

Les solutions pour la protection

Frédéric Broydé

Excem

12, Chemin des Hauts de Clairefontaine - 78580 Maule

Tél. : (1) 34 75 13 65 - Fax : (1) 34 75 13 66

Résumé — Les solutions techniques permettant d'obtenir la compatibilité électromagnétique d'un appareil, d'un système ou d'une installation sont nombreuses et parfois contradictoires en apparence. Nous insistons sur la nécessité de ne les employer que dans le cadre d'une conception, débutant par l'élaboration de l'énoncé du problème, et comportant, pour les points critiques, une étude quantitative des performances de solutions concurrentes.

I. INTRODUCTION

L'exercice de concevoir une conférence sur un titre imposé est intéressant, en particulier lorsque ce titre est manifestement à l'opposé du message que l'on pense devoir transmettre.

Pour "se protéger" des problèmes de compatibilité électromagnétique, qu'ils soient relatifs à l'émission, à l'immunité ou à l'autoperturbation, il y a bien sûr de nombreuses "solutions" classiques : filtrage, écrantage des boîtiers, écrantage des câbles...

Mais comment oser parler de solution lorsque le problème n'a pas été défini ? Comment ne pas citer le cas d'une étude approfondie de compatibilité électromagnétique à laquelle nous avons récemment pris part, ayant trait à l'introduction d'un nouveau système d'électronique communicante. Le client, qui nous demandait de quantifier l'une après l'autre une variété de solutions techniques pour l'immunité de ce système, a finalement renoncé au lancement des produits : il y avait trop d'incertitude sur la nature du problème, pour que l'on puisse valider des solutions.

Il faut dire qu'en l'espèce, les concepteurs n'en étaient plus à s'inquiéter d'une conformité à des normes qui ne font que définir des exigences minimales en termes généraux, en reflétant un état de la technique souvent périmé. Ce client se posait le problème de la détermination des réelles caractéristiques de CEM du système dans ses environnements d'utilisation possibles, présents et futurs. Toute la difficulté provenait d'une exigence élevée de qualité (les acquéreurs de ses produits ne devaient pas avoir de problèmes de CEM), avec des objectifs de coût difficiles à atteindre, et des contraintes techniques et d'installation laissant peu de marge de manoeuvre.

Notre équipe de spécialistes en CEM constate malheureusement trop souvent qu'une perception erronée de cette discipline est qu'elle a pour contenu :

- 1) d'appliquer des règles de l'art ou "solutions" simples,
- 2) de faire des essais, selon des normes obligatoires,
- 3) et, en cas de non-conformité, de plaquer d'autres "solutions" pour rendre les matériels conformes à ces normes.

Notre point de vue est plutôt que le travail permettant d'obtenir la compatibilité électromagnétique d'une entité devrait toujours comporter une succession logique d'étapes. Nous présentons au § II celles que nous appliquons normalement dans une mission d'aide à la conception. La méthode de travail est ensuite un peu détaillée aux § III et § IV, en mettant l'accent sur l'importance des raisonnements quantitatifs.

Nous passons ensuite à la présentation des principales règles de l'art : le § V présente huit principes à appliquer pour obtenir la compatibilité des liaisons, et le § VI présente une liste assez complète, mais non limitative de solutions possibles.

Les trois exemples présentés au § VII permettent de se faire une idée de ce que peut être la détermination des performances auxquelles conduisent des choix de conception.

Notons que cette communication est essentiellement basée sur quelques parties de notre stage 4 [1].

II. LA CEM EN CONCEPTION ET MISE AU POINT D'ÉQUIPEMENTS

II.1. Les trois approches de la CEM

Une démarche normale de conception d'une entité passe normalement par les étapes suivantes :

- définir les objectifs,
 - analyser les implications de ces objectifs,
 - connaître ou inventer des solutions aux problèmes de conception,
 - définir l'entité à concevoir, avec une mise en oeuvre de solutions,
 - quantifier les performances attendues de cette définition,
 - réaliser un exemplaire (prototype),
 - valider les solutions par des essais,
- l'ordre et les modalités de ces étapes dépendant de l'approche choisie.

Les deux premières étapes méritent une illustration, car comme nous l'avons dit, elles sont trop souvent négligées. Si par exemple les objectifs de compatibilité sont réduits à "la conformité aux exigences des deux normes génériques, édition 1992", l'analyse des implications des objectifs pourra conduire à se demander s'il est acceptable qu'il ne soit pas prévu qu'un autre appareil doive pouvoir opérer sans trouble de fonctionnement à une distance inférieure à 10 m de l'entité ! Si tel n'est pas le cas, il peut être utile d'étoffer un peu les objectifs.

La Compatibilité Electromagnétique peut être abordée de trois façons différentes : l'approche par mise au point, l'approche par spécification, et l'approche globale, également appelée l'approche système. Notons avant de présenter ces approches, que dans la plupart des projets, elles coexistent en s'appliquant à différents aspects de la CEM de l'entité.

II.2. L'approche par mise au point

L'approche par mise au point consiste à réaliser un prototype du système, et à effectuer des essais au cours desquels on prévoit de modifier le prototype jusqu'à ce que les performances souhaitées soient obtenues. Cette méthode comporte deux risques principaux :

- le premier est que l'obtention de la CEM exige une refonte complète du prototype ; dans ce cas le projet est assurément retardé, et il faut assumer le coût d'un deuxième développement de prototype,
- le second risque est que la CEM du dispositif puisse être obtenue, mais au prix de techniques inélégantes et coûteuses à mettre en oeuvre.

En dépit de ces risques, l'approche par mise au point est viable, et peut être recommandée dans les deux cas suivants:

- lorsque le système ne comporte pas d'innovation technologique pour l'équipe de conception, est dérivé d'un type bien connu, sur lequel la CEM a été obtenue, comprise, et maîtrisée.
- lorsque le prototype comporte un très grand nombre de précautions en vue d'obtenir la CEM, mises en œuvre de façon telle que la CEM du prototype soit certaine, et que l'objet des essais est d'éliminer les précautions superflues pour améliorer le coût variable du système (opération dite "de dégraissage").

