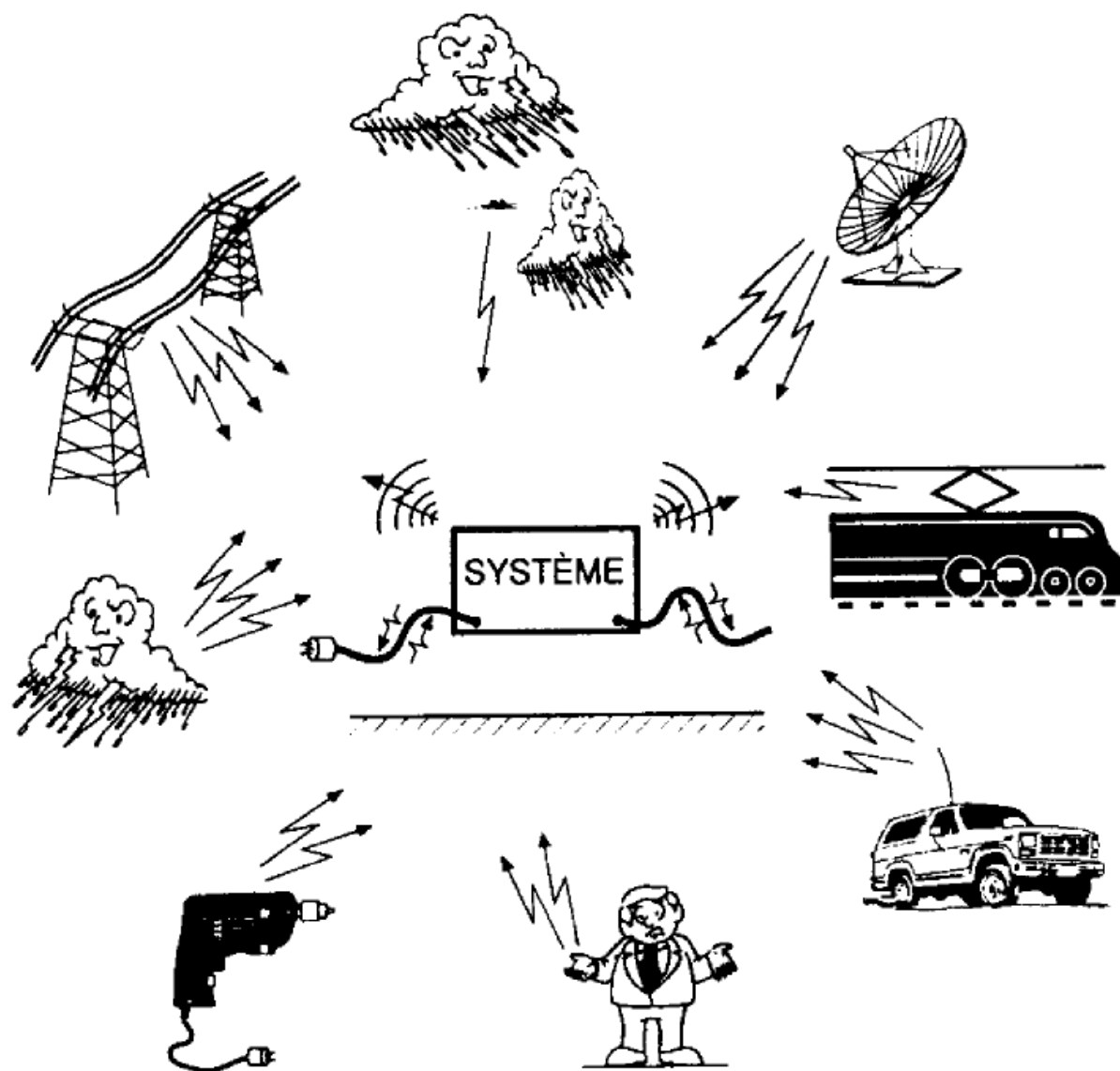


COMPATIBILITE ELECTROMAGNETIQUE



CERGE

Académie de Paris, Créteil, Versailles

SOMMAIRE

1	INTRODUCTION	3
2	ORGANISMES DE RÉGLEMENTATION	4
2.1	<i>Présentation générale</i>	4
2.2	<i>Exemple de norme</i>	5
3	NATURE DES SOURCES DE PERTURBATION	6
3.1	<i>Perturbations rayonnées</i>	7
3.2	<i>Perturbations conduites</i>	8
4	TERMINOLOGIE EMPLOYÉE	9
5	MÉCANISMES DE TRANSMISSION DES PERTURBATIONS	10
5.1	<i>Transmission par conduction</i>	10
5.2	<i>Transmission par rayonnement</i>	11
6	DISPOSITIFS DE MESURE DES PERTURBATIONS	13
6.1	<i>Mesures des perturbations conduites</i>	13
6.2	<i>Mesures des perturbations rayonnées ; Antennes [1-4, 1-5, 1-6, 1-7]</i>	20
6.3	<i>L'analyseur de spectre</i>	22
7	LES NORMES	24
8	BIBLIOGRAPHIE	24

PRESENTATION GENERALE

1 INTRODUCTION

Les systèmes électriques et/ou électroniques ne sont pas isolés de leur environnement. De l'énergie électromagnétique peut donc franchir non intentionnellement leurs frontières soit pour y pénétrer, soit pour s'en échapper. Cette énergie parasite est appelée **perturbation électromagnétique**.

Si nous nous intéressons à l'environnement électromagnétique d'un équipement, nous pouvons distinguer les **sources de perturbations** d'origine naturelle et les sources de perturbations qui tiennent à l'activité humaine.

Parmi les sources de perturbation d'origine naturelle, nous pouvons citer :

- La foudre (décharge électrostatique entre nuages ou entre nuage et sol) ;
- Les rayonnements cosmiques et en particulier solaires

Parmi les sources de perturbation qui découlent de l'activité humaine, on peut distinguer trois catégories :

- Les sources de rayonnement électromagnétique volontairement créées par l'homme : émetteurs radio, télévision, radar, téléphones portables, etc. ;
- Les sources de perturbation involontaires qui proviennent de l'utilisation de l'électricité : lignes de transport de l'énergie, éclairage fluorescent, moteurs électriques, alimentations des systèmes électroniques, etc.
- Les décharges électrostatiques qui impliquent le corps humain ou des matériaux mis en mouvement par l'homme.

Un équipement électrique ou électronique peut devenir victime de l'environnement électromagnétique dans lequel il opère. Le fonctionnement du système est alors perturbé. Ce qui peut aller du simple désagrément, comme le grésillement d'un récepteur radio, à la perte de fonctionnalité momentanée ou permanente. Il est donc indispensable de se préoccuper lors de sa conception des perturbations électromagnétiques qu'il aura à subir et de sa capacité à leur résister.

Parallèlement, en tant qu'émetteur non intentionnel d'énergie électromagnétique, un système électrique ou électronique constitue une source potentielle de perturbations.

La **compatibilité électromagnétique (CEM)** est la discipline qui a pour objet d'étudier les problèmes de cohabitation électromagnétique. Sa vocation est :

- D'étudier les transferts d'énergie non intentionnels entre systèmes électriques et/ou électroniques ;
- De mettre au point des procédés permettant de limiter les perturbations électromagnétiques émises et ainsi de satisfaire à la réglementation en vigueur ;
- De mettre au point des procédés permettant d'accroître l'immunité des systèmes aux parasites dans des limites faisant également l'objet de réglementations.

Le champ d'action de la CEM est vaste :

- Phénomènes physiques (foudre, décharges électrostatiques, rayonnements, courants conduits) ;

- Domaines d'application (télécommunications, équipement spatial et militaire, contrôle commande, instrumentation, électronique de puissance) ;
- Gamme de fréquence (de quelques Hz à quelques dizaines de GHz).

On peut donc délimiter trois principaux centres d'étude :

- Les sources de perturbation ;
- Leur mode de couplage et de propagation ;
- Les effets des perturbations sur les "victimes", qui correspondent au concept de susceptibilité électromagnétique.

Des normes existent concernant chacun des ces trois points.

2 ORGANISMES DE REGLEMENTATION

2.1 Présentation générale

Au niveau de la Communauté Economique Européenne (CEE), la réglementation est élaborée par les différents Comités Techniques (TC) du Comité Européen de Normalisation en Electrotechnique (CENELEC). La Directive européenne n°89/336/CEE stipule que dans tous les états membres de la CEE, les appareils susceptibles de générer des perturbations électromagnétiques ou dont le fonctionnement peut être affecté par ces perturbations ne peuvent être commercialisés dans les pays de la CEE que s'ils sont conformes aux spécifications en matière de CEM. Cette directive est rentrée en application le 28 octobre 1992. Toutefois, une période de transition de quatre ans a été prévue pour permettre aux fabricants de s'adapter et au CENELEC d'élaborer tous les documents. Nous donnons ci-dessous un échantillon des normes Européennes.

Au plan international, la Commission Electrotechnique Internationale (CEI) a créé un comité spécial, le Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques (CISPR) en vue de formuler les normes CEM. Les publications du CISPR sont généralement utilisées par les différents pays comme document de base pour l'établissement de leurs propres normes.

Vous trouverez dans le tableau ci-dessous les références et domaines d'applications des principales normes Européennes :

	Standards Européens	Titre	Equivalent international
Emission	EN 55011	Exigences sur l'émission des équipements Industriels, Scientifiques et médicaux	CISPR 11
	EN 55013	Exigences sur les récepteurs de radiodiffusion	CISPR 13
	EN55014	Exigences sur l'émission des équipements électroménagers et des outils portatifs	CISPR 14
	EN55015	Exigences sur l'émission des lampes fluorescentes et les luminaires	CISPR 15
	EN55022	Exigences sur l'émission des équipements de traitement de l'information	CISPR 22
	EN60555-1	Définitions des harmoniques, sous-harmoniques et du scintillement	IEC 555-1
	EN60555-2	Perturbations harmoniques provoquées par les équipements électroménagers et similaires.	IEC 555-2
	EN60555-3	Variations de tension provoquées par les équipements électroménagers et similaires.	IEC 555-3

Tableau 1 : principales normes Européennes en matière de CEM

2.2 Exemple de norme

Considérons la norme 55022 qui concerne une catégorie importante d'appareils électriques, les appareils de traitement de l'information. Cette norme est directement dérivée de la publication n°22 du CISPR et distingue deux classes d'appareils :

- Les appareils de classe A qui sont destinés à être utilisés en milieu industriel, commercial ou d'affaires ;
- Les appareils de classe B qui sont destinés à être utilisés dans des locaux d'habitation.

