

ÉPREUVE COMMUNE DE TIPE - Partie D

TITRE :

Pollutions Electromagnétiques

Temps de préparation :2 h 15 minutes

Temps de présentation devant le jury :10 minutes

Entretien avec le jury :10 minutes

GUIDE POUR LE CANDIDAT :

Le dossier ci-joint comporte au total : 12 pages

Document principal (12 pages) : Dossier sur les pollutions électromagnétiques

Travail **suggéré** au candidat :

A partir de l'étude du dossier proposé, il peut être intéressant :

- de dégager la problématique générale de la compatibilité électromagnétique (CEM) ;
- de donner un ou deux exemples de sources de perturbations et de modes de couplage, de les modéliser (à l'aide de circuits équivalents par exemple), et de donner des moyens de mesure et de limitation des effets perturbateurs.

CONSEILS GENERAUX POUR LA PREPARATION DE L'EPREUVE :

* Lisez le dossier en entier dans un temps raisonnable.

* Réservez du temps pour préparer l'exposé devant le jury.

- Vous pouvez écrire sur le présent dossier, le surligner, le découper ... mais tout sera à remettre au jury en fin d'oral.
- En fin de préparation, rassemblez et ordonnez soigneusement TOUS les documents (transparents, etc.) dont vous comptez vous servir pendant l'oral, ainsi que le dossier, les transparents et les brouillons utilisés pendant la préparation. En entrant dans la salle d'oral, vous devez être prêts à débiter votre exposé.
- A la fin de l'oral, vous devez remettre au jury le présent dossier, les transparents et les brouillons utilisés pour cette partie de l'oral, ainsi que TOUS les transparents et autres documents présentés pendant votre prestation.

Pollutions Electromagnétiques

Le développement durable nécessite de limiter les pollutions de toutes natures. Les pollutions électromagnétiques, si elles n'ont pas d'existence matérielle, ont cependant de nombreux effets.

Le dossier va traiter de la Compatibilité Electromagnétiques (CEM). Il commencera par donner des exemples de dysfonctionnement de systèmes électroniques. Il traitera ensuite des sources de pollutions, des modes de couplage (rayonné, conduit), et de leurs effets. Le sujet se terminera sur l'étude d'une alimentation à découpage de PC. Des modèles simplifiés permettront de simuler les courants hautes fréquences absorbés par l'alimentation, leur mesure et leur diminution à l'aide de filtres CEM.

Problématique de la pollution électromagnétique

Nous connaissons tous les problèmes de pollutions de l'environnement causés par les résidus solides, liquides et gazeux. Nous avons conscience de ces polluants à travers nos sens. D'une façon semblable, la contamination de notre environnement avec l'énergie électromagnétique est en augmentation constante. Les êtres humains n'ayant pas d'organe de perception pour une telle contamination, ils ne peuvent s'en rendre compte. Ceux qui en pâtissent, ce sont les systèmes électroniques développés par l'homme.

Exemples de dysfonctionnement de systèmes

Les effets de la pollution électromagnétique vont de désagréments bénins, comme des crachements lors de la réception de la radio, jusqu'à des accidents mortels dans le cas de perturbations de systèmes automatiques critiques pour la sécurité.

La suite de ce paragraphe donne quelques exemples d'incompatibilité électromagnétique :

- En Allemagne, une certaine marque de voiture cale sur une portion d'autoroute en face d'un émetteur radio de forte puissance. Finalement, il a fallu blinder cette section d'autoroute avec du grillage ;
- Sur un autre type de voiture, le blocage centralisé des portes et le toit ouvrant électrique sont actionnés par le téléphone portable utilisé à bord ;

- 35
- Un briquet piézo-électrique actionné près du coffret de commande de la barrière d'un parc de stationnement provoquait l'ouverture de la barrière et permettait aux conducteurs de sortir sans payer ;
 - Des tiroirs caisses électroniques utilisées sur des moquettes épaisses par des vendeurs habillés en synthétique étaient affectés par des blocages, des données fausses et des
- 40
- ouvertures intempestives ;
 - La descente des pantographes de locomotives interférait avec un nouveau système de commande de signaux ;
 - Un système radar qui aurait pu détecter un missile qui a coulé un bateau avait été arrêté parce qu'il perturbait le système de communication par satellite.



Figure n° 1 – *Interdiction des téléphones portables dans les hôpitaux*

Les téléphones cellulaires n'ont pas tardé, par leur prolifération, à devenir une menace sérieuse pour la compatibilité électromagnétique. Ils ont donc été rapidement interdits d'utilisation (ainsi

50

que certains autres appareils électroniques) à bord des avions ou dans les enceintes d'hôpitaux (**Figure n° 1**). Dans ces domaines, on a pu ainsi relever :

- Un avion n'était pas sur la trajectoire indiquée sur les instruments de bord. Le contrôle aérien a dû remettre les équipages sur la bonne route. Le système de bord a repris son fonctionnement normal une fois le générateur de parasites arrêté ;

55

- Certaines opérations d'électro-chirurgie corrompaient l'affichage d'un moniteur de gaz d'anesthésie ;
- Des fauteuils roulants motorisés quittaient le trottoir spontanément lors du passage à proximité d'émetteurs radio (police, pompiers, CB).