II.3. L'approche par spécification

Selon l'approche par spécification, la compatibilité électromagnétique d'un système est obtenue en reportant sur chaque sous-ensemble des contraintes de CEM d'une rigueur au moins égale (et en général nettement supérieure) à celle des contraintes de CEM sur le système. D'un système devant rayonner moins de 30 dB μ V/m à 30 m à une certaine fréquence et dans certaines conditions, système composé de trois sous-ensembles, on exigera par exemple de chaque sous-ensemble que son niveau d'émission reste en dessous d'une limite d'émission arbitraire de 25 dB μ V/m (les sources étant supposées incohérentes). On pourra aussi décréter que cette limite devra être 20 dB μ V/m, ou 10 dB μ V/m, afin de s'accorder une marge de sécurité.

Il convient ici de rappeler qu'il n'y a aucune raison pour que le comportement d'un système (en ce qui concerne l'émission comme l'immunité) soit la superposition du comportement des parties prises séparément. Tel système comportant trois sources, dont les niveaux d'émission ont été mesurés tous inférieurs à 10 dB μ V/m pour chaque source prise isolément, émettra 5 dB μ V/m, alors qu'un autre système comportant seulement les trois mêmes sources, mais interconnectées et installées différemment, aura un niveau d'émission de 40 dB μ V/m.

Les risques de l'approche par spécification découlent de cette propriété :

- il est nécessaire de prévoir une importante sur-performance des sous-ensembles (marges) sur les niveaux d'émission et d'immunité, avec les conséquences que cela comporte sur le prix et sur le poids ;
- en dépit de ces marges, il existe des risques de non-conformité du système à ses spécifications de CEM.

Malgré ces inconvénients, l'approche par spécification est raisonnable pour les gros systèmes évolutifs, du fait de sa grande simplicité.

II.4. L'approche globale de la CEM

Selon l'approche globale de la CEM, les concepteurs d'un système cherchent à déterminer à l'avance, par une étude appropriée, les propriétés de CEM, et à faire un travail d'optimisation. Cette démarche présente deux inconvénients :

- elle conduit à alourdir le travail de conception ;
- si le système n'est pas destiné à être figé, son évolution doit être soigneusement contrôlée.

Cette méthode présente l'immense avantage d'une recherche d'optimisation des coûts variables.

III. LES TECHNIQUES DE L'APPROCHE GLOBALE

III.1 Organisation

Pour mettre en œuvre l'approche globale de la CEM, il est impératif que la démarche relative à la CEM soit suffisamment formalisée. Nous recommandons généralement qu'un Ingénieur Responsable de la Compatibilité (IRC) soit nommé:

- l'IRC a la charge de superviser les opérations visant à obtenir la CEM du système, ce que nous appelons le travail de mise en compatibilité ;
- l'IRC assumant une responsabilité, doit disposer de droits bien définis par rapport au projet (information, participation aux revues de projet, intervention) ;
- l'IRC doit rester indépendant du projet, ne s'y occuper que de CEM, et il est supposé maîtriser cette discipline ;
- l'IRC doit disposer de moyens bien définis pour chaque projet.

Une part importante du travail de l'IRC est de documenter son travail, et d'informer l'équipe de projet de ses recommandations, au fur et à mesure qu'elles apparaissent.

Nous découpons traditionnellement en cinq phases le travail de l'IRC, phases que nous présentons ci-dessous, avec leurs principaux points-clefs.

Analyse des besoins en compatibilité

- détermination des objectifs,
- normes et règlements applicables,
- criticité des interférences,
- données sur l'appareil, les contraintes, les règles d'installation,
- choix de l'approche et organisation du travail,
- coûts et délais.

Etude de compatibilité

- compléments d'information,
- définition de la structure et des isolements,
- découpage,
- schéma topologique des écrans,
- schéma des connexions de masse,
- calcul des découplages et des marges,
- explication des choix techniques.

Préparation des essais

Essais

Synthèse

- choix techniques finaux,
- consignes de mise en œuvre et d'entretien,
- traitement des futures modifications,
- recensement des problèmes de CEM rencontrés après la conception, et explication de leur traitement.

Bien sûr, les différentes phases ne sont pas nécessairement effectuées en séquence, et il peut y avoir des boucles dans l'enchaînement des tâches. Il est nécessaire de prévoir une certaine souplesse : un volet de l'étude de compatibilité peut nécessiter des essais préliminaires, les calculs peuvent démontrer qu'un découpage n'était pas bon, des essais peuvent devoir être reconduits... L'IRC est le maître d'œuvre de tout ce travail, et doit guider l'équipe de projet dans les différentes phases du travail de mise en compatibilité, et faire vivre les documents consignant l'évolution des différentes phases.

III.2. Découpage

Une part essentielle de l'art de l'IRC repose sur deux choix :

- un découpage en zones du système ;
- l'affectation, à chaque zone, de niveaux maximums d'émission et de niveaux minimums d'immunité, pour les différents phénomènes pertinents.

Les différentes zones sont délimitées par des écrans généralisés, qui sont soit des écrans (on dit aussi "blindages"), soit des zones d'exclusion. Les écrans généralisés doivent toujours être fermés, et les principes fondamentaux à respecter sont:

- l'interdiction de faire passer des câbles conducteurs dans une zone d'exclusion ;
- l'interdiction de faire traverser un écran par un câble sans filtrage adéquat.

Une conception qui respecte ces principes est dite à topologie contrôlée.

L'idéal de l'approche globale est d'obtenir la compatibilité par la conception de l'ensemble, plutôt que par l'ajout de dispositifs spécifiques et coûteux. Un bon découpage est donc celui qui permet d'obtenir la compatibilité souhaitée, avec le plus petit coût variable.

III.3. Schéma topologique des écrans

Le schéma topologique des écrans est simplement l'instrument permettant de communiquer les choix concernant le découpage effectué par l'IRC. Sur le schéma topologique des écrans doivent donc figurer :

- les principaux sous-ensembles du système ;
- les écrans-enveloppes d'équipement ;
- les écrans de câble ;
- les zones d'exclusion ;
- les filtres.

Une règle simple et pratique pouvant être instaurée dans l'équipe de projet peut être exprimée dans les termes suivants: "INTERDICTION DE FAIRE PASSER QUOI QUE CE SOIT DANS UN ECRAN GENERALISE SANS AUTORISATION PREALABLE DE L'IRC".