Les niveaux limites de perturbations rayonnées sont définies pour des distances de la source de 30m et 10m. Les limites de champ perturbateur rayonné dans la gamme de fréquence 30MHz à 1000MHz à une distance de 30m pour les appareils de classe A sont données dans le tableau n°2 (les unités exprimées en dB μ V/m signifient que le champ électrique a été spécifié en décibel en prenant comme valeur de référence un champ de 1 μ V/m, soit $20 \cdot \log(E_{\text{exprimé en } \mu\text{V}})$). Ces limites sont données à une distance de 10m pour les appareils de classe B dans le tableau n°3.

Gamme de Fréquences (MHz)	Limites quasi-crête dB μ V/m
30 à 230	30
230 à 1000	37

Tableau 2 : Limites de champ perturbateur rayonné pour les appareils de classe A

Gamme de Fréquences (MHz)	Limites quasi-crête dB μ V/m
30 à 230	30
230 à 1000	37

Tableau 3 : Limites de champ perturbateur rayonné pour les appareils de classe B

Le site d'essai doit permettre de distinguer les perturbations émises par l'équipement sous test du bruit ambiant. On peut déterminer si un site convient à l'essai en mesurant le niveau du bruit ambiant, l'équipement sous test n'étant pas en fonctionnement. Il faut alors que le niveau de bruit soit inférieur d'au moins 6dB aux limites indiquées dans les tableaux précédents.

On cherchera à obtenir le rayonnement maximal en modifiant la position des éléments d'une manière compatible avec l'usage normal.

Toute série de résultats doit être accompagnée d'une description d'ensemble complète des orientations des câbles et de l'équipement.

Les tableaux 4 et 5 donnent, pour ces mêmes appareils, les valeurs que ne doivent pas dépasser leurs perturbations conduites. Ces mesures sont effectuées à l'aide d'un Réseau de Stabilisation d'Impédance de Lignes (RSIL) que nous décrirons dans le paragraphe *dispositifs de mesure des perturbations*.

Gamme de Fréquences (MHz)	Limites Quasi-crête dB μ V	Limites Valeur moyenne dB μ V
0.15 à 0.50	79	66
0.50 à 30	73	60

Tableau 4 : Limites de la tension perturbatrice aux bornes du RSIL pour les appareils de classe A

Gamme de Fréquences (MHz)	Limites Quasi-crête dB μ V	Limites Valeur moyenne dB μ V
0.15 à 0.50	66 à 56	56 à 46
0.50 à 5	56	46
5 à 30	60	50

Tableau 5 : Limites de la tension perturbatrice aux bornes du RSIL pour les appareils de classe B

Note : pour le Tableau 4, la limite décroît en fonction linéaire du logarithme de la fréquence dans la gamme de 0.15MHz à 0.50MHz.

Si un cordon d'alimentation souple est fourni par le fabricant, il devra avoir une longueur de 1m ; le cas échéant, l'excédent sera replié de façon à former un faisceau ne dépassant pas 40cm de longueur.

Les liaisons de masse, lorsqu'elles sont prescrites pour la sécurité, doivent être reliées au point de masse de référence du RSIL et, sauf indication contraire du fabricant, avoir une longueur de trajet de 1m et un trajet parallèle aux conducteurs d'alimentation à 10cm au plus de ces derniers.

Dans les paragraphes qui précèdent, nous avons vu quelques extraits du contenu de la norme EN55022. Pour vous aider à comprendre les raisons de ces spécifications, nous allons donner quelques éléments concernant la nature des sources de perturbations électromagnétiques.

3 NATURE DES SOURCES DE PERTURBATION

Comme nous avons pu le constater à la lecture de la norme donnée en exemple, les perturbations électromagnétiques peuvent prendre deux formes distinctes : les perturbations dites conduites et celles dites rayonnées. Les gammes de fréquences correspondant à chacune d'elles sont différentes et complémentaires (150kHz-30MHz et 30MHz-1GHz dans notre exemple).

Les signaux parasites émis par la source (par exemple dans un convertisseur statique, la ou les cellules de commutations) sont propagés vers la source d'énergie (ou vers la charge) qui est désignée par le terme de "victime", de plusieurs façons, liées à leur environnement respectif. Deux cas peuvent alors se présenter :

- si la source et la victime sont voisins avec ou sans liaison galvanique, le couplage est dit proche et il peut être de nature capacitive, inductive ou résistive. Les outils d'analyse font appel à des modèles de types réseau électrique où les couplages sont représentés par des

capacités, des mutuelles ou des résistances (dans le cas de liaisons galvaniques directes). Les phénomènes perturbateurs sont dans ce cas les variations rapides de courant ou de tension ($\frac{di}{dt}, \frac{dv}{dt}$). Ce type de perturbations est appelé **perturbations conduites** et elles se développent dans les câbles ou conducteurs de liaisons aux réseaux, sources d'énergie ou charges.

- Si source et victime sont éloignées et sans liaison galvanique, la perturbation est transmise par une onde électromagnétique, on parle de **perturbations rayonnées** ou propagées. Les phénomènes sont décrits avec les outils théoriques et expérimentaux propres à ce domaine (équation de Maxwell et utilisation d'antennes de mesure).

3.1 Perturbations rayonnées

Les circuits électriques, lorsqu'ils sont soumis à des différences de potentiel et ou parcourus par des courants, produisent des champs électromagnétiques dans l'espace. Leurs intensités dépendent de la nature, la fréquence et la distance par rapport à la source.

- Le champ électrique s'exprime en V/m. Son émission est produite par un circuit électrique à haute impédance soumis à une différence de potentiel élevée v (Figure 1).
- Le champ magnétique s'exprime en A/m. Son émission est engendré par un circuit basse impédance parcouru par un courant i (Figure 2).

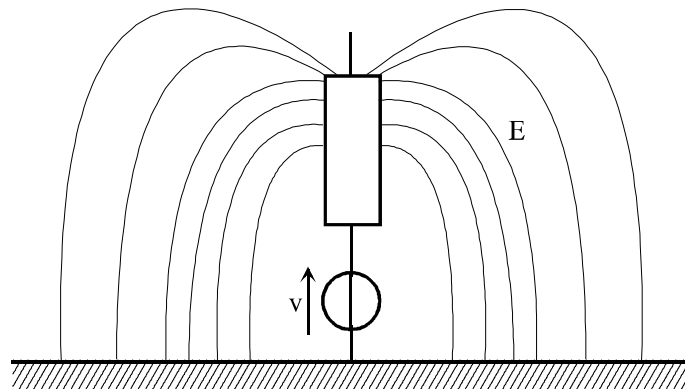


Figure 1 : Emission en champ électrique

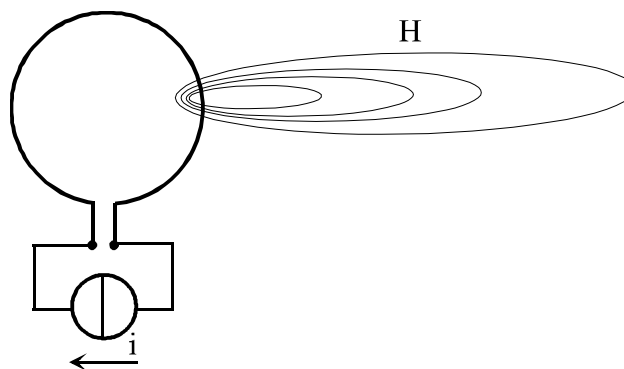


Figure 2 : Emission en champ magnétique

Rappels :

L'impédance de l'onde électromagnétique représente le rapport de l'intensité du champ électrique sur l'intensité du champ magnétique : $Z = \frac{E}{H}$

La longueur d'onde peut être calculée en effectuant le rapport de la vitesse de propagation de l'onde (soit la vitesse de la lumière pour le vide et en première approximation pour l'air) sur la fréquence des signaux constituant cette onde électromagnétique : $\lambda = c / f = 3 \cdot 10^8 / f$ (en m) soit 1m pour $f=300\text{MHz}$.

Notations :

Pour des distances à la source inférieures à $\lambda / 2\pi$ nous considérerons que nous sommes en champs proches.

Pour des distances à la source supérieures à $\lambda / 2\pi$ nous considérerons que nous sommes en champs lointains.

Champs proches :

- Dipôle électrique : E varie en $1/r^3$, H varie en $1/r^2$, Z varie alors en $1/r$.

A faible distance le doublet rayonne essentiellement en champ E.

- Dipôle magnétique : E varie en $1/r^2$, H en $1/r^3$, Z varie en r

A faible distance la boucle rayonne essentiellement en champ H.

Champs lointains :

E et H décroissent en $1/r$, $Z=Cte=377\Omega$ (impédance du vide)

Le champ électromagnétique a les caractéristiques d'une onde plane

Exemple :

Le champ E créé par une antenne boucle d'aire A, parcourue par un courant sinusoïdal d'amplitude I et de fréquence F, dans le plan de la boucle à une distance r, a pour expression en champ lointain :

$$E \approx 1,32 \cdot 10^{-14} \cdot A \cdot I \cdot \frac{F^2}{r}$$

3.2 Perturbations conduites

Les perturbations électromagnétiques peuvent également être transmises en utilisant comme vecteur les connexions électriques entre différents équipements. Ces perturbations sont alors nommées perturbations conduites.

Bien évidemment ces courants et tensions parasites circulant dans les câbles ou fils interconnectants des équipements entre eux vont eux-mêmes rayonner. De même des perturbations rayonnées vont pouvoir induire des courants et tensions parasites dans les différentes interconnexions. Les perturbations conduites et rayonnées sont donc intimement couplées.