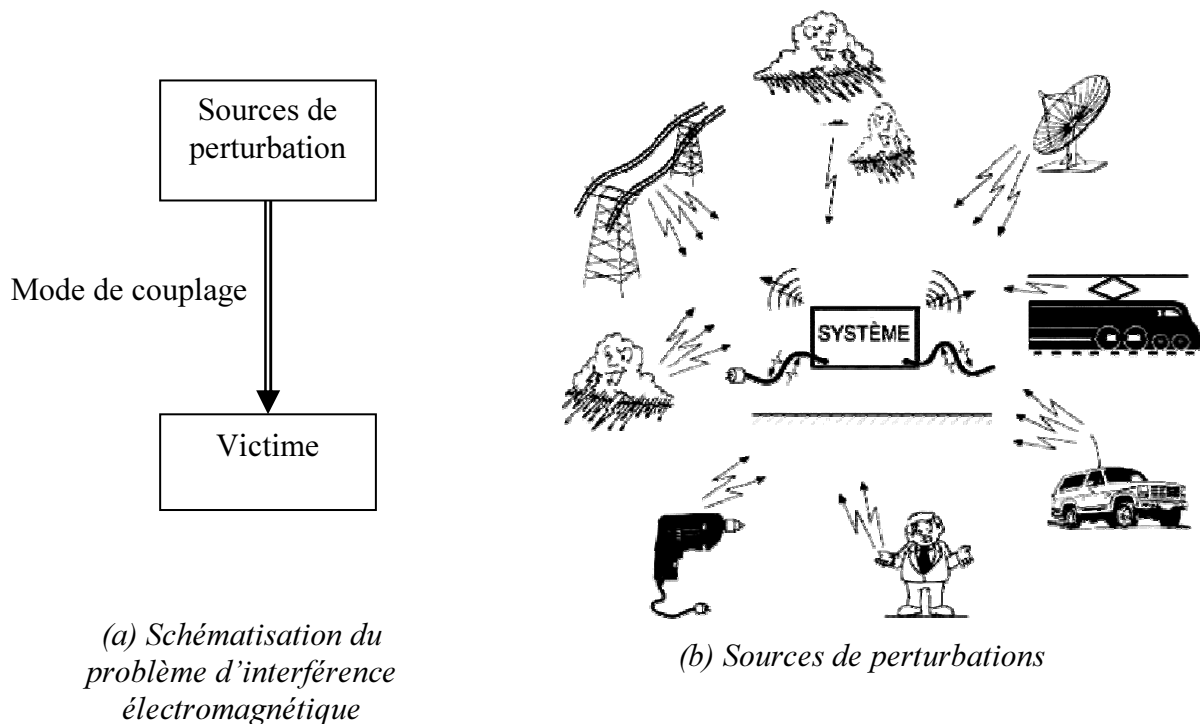
60

Notion de sources et de victimes

Dans l'ensemble de ces exemples on peut distinguer un certain nombre de points communs (**Figure n° 2 (a)**). Il existe toujours :

65

- Une source de perturbation : dispositif générant des signaux électromagnétiques polluant ;
- Une victime : système électronique subissant l'agression de la source de perturbation et présentant un dysfonctionnement ;
- Un mode de couplage : support ou mode de transfert des perturbations.



70

Figure n° 2 - *Notion de source et de victime*

Les sources d'interférence (**Figure n° 2 (b)**) peuvent être :

- Les coupe-circuits électromécaniques, la mise sous courant, les branchements des alimentations ;
- Les composants électroniques fonctionnant en commutation (numérique, alimentations) ;

75

- Les moteurs ;
- Les fours à hautes-fréquences ;
- Les décharges électrostatiques à partir d'un objet ou d'une personne ;
- Les effets de la foudre ;
- Les explosions nucléaires ;
- Les sources de rayonnement radiofréquence (téléphone portables, stations de radiodiffusion, radar, ...)
- Etc., ...

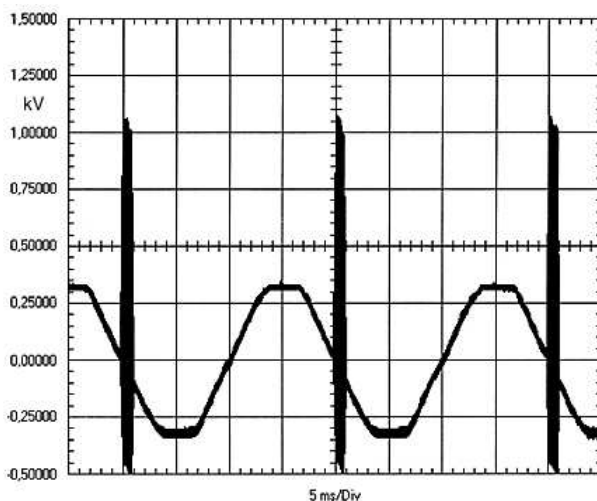
80

85

Ces sources de perturbation ont pour point commun de générer des tensions, des courants ou des champs électromagnétiques rapidement variables. Ces variations brutales ont la particularité de bien se transmettre aux circuits électroniques victimes. On peut les caractériser et les mesurer (**Figure n° 3**) :

90

- temporellement à l'aide d'appareils des mesures adaptés : sonde de tension, de courant ou de champs, et d'oscilloscopes ;
- fréquentiellement à l'aide de sondes, d'antennes et d'analyseurs de spectre.



