement à la situation à traiter. Leur étude sort du cadre de ce cours.

Les filtres de haute fréquence (100KHz à 30MHz) sont ceux que l'on trouve maintenant systématiquement à l'arrivée secteur des appareils pour l'amélioration des équipements en matière de CEM (figures 44a et 44b). Ils sont du type passe-bas. Leur fonctionnement repose sur le principe du pont diviseur, par l'utilisation conjointe d'une impédance relativement élevée et croissante avec la fréquence : l'inductance, et si nécessaire, une inductance relativement faible et décroissante avec la fréquence : le condensateur.

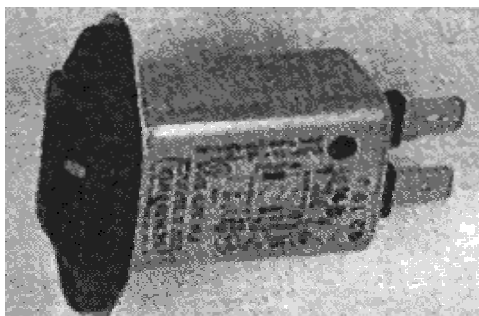


Figure 44a

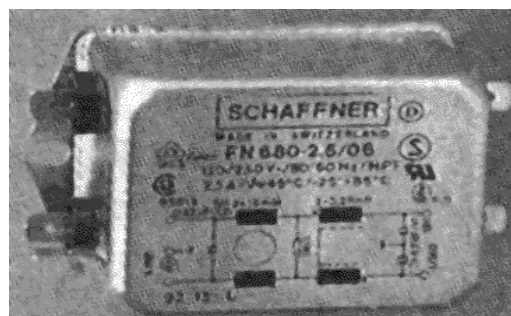


Figure 44b

Les valeurs sont à établir relativement aux caractéristiques du circuit dans lequel le filtre est inséré : l'impédance de la source constituée par le réseau électrique d'une part, l'impédance présentée par l'appareil à protéger d'autre part. Ce sont là les éléments fondamentaux permettant de choisir le type de filtre approprié ainsi que ses paramètres de filtrage. Problème: ces éléments fondamentaux ne sont pas toujours établis avec précision, ils peuvent aussi ne pas être constants. Pour pouvoir évaluer et comparer les performances des appareils, les règlements CEM proposent des modèles de ligne électriques standardisés, les RSIL que nous verrons plus en détail dans la deuxième partie du cours.

Attention aux résonances !

Le filtrage d'alimentation électrique doit être à faible dissipation. On n'y introduit donc pas - en principe - de résistance de nature à dissiper de l'énergie. On obtient de ce fait des circuits dont le coefficient d'amortissement est assez faible, et leur comportement périodique peut donner lieu à des résonances auxquelles il faudra toujours faire attention, en particulier lorsqu'une inductance telle que l'inductance de fuite d'un transformateur est placée en amont ou en aval du filtre, et en modifie considérablement le comportement.

8.3.2.3 - Structure des filtres secteur

Comme nous l'avons dit plus haut, c'est sur la base des impédances en amont et en aval du filtre que le choix de la structure du filtre peut se faire. La figure 45 résume les critères de choix.

Impédance de la source	structure typique du filtre	impédance de la charge	filtrage différentiel	filtrage de mode commun
élevée		élevée		
élevée		élevée		
faible		faible		
faible		faible		
faible		élevée		
élevée		faible		

Figure 45

8.3.2.4 - Câblage des filtres secteur

Les filtres bien adaptés, logés dans des enveloppes métalliques de blindage, ont des caractéristiques satisfaisantes. Elles seraient cependant altérées si l'on permettait un couplage entre les fils à l'entrée et à

la sortie. Ils doivent donc être câblés avec soin. La meilleure disposition consiste à joindre le blindage du filtre à celui de l'appareil (coffret) au niveau du passage de la prise ou du cordon secteur (figure 46).

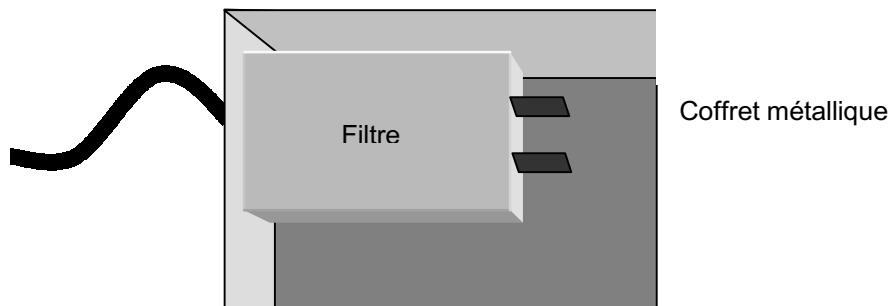


Figure 46

8.4 - La protection contre les surtensions

Nous avons vu que les effets de la foudre pouvaient provoquer d'importantes surtensions sur le réseau. Ils ne sont cependant pas la seule cause possible. D'autres phénomènes, comme la coupure d'une forte intensité par le déclenchement d'un disjoncteur ou d'un fusible, ou encore une décharge électrostatique, peuvent aussi provoquer des surtensions dangereuses. Elles peuvent bien entendu excéder la tension maximum de certains organes (transformateurs, condensateurs...) et entraîner des dégâts permanents, mais elles sont aussi responsables du vieillissement prématuré de certains composants.

8.4.1 - Caractéristique d'une surtension

La surtension peut revêtir plusieurs aspects. Ce peut être :

- une élévation modérée (qq%) mais prolongée (quelques minutes, quelques heures) de la tension du réseau. Elle est due à certains dysfonctionnements (résonance, déplacement du neutre...)
- une élévation considérable (plusieurs fois la tension nominale) mais brève (des microsecondes), due à un événement transitoire atteignant le réseau.

Dans le premier cas, les appareils sont construits pour supporter une variation de tension pouvant atteindre 10%. La surtension prolongée concerne davantage la sécurité au sens de la directive "basse tension" que la CEM qui ne retient pour le moment que les variations périodiques "flicker". Elle ne concerne pas l'aspect "protection contre les surtensions" que nous traitons ici.

Dans le second cas, la surtension doit être limitée par des dispositifs appropriés qui doivent être - comme les dispositifs de filtrage qu'ils complètent - d'usage systématique. Il faut pourtant reconnaître que beaucoup de petits appareils n'en sont pas équipés.

La surtension brève est avant tout caractérisée par son niveau d'énergie que l'on obtient, lorsqu'elle est appliquée à une impédance donnée, en intégrant la tension, le courant, la durée. Elle peut être apériodique (figure 47a) ou oscillante (figure 47b).

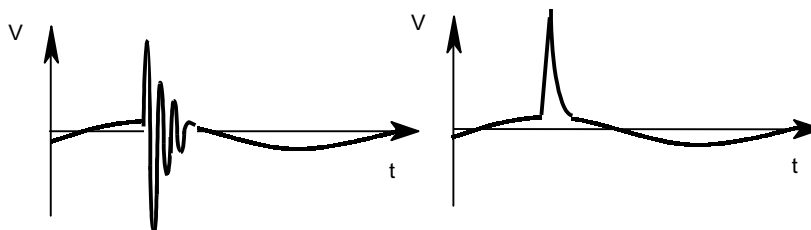


Figure 47a

Figure 47b

On distingue les surtensions par leur durée et leur niveau d'énergie :

- Surtensions très brèves (des nanosecondes). De très faible énergie (le millijoule), elles sont typiquement dues aux décharges électrostatiques. Pour s'en prémunir, on doit utiliser des composants très rapides.
- Surtensions "rapides" (< microseconde). D'énergie très variable, elles sont typiquement d'origine industrielle (coupures de courants importants). Pour la conduite de certains essais, on a normalisé deux formes d'onde typiques: l'onde de tension 1.2/50 μ s (figure 48a), et l'onde de courant 8/20 μ s (figure 48b).
- Surtensions "énergétiques" (des centaines de microsecondes). D'énergie souvent importante (des dizaines voire des centaines de joules) elles sont typiquement le fait de perturbations atmosphériques.