4 TERMINOLOGIE EMPLOYÉE

Nous allons définir la terminologie employée pour caractériser les perturbations.

On peut définir un modèle électrique de liaison entre deux "**boîtes**". Ces deux boîtes symbolisent deux équipements électriques reliés par deux fils permettant le transfert d'information ou d'énergie. Ce modèle comporte également une liaison équipotentielle (plan de masse, châssis de l'appareil, terre, etc.).

Dans ce modèle dit des "deux boîtes" on différencie deux modes de circulation des courants :

- Le mode **différentiel** ou **symétrique**
- Le mode **commun** ou **asymétrique**

La représentation de ces deux modes est donnée aux figures 3 et 4.

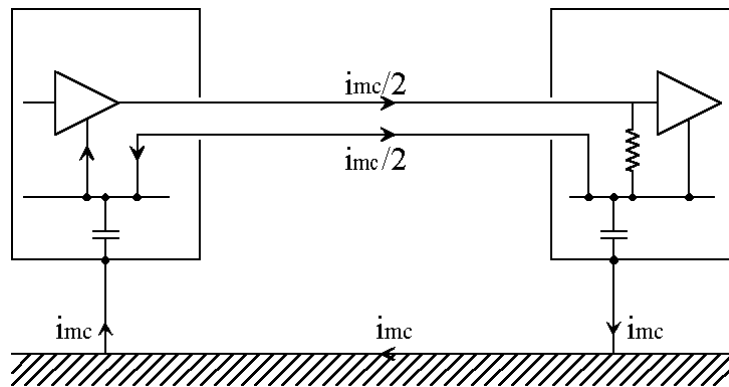


Figure 3 : Mode commun

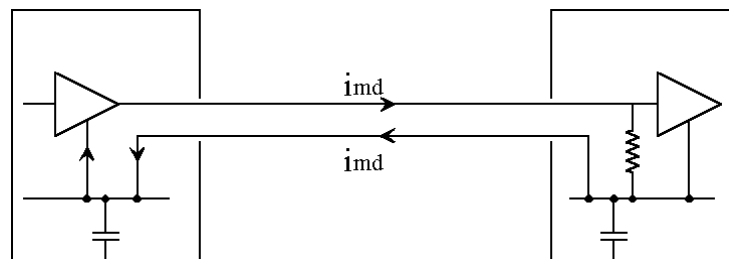


Figure 4: Mode différentiel

La circulation du mode différentiel ne fait intervenir que la liaison bifilaire entre les deux équipements. Dans ce cas, le courant dans le conducteur "aller" est égal au courant dans le conducteur "retour".

La circulation du courant de mode commun fait intervenir la liaison bifilaire et la liaison équipotentielle. Par définition, nous appelons courant de mode commun, le courant qui circule dans la connexion équipotentielle.

Dans le cas général, il y a superposition de ces deux modes. Les définitions précédentes restent exactes, si nous définissons les courants dans le système de la façon indiquée à la Figure 5.

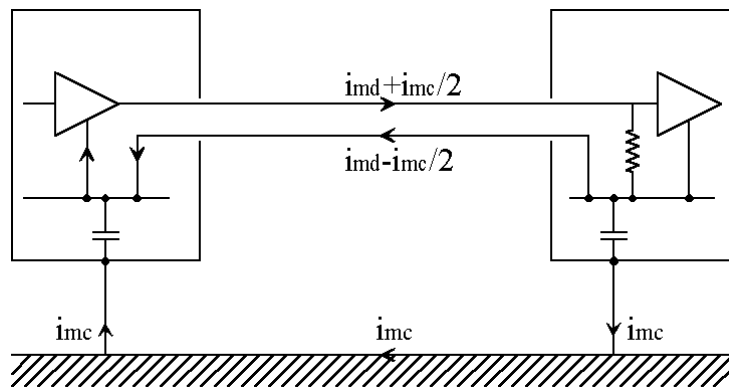


Figure 5: Superposition du mode différentiel et du mode commun

Les courants "aller" et "retour" dans la liaison bifilaire ne sont plus égaux.

5 MECANISMES DE TRANSMISSION DES PERTURBATIONS

5.1 Transmission par conduction

La Figure 6 donne un aperçu des différents modes de transmission des perturbations en mode conduit. Nous allons expliciter chacun de ces modes. Dans cette figure nous différencions trois types d'éléments, l'équipement perturbateur dit "source", les équipements susceptibles d'être perturbés ("victimes") et le réseau.

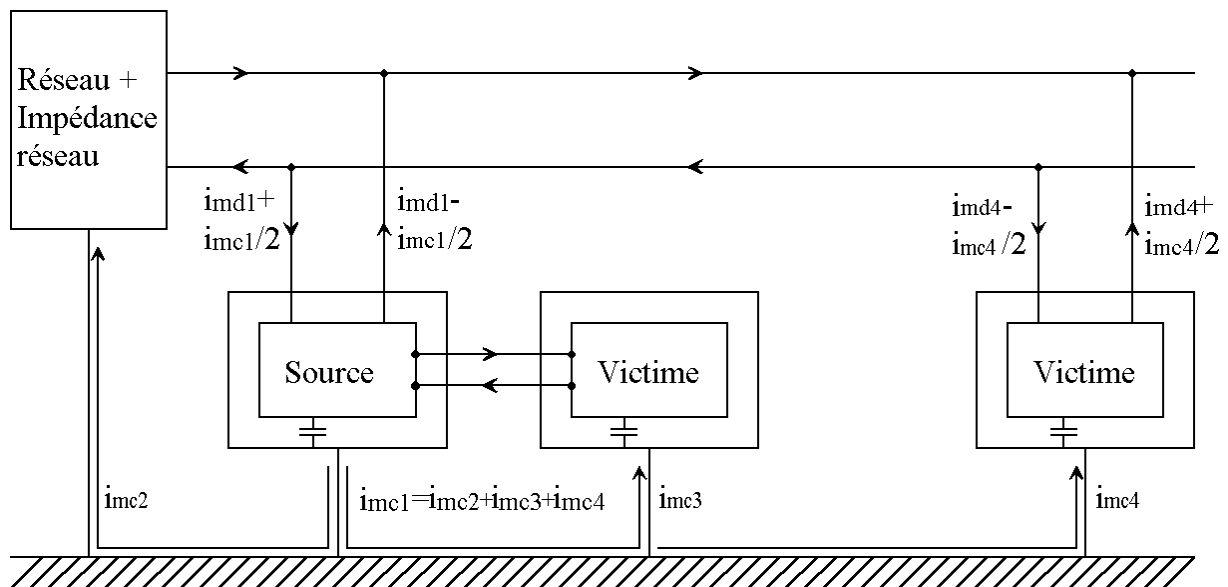


Figure 6 : Modes de transmission des perturbations conduites

5.1.1 Les couplages par liaison directe

Les couplages par liaison directe permettent la propagation de la "source" à la "victime" par l'intermédiaire d'un canal de transmission d'information ou d'énergie.

Ces perturbations passent de la "source" à la "victime" en mode commun et en mode différentiel (Figure 7).

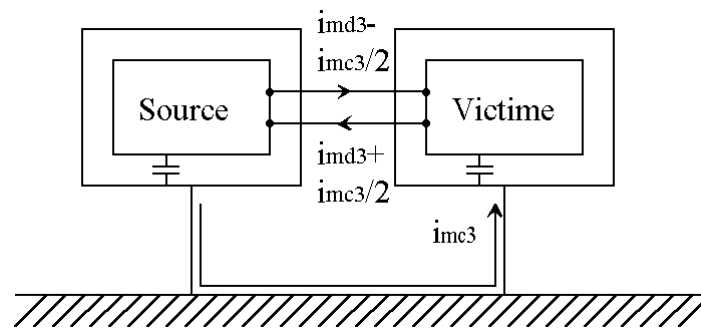


Figure 7 : Couplage par liaison directe

5.1.2 Les couplages par impédance commune

Ce mode de transmission des perturbations est bien plus difficile à identifier que celui présenté précédemment. Les éléments "source" et "victime" ne sont pas liés entre eux pour des raisons fonctionnelles, c'est à dire qu'ils n'échangent théoriquement pas d'information ou d'énergie. La connexion qui les lie est une liaison indirecte, comme par exemple une connexion à un même réseau (Figure 8).

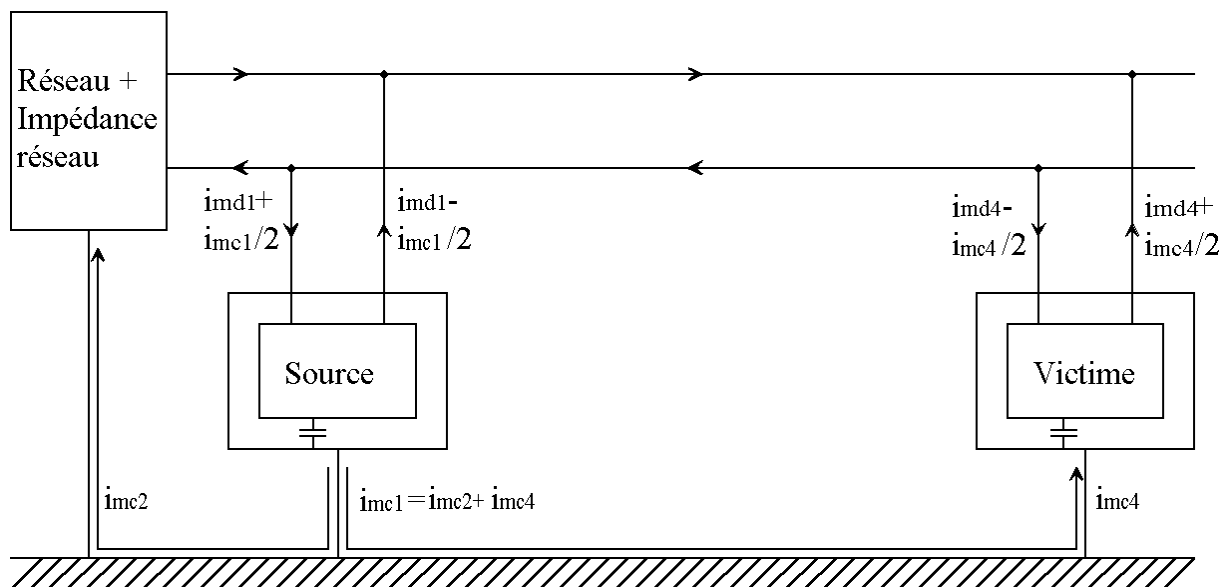


Figure 8 : Couplage par impédance commune

On retrouve ce couplage dans les deux modes, en mode commun et en mode différentiel. Les courants perturbateurs absorbés par la "source", c'est à dire des courants dont la fréquence est telle que l'impédance réseau n'est plus négligeable vis à vis de l'impédance d'entrée de la "victime", vont se partager entre le réseau et la "victime" dans des proportions dépendant de leurs impédances respectives. Ces courants provoquent des chutes de tension sur le réseau.