95

Figure n° 3 – Exemple d'un signal perturbateur (tension EDF polluée)

100

Des normes ont été mises en place afin de mesurer et de limiter les émissions électromagnétiques des produits commercialisés. Elles régissent notamment le spectre d'émission des produits en mode conduit (transmis par les câbles ou les pistes conducteurs) ou rayonné (transmis par des ondes électromagnétiques). Les sources perturbatrices les plus fréquemment rencontrées telles que les

régulateurs de tension, les alimentations transistorisées, les systèmes de traitement de données, ... ont un spectre d'interférence compris entre 10 kHz et 30 MHz en mode conduit et entre 30 MHz et 1 GHz en mode rayonné. La **Figure n° 5** donne les limites d'émissions données par ces normes.

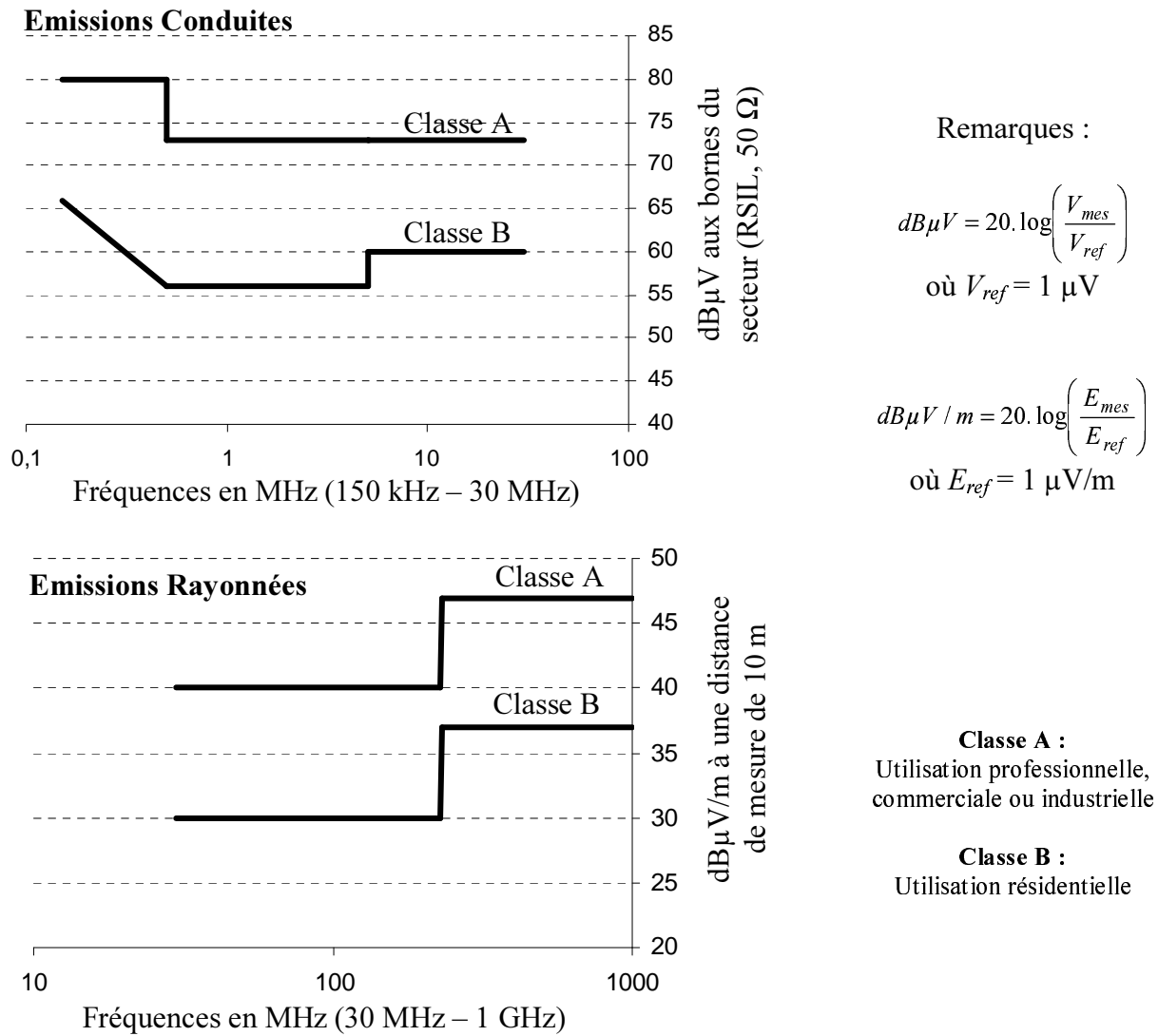


Figure n° 5 – Limites d'émissions

Les victimes voient leur fonctionnement perturbé par les ces signaux polluants. Les produits commercialisés doivent résister à des niveaux donnés de perturbations. Ils doivent donc pouvoir se comporter correctement lors de tests de susceptibilité électromagnétiques. Ces derniers peuvent prendre les formes suivantes :