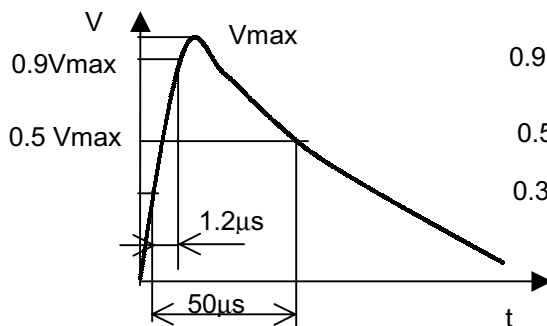


Figure 48a

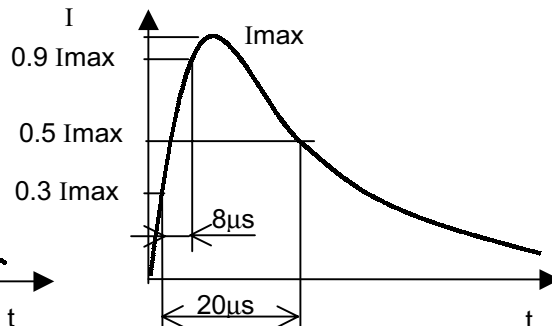


Figure 48b

8.4.2 - Les écrêteurs

La technique de protection contre les surtensions consiste à faire usage de composants dont la propriété est de devenir subitement passants au delà d'une certaine tension appliquée à leurs bornes. Selon la puissance souhaitée et le niveau de tension, il peut s'agir :

- D'éclateurs
- de tubes à décharge de gaz
- de résistances variables avec la tension telles les varistances (VDR) ;
- de diodes zener rapides spéciales telles les diodes transil ;

8.4.2.1 - Les éclateurs

Ils concernent les réseaux de distribution d'électricité. En cas de surtension, un amorçage se fait dans l'air entre des pointes dont l'écartement détermine la tension d'amorçage.

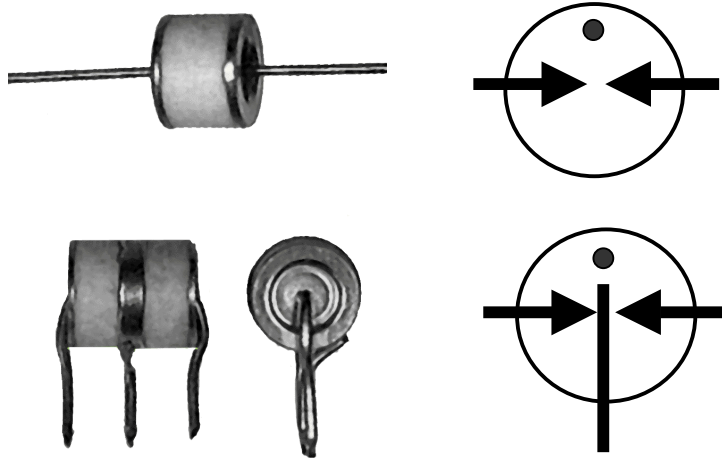
8.4.2.2 - Les tubes à décharge de gaz

Ce sont les éclateurs, ou parafoudres qui concernent la protection primaire des lignes de transmission de données (téléphone, liaisons informatiques) et la distribution d'énergie basse et très basse tension. Ils permettent d'écouler de fortes énergies.

Ils sont constitués d'une enveloppe étanche verre-métal ou céramique-métal, remplie de gaz rares. La figure 49 (en haut) montre un modèle capable d'écouler 5000A lors d'une impulsion normalisée 8/20 μ s. Dimensions approximatives : longueur 6 mm, diamètre 8mm. La version tripolaire, bien adaptée aux protections en mode commun est représentée en bas.

Les tubes à gaz sont robustes, ils ont un fort pouvoir d'écoulement, mais leur tension d'amorçage dépend de plusieurs facteurs : température, présence de rayons ionisants, forme de l'impulsion - et en particulier

le temps de montée. Les caractéristiques du composant font apparaître distinctement la tension d'amorçage statique, et la tension d'amorçage dynamique pour une vitesse de croissance donnée, par exemple $1\text{KV}/\mu\text{s}$. Leur tension de désamorçage est assez faible (typiquement de 75 à 150V) et doit en tout état de cause être supérieure à la tension nominale de la ligne sous peine de la maintenir en court-



circuit après un amorçage.

Figure 49

8.4.2.3 - Les varistances et composants apparentés

Economiques et faciles à implanter, elles permettent de traiter les impulsions de quelques joules à quelques centaines de joules. Elles sont bien adaptées au traitement des perturbations d'origine industrielle sur les réseaux de distribution d'électricité. Elles sont aussi très utilisées pour la protection des lignes de transport d'information, mais il faut alors tenir compte de leur capacité non négligeable : quelques nF à quelques dizaines de nF. Elles réagissent en quelques dizaines de nanosecondes, ce qui est encore insuffisant pour les transitoires très rapides, comme celles qui proviennent de décharges électrostatiques.

Une VDR est formée d'un disque d'une sorte de céramique semi-conductrice - par exemple de l'oxyde de zinc semi-conducteur mélangé à d'autres oxydes. Une métallisation sur chaque face permet la soudure des fils de connexion. Elle est finalement enrobée d'une résine (figure 50).

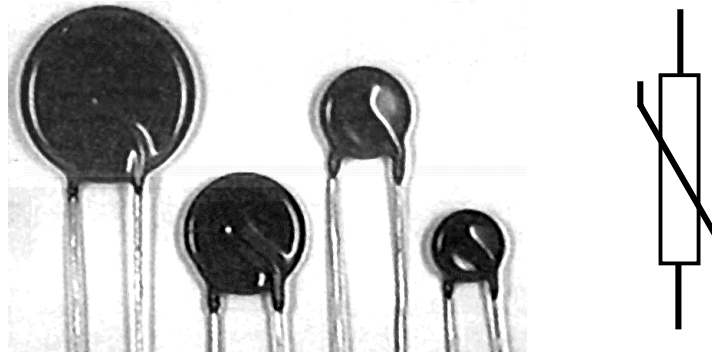


Figure 50

Les principales caractéristiques des VDR sont la tension de service maximale permanente, la tension d'écrêtage pour un courant donné et l'énergie (en joules) qu'elle peut écouler (sur la base d'une onde normalisée 8/20 μ s).

Les VDR ne restent pas indemnes des décharges qu'elles subissent, et le composant vieillit en perdant de ses performances. Sa fin de vie est souvent l'éclatement lors d'une décharge. Il est donc sensé d'inscrire le remplacement des VDR ou des composants qui en font usage dans les programmes de maintenance.

8.4.2.4 - Les diodes de protection

Leur avantage essentiel est leur temps de réponse qui peut être très rapide. Mais elles ne peuvent écouler de fortes énergies. On la voit donc comme un composant complémentaire aux parafoudres. Elle permet en particulier de traiter les transitoires très rapides dues aux décharges électrostatiques, à condition toutefois que le câblage permette de tirer parti de ses performances : liaisons très courtes en mode bifilaire de manière à réduire la surface de boucle.

Elles sont bien adaptées à la protection des lignes de transport d'information, mais il faut tenir compte de la capacité de jonction qui n'est pas négligeable en ce qui concerne les lignes à haut débit.

On caractérise leurs performances en onde de courant 10/1000 μ s. Elles sont capables de supporter quelques centaines de watts pendant 1ms.