5.2 Transmission par rayonnement

Les perturbations électromagnétiques peuvent également se propager sans qu'il existe de conducteurs communs entre la "source" et la "victime"

On peut distinguer deux types de couplage dans ce mode le couplage en champ lointain et le couplage en champ proche.

5.2.1 Le couplage en champ lointain

Dans ce cas nous supposons que les courants et tensions induits dans la "victime" ne provoquent pas de modification dans les caractéristiques d'émission de l'élément perturbateur. Ceci est vérifié si le couplage entre les deux éléments est faible. Ce couplage n'a donc, dans la majorité des cas une importance significative que si les longueurs et surfaces mises en jeu sont grandes. C'est pourquoi ils interviennent de façon significative dans les connexions. Nous parlons alors dans ce cas de couplage **champ à câble**. Ce couplage est soit un couplage en champ électrique ou un couplage en champ magnétique et peut s'effectuer en mode commun ou en mode différentiel (Figure 9, Figure 10 et Figure 11).

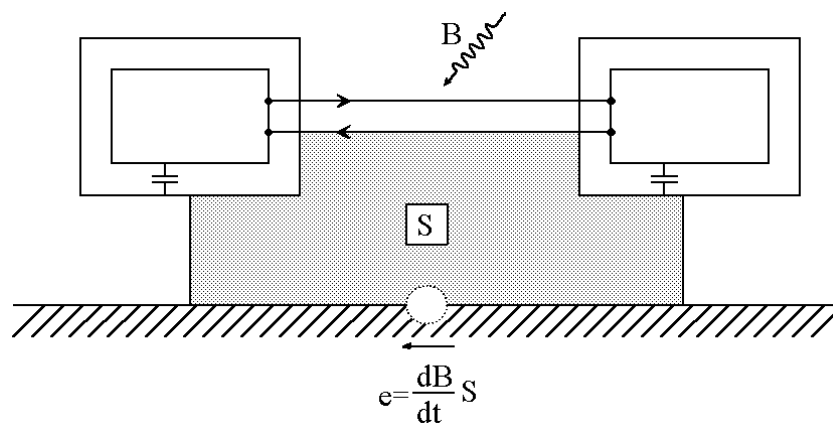


Figure 9 : Couplage champ magnétique à câble en mode commun

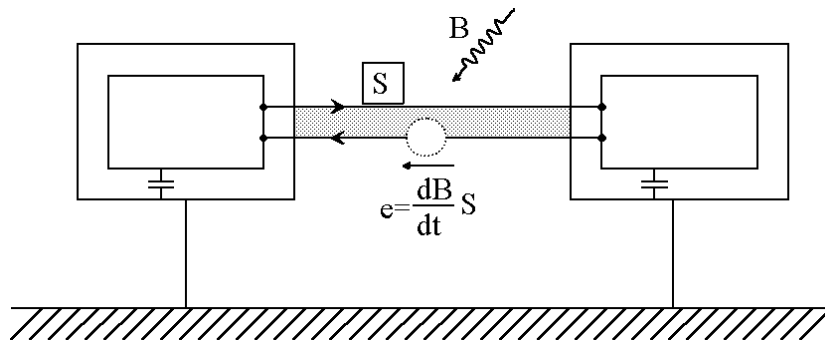


Figure 10 : Couplage champ magnétique à câble en mode différentiel

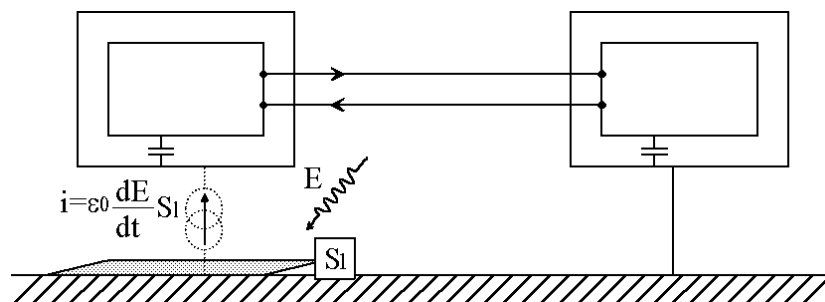


Figure 11 : Couplage champ électrique à câble en mode commun

5.2.2 Le couplage en champ proche

Ces couplages en champ électrique ou magnétique peuvent être représentés respectivement par des liaisons capacitives ou des mutuelles inductances. Quand ces couplages interviennent sur des connexions électriques, on parle alors de couplages **câble à câble** ou de phénomènes de **diaphonie capacitive** ou **inductive** (Figure 12).

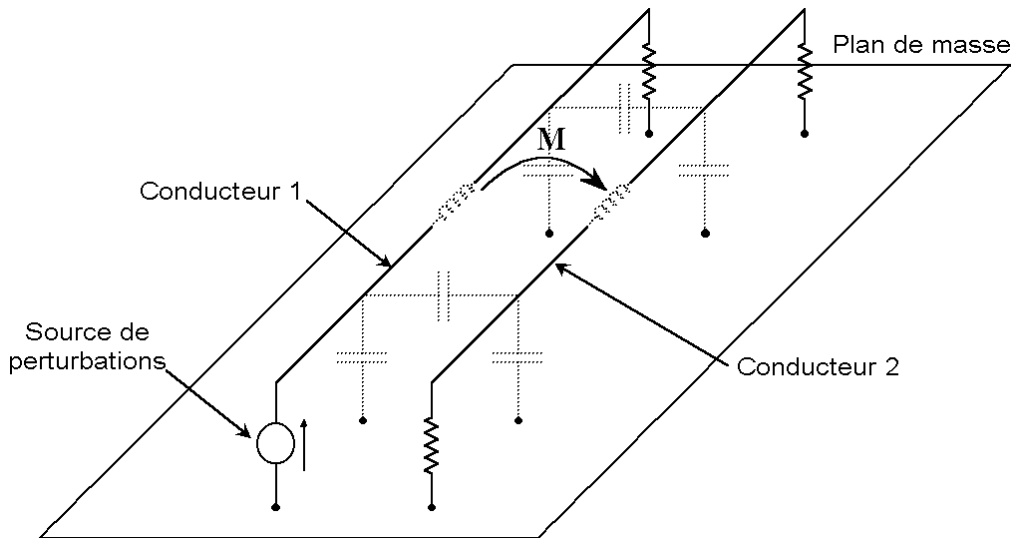


Figure 12 : Couplage en champ proche

6 DISPOSITIFS DE MESURE DES PERTURBATIONS

On distingue deux catégories de dispositifs de mesure utilisés en CEM. La première concerne la mesure des perturbations conduites à haute fréquence, elle comprend le Réseau Stabilisé d'Impédance de Ligne (RSIL) et les capteurs de courant passif basés sur le principe du transformateur de courant. Dans la seconde catégorie, on trouve divers types d'antennes destinées aux mesures en champ proche ou lointain. Dans tous les cas, le signal issu du capteur est analysé dans le domaine temporel (oscilloscope) et plus généralement dans le domaine fréquentiel grâce à l'analyseur de spectre hétérodyne.

6.1 Mesures des perturbations conduites

Les mesures doivent être effectuées en connectant l'appareil sous test à un RSIL (Réseau de Stabilisation d'Impédance de Ligne) pour les fréquences s'étendant de 150kHz à 30MHz ou en utilisant une pince absorbante pour les fréquences de 30MHz à 300MHz (pour certaines normes).

6.1.1 Le RSIL

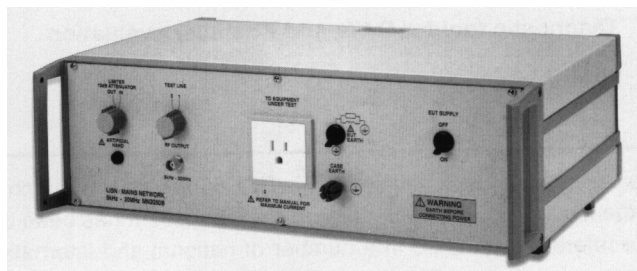


Figure 13 : Photo d'un RSIL

Le RSIL s'apparente à un filtre qui est inséré entre le dispositif sous test et le réseau fournissant l'énergie. Son rôle est double.

Il doit isoler le réseau, sur lequel peuvent exister des perturbations de mode commun et de mode différentiel, de l'équipement sous test. Cependant, il doit présenter à la fréquence du réseau une chute de tension sortie/entrée inférieure à 5% de la tension nominale lorsqu'il est parcouru par le courant nominal.

Enfin, il doit présenter une impédance de fermeture constante vis-à-vis des perturbations à haute fréquence émises par le dispositif sous test, tant en mode commun que différentiel, et ceci indépendamment de l'impédance présentée par le réseau d'énergie. Cette impédance est normalisée par le CISPR [1-2]. La norme définit les limites de variation de cette impédance, mesurée entre une borne de sortie et la terre dans la gamme de fréquence 10kHz-100MHz. Cette gamme est divisée en trois bandes (A, B, C). Le schéma équivalent relatif à chaque bande est indiqué Figure 14.