L'intérêt méthodologique d'une telle procédure est évident. Le schéma topologique des écrans doit donc être tenu à jour, expliqué et diffusé dans l'équipe de projet, et ce travail échoit à l'IRC.

Il est également possible de franchir un pas supplémentaire, et de porter sur le schéma topologique des écrans les valeurs de couplage maximal autorisé (cette notion est semblable à celle d'atténuation d'écran, mais sensiblement plus élaborée). Dans ce cas, le schéma topologique des écrans devient un instrument d'analyse quantitative (voir figure 1).

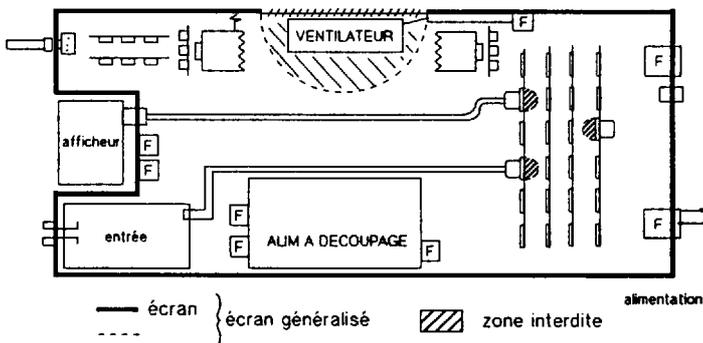


Figure 1 : Exemple de schéma topologique des écrans

III.4. Schéma des connexions de masse

Il s'agit d'un schéma sur lequel sont portés, à l'aide de symboles distincts, les différentes connexions de masse. Il sera utilisé par l'IRC pour identifier et limiter les couplages par impédance commune possibles. Doivent y figurer : les différents types de connexion de masse, et les isolements.

En ce qui concerne les différents types de connexion de masse devant être distingués, et les symboles correspondant à employer, il s'agit d'une affaire de cas d'espèce.. et de ce qu'il est possible de faire avec votre CAO!

Pour la conception d'un système tel qu'un tiroir électronique, nous utilisons par exemple :

- un symbole pour le châssis ;
- un symbole pour une connexion au châssis ;
- un symbole pour un câble d'alimentation ;
- un symbole pour les mises à la masse capacitives ;
- un symbole pour la connexion à un réseau de masse externe ;
- un symbole pour le 0 Volt d'une carte ;
- un symbole pour le 0 Volt d'un câble de signal.

Bien sûr, s'il y a des amplificateurs d'isolement ou des circuits isolés par optocoupleur, par transformateur ou par relais, d'autres symboles peuvent s'avérer utiles.

L'expérience montre que le schéma des connexions de masse est un complément extrêmement utile au schéma topologique des écrans, et il doit être traité avec autant de soin (voir figure 2).

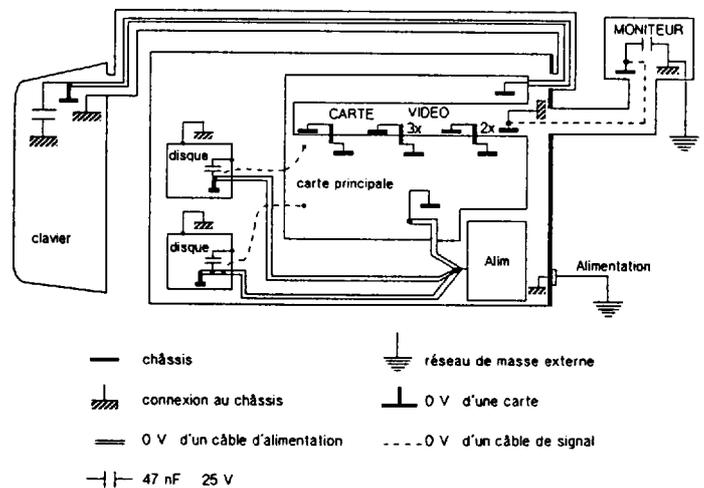


Figure 2 : Exemple de schéma des connexions de masse

III.5. Modélisation et calculs

Un des aspects essentiels de l'approche globale de la CEM est que l'on y cherche à prévoir : d'où la nécessité de modéliser puis de calculer.

Comme pour tout calcul de phénomène physique, la principale difficulté est de créer un modèle juste assez complexe pour rendre raisonnablement compte de la réalité, toute complexité supplémentaire alourdissant inévitablement le travail. Même en étant économe, la pratique montre que les calculs sont souvent longs, et qu'ils sont plutôt du domaine d'un spécialiste. Celui-ci aura parfois à effectuer des calculs à la main, mais il préférera, à chaque fois que ce sera possible, utiliser des logiciels disponibles ou des progiciels.

Soulignons l'importance du choix du modèle. Un premier point est que les logiciels abondent, qui reposent sur des modèles simplistes, et dont les résultats ne sont donc corrects que dans des situations limitées (par exemple : propagation négligée, pas de pertes donc pas de couplage par résistance commune, pas d'effet de proximité, calculs effectués pour des ondes planes seulement...). L'utilisateur n'est souvent pas conscient (a-t-il été informé?) des conséquences de ces limitations, dues à la nature même du modèle adopté. Des difficultés semblables se retrouvent sur des outils logiciels beaucoup plus complexes. Cependant, de tels logiciels se vendent, et ces "problèmes" ne sont (pratiquement) jamais mentionnés dans la documentation.

La vérité est que tous les outils de calculs ont des limitations, bien sûr, si bien que les calculs doivent toujours être menés et interprétés par un spécialiste, qui saura détecter les canulars dus aux modèles, et ceux qui proviennent de problèmes numériques. Les logiciels sont souvent acquis avec l'état d'esprit inverse: "achetons donc un logiciel sachant tout faire, de façon à ce qu'un novice en CEM puisse s'occuper des études!". Il va sans dire que ce type d'attitude contribue à répandre l'adage selon lequel les calculs sont inutiles en CEM, puisqu'ils conduisent à des conceptions erronées. Les logiciels ne sont que des outils, et il est ridicule d'accuser l'outil lorsque l'utilisation est inadéquate.

En vérité, il est possible et souhaitable en matière de CEM, de chercher à prédire, à modéliser et à calculer. Les limitations des outils de calcul devront être étudiées et comprises, et les calculs vaudront ce que vaut le spécialiste qui les aura menés. Quelles sont les grandes familles de logiciels disponibles ou envisageables ?