Leur aspect extérieur est celui d'une diode classique. Elle est distinguée par un symbole spécial qui fait apparaître son type mono ou bi-directionnel (figure 51)

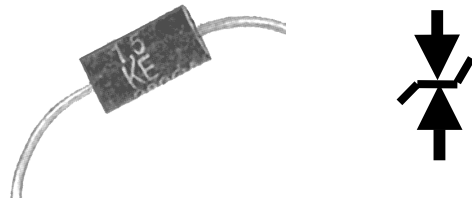


Figure 51

8.4.3 - Ecrêter n'est pas filtrer

On compte sur l'écrêtage aussi bien que sur le filtrage pour se prémunir contre des impulsions indésirables que l'on qualifie souvent de "parasites". Il faut toutefois distinguer clairement le comportement des deux procédés :

- L'énergie mise en jeu est très différente dans un cas et dans l'autre : quelques millijoules pour un filtre radio-fréquences, des joules pour un écrêteur (rapport 1000!).
- Le traitement effectué n'est pas comparable, comme le montre clairement la figure 52.

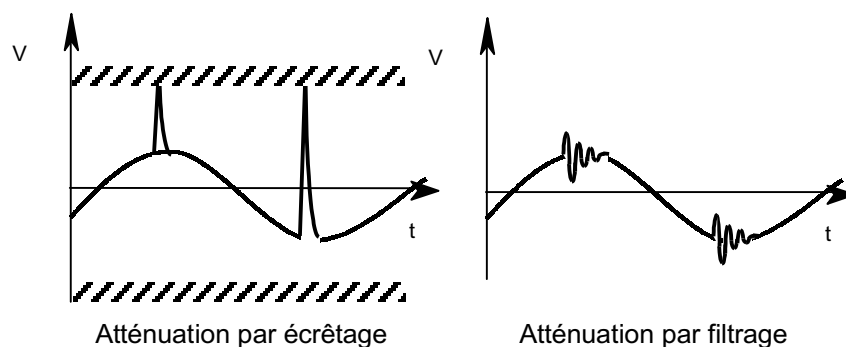


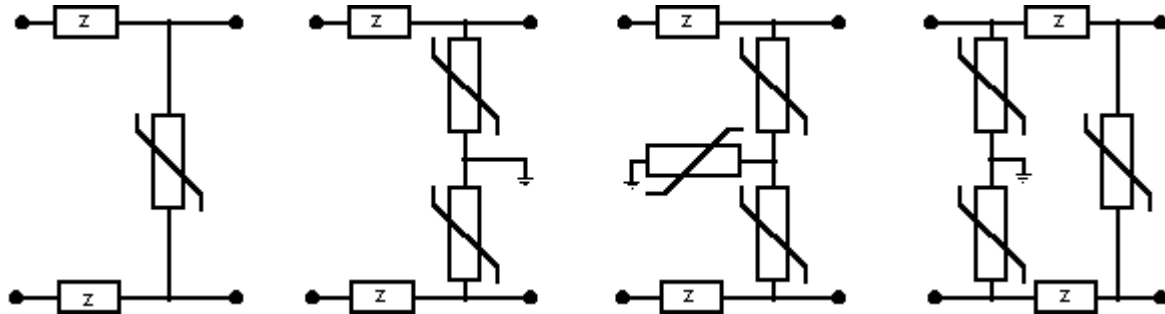
Figure 52

8.4.4 - Les montages écrêteurs

On retrouve pour ces montages typiques (figure 53), la même logique que pour les filtres, en ce sens que l'on distingue ici encore entre la protection en mode différentiel et la protection en mode commun. D'autres variantes sont encore possibles, à étudier au cas par cas.

On retrouve une structure en "pont diviseur", de rapport proche de 1 lorsque le composant d'écrêtage n'est pas conducteur, proche de zéro lorsqu'il est devenu passant.

Les impédances qui figurent dans le montage ne sont pas toujours utilisées. On peut en effet concevoir l'écrêtage comme un court-circuit de la source.



Protection différentielle

Protection de mode commun

Protections mixtes

Figure 53

Il faut cependant réaliser que l'aspect le plus important pour la protection n'apparaît pas sur le schéma : il s'agit du chemin par lequel le courant d'écrêtage va s'écouler. D'une manière générale, il se dirige vers le "fil de terre", qui est aussi la protection PE. Ce conducteur est également celui qui assure en principe la liaison équipotentielle entre divers appareils qui peuvent être connectés les uns aux autres, par exemple par des câbles de transmission de données. On peut donc prévoir à un certain degré une rupture d'équipotentielle.

On peut limiter l'élévation de tension de la référence en limitant le courant de décharge, et c'est là que les impédances en série (inductance ou résistance) peuvent intervenir. On utilise des inductances à air le cas échéant, car un noyau de ferrite ne peut stocker que peu d'énergie, il arriverait très vite en saturation (voir le point 8.3.1). Les perles de ferrite, lorsqu'on en trouve, sont utilisées à l'encontre des impulsions très brèves, en tirant parti de la capacité des VDR.

L'usage d'une résistance (valeur assez faible pour que la chute de tension en service normal soit négligeable) évite de rendre l'impulsion perturbatrice oscillante en amont de la protection au moment de la décharge. Il faut toutefois veiller à ce que les composants placés en série puissent supporter les intensités écoulées dans les pires circonstances.

8.5 - Les montages combinés pour le filtrage et la protection contre les surtensions

Pour simplifier la confection des systèmes de protection, des composants et des modules de protection combinés ont été développés. On trouve ainsi :

- Des filtres de traversée de blindage incluant dans un boîtier coaxial éventuellement fileté l'inductance (ou les inductances) et le (ou les) condensateur(s).
- Des condensateurs associés à des perles de ferrite.
- Des modules de filtrage associés à des limiteurs de tension et éventuellement des fusibles ...
- ...

9 - Les méthodes d'investigation

9.1 - Les tests normalisés

Pour évaluer les performances des appareils vis à vis de la CEM, différents tests ont été imaginés. Pour garantir une base cohérente et équitable dans cette évaluation, ils ont été soigneusement décrits et normalisés.

Les appareils ont été classés en diverses catégories en fonction de leur spécificité, et des tests particuliers peuvent concerner certaines d'entre elles. Des normes génériques sont applicables à défaut de dispositions spécifiques.

Ainsi, chaque appareil mis sur le marché doit subir une série de tests, pour établir sa conformité dans trois domaines :

- Le niveau des perturbations qu'il émet (perturbations conduites, rayonnement). Il doit être inférieur au niveau limite pour sa catégorie pour tous les types de perturbations auxquels les normes font référence.
- Le niveau des perturbations qu'il peut supporter sans altération du fonctionnement. Il doit être au moins égal aux seuils pour sa catégorie pour tous les types de perturbations auxquels les normes font référence.
- La sécurité "des personnes et des animaux domestiques ainsi que des biens". Pour les matériels soumis à la "*directive basse tension*" directives 73/23/CEE et 93/68/CEE, décret français 95-1081.

Les tests ne concernent en général que les prototypes. Ils n'interviennent pas lors de la production industrielle. Ils concernent tout ou partie de l'ensemble suivant :

- Tests d'immunité aux décharges électrostatiques
- Tests d'immunité aux perturbations conduites
- Tests d'immunité aux perturbations rayonnées
- Mesures des perturbations conduites émises
- Mesures des perturbations rayonnées
- Tests spécifiques à certains matériels

Ils nécessitent un équipement coûteux qui n'est pas à la portée des entreprises petites ou moyennes, et un personnel spécialisé. Ils sont donc sous-traités la plupart du temps à des laboratoires de CEM. L'incidence du coût de la qualification d'un appareil sur son prix est donc sensible, en particulier pour les petites séries. Pour le réduire autant que possible, il faut prendre en compte le plus tôt possible les impératifs de la CEM lors du développement du produit, pour réussir l'examen au premier tour et éviter les allées et venues entre les phases de mise au point et les tests.

Les essais d'immunité rayonnée - à moins que l'on ne fasse usage que d'une cellule TEM blindée - et les essais de perturbations rayonnées nécessitent une cage de Faraday de dimensions suffisantes (c'est une pièce ou une salle selon les matériels à tester) équipée d'absorbeurs d'onde électromagnétique. Il s'agit souvent de trémies de mousse de polyuréthane chargée de carbone. La composition réelle est en fait bien gardée. Il peut également s'agir d'un bardage de ferrite, et on peut aussi utiliser les deux conjointement.