- Injection de courants parasites dans les câbles d'alimentation de l'appareil sous test à l'aide de générateur de transitoire via un réseau de couplage capacitif ;

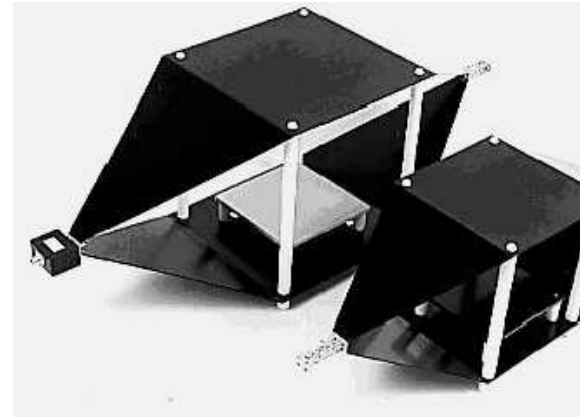
115

- Application de champs électromagnétiques à l'aide d'antennes ou de cellules TEM (électromagnétique transverse) ;
- Simulation de décharges électrostatiques (ESD) à l'aide de pistolets hautes tensions (plusieurs kV).

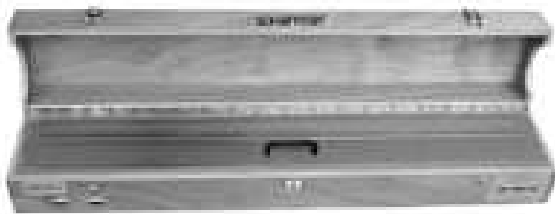
120



Antenne dans chambre anéchoïque



Cellule TEM



Réseau de couplage capacitif



Pistolet ESD

Figure n° 6 – Moyens de tests de susceptibilités

Modes de couplage

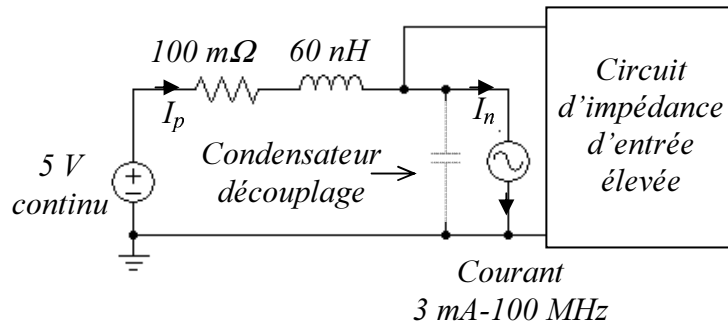
125 Les perturbations peuvent se transmettre au sein d'un même système ou d'une même carte électronique, ou encore entre différents systèmes. On va voir ici sur quelques exemples comment les harmoniques générés par un circuit peuvent se transmettre à d'autres circuits en mode conduit :

- **Couplage par impédance commune :**

130 L'utilisation de dispositifs numériques ou de puissance à commutation rapide peut perturber les circuits voisins. Cette perturbation peut être transmise par la chute de tension dans la

135

ligne d'alimentation commune au dispositif polluant et aux circuits victimes. Sur la **Figure n° 7**, on assimile le circuit numérique à une source de courant sinusoïdal haute fréquence. Lorsque le condensateur de découplage n'est pas présent, l'impédance de la piste d'alimentation représentée ici par une résistance ($100\text{ m}\Omega$) et une inductance (60 nH) génère une chute de tension partagée par les circuits voisins qui peuvent en être perturbés. Pour limiter ce phénomène, on peut ajouter, à proximité du circuit numérique polluant, un condensateur de découplage.



140

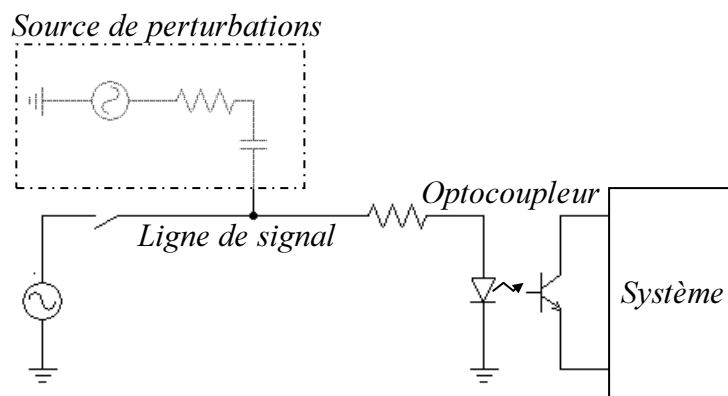
Figure n° 7 – Couplage par impédance commune