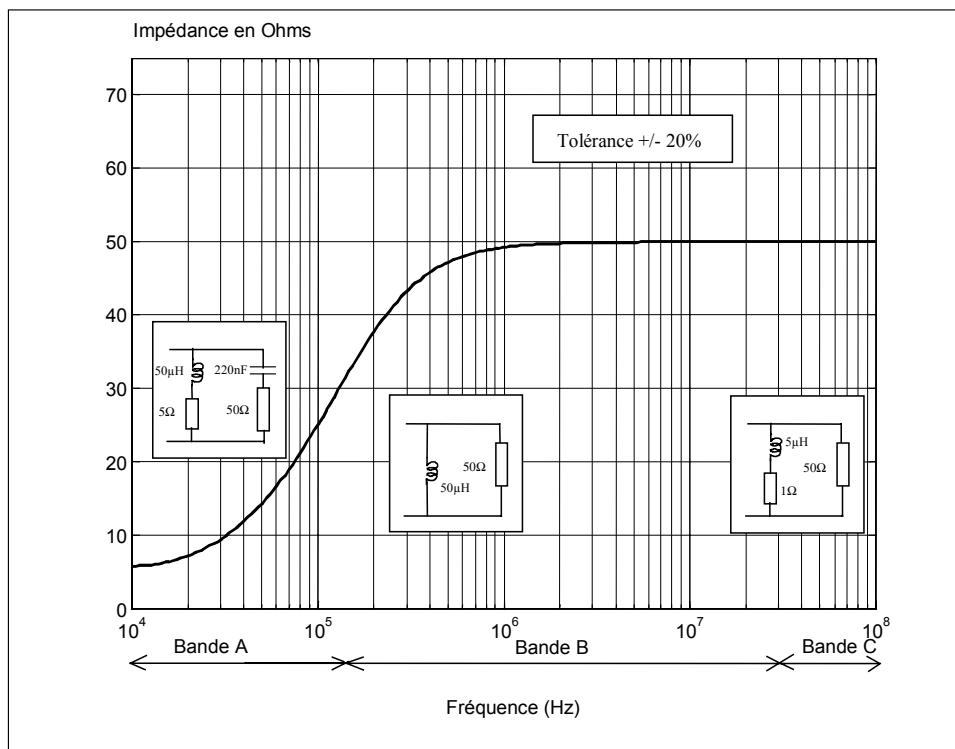


Figure 14 : Impédance de mode commun du RSIL

La structure du RSIL est représentée à la Figure 15.

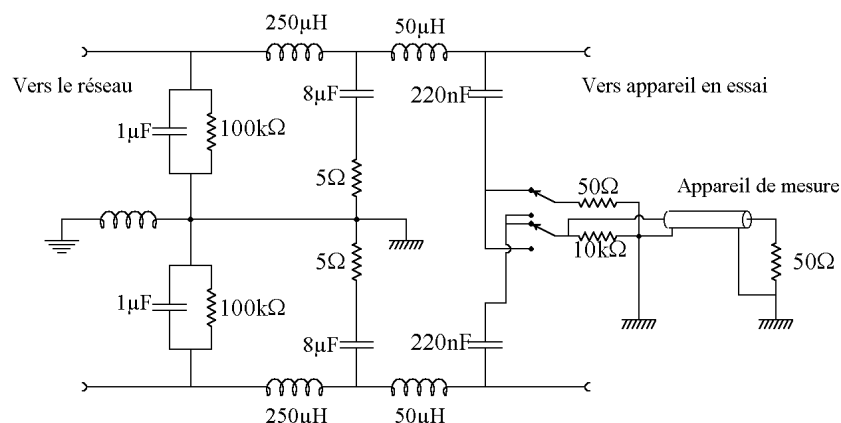


Figure 15 : Schéma de principe d'un RSIL monophasé

La mesure est effectuée au-dessus d'une surface conductrice reliée à la masse du banc de mesure (Figure 16). Les distances et longueurs des connexions sont spécifiées dans la norme.

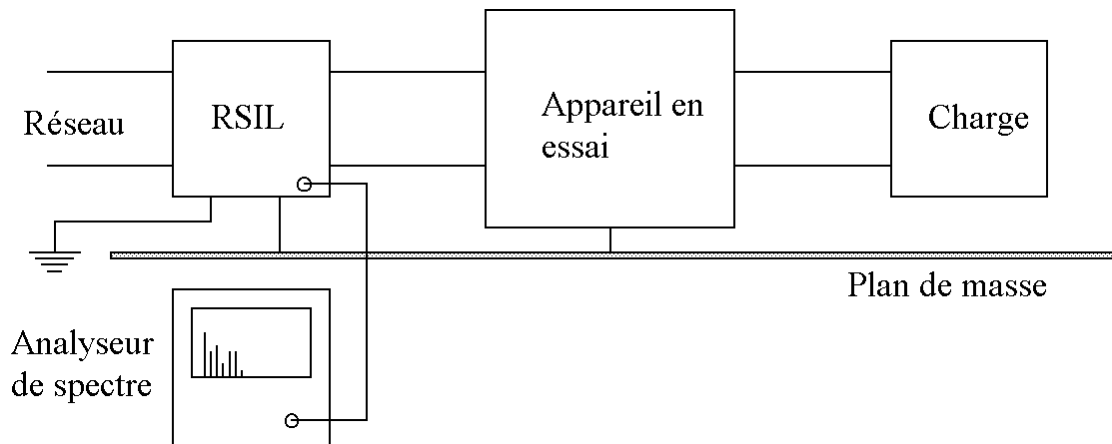


Figure 16 : Principe de la mesure des perturbations

Principe de la mesure

Nous avons vu que les perturbations conduites peuvent être transmises en **mode commun** ou en **mode différentiel**. Le RSIL permet d'effectuer une mesure combinée des perturbations de mode commun et de mode différentiel. Pour bien comprendre le principe de fonctionnement du RSIL, nous pouvons nous intéresser au schéma simplifié de la Figure 17 valable pour des fréquences des signaux perturbateurs supérieures à 1MHz.

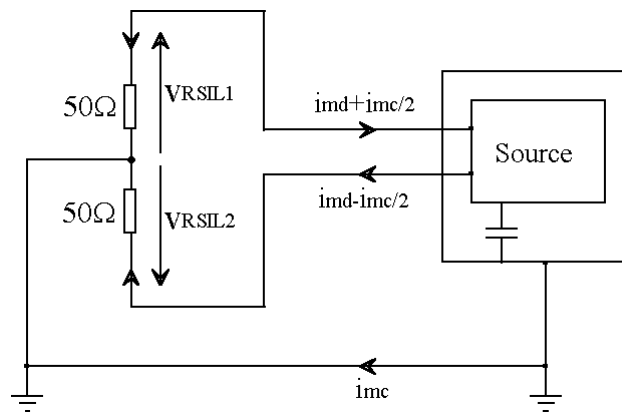


Figure 17 : Principe de fonctionnement du RSIL

Nous pouvons constater sur cette figure que l'influence de l'impédance du réseau est négligée (ceci représente l'un des intérêts du RSIL). Les perturbations conduites générées par le système sous test sont caractérisées par les tensions V_{RSIL1} et V_{RSIL2} . Les relations liant ces tensions aux courants i_{md} et i_{mc} sont données ci-dessous :

$$V_{RSIL1} = -50 \cdot (i_{md} + i_{mc} / 2)$$

$$V_{RSIL2} = +50 \cdot (i_{md} - i_{mc} / 2)$$

Les informations données par les tensions aux bornes des deux résistances ne sont pas identiques. D'un point de vue normatif, les deux mesures seront réalisées et l'amplitude la plus élevée sera choisie afin de vérifier les niveaux d'émission par rapport aux spécifications (cette comparaison doit être effectuée pour chaque fréquence).

6.1.2 . La pince absorbante

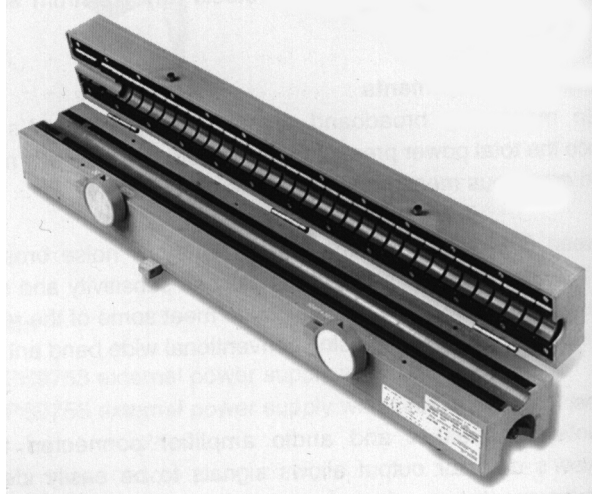


Figure 18 : Photo d'une pince absorbante

Il est généralement admis qu'au-dessus de 30MHz l'énergie perturbatrice se propage par rayonnement vers l'installation réceptrice perturbée.

L'expérience a montré que l'énergie perturbatrice était surtout rayonnée par la portion de la ligne voisine de l'appareil considéré. On a donc convenu d'appeler pouvoir perturbateur d'un tel appareil la puissance qu'il pourrait fournir à son cordon d'alimentation. Cette puissance est sensiblement égale à celle qui est fournie par l'appareil à un dispositif absorbant placé autour de ce cordon à l'endroit où cette puissance est à son maximum.

Cet équipement doit être conforme à la Publication 14 du CISPR et est utilisé pour la mesure des perturbations générées par les équipements électroménagers et les outils portatifs (norme européenne EN55014).

Le principe de la méthode est illustré à la Figure 19. Le cordon d'alimentation du perturbateur est connecté directement à la prise du réseau. La pince absorbante vient se placer autour de ce cordon d'alimentation. Il s'agit d'un transformateur de courant entourant le cordon secteur. Il donne une indication de la somme vectorielle des courants circulant dans ce dernier. Le secondaire du transformateur est constitué d'une spire de fil blindé. Les autres bagues ferrites servent à atténuer les courants dans ces derniers après la mesure.