Complètement équipée d'absorbeurs, la cage de Faraday devient une chambre anéchoïque (figure 54).

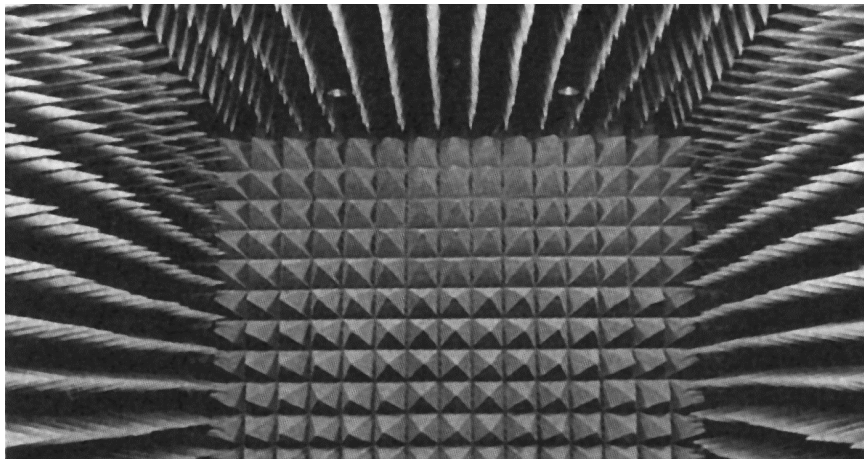


Figure 54

Note importante

Les tests décrits ci-dessous le sont à titre indicatif. Le but est de présenter la démarche la plus typique en s'en tenant aux tests courants. De nombreuses normes sont à l'étude ou en cours de négociation, et certains matériels nécessitent des tests spécifiques.

9.2 - Tests d'immunité aux décharges électrostatiques (DES)

Norme de référence : CEI 1000-4-2

Ils concernent les perturbations provoquées par les transferts de charge. En s'approchant d'un appareil, un objet ou une personne chargée d'électricité statique peut provoquer un transfert de charge vers son boîtier ou l'un de ses organes : afficheur, bouton de commande, borne de raccordement. Il s'en suit une surtension d'énergie modérée, mais très rapide, qui peut provoquer des dysfonctionnements, notamment pour les appareils qui traitent de l'information.

Les tests sont réalisés grâce à un pistolet électrique qui produit ce phénomène de manière contrôlée (figure 55a). Les décharges peuvent se faire par effluves dans l'air, ou par contact selon le type de boîtier de l'appareil sous test. Selon le niveau de sévérité du test, elles vont de 2 à 8 KV par contact et de 2 à 15 KV dans l'air. Elles provoquent des surtensions (figure 55b) dont le temps de montée est très bref (moins de 1ns). Pour parvenir à une conclusion significative, elles sont répétées de nombreuses fois de manière

à attaquer à plusieurs reprises toutes les parties de l'appareil, et en particulier les vis de fixation, les joints d'assemblage etc, et également l'environnement de l'appareil via des plans de couplage.

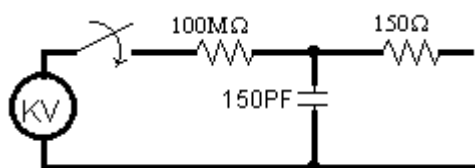
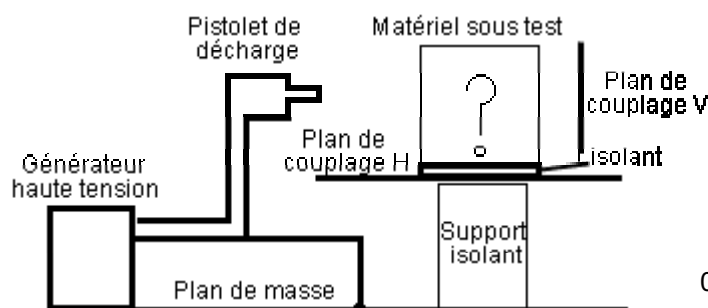


Schéma simplifié du générateur de décharges

Figure 55a

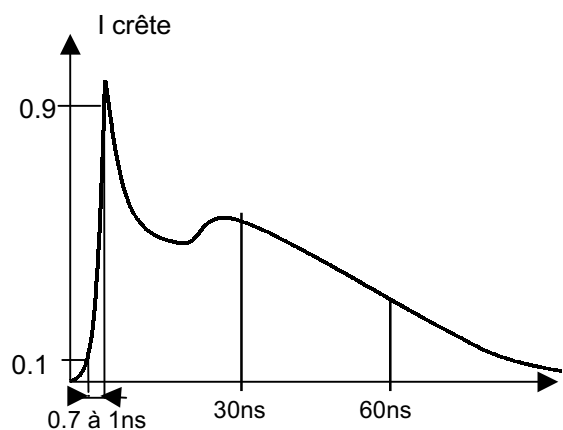


Figure 55b

9.3 - Tests d'immunité aux perturbations conduites

Normes de référence : CEI 1000-4-4, 1000-4-5, 1000-4-6.

Il s'agit d'injecter sur le câble d'alimentation de l'appareil ou sur les câbles de connexion entrée-sortie, des courants représentant les perturbations transitoires d'origine industrielle et des commutations sur le réseau de distribution, l'influence sur les câbles des rayonnements électromagnétiques, l'effet de la foudre.

On utilise une pince de couplage (figure 56). Il s'agit d'une goulotte d'un mètre, montée sur un support isolant, formant avec le câble qui l'emprunte de bout en bout, un condensateur déterminé. Elle est reliée à un générateur de tensions d'essai spécial.

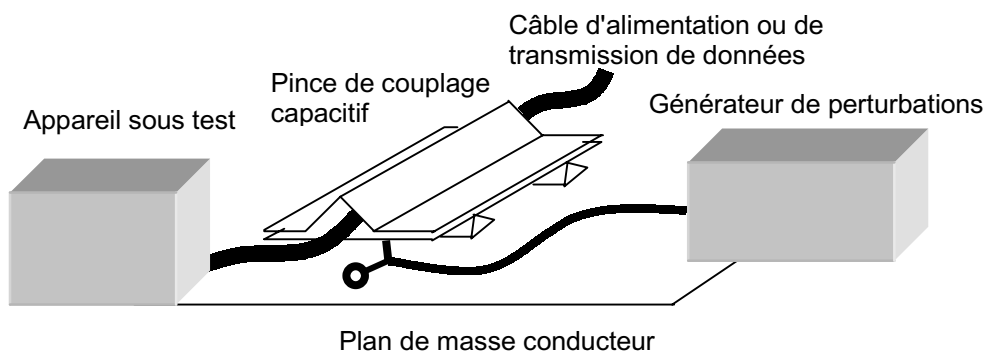


Figure 56

9.3.1 - Essais d'immunité aux transitoires rapides en salves (TRES)

A titre d'exemple, le générateur appliquera à la pince de couplage une impulsion de 4KV selon l'onde de tension 5/50ns (revoir le point 1.8.4.1 pour la définition des ondes de tension et de courant)

9.3.2 - Simulation de l'influence des rayonnements électromagnétiques

On appliquera par exemple une onde sinusoïdale modulée en amplitude, en balayant les fréquences entre 150KHz et 80MHz avec des amplitudes de 1, 3 et 10V.

9.3.3 - Simulation des effets de la foudre

On appliquera une onde de choc de 4KV en onde de tension 1.2/50µs. Celle-ci se transforme en onde de courant 8/20 µs (revoir les gabarits figures 48a et 48b).