- **Couplage capacitif :**

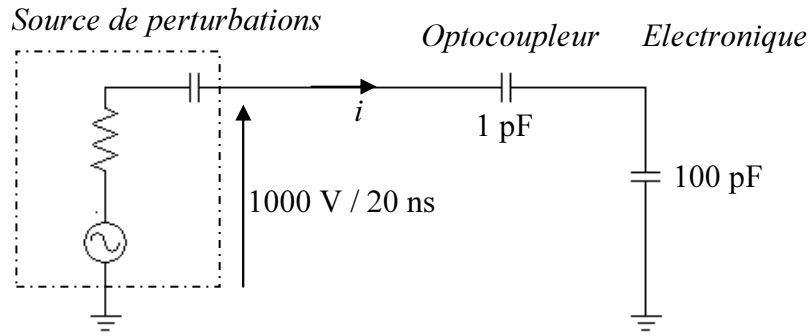
145

Un système de réglage d'un processus chimique était soumis à des erreurs sporadiques en dépit du fait que toutes les lignes de signal étaient alimentées par l'intermédiaire d'optocoupleurs de qualité. Les impulsions perturbatrices provenaient d'un coupe-circuit hautement inductif que l'on commutait près de la ligne de signal. Les impulsions perturbatrices générées sur la ligne présentaient une amplitude de 1000 V max avec un temps de montée de 20 ns. Le schéma équivalent de ce couplage est donné **Figure n° 8**. Le courant d'interférence qui traverse l'optocoupleur via une capacité de couplage de 1 pF vaut environ 50 mA et est largement suffisant pour perturber un circuit TTL.

150



(a) Perturbation et couplage capacitif



(b) Circuit équivalent

Figure n° 8 – Couplage capacitif

155

• **Couplage inductif :**

Pour relier des cartes électroniques entre elles, on peut être amené à utiliser des câbles plats. La configuration la moins chère (minimisant le nombre de conducteurs) est d'utiliser un seul conducteur de masse pour tout le câble comme représenté sur la **Figure n° 9**. On va s'intéresser au couplage inductif qui peut apparaître dans ces conditions entre les lignes 1 et 2 du câble plat. Seule la ligne 1 est alimentée par une source de tension. Les deux lignes peuvent se modéliser par schéma équivalent de la **Figure n° 9**. Le calcul de la fonction de transfert I_2/I_1 permet de voir que les composantes hautes fréquences du courant de la ligne 1 sont transmis à la ligne 2.

160

165

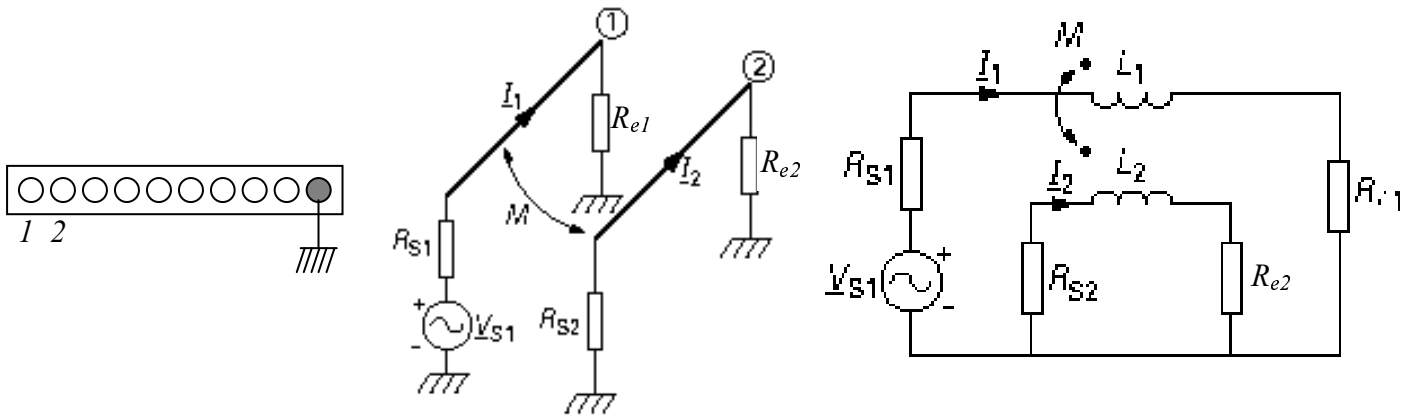


Figure n° 9 – Câble plat et couplage inductif

Etude de cas : perturbations, mesure et filtrage

On va s'intéresser ici à un dispositif de petite puissance (courant efficace inférieur à 1 A) alimenté par une alimentation à découpage. Une alimentation à découpage comme celle de la **Figure n° 10** sert d'alimentation électrique dans les téléviseurs, ordinateurs, ou lecteurs DVD. Elles peuvent

170

empêcher le bon fonctionnement des appareils voisins. Dans la suite du dossier, on va étudier les harmoniques qui peuvent être générées par des signaux à fronts raides, leur mesure et leur filtrage.

