

## Chapitre 1. Phénomènes électrostatiques et magnétostatiques

### 1. Généralités

La compatibilité électromagnétique (CEM) est l'aptitude d'un appareil ou d'un système électrique, ou électronique, à fonctionner dans son environnement électromagnétique de façon satisfaisante, sans produire lui-même des perturbations électromagnétiques gênantes pour tout ce qui se trouve dans cet environnement.

Une bonne compatibilité électromagnétique décrit un état de « bon voisinage électromagnétique » :

Limitier le niveau des émissions non désirées provenant de l'appareil, afin de ne pas perturber la réception radio ou les autres équipements ;

Être suffisamment immunisé contre les perturbations provenant des autres équipements, ou plus généralement de l'environnement.

Les bruits électromagnétiques et radioélectriques sont le résultat de tous les courants et tensions électriques induisant une multitude de champs (électrique et magnétique) et signaux parasites.

Les diverses réglementations requièrent un niveau de compatibilité électromagnétique à respecter (directives européennes, FCC pour les États-Unis...). Elles ont donc établi des méthodes d'évaluation des perturbations, ainsi que des limites de niveau de perturbation à ne pas dépasser ou à supporter dans un environnement donné.

### 2. Origine des phénomènes électrostatiques et magnétostatiques

Il existe une expérience simple, que tout le monde peut faire, permettant de percevoir une force électrostatique : il suffit de frotter une règle en plastique avec un chiffon bien sec et de l'approcher de petits bouts de papier : c'est l'électrisation. Les papiers se collent à la règle et y restent tant que les charges ne sont pas équilibrées. L'expérience est simple à réaliser, cependant l'interprétation n'est pas simple puisque, si la règle est chargée par frottement, les bouts de papiers ne le sont pas a priori. Une autre expérience du même style consiste à observer qu'un filet d'eau est dévié si on en approche un film de cellophane.

Plus simplement, une expérience commune des effets de l'électrostatique est la sensation de recevoir une décharge en attrapant un chariot par temps très sec, en descendant ou montant dans une voiture ou en retirant un vêtement en tissu synthétique. Ce sont des phénomènes où il s'est produit une accumulation de charges, d'électricité statique.

### 3. Problèmes des perturbations ECM en BF et H.F

Par convention, on appelle « basse fréquence » ou « BF » une perturbation dont le spectre représentatif reste inférieur à 1 MHz. Les câbles blindés sont médiocrement efficaces en BF, mais les chemins de câbles métalliques bien interconnectés sont efficaces dès le continu. Par convention, on appelle « haute fréquence » ou « HF » une perturbation dont le spectre représentatif s'étend au-delà de 1 MHz. L'effet d'antenne des câbles en HF est significatif et la mise en œuvre de la reprise des écrans de câbles blindés y est critique.

#### 4. Classification par fréquence

##### $f < \sim 9 \text{ kHz}$ :

Il s'agit principalement de perturbations de mode différentiel (harmoniques de courant des alimentations, fluctuations de tension dues à des variations de charge...)

Les champs magnétiques et électriques des équipements de puissance sont aussi à considérer dans certains cas (sources : transformateur, ligne haute tension, moteur... ; victimes : capteurs à effet hall, tubes cathodiques...).

##### $\sim 9 \text{ kHz} < f < \sim 300 \text{ MHz}$ :

Perturbations véhiculées essentiellement en mode commun, mais peut avoir une source de mode différentiel. Le rayonnement dans cette bande de fréquence est bien souvent véhiculé par les câbles qui font antenne (plus ou moins efficace selon la longueur et la disposition).

On retrouve en général des bruits larges bandes provenant des commutations rapides des convertisseurs d'énergie.

##### $f > \sim 300 \text{ MHz}$ :

Perturbations de mode commun.

Plus on monte en fréquence, plus la perturbation sera visible uniquement selon un angle précis. Ces perturbations sont essentiellement dues aux horloges internes des équipements, aux harmoniques de ces horloges ou de l'émetteur radio.

#### 5. Lignes de champ électrostatiques

On appelle ligne de champ électrostatique toute "courbe orientée" de l'espace qui est tangente en tout point au champ électrostatique associé et orientée dans le même sens que ce dernier.

#### 6. Caractéristiques du champ électrostatique et électromagnétique

Les mots parasites et perturbations électromagnétiques sont synonymes : ce sont des signaux électriques indésirables. L'utilisation maîtrisée des logiciels orientés pour évaluer des perturbations électromagnétiques nécessite de comprendre le vocabulaire utilisé en CEM.

#### 7. Perturbations impulsives ou entretenues

Une perturbation impulsive (ou transitoire) n'apparaît que de temps à autre : surtension foudre, coupure de contact sec ou décharge électrostatique par exemple. L'amplitude peut être forte (plusieurs kilovolts) d'où le risque de destruction d'un équipement mal protégé. En général, on tolère un dysfonctionnement après une impulsion, à condition qu'il soit auto-récupérable. Le dysfonctionnement provoqué par une impulsion HF sur un système numérique peut être statistique. Une perturbation entretenue (ou permanente) dure au moins une seconde. Elle est plus aisée à mesurer qu'une impulsion, et sa source est plus facile à identifier. Il s'agit le plus souvent de convertisseurs de puissance ou d'émetteurs radio. Les équipements analogiques à bas niveaux sont plus exposés que les systèmes numériques aux perturbations permanentes. Des perturbations répétitives à basse fréquence (à 10 kHz par exemple) composées d'impulsions HF (à 10 MHz par exemple) sont à traiter comme des perturbations HF et non BF. Il revient à l'industriel de préciser quelle erreur de mesure est acceptable durant une perturbation entretenue.