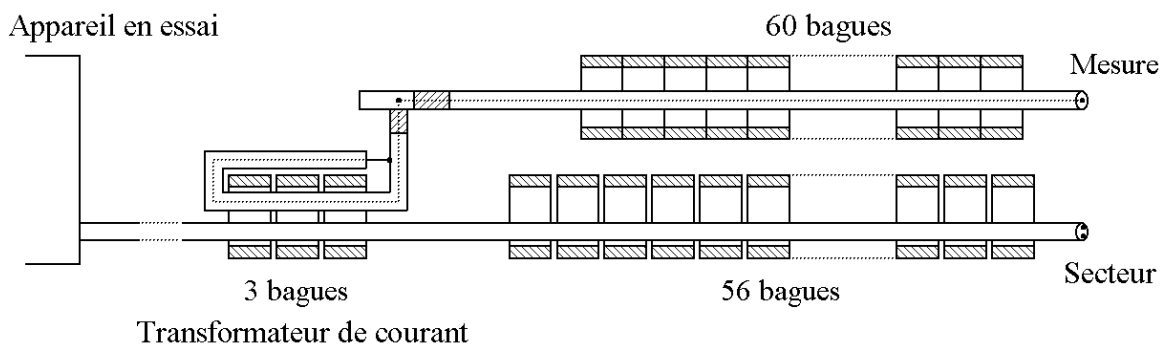


Figure 19 : Schéma de principe de la pince absorbante

La position de ce dispositif doit être réglée à chaque fréquence d'essai en le faisant glisser sur le cordon d'alimentation secteur pour obtenir le maximum en sortie de mesure.

6.1.3 . Les capteurs de courant

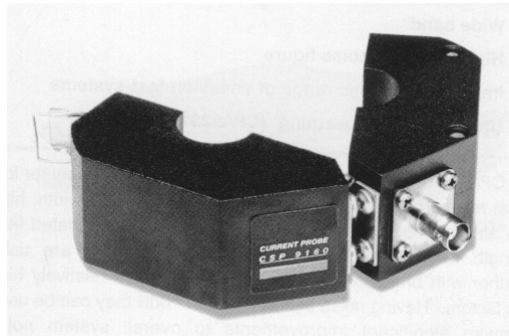


Figure 20 : Photo d'un capteur de courant

Les capteurs de courant utilisés en métrologie dans les dispositifs de conversion statique doivent posséder une bande passante très large, du continu à la centaine de MHz, être capable de mesurer des courant élevés (jusqu'à quelques kA) et être insensibles aux agressions électromagnétiques délivrées par le convertisseur testé. Ils sont également utilisés pour la mesure CEM des courant conduits. Dans ce cas, ils doivent posséder une large bande passante et être peu perturbables. L'expérience montre que les capteurs passifs, basés sur le principe du transformateur de courant, sont les mieux adaptés à ces contraintes métrologiques, dans la mesure où la connaissance de la composante continue n'est pas indispensable. Le modèle électrique à constantes localisées d'un tel dispositif est donné Figure 21.

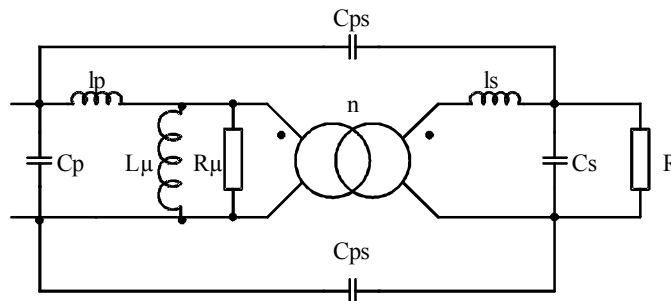


Figure 21 : Modèle du transformateur de courant

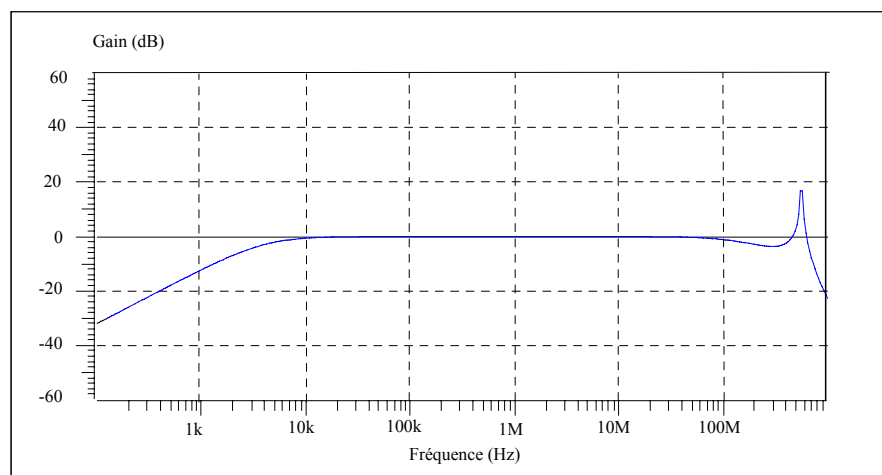


Figure 22 : Fonction de transfert du transformateur de courant obtenue par le modèle

Il permet de comprendre les performances et limitations de ce dispositif. Elles concernent la fréquence de coupure basse, la linéarité hors saturation, le fonctionnement en haute fréquence et la robustesse aux perturbations électromagnétiques.

Comportement en basse fréquence et effet de la saturation :

Le transformateur de courant possède un comportement passe-haut. En négligeant les inductances de fuites, sa fréquence de coupure basse est donnée par l'expression :

$$(1) F_L = \frac{k}{2\pi \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot n \cdot \frac{A_e}{l_e}} \quad A_e : \text{section du circuit magnétique, } n : \text{nombre de spires, } k = \frac{R}{n}$$

Si le courant mesuré possède une composante continue ou à basse fréquence (hors de sa bande passante basse), le circuit magnétique peut être saturé, ce qui se traduit par une distorsion du signal de sortie. L'expression (2) définit, en régime sinusoïdal avec composante continue, les limites de fonctionnement linéaires du dispositif en fonction des grandeurs impliquées (courant continu I_{DC} , courant alternatif maximal I_{ACmax} , fréquence ω et spécifications du circuit magnétique : B_M , μ_r , inductance spécifique A_L , longueur magnétique l_e).

$$(2) I_{AC} = (H_M \cdot l_e - I_{DC}) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\omega \cdot n^2 \cdot A_L}{R}\right)^2}$$

En régime impulsionnel de courant, la saturation du circuit magnétique est caractérisée par le produit I.T maximal. Son expression est donnée par :

$$(3) (I \cdot T)_{max} = \frac{n^2}{R} \cdot B_M \cdot A_e$$

Comportement en haute fréquence et vis-à-vis des perturbations :

Une troisième limitation apparaît pour le fonctionnement haute fréquence. Les expressions (1) et (2) montrent que pour réduire F_L et accroître I_{ACmax} , il faut augmenter le nombre de spires n et la section du circuit magnétique A_e . Mais ceci est contradictoire avec les performances haute fréquence du capteur. En effet la longueur de l'enroulement secondaire s'accroît, de même les phénomènes électrostatiques (capacités des enroulements primaires et secondaire C_p , C_s), ce qui limite la bande passante haute du capteur, comme l'indique la fonction de transfert en courant :

$$(4) \frac{V_s(p)}{I(p)} = \frac{R/n}{1 + R/n^2 \cdot (C_p + n^2 \cdot C_s) \cdot p + (l_p + l_s/n^2) \cdot C_p \cdot p^2 + R \cdot (l_p + l_s/n^2) \cdot C_p \cdot C_s \cdot p^3}$$

La fréquence de coupure haute est donnée par :

$$(5) F_H = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt[3]{R \cdot (l_p + l_s/n^2) \cdot C_p \cdot C_s}}$$

La courbe de la Figure 22 présente la fonction de transfert complète relative à ce modèle. Les effets de couplages capacitifs primaire secondaire (capacité C_p) constituent aussi une limitation en haute fréquence, le capteur se comportant comme un filtre passe-haut. Il en résulte la

possibilité de circulation d'un courant de mode commun, préjudiciable à la mesure, comme représenté Figure 23. Le blindage entre primaire et secondaire du dispositif permet de limiter ces effets. Enfin, le câble de liaison entre le capteur et l'appareil de mesure peut être influencé par des champs perturbateurs haute fréquence et par les courants de mode commun, ce qui se traduit aussi par la dégradation de la mesure [1-3]. Afin de minimiser ces problèmes, il est souhaitable d'insérer le capteur sur un conducteur à potentiel peu variable pour limiter la circulation de courants de mode commun et de réduire autant que possible l'impédance de blindage des câbles.

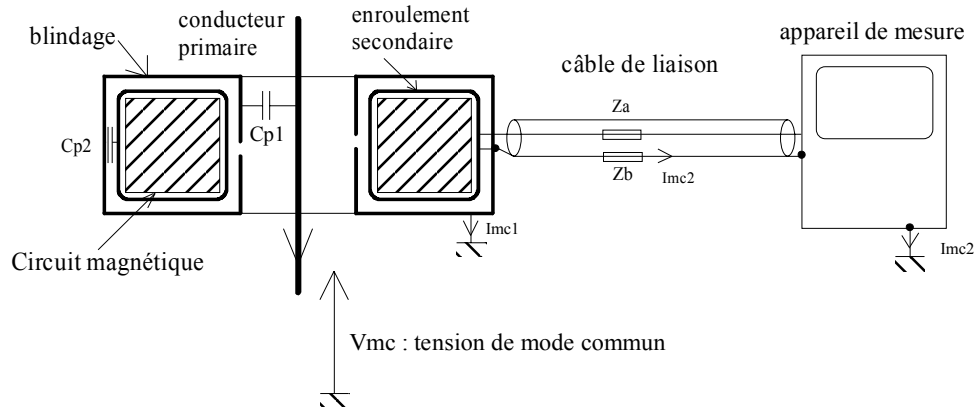


Figure 23 : Réduction des perturbations du capteur par blindage

Capteurs passifs disponibles et leurs spécifications :

Les capteurs existants actuellement sur le marché sont limités en fréquence à 4 ou 5 décades, soit vers les basses fréquences (10Hz-1MHz), soit vers les hautes fréquences (10kHz-1GHz). La courbe de la Figure 24 précise l'évolution de la fréquence de coupure haute avec le calibre en courant, constatée sur les produits existants.