175

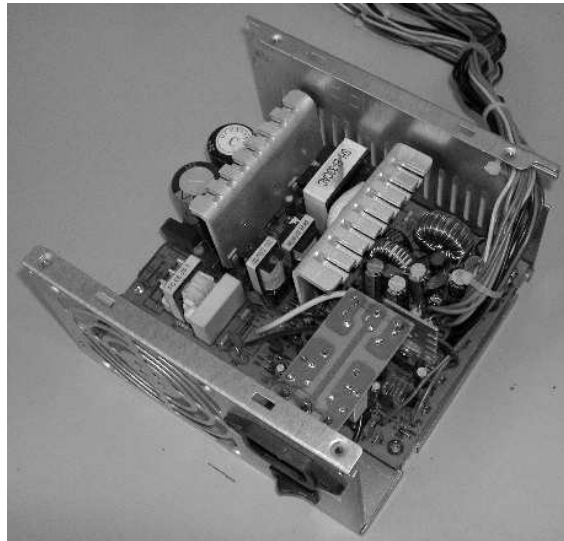
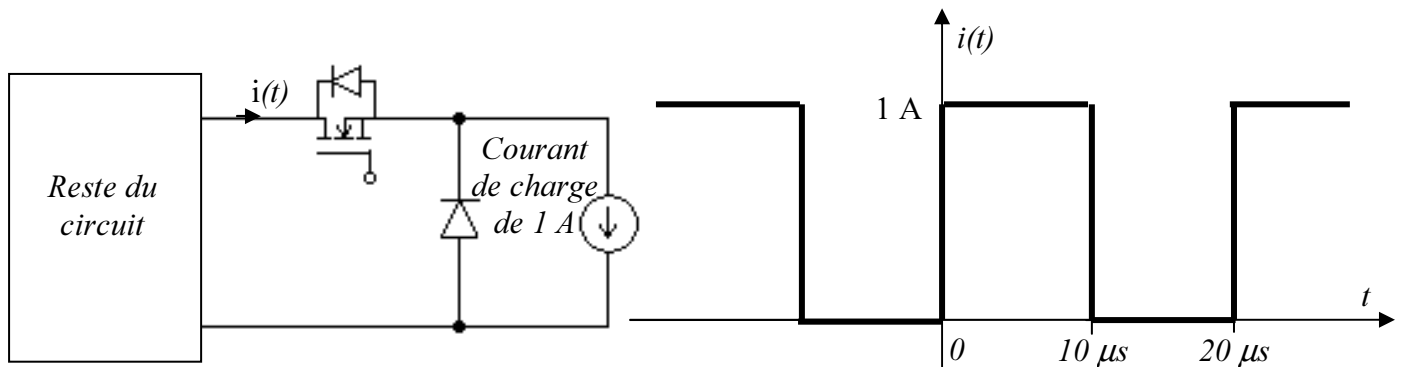


Figure n° 10 – Alimentation à découpage

Harmoniques d'une alimentation à découpage

180

Les normes CEM (Compatibilité ElectroMagnétique) s'appliquent à la bande de fréquence 150 kHz-30 MHz. Une alimentation à découpage contient essentiellement une cellule de commutation proche de celle d'un hacheur (transistor MOS + Diode) et absorbe donc des créneaux de courant (**Figure n° 11**).



185

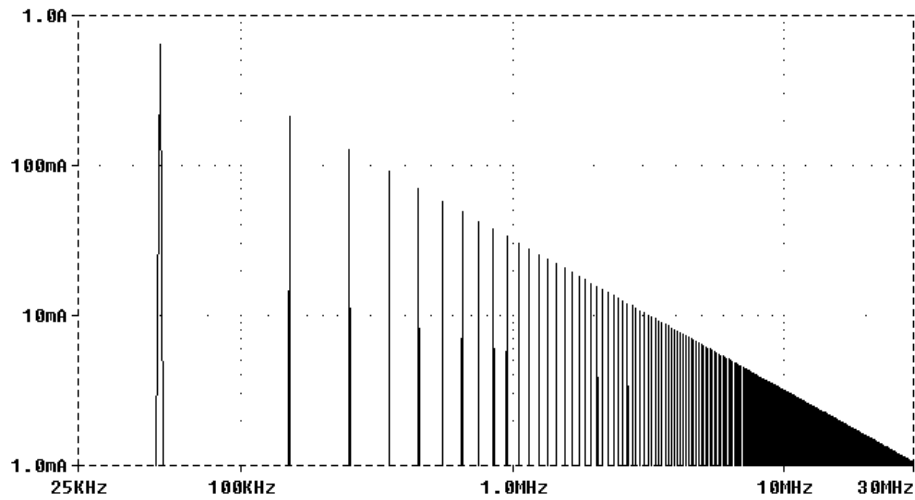
Figure n° 11 – Hacheur et courant absorbé

Sur l'exemple de la **Figure n° 11**, le hacheur absorbe un courant $i(t)$ rectangulaire 0-1 A, de rapport cyclique 0,5. Le courant $i(t)$ est périodique et peut donc s'écrire sous la forme d'une série de Fourier :

190

$$i(t) = \langle i \rangle + \sum_n A_n \cdot \cos(n\omega t) + B_n \cdot \sin(n\omega t)$$

Le spectre correspondant à cette décomposition est représenté **Figure n° 12**.