- Les logiciels permettant de calculer des champs au voisinage d'objets métalliques massifs, de structures filaires, d'ouvertures, et de déterminer les courants correspondant : les calculs reposent sur des résolutions temporelles ou fréquentielles d'équations de Maxwell en 2D ou en 3D, sous forme différentielle ou intégrale; il existe une grande variété de méthodes d'intégration (méthodes des moments, méthodes de différences finies, méthode d'éléments finis...) à choisir en fonction du problème spécifique ; en général les parties conductrices sont supposées infiniment conductrices, certaines équipes sachant toutefois introduire des absorbeurs ; le traitement d'objet trop grands devant la longueur d'onde pose des problèmes.

- Les logiciels permettant de calculer des champs et des courants pénétrant à travers un écran électromagnétique : la conductivité finie de l'écran est forcément prise en compte, et seules les géométries très simples d'écran, soumises à un champ simple (onde plane, champ d'un dipôle...) sont envisageables ; les résultats ne sont corrélables avec l'expérience que pour les mauvais écrans.

- Les logiciels permettant de faire des calculs de couplage champ à lignes, ou de diaphonie sur les lignes, ou d'émission de lignes : les calculs peuvent être faits dans le domaine temporel ou dans le domaine fréquentiel ; dans le cas de calculs temporels, la prise en compte de la dispersion (effet de peau) est difficile, tandis que la prise en compte de l'effet de proximité n'est pas réaliste ; dans le cas de calculs fréquentiels, tous les éléments sont supposés linéaires ; dans tous les cas, le mode d'antenne (c'est-à-dire le mode où le courant total, y compris le conducteur de référence, est non nul) est ignoré, ce qui peut conduire à des erreurs considérables ; les conducteurs sont supposés longitudinalement homogènes, ce qui limite également leur validité.

- Les logiciels permettant de faire des conceptions (synthèse et analyse) de filtres passifs : ces outils doivent permettre de prendre en compte les incertitudes sur l'impédance des sources et charges des filtres utilisés en CEM, ainsi que des imperfections des composants réels ; le logiciel **FILTREXPERT** permet par exemple ce genre de calculs.

- Les logiciels permettant de simuler des circuits non linéaires : l'exemple le plus classique de ce type de logiciel est le Spice de l'U.C. Berkeley et ses dérivés, qui permettent de simuler toutes sortes d'interactions entre dispositifs électroniques ; la possibilité d'effectuer des calculs de couplage entre lignes longues terminées par des charges non linéaires avec des logiciels a récemment été développée. Nous en donnerons un exemple au § VII.

- Les logiciels permettant d'étudier les interactions entre systèmes complexes : ces outils permettent une recherche exhaustive et quantitative de tous les couplages possibles entre sources et suscepteurs, mais ils reposent toujours sur des modèles simplistes et extrêmement dangereux ; leur utilisation présente toutefois un intérêt méthodologique dans certains systèmes comme les navires, les aéronefs et les véhicules spatiaux.

- Les autres logiciels (pour être exhaustif !) ; on peut par exemple mentionner des outils permettant de calculer les réflexions dans les chambres anéchoïques, de faire des calculs d'atténuation de site...

Si les logiciels sont des moyens indispensables de l'approche globale, leur emploi est délicat : le logiciel ne peut pas servir d'excuse en cas d'échec, en tout cas pas davantage que les stylos ou le bloc-note.

IV. POINTS CRITIQUES ET REGLES DE L'ART

Nombres de problèmes de CEM peuvent être réglés par l'application systématique de règles de l'art. Pour caricaturer, si l'on doit concevoir un équipement, les caractéristiques voulues de CEM pourront (presque) toujours être obtenues en blindant suffisamment, et en filtrant ce qui ne peut être blindé. Mais à quel prix ? Quel avenir pour votre produit s'il est conforme à ses spécifications de CEM, mais qu'il coûte 30% de plus ou pèse 100% de plus qu'un produit concurrent, à performances égales ?

L'IRC doit donc travailler sur les points qui vont permettre d'améliorer l'appareil, l'installation ou le véhicule sur lequel il travaille. Il ne doit définir les points pour lesquels on appliquera directement des règles habituelles, et ceux pour lesquels il est intéressant de fouiller davantage :

- soit parce qu'il anticipe que les règles habituelles risquent de s'avérer insuffisantes,
- soit parce qu'il espère réaliser des économies substantielles.

Cette identification des points critiques, c'est-à-dire ceux qui méritent une remise en cause ou un approfondissement, est une étape décisive, mais difficile à justifier : elle reste un art.

Pour les points non critiques, l'application de règles de l'art doit faire l'objet de choix par l'IRC, parce qu'il existe de nombreuses "règles contradictoires". L'IRC doit en effet gérer deux aspects déroutants de la CEM :

- il est parfois possible d'arriver à des résultats satisfaisants par des chemins très différents, voire franchement opposés,
- des préconisations apparemment identiques conduisent parfois à des résultats inverses.

Pour illustrer ce dernier point, prenons l'exemple d'une "solution" intéressante : il est recommandé de router les interconnexions internes d'un équipement au plus près de son enveloppe métallique. Et bien, parfois il en résulte une amélioration de la compatibilité par rayonnement (émission ou immunité), et parfois une dégradation.

Si l'analyse n'est pas poussée plus loin, on en déduira que, décidément, il n'y a rien à comprendre à la CEM, tout est une question de chance. Mauvaise réaction, car ce type de phénomène s'interprète en fait facilement. Pourvu que l'on se donne un peu de peine. Sur cet exemple c'est la manière dont l'enveloppe métallique est faite qui déterminera les conséquences d'un routage proche.

V. LES HUIT PRINCIPES POUR LA CEM DES LIAISONS

Un grand nombre de problèmes de compatibilité électromagnétique proviennent d'un traitement incorrect des liaisons entre équipements. Nous avons l'habitude de préconiser huit principes pour la compatibilité des liaisons.

Principe 1 : Eliminer les parties communes aux chemins de transmission. En basse fréquence, ceci impose de transmettre les signaux par liaison flottante ou par liaison équilibrée. En haute fréquence, pourvu que l'on utilise des câbles avec écran, la séparation des chemins de transmission s'opère naturellement grâce à l'effet de proximité.