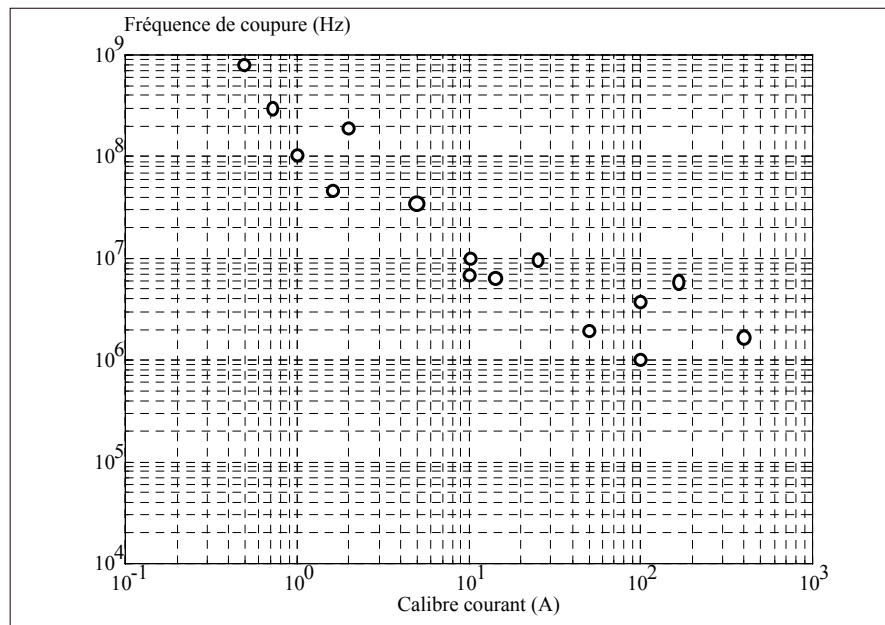


Figure 24 : Fréquence de coupure haute des transformateurs de courant en fonction du calibre (d'après doc. Pearson)

Les spécifications à prendre en compte pour un choix de capteur sont :

- le courant maximal pour différentes fréquences, généralement 50Hz et à la fréquence maximale d'utilisation
- la bande passante à -3dB
- le produit $(I.T)_{\max}$ qui traduit la saturation lors de l'application d'une impulsion de courant
- la composante continue maximale avant saturation
- la valeur de la résistance de charge
- l'impédance d'insertion
- les données géométriques et physiques (diamètre du trou de passage, encombrement, masse, etc..)

6.2 Mesures des perturbations rayonnées ; Antennes [1-4, 1-5, 1-6, 1-7]

Les antennes sont employées pour les mesures en champs proches (c'est à dire pour une distance $d < \frac{\lambda}{2\pi}$ ou lointain $d > \frac{\lambda}{2\pi}$ (λ est la longueur d'onde du signal perturbateur). Dans ce dernier cas, on considère que les ondes sont planes. L'impédance d'onde définie par le rapport $\frac{E}{H}$ est constante et vaut 377Ω . Il suffit donc de mesurer une des deux composantes du champ électromagnétique. Les antennes pour les mesures en champ lointain sont caractérisées par :

- le diagramme de rayonnement : c'est la mesure de l'intensité du champ E émis en fonction de deux angles définissant les coordonnées sphériques de l'espace.
- le gain G, il est défini relativement à une antenne isotrope rayonnant la même puissance :
- $G =$ densité de puissance maximale rayonnée dans une direction spécifique/densité de puissance maximale rayonnées de façon uniforme dans toutes les directions de l'espace
- Le gain d'une antenne est variable avec la fréquence, la connaissance de cette caractéristique doit être établie par gamme de fréquence.
- le facteur d'antenne F_a . C'est le rapport entre le champ E et la tension U mesurée aux bornes de l'antenne, il varie également avec la fréquence. Il est établi à une distance précisément définie et est généralement exprimé en dB : $F_a = 20 \cdot \text{Log} \frac{E}{U}$.

La nature des antennes est adaptée à la bande de fréquence et à la nature du champ que l'on veut mesurer. Ses caractéristiques doivent être aussi constantes que possible dans la bande de fréquence considérée. La référence [1-8] définit les caractéristiques des antennes utilisées en mesure de champ. Citons quelques modèles d'usage courant.

Bande A (10kHz-150kHz), champ H : les observations montrent que c'est le champ magnétique qui est responsable des perturbations. L'antenne est de type boucle dans un cadre blindé électriquement, elle doit s'inscrire dans un carré de 0.6m.

Bande B (150kHz-30MHz),

champ H : on utilise le même dispositif qu'en bande A

Champ E : on utilise une antenne fouet verticale de 1m pour une distance de mesure $d < 10m$.

Bande C (30-300MHz), champ E : on utilise un doublet équilibré de longueur $\frac{\lambda}{2}$ pour F=80MHz (λ correspondant à F=80MHz soit 3.75m). Sa symétrie est telle que le niveau mesuré varie d'au moins 20dB lorsque son orientation passe de la direction de polarisation parallèle à la direction de polarisation transverse. Il est possible d'utiliser des antennes doublets courts (mais leur longueur est limitée à $\frac{\lambda}{10}$), moyennant la connaissance de leur facteur d'antenne. Elles sont cependant moins sensibles. Un modèle fréquemment utilisé est l'antenne bi-conique (Figure 25) qui a l'intérêt de présenter une large bande passante.

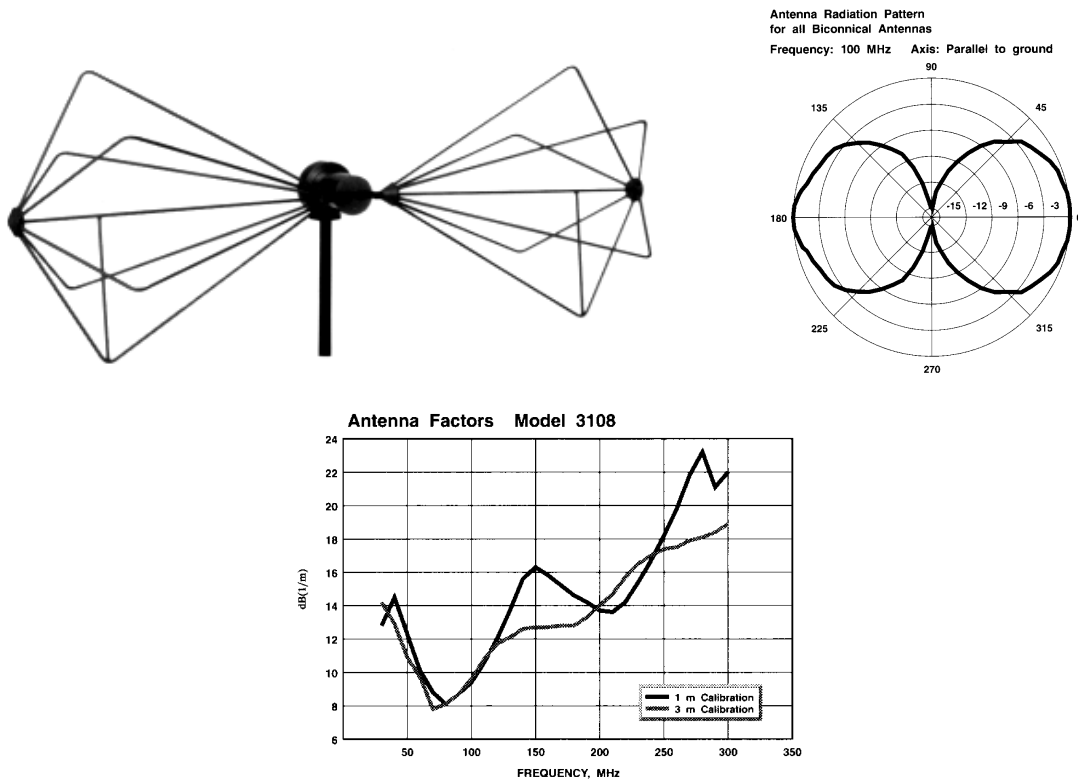


Figure 25 : Antenne bi-conique et la courbe de facteur d'antenne (d'après doc. EMCO)

Bande D (300MHz-1000MHz) : l'antenne doit être polarisée dans un plan. On utilise des antennes plus complexes que le doublet, comme par exemple l'antenne log-périodique, constituée d'éléments couplés dont les fréquences d'accord sont en progression géométrique, ce qui lui confère une bande passante large. Un exemple est donné Figure 26.

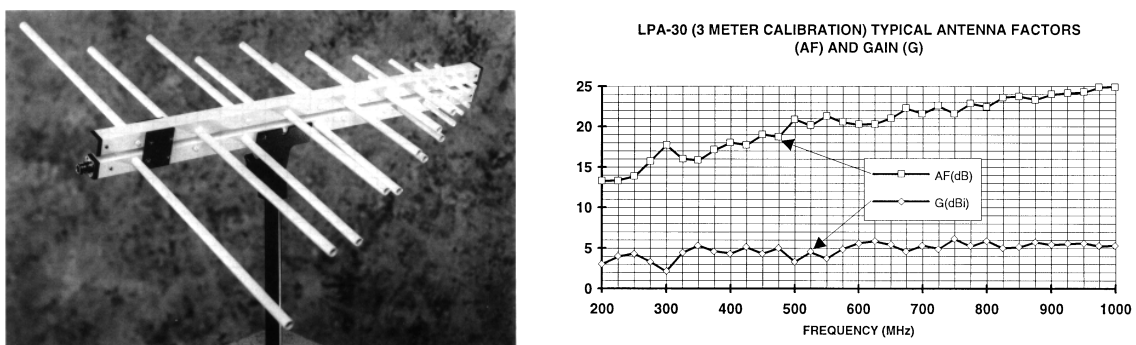


Figure 26 : Antenne log-périodique et son facteur d'antenne (d'après doc. Electro-Metrics)

La disposition de l'antenne est importante. Les mesures doivent être effectuées hors de toutes surfaces réfléchissantes. La hauteur par rapport au sol et la distance par rapport au perturbateur doivent être connus. Les distances de mesures préférentielles sont 3, 10, 30m etc...On pourra consulter [1-2] pour les recommandations précises concernant les méthodes de mesure rayonnées.