9.4 - Essais d'immunité aux creux de tension, coupures brèves et variations de tension

Normes de référence : CEI 1000-4-11

On fait usage d'un simulateur de perturbations qui tient lieu du réseau d'alimentation. Il génère les défauts contrôlés tandis que l'on s'assure que l'appareil sous test conserve toutes ses fonctionnalités.

9.5 - Tests d'immunité aux perturbations rayonnées

Normes de référence : CEI 1000-4-3

Il s'agit de placer l'appareil sous test entièrement sous l'influence d'un champ électrique déterminé (valeur de 1 à 10 V/m en principe, fréquence de 80 Mhz à 1 GHz). On utilise pour cela une cellule spéciale TEM, (figure 58) une "strip line", des antennes étalonnées. Le champ est vérifié avec un champmètre.

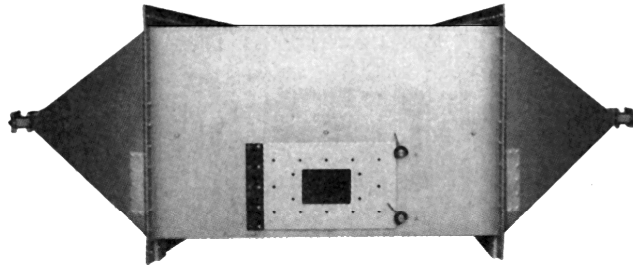


Figure 58

9.6 - Tests d'immunité aux champs magnétiques

Il s'agit de placer l'appareil sous test sous l'influence de différents champs magnétiques :

- 50Hz (CEI 1000-4-8)
- impulsionnel (CEI 1000-4-9)
- oscillatoire amorti (CEI 1000-4-10)

9.7 - Mesures des perturbations conduites émises

Les tests se font avec un réseau artificiel d'alimentation (Réseau de Stabilisation d'Impédance RSIL), caractérisé par une impédance de source normalisée, et un analyseur de spectre possédant les détections normalisées.

Le test comprend l'évaluation :

- des harmoniques secteur de 50 à 2000 Hz (CEI 1000-3-2, CEI 1000-4-7, EN 60555-1, EN 60555-2...)
- des perturbations permanentes par conduction (CEI 1000-4-16 provisoire)
- des perturbations conduites de haute fréquence : 150 KHz à 30 MHz (EN 50081-1 ou 50081-2, EN...)

9.7.1 - Les harmoniques secteur

Le test ne concerne pour le moment que les appareils de puissance au moins égale à 75W.

La norme CEI 1000-3-2, s'applique aux appareils courants appelant au plus 16 Ampères par phase. Ils sont divisés en plusieurs catégories :

- les outils portatifs : classe B
- les équipements d'éclairage : classe C
- les équipements de puissance $\leq 600W$ et de forme d'onde spéciale : classe D
- les autres équipements concernés par cette norme : classe A

Il est intéressant de noter que dans la situation actuelle, les limites des harmoniques de courant pour les appareils de classe A ne sont pas exprimées en pourcentage du courant nominal, mais en valeur absolue selon le tableau :

Rang harmonique	2	4	6	n= 8 à 40	3	5	7	9	11	13	n= 15 à 39
Courant limite (A)	1.08	0.43	0.30	$1.84/n$	2.30	1.14	0.77	0.40	0.33	0.21	$2.25/n$

9.7.2 - Les perturbations permanentes par conduction

La bande de fréquence concernée s'étend de 0 à 150 KHz. Date d'entrée en application des normes découlant de la CEI 1000-4-16 ?

9.7.3 - Les perturbations conduites de haute fréquence

La bande de fréquence concernée s'étend de 150 KHz à 30 MHz.

Pour une classe donnée d'appareils, la norme fournit un gabarit de valeurs limites à ne pas dépasser. Les appareils de mesure font généralement apparaître ce gabarit sur l'écran où apparaissent les valeurs détectées en fonction de la fréquence. Deux valeurs sont à prendre en compte : la valeur quasi-crête et la valeur moyenne de la perturbation. L'ordre de grandeur des valeurs autorisées est de 40 à 80 μ V.

9.8 - Mesures des perturbations rayonnées

Normes de référence (non exhaustive) :

EN 50081-1 : norme générique d'émission environnement résidentiel, commercial et industrie légère

EN 50082-2 : norme générique d'émission environnement industriel

EN 55011 (CISPR 11): norme produits appareils industriels, scientifiques et médicaux à fréquences radioélectriques

EN 55013 (CISPR 13) : norme produit récepteurs de radiodiffusion et appareils associés

EN 55014 (CISPR14) : norme produit appareils électrodomestiques ou analogues comportant des moteurs ou des dispositifs thermiques, par les outils électriques et par les appareils électriques analogues

EN 55015 (CISPR15) : norme produit appareils d'éclairage

EN 55022 (CISPR 22) : norme produit systèmes de traitement de l'information

Les tests se font en chambre anéchoïque, avec un système d'antennes calibrées et un analyseur de spectre large bande ou un récepteur de mesure possédant les détections normalisées. L'espace doit être suffisant autour de l'appareil sous test pour pouvoir positionner les antennes conformément aux indications des normes d'essais.

Les fréquences couvertes vont de 30 MHz à 1 GHz/

Cette partie des essais CEM est sans doute la plus contraignante, la plus délicate et la plus longue. Il est bon de disposer d'un plateau tournant télécommandé pour orienter l'appareil sous test dans différentes positions par rapport à l'antenne, et celle-ci doit pouvoir être placée à différentes hauteurs.

Appendice

Le marquage CE

- Le marquage CE est obligatoire pour tous les appareils électriques mis sur le marché. Il fait suite à une **déclaration CE de conformité** qui doit être tenue à la disposition de l'autorité compétente pendant 10 ans à compter de la mise sur le marché des appareils concernés. Cette démarche incombe au fabricant ou son mandataire. Si ni le fabricant ni son mandataire ne sont établis dans la CEE, la déclaration incombe à toute personne qui met l'appareil sur le marché communautaire.

Les textes de référence à consulter (annexe 2) sont en particulier les paragraphes 10.1,10.2,10.5 de la directive CEM **89/336/CEE**. Plusieurs cas sont à envisager :

- Le fabricant applique les normes harmonisées. D'après **l'article 10.1**, celui-ci (ou son mandataire) atteste par une déclaration CE de conformité que ses appareils sont conformes aux dispositions de la directive. On parle ici d'autocertification.
- Lorsque le fabricant n'applique pas les normes, ou ne les applique qu'en partie, ou lorsqu'il n'existe pas de normes applicables, il constitue selon **l'article 10.2**, un dossier technique de construction comprenant un **rapport technique** ou un **certificat de conformité** établi par un **organisme compétent**. Il établit sur cette base, une déclaration CE de conformité.
- Le fabricant veut mettre sur le marché un appareil conçu pour l'émission de radiocommunications. D'après **l'article 10.5**, la déclaration CE de conformité doit être précédée de l'obtention d'une **attestation CE de type** de la part d'un **Organisme Notifié**.

Annexe 1

Classification des normes

Norme Harmonisée

Une norme est dite harmonisée lorsqu'elle est introduite dans le cadre réglementaire national des pays de la CEE. On en distingue trois grandes catégories :

- Les normes fondamentales
- Les normes génériques
- Les normes produits ou familles de produits.

Normes fondamentales

Elles comportent :

- la description des phénomènes électromagnétiques
- les caractéristiques des appareils de mesure et de génération de signaux de test
- la mise en œuvre des tests
- les recommandations de niveaux de sévérité
- les critères généraux de bon fonctionnement.

Normes génériques

Elles définissent :

- l'environnement (résidentiel, industriel...)
- les essais à effectuer
- les niveaux de sévérité des tests
- les critères de bon fonctionnement

Elles font appel aux normes fondamentales.

Normes produits

Elles sont considérées **en priorité** chaque fois qu'un appareil entre dans une catégorie déterminée.

Elles définissent :

- les essais à effectuer
- les niveaux de sévérité des tests
- les critères de bon fonctionnement

Elles font appel aux normes fondamentales.