Principe 2 : Eloigner les liaisons transportant des signaux d'amplitudes différentes les unes des autres, ou interposer des écrans.

Principe 3 : Eviter le cheminement parallèle de conducteurs proches.

Principe 4 : Utiliser des équipements contenus dans des écrans électromagnétiques.

Principe 5 : Respecter la topologie des écrans. Ainsi les câbles qui ne sont pas traités sur toute leur longueur avec un écran (suffisamment efficace) relié aux deux bouts à des équipements respectant le principe 4, doivent être filtrés par rapport à l'écran de chaque équipement.

Principe 6 : Relier les écrans de câble par des contacts circonférentiels.

Principe 7 : Interconnecter les parties mécaniques métalliques de bâtiment ou de véhicule, enveloppes conductrices des équipements, conducteur de protection électrique pour former un réseau de masse.

Principe 8 : Installer les câbles d'interconnexion au plus près du réseau de masse.

Bien entendu, ces huit principes peuvent être d'application modulée... les principes ne sont-ils pas fait pour être transgressés ? Mais sur ce chemin, il faut être particulièrement prudent.

Le principe 4 n'est souvent respecté que partiellement : on peut très bien construire des systèmes compatibles dans des coffrets non blindés. Dans ce cas, il est indispensable d'utiliser tout de même un écran électromagnétique réduit, constitué d'une plaque d'entrée-sortie métallique à laquelle sont reliés les écrans de câble et les masses des filtres CEM. Ainsi par exemple, les courants de mode commun provenant d'un câble, pourront passer à un autre câble en circulant uniquement sur la plaque d'entrée-sortie, donc sans traverser l'électronique. On utilise également fréquemment la combinaison d'une plaque d'entrée-sortie avec une métallisation d'un boîtier plastique.

Le principe 6, par contre, doit être considéré comme un des tabous majeurs de la CEM. Sa violation entraîne en général des catastrophes. Ainsi, les caractéristiques propres des connecteurs et embases jouent un rôle très important dans les performances de CEM de la liaison.

Dans le cas d'un connecteur multicontacts performant, interviennent généralement les reprises de masse suivantes, représenté sur la figure 3 :

- en 1, le contact entre l'embase et le boîtier de l'électronique (nous supposons que ce boîtier est un écran),
- en 2, le contact entre l'embase et le connecteur,
- en 3, le contact entre le connecteur et le raccord arrière,
- en 4, le contact entre le raccord arrière et l'écran du câble.

Tous ces contacts sont critiques, et l'on peut dire que c'est le plus mauvais d'entre eux qui déterminera en premier lieu les performances de l'ensemble. Chacun de ces contacts indépendamment, et l'ensemble du connecteur, sont essentiellement (mais pas uniquement) caractérisés par leur impédance de transfert.

On notera que les performances des reprises des quatre masses que nous montrons sur la figure 3 sont dépendantes à la fois des différents composants, et de la méthode de montage employée. Celle-ci doit donc être validée. On notera que le vieillissement joue un rôle important sur les performances CEM réelles de la connectique. On veillera donc à prendre en compte l'influence des conditions mécaniques (vibrations, flexions...) et climatiques.

Il sera en général indispensable, au titre de l'assurance qualité, de pouvoir contrôler les caractéristiques d'une liaison constituée (c'est-à-dire l'ensemble câble et connecteur), qu'il s'agisse d'un contrôle d'entrée ou d'un contrôle de fabrication.

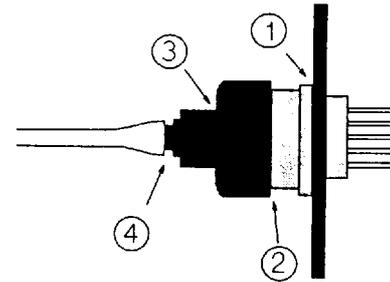


Figure 3 : Les différents contacts liés à un connecteur et une embase

VI. UN REPERTOIRE DE SOLUTIONS TECHNIQUES

Après cinq paragraphes de réserves sur la manière d'exploiter une liste de solutions technique, nous pouvons nous exécuter. Ce répertoire est divisé en sept rubriques : conception générale, installation, transmission des signaux, enveloppe des équipements, structure interne des équipements, entrées-sorties des équipements, conception des cartes et modules.

Conception générale

- choix des modulations,
- choix des bandes passantes analogique,
- choix des vitesses des processeurs et circuits logiques,
- codage, détection et correction des erreurs,
- partage fréquentiel (multiplexage),
- partage temporel,
- spécification des conditions d'utilisation,
- zone de protection.

Installation

- protection foudre (paratonnerre, cage externe maillée, prises de terre...),
- choix d'une ou plusieurs structures de masse (arborescente, en étoile, en réseau à 2 ou 3 dimensions),
- mise à la masse des équipements,
- canalisations (tuyaux métalliques, chemin de câble),
- éloignement des émetteurs de perturbation et des suscepteurs,
- routage des câbles signaux, séparation courants forts / courants faibles,
- traitement spécial des câbles de puissance HF ou de puissance commutée (par exemple sorties de variateurs, à blinder),
- canalisations spéciales pour les courants faibles,
- plancher réalisant un plan de masse,
- cage de Faraday,
- matériaux dissipatifs,
- contrôle d'hygrométrie et de température,
- alimentation basse tension protégée contre les surtensions,
- alimentation sans interruption (onduleur),
- transformateur d'isolement,
- protection des lignes de télécommunication (parasurtenseur, filtrage),
- protection des arrivées d'antennes,
- protection des autres signaux entre bâtiments de l'installation,
- isolements de zones,
- mise à la masse d'écrans de câbles,
- définition des diagrammes de rayonnement des antennes,
- emplacement des antennes,
- utilisation d'écran barrière.

Transmission des signaux

- liaisons équilibrées et liaisons flottantes,
- caractéristiques du support de transmission (torsadages, équilibrage, blindage...),
- surblindage par tresse, tube, chemin de câble,
- adaptation d'impédance,
- perles et tores en ferrite ou autres matériaux magnétiques,
- emplois de fibres optiques.

Enveloppe des équipements

- coffret offrant une étanchéité électromagnétique,
- plaque d'entrée sortie unique,
- dépôt conducteur sur un coffret diélectrique,
- joints (joints métalliques, joints élastomère chargé, joints mixtes),
- traitements des orifices,
- absorbant électromagnétique interne.