195 **Figure n° 12** – *Spectre d'un créneau de courant*

Les commutations ne sont en réalité pas instantanées. Le courant peut présenter des pentes entre 0 et 1 A d'une durée de 100 ns. Le spectre du courant absorbé est modifié en haute fréquence comme le représente la **Figure n° 13**. Dans les deux cas on peut remarquer que de tels courants présentent un nombre important d'harmoniques d'amplitudes non négligeables entre 150 kHz et 30 MHz. Les alimentations présentent des condensateurs de découplages qui permettent d'éliminer en partie ces harmoniques de courants. Une partie de ces dernières se retrouvent cependant sur le câble d'alimentation EDF et peut polluer et parasiter les systèmes électroniques voisins.

200

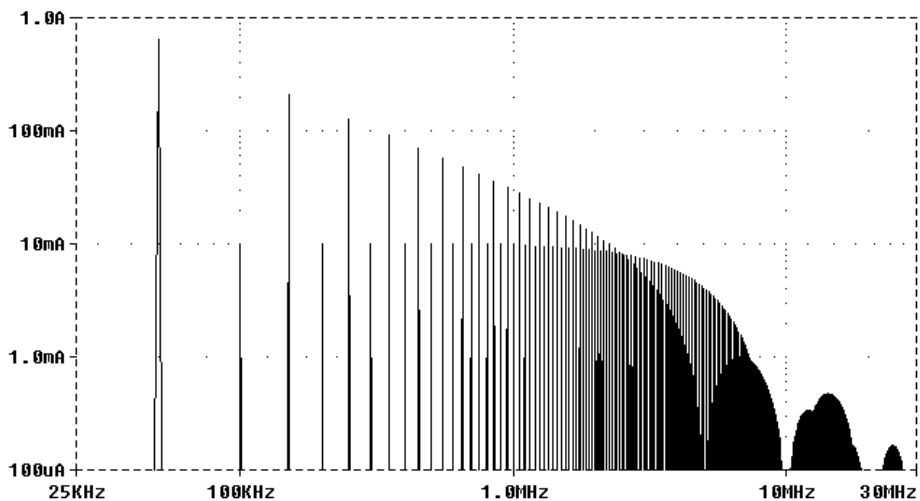


Figure n° 13 – *Spectre d'un créneau trapézoïdal de courant*

205

Mesures de perturbations par RSIL

Avant la vente d'un appareil contenant une telle alimentation, des mesures doivent être effectuées afin de s'assurer que ses harmoniques ne dépassent pas des amplitudes critiques et respectent les normes de compatibilité électromagnétique (**Figure n° 5** – émissions conduites). La mesure réelle passe par un Réseau Stabilisé d'Impédance de Ligne (RSIL) représenté sur la **Figure n° 14**. 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 l'équipement sous test. Il doit également permettre de mesurer les perturbations hautes fréquences de l'appareil sous test aux bornes d'une résistance de mesure. Cette résistance correspond à l'impédance d'entrée (50Ω) d'un analyseur de spectre.