Normes de test

Elles précisent les conditions d'essai de matériels spécifiés.

Annexe A2

Directive 89/336/CEE du Conseil du 3 mai 1989 concernant le rapprochement des législations des États membres relatives à la compatibilité électromagnétique

Journal officiel n° L 139 du 23/05/1989 p. 0019 - 0026

Edition spéciale finnoise: Chapitre 13 Tome 18 p. 241

Edition spéciale suédoise: Chapitre 13 Tome 18 p. 241

Modifications:

Modifié par 392L0031 (JO L 126 12.05.92 p.11)

Modifié par 393L0068 (JO L 220 30.08.93 p.1)

Repris par 294A0103(52) (JO L 001 03.01.94 p.263)

Texte :

DIRECTIVE DU CONSEIL

du 3 mai 1989 concernant le rapprochement des législations des États membres relatives à la comptabilité électromagnétique (89/336/CEE)

LE CONSEIL DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES,

vu le traité instituant la Communauté économique européenne, et notamment son article 100 A,

vu la proposition de la Commission (1),

en coopération avec le Parlement européen (2),

vu l'avis du Comité économique et social (3),

considérant qu'il importe d'arrêter les mesures destinées à établir progressivement le marché intérieur au cours d'une période expirant le 31 décembre 1992; que le marché intérieur comporte un espace sans frontières intérieures dans lequel la libre circulation des marchandises, des personnes, des services et des capitaux est assurée ;

considérant qu'il incombe aux États membres d'assurer aux radiocommunications ainsi qu'aux dispositifs, appareils ou systèmes dont le fonctionnement risque d'être dérangé par des perturbations électromagnétiques produits par des appareils électriques et électroniques une protection suffisante contre les troubles engendrés par ces perturbations ;

considérant qu'il incombe également aux États membres de veiller à la protection des réseaux de distribution d'énergie électrique contre les perturbations électromagnétiques qui peuvent les affecter ainsi que, par voie de conséquence, des équipements alimentés par ces réseaux;

considérant que la directive 86/361/CEE du Conseil, du 24 juillet 1986, concernant la première étape de la reconnaissance mutuelle des agréments d'équipements terminaux de télécommunications (4), vise notamment les signaux émis par ces équipements lorsque leur fonctionnement est normal ainsi que la protection contre tout dommage des réseaux publics de télécommunications; qu'il reste, par conséquent, à assurer une protection suffisante de ces réseaux, y compris des appareils qui y sont raccordés, contre les dérangements momentanés provoqués par les signaux de nature accidentelle susceptibles d'être émis par ces appareils;

considérant que, dans certains États membres, des dispositions impératives déterminent en particulier les niveaux admissibles des perturbations électromagnétiques que ces appareils sont susceptibles de provoquer et leur degré d'immunité contre ces mêmes signaux; que ces dispositions impératives ne conduisent pas nécessairement à des niveaux de protection différents d'un État membre à l'autre mais, en raison de leur disparité, entravent les échanges à l'intérieur de la Communauté ;

considérant que les dispositions nationales qui assurent cette protection doivent être harmonisées pour garantir la libre circulation des appareils électriques et électroniques, sans que les niveaux existants et justifiés de protection dans les États membres soient abaissés ;

considérant que, dans son état actuel, le droit communautaire prévoit que, par dérogation à l'une des règles fondamentales de la Communauté que constitue la libre circulation des marchandises, les obstacles à la circulation intracommunautaire, résultant de disparités des dispositions nationales relatives à la commercialisation des produits, doivent être acceptés dans la mesure où ces dispositions peuvent

être reconnues comme nécessaires pour satisfaire à des exigences impératives; que, dès lors, l'harmonisation législative dans le cas présent doit se limiter aux seules dispositions nécessaires pour satisfaire aux exigences de protection en matière de compatibilité électromagnétique; que ces exigences doivent remplacer les dispositions nationales en la matière ;

considérant dès lors que la présente directive ne définit que les exigences de protection en matière de compatibilité électromagnétique; que, pour faciliter la preuve de la conformité à ces exigences, il est important de disposer de normes harmonisées sur le plan européen concernant la compatibilité électromagnétique, normes dont le respect assure aux produits une présomption de conformité aux exigences de protection; que ces normes harmonisées sur le plan européen sont élaborées par des organismes privés et doivent conserver leur statut de textes non obligatoires; que, à cette fin, le comité européen de normalisation électrotechnique (Cenelec) est reconnu comme étant l'organisme compétent dans le domaine de la présente directive pour adopter les normes harmonisées, conformément aux orientations générales pour la coopération entre la Commission et le comité européen de normalisation (CEN) et le Cenelec, signées le 13 novembre 1984; que, au sens de la présente directive, une norme harmonisée est une spécification technique (norme européenne ou document d'harmonisation) adoptée par le Cenelec sur mandat de la Commission, conformément à la directive 83/189/CEE du Conseil, du 28 mars 1983, prévoyant une procédure d'information dans le domaine des normes et réglementations techniques (1), modifiée en dernier lieu par la directive 88/182/CEE (2), ainsi qu'en vertu des orientations générales susvisées ;

considérant que, en attendant l'adoption de normes harmonisées au sens de la présente directive, il convient de faciliter la libre circulation des marchandises par l'acceptation, à titre transitoire, sur le plan communautaire d'appareils conformes aux normes nationales retenues conformément à une procédure de contrôle communautaire assurant que ces normes nationales répondent aux exigences de protection de la présente directive ;

considérant que la déclaration CE de conformité concernant l'appareil constitue une présomption de sa conformité avec la présente directive; que cette déclaration doit se présenter sous la forme la plus simple possible ;

considérant que, pour les appareils couverts par la directive 86/361/CEE, afin d'obtenir une protection efficace en matière de compatibilité électromagnétique, le respect des dispositions de la présente directive doit, cependant, être attesté par des marques ou certificats de conformité délivrés par des organismes notifiés par les États membres; que, pour faciliter la reconnaissance mutuelle des marques et certificats délivrés par ces organismes, il convient d'harmoniser les critères à prendre en considération pour les désigner ;

considérant qu'il pourrait néanmoins arriver que des appareils gênent les radiocommunications et les réseaux de télécommunication; qu'il convient donc de prévoir une procédure destinée à pallier ce danger ;

considérant que la présente directive s'applique aux appareils et matériels visés par les directives 76/889/CEE (1) et 76/890/CEE (4), qui concernent le rapprochement des législations des États membres relatives respectivement aux perturbations radioélectriques produits par les appareils électrodomestiques, outils portatifs et appareils similaires et à l'antiparasitage de luminaires avec démarreur pour éclairage à fluorescence; qu'il convient donc d'abroger lesdites directives,

A ARRÊTÉ LA PRÉSENTE DIRECTIVE:

Article premier

Au sens de la présente directive, on entend par:

- 1)** « appareils », tous les appareils électriques et électroniques, ainsi que les équipements et installations qui contiennent des composants électriques et/ou électroniques;
- 2)** « perturbations électromagnétiques », les phénomènes électromagnétiques susceptibles de créer des troubles de fonctionnement d'un dispositif, d'un appareil ou d'un système. Une perturbation électromagnétique peut être un bruit électromagnétique, un signal non désiré ou une modification du milieu de propagation lui-même;
- 3)** « immunité », l'aptitude d'un dispositif, d'un appareil ou d'un système à fonctionner sans dégradation de qualité en présence d'une perturbation électromagnétique;

- 4) « compatibilité électromagnétique », l'aptitude d'un dispositif, d'un appareil ou d'un système à fonctionner dans son environnement électromagnétique de façon satisfaisante et sans produire lui-même des perturbations électromagnétiques intolérables pour tout ce qui se trouve dans cet environnement ;
- 5) « organisme compétent », un organisme répondant aux critères énumérés à l'annexe II et reconnu comme tel ;
- 6) « attestation CE de type », le document par lequel un organisme notifié conformément à l'article 10 paragraphe 6 certifie que le type d'appareil examiné répond aux dispositions de la présente directive qui le concernent.