Structure interne des équipements

- choix d'une structure de masse,
- choix d'une structure de référence(s),
- choix d'un mode distribution du 0V électrique,
- placements des cartes et modules,
- blindages internes,
- modes de transmission des signaux internes (unifilaire, équilibré, câble coaxial, multifilaire blindé),
- filtres de signaux internes,
- limiter les capacités parasites nuisibles (par exemple avec les boîtiers de composants de découpage),
- limiter les transitoires dans les circuits de commutation.

Entrées/sorties des équipements

- filtres de signaux (filtres réactifs ou filtres dissipatifs),
- filtres d'alimentation (filtres dissipatifs),
- transformateur d'alimentation avec écran,
- inductance de masse (non recommandé !),
- spécifier les câbles signaux (unifilaire, équilibré, câble coaxial, multifilaire blindé),
- spécifier un câble d'alimentation filtrant,
- entrées différentielles, entrées flottantes (amplificateurs d'isolement),
- sorties symétriques,
- entrées ou sorties optoisolées,
- transformateur de ligne, transformateurs d'impulsion,
- parasurtenseurs (éclateurs, varistances, diodes à avalanche de puissance, diodes Shockley, diodes de signal),
- connecteurs blindés,
- autres moyens de mise à la masse des écrans de câbles,
- connecteurs filtrants.

Conception des cartes et modules

- choix d'une structure de masse,
- emplacement et type des connecteurs,
- schémas,
- limitation des bandes passantes analogiques,
- prendre en compte le comportement hors bande des circuits analogiques,
- augmenter les temps de transition des circuits numériques,
- limiter les transitoires de recouvrement inverse des diodes de redressement,

- inductance de lissage pour l'alimentation (harmoniques),
- circuit de correction de facteur de puissance (harmoniques),
- limiter les transitoires sur les commutations de charges inductives (relais, moteurs...),
- placement des composants,
- routage des signaux sensibles et perturbateurs,
- distribution d'alimentations à basse impédance,
- filtrage et découplage des alimentations.

Chacune des solutions que nous proposons demande par elle-même un développement important. Une liste de ce type ne peut de toute façon être expliquée et justifiée que dans le cadre d'un stage ou d'un ouvrage complet sur la CEM. Nous nous limiterons à offrir une illustration avec trois exemples, présentés au paragraphe suivant.

VII. EXEMPLES

VII.1 Premier exemple

Notre premier exemple de situation où la conception CEM mérite d'être approfondie jusqu'à devenir quantitative, concerne la partie d'un système dont nous avons déjà dit qu'elle jouait un rôle majeur dans sa compatibilité : les interconnexions. L'objet de cet exemple est de montrer comment l'on peut valider un ensemble de "solutions" appartenant à la rubrique "entrées-sorties des équipements" du répertoire.

Dans un contexte de conception, avant l'intervention de l'ingénieur responsable de la CEM, ont été définis :

- les techniques de transport des signaux (unifilaire, bifilaire, bifilaire écrané, coaxial,...),
- les interfaces et les niveaux pour les différents signaux,
- les spécifications CEM du système,
- la partie mécanique, d'où découle la possibilité de placer un ou plusieurs écrans électromagnétiques.

La définition de la liaison devra être compatible avec ces exigences. Le seul moyen de prédire qu'une conception donnée de liaison est satisfaisante, est de la simuler. Notre problème est donc :

- premièrement, de pouvoir créer un modèle de liaison à partir de valeurs des paramètres de spécification du câble et de la connectique introduits dans les deux paragraphes précédents,
- et deuxièmement d'utiliser ce modèle de liaison dans une simulation prenant en compte les autres paramètres importants du problème et notamment les terminaisons réelles.

Nous n'évoquerons pas les méthodes employées, que nous détaillons dans [2]. Nous nous limitons ici à un exemple concret.

La figure 4 montre une liaison comportant un câble avec deux paires blindées et deux conducteurs supplémentaires, au-dessus d'une structure de masse. Ce câble est relié de part et d'autre à des circuits électroniques, constituant ses terminaisons réelles. La paire écranée du haut correspond à une liaison numérique, la paire écranée du bas à une liaison analogique, et les deux conducteurs centraux à des conducteurs de commande. La question posée est de terminer l'effet d'une onde de type CEI 1000-4-5 sur les conducteurs de commande, la liaison ayant une longueur de 300 m.

La figure 5 montre l'impulsion aux bornes du générateur d'impulsions VGEN2, d'impédance impulsionnelle 2 Ω . La figure 6 montre le signal sur la partie droite de la liaison numérique. La figure 7 montre le signal sur l'anode de la photodiode.

Nous obtenons ces résultats avec un logiciel de simulation de type Spice, dans notre cas le progiciel ICAP4/Windows. Notre progiciel SpiceLine nous permet de déterminer automatiquement des modèles pour ICAP4/Windows, qui les utilise de façon totalement transparente. On notera que les modèles créés sont paramétrables par la longueur de la liaison, et apparaissent comme des symboles dans la schématique de ICAP4/Windows.

On voit toute la puissance d'une telle méthode, qui permet de quantifier un phénomène très complexe de couplage sur des lignes. Les concepteurs du système peuvent sur la base d'une telle simulation décider si les perturbations obtenues sont acceptables ou non.