6.3 L'analyseur de spectre

6.3.1 Principe

La fonction de l'analyseur de spectre est d'extraire les informations contenues dans un signal pour les représenter dans le domaine fréquence. L'analyseur de spectre est donc au domaine fréquence ce qu'est l'oscilloscope au domaine temps. C'est l'appareil préférentiellement employé pour les mesures en CEM. Il peut être utilisé pour analyser les propriétés des signaux de perturbation ou pour effectuer des mesures selon des procédures normalisées. Sa structure simplifiée est représentée Figure 27.

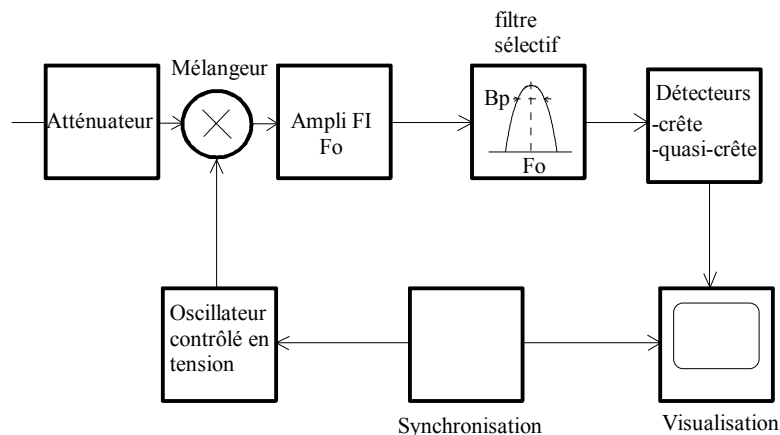


Figure 27 : Principe d'un analyseur de spectre

Le signal incident se mélange avec celui de l'oscillateur local (OL). Le signal ainsi modulé traverse le filtre intermédiaire (FI) qui est un filtre passe bande à fréquence centrale fixe et de largeur de bande réglable. Le signal résultant traverse alors le détecteur. Trois modes de détection sont employés pour les mesures de CEM : la détection Crête, Moyenne, Quasi-crête.

6.3.2 Caractéristiques fondamentales

Les principaux points à prendre en considération dans le cas des mesures CEM sont :

- la résolution. C'est la bande passante du filtre d'analyse. Elle est va déterminer le fait que les mesures sont effectuées en bande étroite (une seule harmonique du signal dans la bande de résolution) ou large (plusieurs harmoniques dans la bande passante du filtre), comme représenté Figure 28 dans le cas d'un signal perturbateur répétitif, possédant donc un spectre de raies.

Les signaux impulsionnels ou à très faible récurrence sont toujours mesurés en bande large. Les normes définissent la résolution selon la bande de fréquence mesurée, comme indiqué sur le Tableau 6.

Gamme de fréquence	A	B	C et D
Bande passante (-6dB)	200Hz	9kHz	120kHz

Tableau 6 : Bande de résolution normalisées pour les mesures CEM

- le mode de détection. Les principaux modes de détection sont les modes crête, quasi-crête et moyen. Les normes recommandent la détection quasi-crête car elle est bien adaptée à la quantification de la gêne acoustique qui résulte de perturbations radiofréquences. Le niveau de sortie du détecteur quasi-crête est variable avec la fréquence du perturbateur. Ce mode de détection génère des temps de mesure beaucoup plus long qu'en détection crête. La détection de valeur moyenne fournit un niveau proportionnel à la fréquence du signal. La Figure 29 indique les niveaux fournis par ces trois détecteurs en fonction de la fréquence du signal de perturbation et pour les spécifications de réglage normalisées.

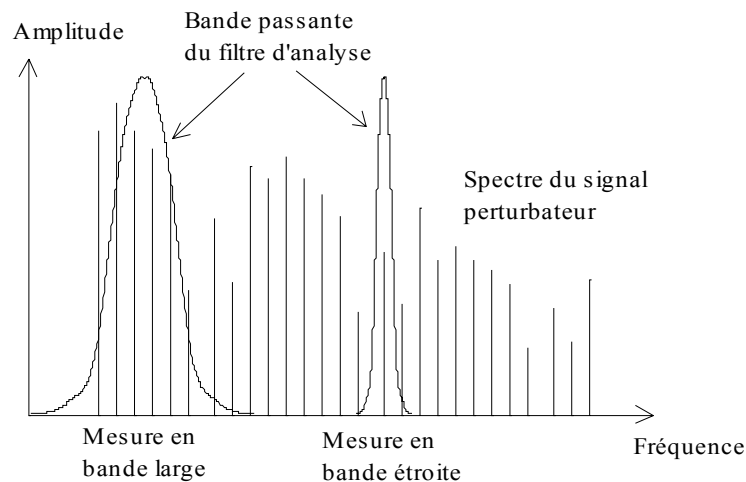


Figure 28 : Signal mesuré en bande étroite ou large

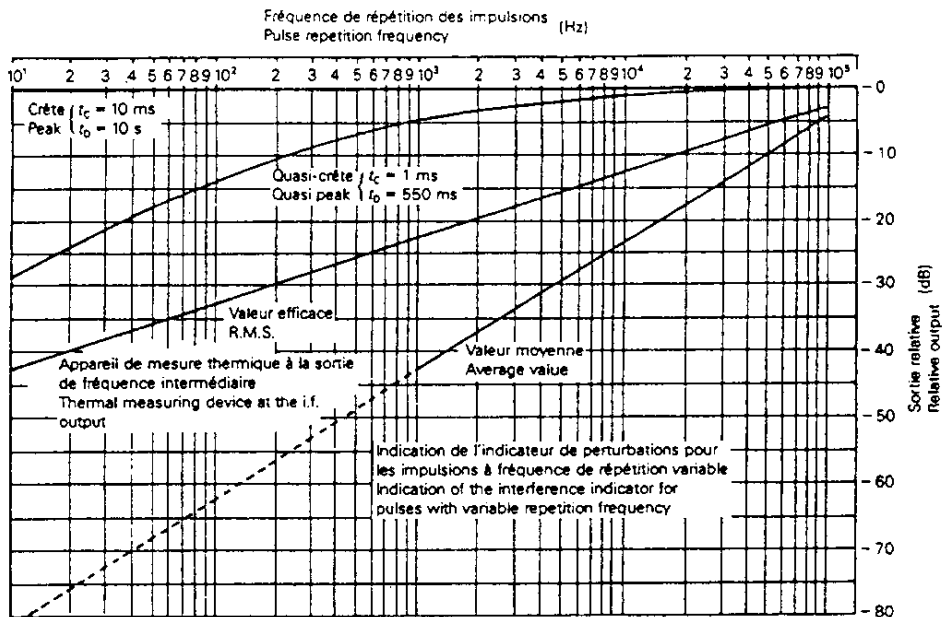


Figure 29 : Niveau de sortie des différents détecteurs en fonction de la fréquence du perturbateur

Il résulte de ces considérations que la mesure d'un signal peut présenter de fortes variations selon qu'il est en bande étroite ou large et selon le mode de détection.

7 LES NORMES

Deux principales catégories de normes existent : celles qui définissent les niveaux tolérés d'émission conduite ou rayonnée, et celles qui définissent la susceptibilité électromagnétique d'un équipement, à savoir sa tolérance aux agressions électromagnétiques. L'objectif principal des normes est de caractériser aussi précisément que possible l'environnement de mesure en conduit et en rayonné (mesure en espace libre, en chambre anéchoïque, support des appareils), les conditions de mesure (longueur des câbles, distance des antennes, hauteur, angle, etc.) , la calibration et le réglage des appareils de mesure utilisés, ceci dans le but d'effectuer des mesures reproductibles et fiables. Depuis le 01/01/1996, tout équipement électrique doit obligatoirement satisfaire à une ou plusieurs normes CEM liée à sa catégorie. Historiquement les normes ont été établies pour la protection de la radiodiffusion [1-9], mais ce champ est aujourd'hui étendu, comme en témoignent les normes de susceptibilité [1-10] : robustesse de telle catégorie d'équipement aux décharges électrostatiques, aux courants induits, aux champs électromagnétiques, à l'IEMN (impulsion électromagnétique nucléaire).

8 BIBLIOGRAPHIE

[1-1] P. Degauque , J. Hamelin, "Compatibilité électromagnétique" édition Dunod 1990.

[1-2] Recommandations du Comité International Spécial des Perturbations Radio-électriques CISPR 16.

[1-3] E. Labouré, F. Costa, F. Forest, "Current measurement in static converters and realization of a high frequency passive current probe (50A-300MHz)", actes du congrès EPE93, Brighton septembre 1993, pp.4/478-4/483.

[1-4 à 1-6] Articles E 6140, E6142, E3280 du traité d'électronique des Techniques de l'Ingénieur.

[1-7] R. Badoual, Les Micro-ondes, édition Masson, 1984.

[1-8] Recommandations du Comité International Spécial des Perturbations Radio-électriques CISPR 11.

[1-9] Recommandations du Comité International Spécial des Perturbations Radio-électriques CISPR 20.

[1-10] Normes CEI 1000-4-1 (généralités) , CEI 1000-4-8 (champs magnétiques secteur), CEI 1000-4-9 (champs magnétiques impulsionnels), CEI 1000-4-10 (champs magnétiques 1Hz-1MHz), CEI 801-3 (champs électromagnétiques de fréquence radio), CEI 801-5 (impulsions électromagnétiques), CEI 801-6 (perturbations de conduction dues aux champs radioélectriques).