Article 2

1. La présente directive s'applique aux appareils susceptibles de créer des perturbations électromagnétiques ou dont le fonctionnement est susceptible d'être affecté par ces perturbations. Elle fixe les exigences de protection en la matière ainsi que les modalités de contrôle qui s'y rapportent.
2. Dans la mesure où des exigences de protection spécifiées dans la présente directive sont harmonisées, pour certains appareils, par des directives spécifiques, la présente directive ne s'applique pas ou cesse de s'appliquer, pour ces appareils et pour ces exigences de protection, dès l'entrée en vigueur de ces directives spécifiques.
3. Les équipements radio utilisés par les radioamateurs au sens de la définition no 53 de l'article 1er du « règlement radio », qui fait partie de la convention internationale des télécommunications, sont exclus du champ d'application de la présente directive, sauf si l'équipement est disponible dans le commerce.

Article 3

Les États membres prennent toutes les dispositions utiles pour que les appareils visés à l'article 2 ne puissent être mis sur le marché ou en service que s'ils répondent aux exigences édictées par la présente directive, lorsqu'ils sont installés et entretenus convenablement et utilisés conformément à leur destination.

Article 4

Les appareils visés à l'article 2 doivent être construits de telle sorte que:

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

Les principales exigences en matière de protection figurent à l'annexe III.

Article 5

Les États membres ne font obstacle, pour des motifs concernant la compatibilité électromagnétique, ni à la mise sur le marché ni à la mise en service sur leur territoire des appareils visés par la présente directive qui satisfont à ses dispositions.

Article 6

1. Les dispositions de la présente directive ne font pas obstacle à l'application dans un État membre des mesures spéciales suivantes:

- a) les mesures concernant la mise en service et l'utilisation de l'appareil prises pour un site particulier afin de remédier à un problème de compatibilité électromagnétique existant ou prévisible;
- b) les mesures concernant l'installation de l'appareil prises pour protéger les réseaux de télécommunications publics ou les stations réceptrices ou émettrices utilisées pour des raisons de sécurité.

2. Sans préjudice de la directive 83/189/CEE, les États membres informent la Commission et les autres États membres des mesures spéciales prises en vertu du paragraphe 1.

3. Les mesures spéciales qui ont été reconnues comme justifiées font, de la part de la Commission, l'objet d'une information appropriée dans le Journal officiel des Communautés européennes.

Article 7

1. Les États membres présument conformes aux exigences de protection visées à l'article 4 les appareils qui sont conformes:

- a) aux normes nationales les concernant, transposant les normes harmonisées dont les références ont fait l'objet d'une publication au Journal officiel des Communautés européennes. Les États membres publient les références de ces normes nationales;

b) ou aux normes nationales les concernant visées au paragraphe 2 dans la mesure où, dans les domaines couverts par de telles normes, des normes harmonisées n'existent pas.

2. Les États membres communiquent à la Commission le texte de leurs normes nationales visées au paragraphe 1 point b) qu'ils estiment satisfaire aux exigences de protection visées à l'article 4. La Commission communique ce texte immédiatement aux autres États membres. Selon la procédure prévue à l'article 8 paragraphe 2, elle notifie aux États membres celles desdites normes qui bénéficient de la présomption de conformité aux exigences de protection visées à l'article 4.

Les États membres publient les références de ces normes. La Commission les publie également au Journal officiel des Communautés européennes.

3. Les États membres acceptent que les appareils pour lesquels le fabricant n'a pas appliqué, ou n'a appliqué qu'en partie, les normes visées au paragraphe 1, ou en l'absence de normes, soient présumés conformes aux exigences de protection visées à l'article 4 lorsque leur conformité avec ces exigences est attestée par le moyen d'attestation prévu à l'article 10 paragraphe 2.

Article 8

1. Lorsqu'un État membre ou la Commission estime que les normes harmonisées visées à l'article 7 paragraphe 1 point a) ne satisfont pas entièrement aux exigences visées à l'article 4, l'État membre concerné ou la Commission saisit le comité permanent institué par la directive 83/189/CEE, ci-après dénommé « comité », en exposant ses raisons. Le comité émet un avis d'urgence.

Au vu de l'avis du comité, la Commission notifie au plus tôt aux États membres si les normes concernées doivent être retirées ou non des publications visées à l'article 7 paragraphe 1 point a), dans leur totalité ou en partie.

2. Après réception de la communication visée à l'article 7 paragraphe 2, la Commission consulte le comité. Au vu de l'avis de celui-ci, la Commission notifie au plus tôt aux États membres si la norme nationale en cause doit ou non bénéficier de la présomption de conformité et, dans l'affirmative, faire dès lors l'objet d'une publication nationale de référence.

Si la Commission ou un État membre estime qu'une norme nationale ne remplit plus les conditions nécessaires pour être présumée conforme aux exigences de protection visées à l'article 4, la Commission consulte le comité, qui donne son avis sans délai. Au vu de l'avis de celui-ci, elle notifie au plus tôt aux États membres si la norme en cause doit encore ou ne doit plus bénéficier de la présomption de conformité et, dans ce dernier cas, être retirée dans sa totalité ou en partie, des publications visées à l'article 7 paragraphe 2.

Article 9

1. Lorsqu'un État membre constate qu'un appareil accompagné de l'un des moyens d'attestation prévus à l'article 10 ne répond pas aux exigences de protection visées à l'article 4, il prend toutes les mesures utiles pour retirer du marché l'appareil en cause, en interdire la mise sur le marché ou en restreindre la libre circulation.

L'État membre concerné informe immédiatement la Commission de cette mesure et indique les raisons de sa décision et, en particulier, si la non-conformité résulte:

- a) du non-respect des exigences visées à l'article 4, lorsque l'appareil ne correspond pas aux normes visées à l'article 7 paragraphe 1;
- b) d'une mauvaise application des normes visées à l'article 7 paragraphe 1;
- c) d'une lacune des normes visées à l'article 7 paragraphe 1 elles-mêmes.

2. La Commission consulte les parties concernées dans les plus brefs délais. Lorsqu'elle constate, après cette consultation, que l'action est justifiée, elle en informe immédiatement l'État membre qui a pris l'initiative ainsi que les autres États membres.

Lorsque la décision visée au paragraphe 1 est motivée par une lacune des normes, la Commission, après consultation des participants, saisit le comité dans un délai de deux mois si l'État membre ayant pris les mesures entend les maintenir, et elle entame les procédures visées à l'article 8.

3. Lorsque l'appareil non conforme est accompagné de l'un des moyens d'attestation visés à l'article 10, l'État membre compétent prend à l'encontre de l'auteur de l'attestation les mesures appropriées et en informe la Commission et les autres États membres.

4. La Commission s'assure que les États membres sont tenus informés du déroulement et des résultats de cette procédure.

Article 10

1. Dans le cas d'appareils pour lesquels le fabricant a appliqué les normes visées à l'article 7 paragraphe 1, la conformité des appareils avec les dispositions de la présente directive est attestée par une

déclaration CE de conformité, délivrée par le fabricant ou son mandataire établi dans la Communauté. Cette déclaration doit être tenue à la disposition de l'autorité compétente pendant dix ans suivant la mise sur le marché des appareils.

En outre, le fabricant, ou son mandataire établi dans la Communauté, appose la marque CE de conformité sur l'appareil, à défaut sur l'emballage, sur sa notice d'emploi ou sur son bon de garantie. Lorsque ni le fabricant ni son mandataire ne sont établis dans la Communauté, l'obligation susmentionnée de tenir à disposition la déclaration CE de conformité incombe à toute personne qui met l'appareil sur le marché communautaire.

Les dispositions relatives à la déclaration CE et à la marque CE figurent à l'annexe I.