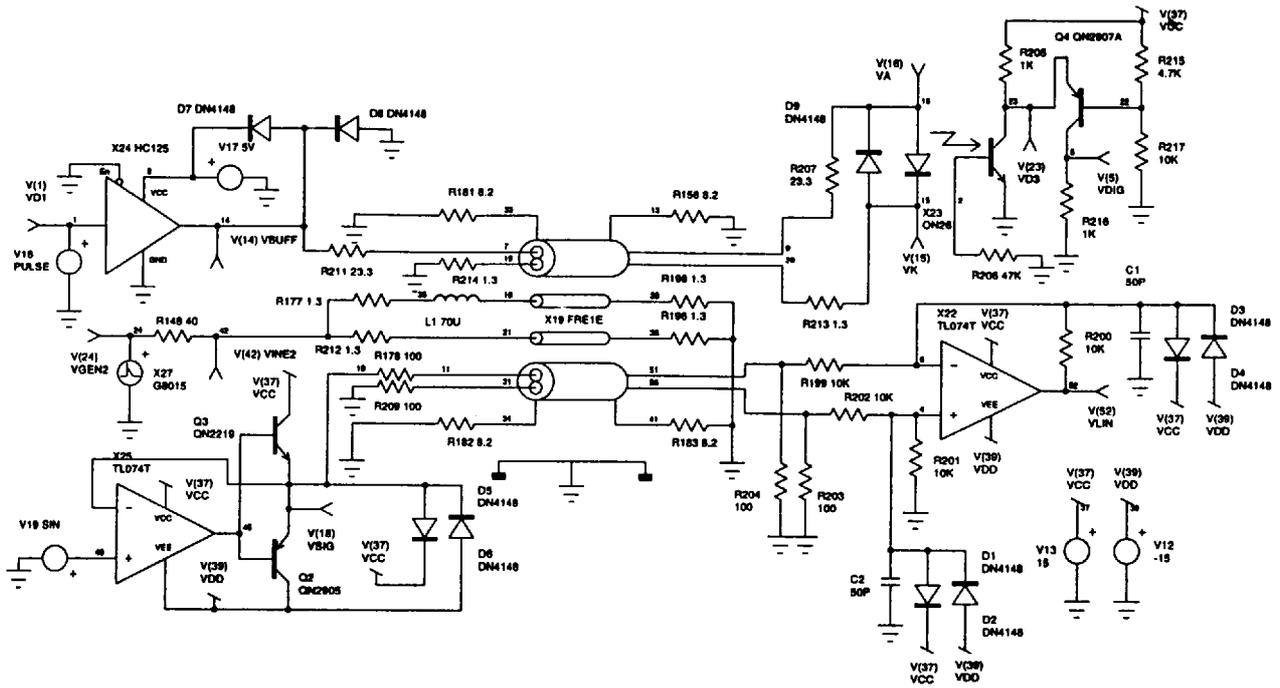


Figure 4 : Une liaison avec ses terminaisons réelles

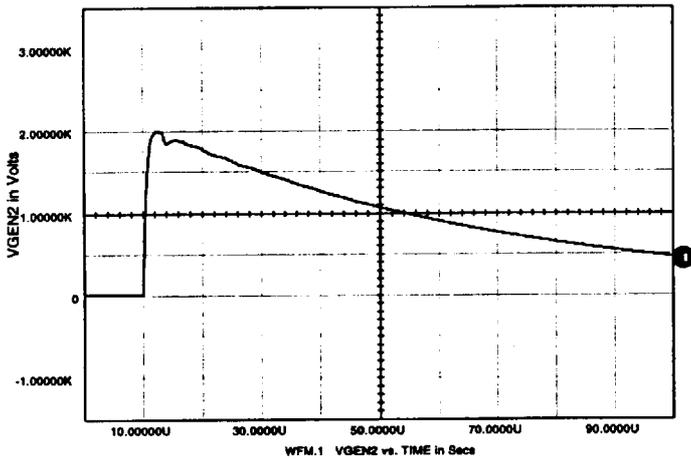


Figure 5 : L'impulsion aux bornes du générateur d'impulsions

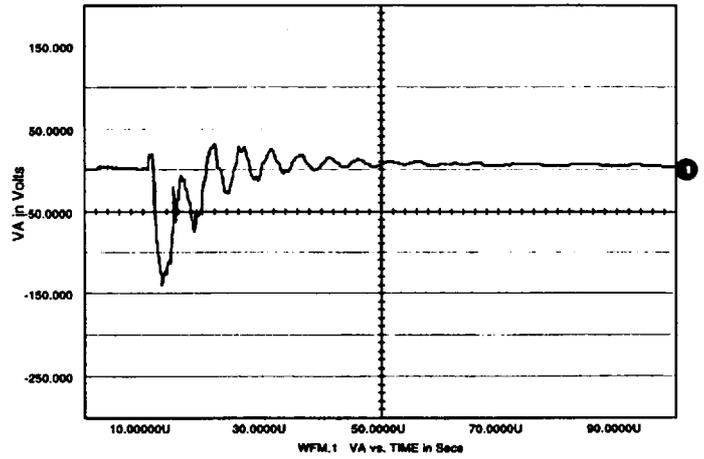


Figure 7 : Signal sur l'anode de la photodiode

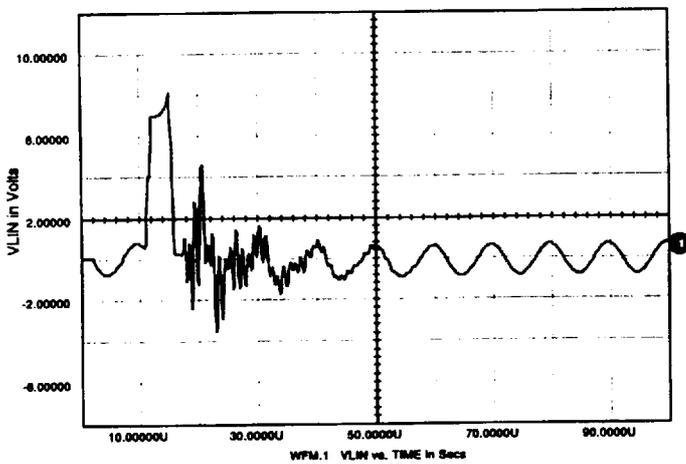


Figure 6 : Signal sur la partie droite de la liaison numérique

VII.2 Second exemple

Notre second exemple concerne la rubrique "conception des cartes et modules" du répertoire, et en particulier l'obtention de la conformité à la norme EN 61000-3-2 limitant l'amplitude des harmoniques.

Après un transformateur d'alimentation élevant la tension du secteur (monophasé) à 400 V environ, le concepteur souhaite ici valider une valeur d'inductance de lissage à interposer avant les condensateurs de filtrage. Cette inductance fonctionnera en mode discontinu. La figure 8 montre le courant débité par le redresseur, pour 20 μ H et 500 μ F, pour une puissance consommée (imposée) de 650 W. La valeur crête du courant permet de dimensionner l'inductance de lissage. La figure 9 est le résultat d'une transformation de Fourier. Ici, on détermine que les courants harmoniques au primaire sont :

- de 3,01 A efficace pour la composante à 50 Hz,
- de 2,21 A efficace pour l'harmonique 3 (conforme, la limite étant 2,3 A),

- de 1,11 A efficace pour l'harmonique 5 (conforme, la limite étant 1,14 A),
- de 0,35 A efficace pour l'harmonique 7 (conforme, la limite étant 0,77 A),
- toutes les autres harmoniques sont largement en-dessous de leur limites respectives.