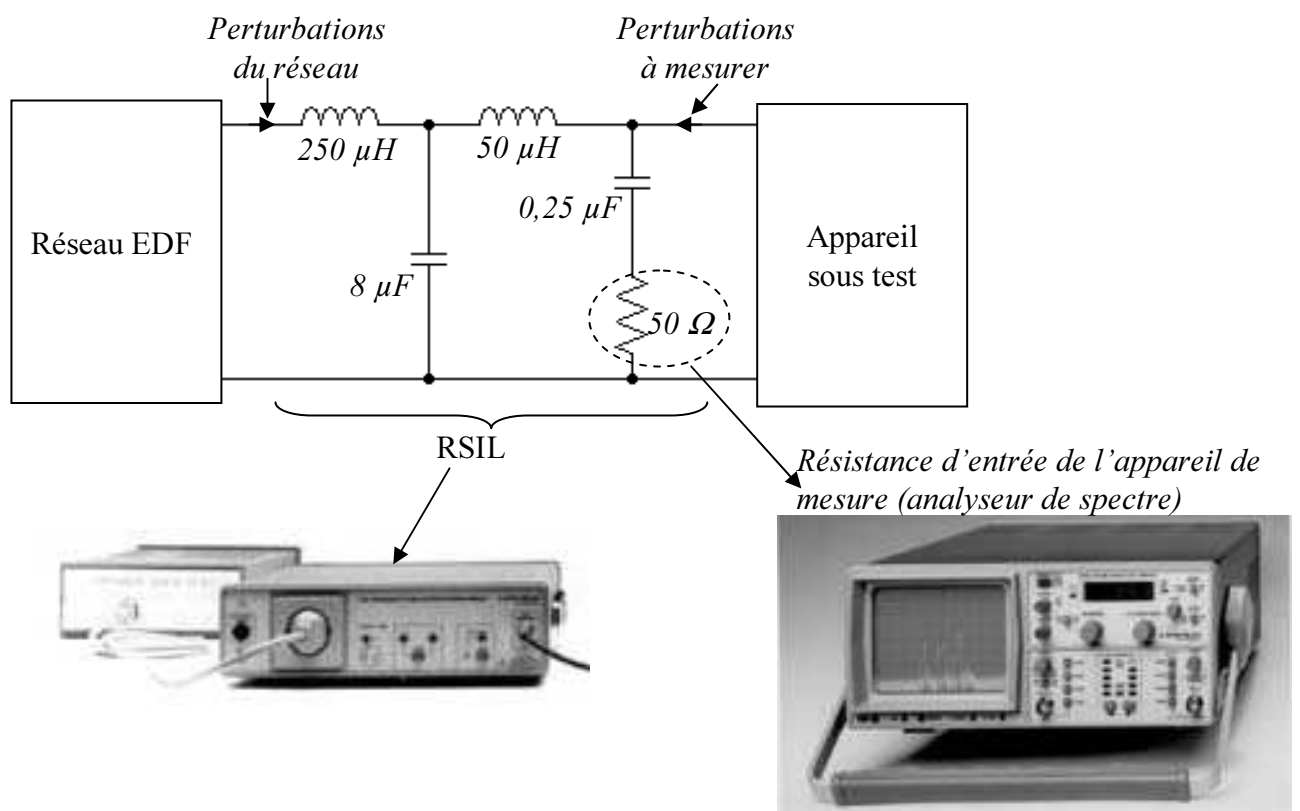


Figure n° 14 – schéma de principe d'un RSIL

220

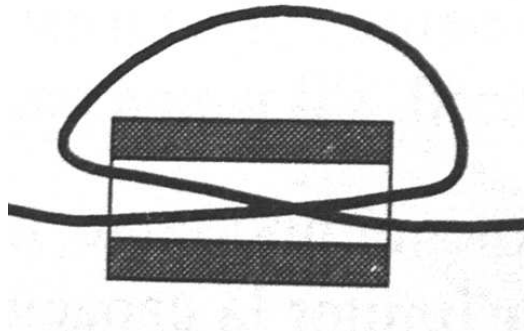
Filtres CEM

Lorsqu'un dispositif ne respecte pas les normes CEM, ce qui est très souvent le cas, il est possible de lui adjoindre un filtre placé au niveau de l'alimentation secteur. La **Figure n° 10** donne deux

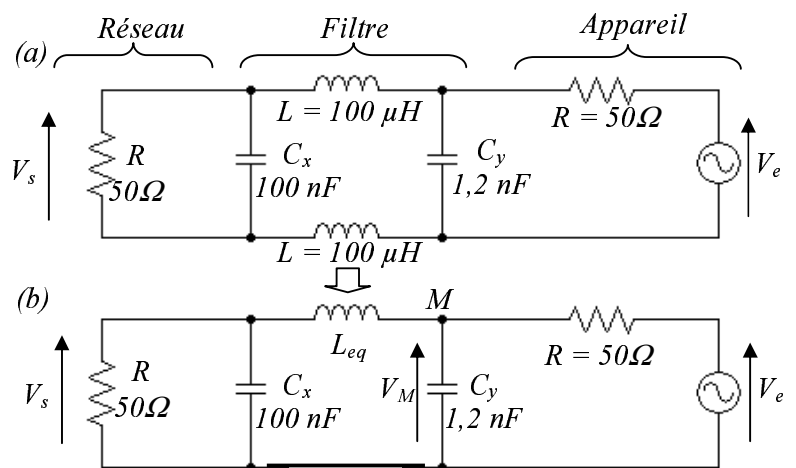
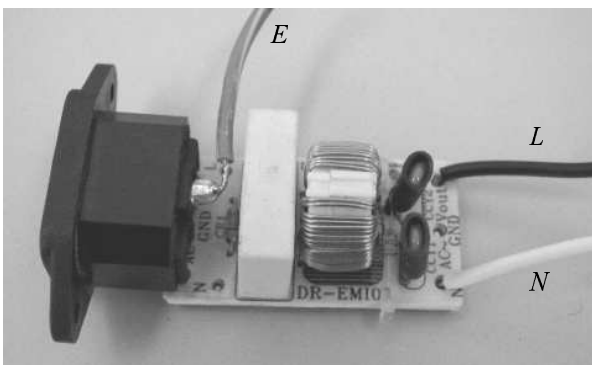
225 exemples de filtres CEM :

- La Figure (a) correspond a un tore de ferrite rajouté sur un câble d'alimentation qui a pour effet d'augmenter fortement l'inductance apparente du conducteur ;
- La Figure (b) correspond à un filtre d'alimentation placé sur le bloc de raccordement au secteur d'une une alimentation à découpage de PC. L'ensemble d'inductances et de condensateurs permet d'obtenir un filtre passe-bas.

230



(a) Tores de ferrites



(b) Filtre d'alimentation

Figure n° 10 – Filtres CEM