2. Dans le cas d'appareils pour lesquels le fabricant n'a pas appliqué ou n'a appliqué qu'en partie les normes visées à l'article 7 paragraphe 1, ou en l'absence de normes, le fabricant, ou son mandataire établi dans la Communauté, tient à la disposition des autorités compétentes concernées, dès la mise sur le marché, un dossier technique de construction. Ce dossier doit donner une description de l'appareil, exposer les modalités mises en oeuvre pour assurer la conformité de l'appareil avec les exigences de protection visées à l'article 4 et comprendre un rapport technique ou un certificat, l'un ou l'autre ayant été obtenu d'un organisme compétent.

Le dossier doit être tenu à la disposition des autorités compétentes pendant dix ans suivant la mise sur le marché des appareils.

Lorsque ni le fabricant ni son mandataire ne sont établis dans la Communauté, cette obligation de tenir à disposition le dossier technique incombe à toute personne qui met l'appareil sur le marché communautaire.

La conformité des appareils avec celui décrit dans le dossier technique est attestée conformément à la procédure prévue au paragraphe 1.

Les États membres présument, sous réserve des dispositions du présent paragraphe, que ces appareils sont conformes aux exigences de protection visées à l'article 4.

3. Pour autant que les normes visées à l'article 7 paragraphe 1 n'existent pas encore, et sans préjudice des dispositions du paragraphe 2 du présent article, les appareils concernés peuvent continuer d'être soumis à titre transitoire, jusqu'au 31 décembre 1992 au plus tard, aux régimes nationaux en vigueur à la date d'adoption de la présente directive, sous réserve de la compatibilité de ces régimes avec les dispositions du traité.

4. La conformité des appareils visés par l'article 2 paragraphe 2 de la directive 86/361/CEE avec les dispositions de la présente directive est attestée conformément à la procédure prévue au paragraphe 1, après que le fabricant, ou son mandataire établi dans la Communauté, a obtenu une attestation CE de type concernant ces appareils, délivrée par l'un des organismes notifiés visés au paragraphe 6 du présent article.

5. La conformité des appareils conçus pour l'émission des radiocommunications, telles que définies dans la convention de l'union internationale des télécommunications, avec les dispositions de la présente directive est attestée conformément à la procédure prévue au paragraphe 1, après que le fabricant, ou son mandataire établi dans la Communauté, a obtenu une attestation CE de type concernant ces appareils, délivrée par l'un des organismes notifiés visés au paragraphe 6.

Cette disposition ne s'applique pas aux appareils mentionnés ci-dessus lorsqu'ils sont conçus et destinés exclusivement à des radioamateurs au sens de l'article 2 paragraphe 2.

6. Chaque État membre notifie, à la Commission et aux autres États membres, les autorités compétentes visées dans le présent article et les organismes chargés de délivrer les attestations CE de type, visés aux paragraphes 4 et 5 la Commission publie, pour information, au Journal officiel des Communautés européennes, la liste de ces autorités et organismes et en assure la mise à jour.

La notification précise si ces organismes sont compétents pour tous les appareils couverts par la présente directive ou si leur responsabilité se borne à certains domaines spécifiques.

Les États membres appliquent les critères énumérés à l'annexe II pour l'évaluation des organismes à notifier.

Les organismes qui satisfont aux critères d'évaluation fixés par les normes harmonisées concernées sont présumés répondre aux critères susvisés.

Un État membre qui a notifié un organisme doit retirer son agrément s'il constate que cet organisme ne satisfait plus aux critères énumérés à l'annexe II. Il en informe immédiatement la Commission et les autres États membres.

Article 11

Les directives 76/889/CEE et 76/890/CEE sont abrogées à partir du 1er janvier 1992.

Article 12

1. Les États membres adoptent et publient, avant le 1er juillet 1991, les dispositions législatives, réglementaires et administratives nécessaires pour se conformer à la présente directive. Ils en informent la Commission. Ils appliquent ces dispositions à partir du 1er janvier 1992.
2. Les États membres communiquent à la Commission le texte des dispositions de droit interne qu'ils adoptent dans le domaine régi par la présente directive.

Article 13

Les États membres sont destinataires de la présente directive.

Fait à Bruxelles, le 3 mai 1989.

Par le Conseil

Le président

P. SOLBES

- (1) JO no C 322 du 2. 12. 1987, p. 4.
- (2) JO no 262 du 10. 10. 1988, p. 82, et JO no C 69 du 20. 3. 1989, p. 72.
- (3) JO no C 134 du 24. 5. 1988, p. 2.
- (4) JO no L 217 du 5. 8. 1986, p. 21.
- (1) JO no L 109 du 26. 4. 1983, p. 8.
- (2) JO no L 81 du 26. 3. 1988, p. 75.
- (3) JO no L 336 du 4. 12. 1976, p. 1.
- (4) JO no L 336 du 4. 12. 1976, p. 22.

ANNEXE**1. Déclaration CE de conformité**

La déclaration CE de conformité doit comprendre les éléments suivants:

- description de l'appareil ou des appareils visé(s),
- référence des spécifications par rapport auxquelles la conformité est déclarée et, le cas échéant, mesures internes mises en oeuvre pour assurer la conformité des appareils avec les dispositions de la directive,
- identification du signataire ayant reçu pouvoir pour engager le fabricant ou son mandataire,
- le cas échéant, référence de l'attestation CE de type délivrée par un organisme notifié.

2. Marque CE de conformité

- La marque CE de conformité est composée du sigle « CE », figurant ci-dessous, et du millésime de l'année au cours de laquelle la marque a été apposée.
- Le cas échéant, cette marque doit être complétée par le sigle distinctif de l'organisme notifié ayant délivré l'attestation CE de type.
- Lorsque des appareils font l'objet d'autres directives prévoyant la marque CE de conformité, l'application de la marque CE indique également la conformité avec les exigences concernées de ces autres directives.

ANNEXE II

Critères pour l'évaluation des organismes à notifier

Les organismes désignés par les États membres doivent remplir les conditions minimales suivantes:

- 1) disponibilité en personnel ainsi qu'en moyens et équipements nécessaires;
- 2) compétence technique et intégrité professionnelle du personnel;
- 3) indépendance, quant à l'exécution des essais, à l'élaboration des rapports, à la délivrance des attestations et à la réalisation de la surveillance, prévues par la directive, des cadres et du personnel technique par rapport à tous les milieux, groupements ou personnes, directement ou indirectement intéressés au domaine du produit concerné;
- 4) respect du secret professionnel par le personnel;
- 5) souscription d'une assurance de responsabilité civile à moins que cette responsabilité ne soit couverte par l'État sur la base du droit national.

Les conditions visées aux points 1 et 2 sont périodiquement vérifiées par les autorités compétentes des États membres.

ANNEXE III

Liste illustrant les principales exigences en matière de protection

Le niveau maximal des perturbations électromagnétiques générées par les appareils doit être tel qu'il ne gêne

pas l'utilisation notamment des appareils suivants:

- a) récepteurs de radio et de télévision privés;
- b) équipements industriels;
- c) équipements radio mobiles;
- d) équipements radio mobiles et radiotéléphoniques commerciaux;
- e) appareils médicaux et scientifiques;
- f) équipements des technologies de l'information;
- g) appareils ménagers et équipements électroniques ménagers;
- h) appareils radio pour l'aéronautique et la marine;
- i) équipements éducatifs électroniques;
- j) réseaux et appareils de télécommunications;
- k) émetteurs de radio et de télédiffusion;
- l) éclairage et lampes fluorescentes.

Les appareils, et notamment ceux visés aux points a) à l), devraient être construits de manière à avoir un niveau adéquat d'immunité électromagnétique dans un environnement normal de compatibilité électromagnétique là où les appareils sont destinés à fonctionner, de façon à pouvoir être utilisés sans gêne compte tenu des niveaux de la perturbation générée par les appareils satisfaisant aux normes fixées à l'article 7. Les informations nécessaires pour permettre une utilisation conforme à la destination de l'appareil doivent figurer dans une notice qui accompagne l'appareil.

Fin du document