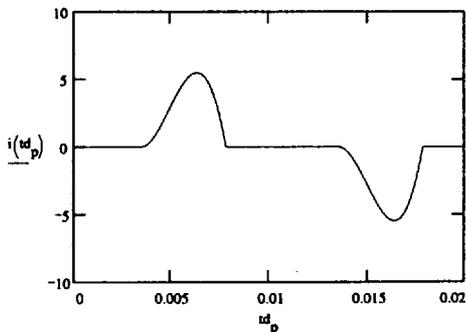


Figure 8 : Courant débité par un redresseur
abscisse : temps en s ; ordonnée : courant en A

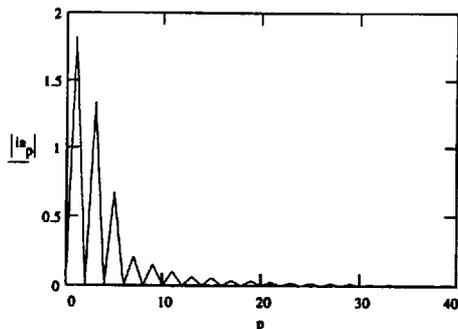


Figure 9 : Amplitude des harmoniques
abscisse : rang de l'harmonique ; ordonnée : courant en A efficace

Ce schéma de redresseur est donc conforme à la norme, avec une marge très faible, pour un taux de distortion harmonique du courant d'environ 84 %.

Il est clair que ce genre de calcul doit être conduit avec soin, afin de déterminer précisément les coûts, et les marges de conception. Ces calculs permettent également de déterminer si l'on préfère s'orienter vers la solution d'une correction active du facteur de puissance (par convertisseur boost en tête), qui a d'autres avantages et inconvénients.

VII.3 Troisième exemple

Notre troisième exemple de situation où les calculs de conception sont efficaces sera choisi dans le domaine des télécommunications, cet exemple concernant plutôt la rubrique "conception générale" de notre répertoire de solutions. Dans ce domaine, nous avons fréquemment à déterminer des couplages entre antennes, ce qui n'est généralement pas très difficile. Parce que les antennes sont généralement bien caractérisées en rayonnement, les calculs sont souvent très précis, disons à quelques dB près. Les problèmes de compatibilité de ce type peuvent cependant s'avérer ardu lorsqu'interviennent des mécanismes de diffraction non classiques. Nous avons ainsi récemment effectué une étude [3] de compatibilité entre le service mobile par satellite et le service de radioastronomie dans la bande des 18 cm, qui a demandé des considérations un peu complexes.

Les solutions que nous avons proposées pour ce problème comprenaient essentiellement un écran barrière (d'environ 40 m de haut) et un système de gestion dynamique d'une zone de protection.

Il est parfaitement évident que dans un contexte de ce genre, il n'y a pas de véritable expérience en vraie grandeur possible. Les résultats de calculs (éventuellement étayés par des expérimentations limitées) sont les seules données sur lesquelles la décision de lancement d'un projet peut être prise.

VIII. CONCLUSION

Nous avons en premier lieu insisté sur le fait que le travail relatif à la compatibilité électromagnétique ne devait pas se limiter à essayer au petit bonheur des solutions techniques, lors d'essais en laboratoire.

Nous avons présenté trois approches du travail en CEM, et introduit une organisation d'un projet technique permettant de prendre en compte la mise en compatibilité du système, dès la conception.

Nous avons insisté sur des techniques que devrait pouvoir mettre en oeuvre l'IRC, afin de valider quantitativement un ensemble de solutions pour des agressions envisagées. Nous avons noté que tout ne se calcule pas en CEM, certaines questions étant d'une complexité ingérable. Cette constatation ne devrait pas servir d'excuse pour ne rien évaluer sérieusement.

Nous avons ensuite insisté sur l'importance particulière du traitement des liaisons filaires, puis introduit un répertoire fourre-tout (mais évidemment non exhaustif) de solutions techniques applicables aux appareils, aux installations et aux systèmes. Ces règles de l'art peuvent être appliquées sans état d'âme sur tous les points non critiques d'une conception. Toutefois, l'IRC devra définir celles des règles qu'il convient d'appliquer sur un projet, car on n'oubliera pas que certaines "règles" ont des énoncés contradictoires... comme il se doit.

Nous avons finalement présenté trois exemples qui montrent l'importance de quantifier les questions de CEM.

On notera que, dès que l'on souhaite envisager des circonstances qui ne sont pas ou mal prévues dans les normes de CEM, le laboratoire d'essais de CEM est souvent dans l'impossibilité de réaliser et de mesurer les configurations les plus intéressantes. Si l'on revient à notre exemple de couplage diaphonique sur une liaison filaire, le laboratoire ne pourrait de toute façon travailler qu'après que les liaisons et interfaces aient été définies et fabriquées. Le rôle du laboratoire est donc normalement limité à :

- la mesure des paramètres d'entrée des simulations,
- la réalisation d'essais de validation de la conception, lorsque les prototypes sont disponibles,
- la réalisation des essais de qualification, par exemple selon des normes.

Cette fonction du laboratoire est essentielle, mais elle ne peut se substituer à celle d'analyser et de concevoir la compatibilité électromagnétique des systèmes.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Stage Excem CEM n°4 "Conception des cartes et systèmes compatibles", auteur F. BROUYDE, dernières modifications décembre 1995.
- [2] "Progrès sur la spécification et la modélisation des liaisons blindées", F. BROUYDE, E. CLAVELIER, 8^{ème} colloque international sur la compatibilité électromagnétique, Lille, septembre 1996.
- [3] "Etude sur la compatibilité entre les services radioastronomie et MOBSAT" F. BROUYDE, E. CLAVELIER, E. GERARD, 8^{ème} colloque international sur la compatibilité électromagnétique, Lille, septembre 1996.