## 8. Application de la compatibilité électromagnétique.

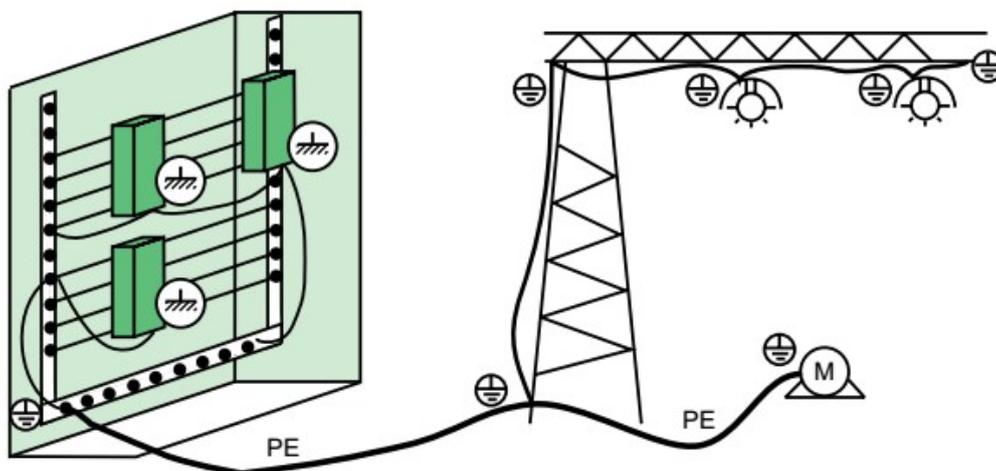
Aujourd'hui, les équipements sont sensibles à des énergies très faibles, ils contiennent des électroniques sensibles aux hautes fréquences et ils sont interconnectés. Les couplages par impédance commune peuvent donc être fréquents. Pour les éviter, un réseau de terre aussi équipotentiel que possible, pour être plus précis maillé, est indispensable. Cette solution est l'une des premières protections à prendre contre les perturbations.

Ainsi dans le réseau d'une usine, tous les câbles de protection (PE) sont à interconnecter, à relier aux structures métalliques existantes, comme le prescrit la NF C 15-100 (fig. 1 ). De même, dans un équipement, toutes les masses et carcasses d'appareillages sont à relier au plus court avec des raccords (fils ou tresses) peu impédants en HF, larges et courts, à un réseau de masse maillé. Le câblage d'une armoire électrique en est un exemple type : toutes les masses sont à interconnecter.

A ce sujet il faut noter un changement : le principe des masses reliées en étoile, parfois utilisé avec les équipements électroniques analogiques sensibles à « la ronflette 50 Hz », est maintenant abandonné au profit des réseaux maillés beaucoup plus efficaces contre les perturbations pouvant affecter les dispositifs numériques actuels, relais de protection et systèmes de contrôle-commande.

## 9. La séparation électrique des circuits

Cette technique consiste à séparer les sources d'énergie (habituellement 50 ou 60 Hz). Son but est d'éviter la perturbation d'un équipement sensible par les perturbations conduites générées par d'autres équipements connectés à la même source d'alimentation. Son principe : un équipement sensible et un équipement perturbateur ont deux alimentations séparées par des impédances importantes aux fréquences perturbatrices. Les transformateurs (et non pas Auto transformateurs) sont des séparateurs efficaces, particulièrement pour les basses fréquences : transformateurs MT/BT, transformateurs d'isolement, et tous les transformateurs d'entrée sur les électroniques sont des limiteurs de propagation des perturbations conduites. Il est parfois nécessaire d'implanter un filtre séparateur pour éliminer les perturbations HF. Si, de plus, l'équipement sensible nécessite une alimentation secourue en cas de défaillance secteur, il pourra être alimenté par une Alimentation Sans Interruption (ASI), dans la mesure où cette ASI comporte le ou les transformateurs d'isolement nécessaires.



*fig. 1 : les maillages des circuits et des réseaux de masses et de terre sont très souvent confondus dans les armoires électriques.*

## **10.conclusion**

L'introduction de l'électronique dans un grand nombre d'applications, et notamment dans les appareillages électrotechniques, oblige à prendre en compte une contrainte nouvelle : la compatibilité électromagnétique -CEM-. Assurer un bon fonctionnement en milieu perturbé et ne pas être eux-mêmes des perturbateurs sont des impératifs de qualité de ces produits.

Ces deux impératifs nécessitent une compréhension de phénomènes complexes, au niveau de la source, des couplages, et au niveau de la victime. Ils obligent à respecter un certain nombre de règles dans la conception, l'industrialisation et la réalisation des produits.

Le site et l'installation jouent également un grand rôle dans la CEM. D'où la nécessité de penser dès les premières études à la disposition architecturale des éléments de puissance, aux passages de câbles, aux blindages... Et, avec des matériels ayant une bonne CEM, une installation bien réalisée apporte des marges importantes de compatibilité. Seules des mesures nécessitant des compétences et des matériels sophistiqués permettent de quantifier la CEM de différents matériels.

Le respect des normes permet ainsi l'assurance du bon fonctionnement d'un appareil dans son environnement électromagnétique.

## Chapitre II. Méthode de calcul des interactions électromagnétiques

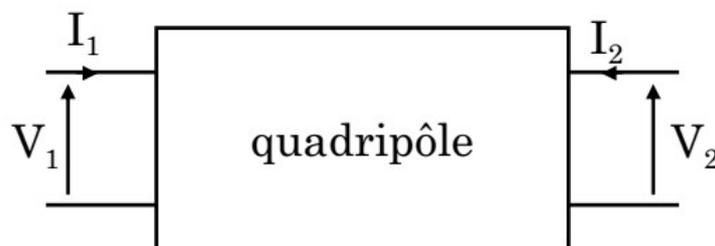
### 1. Notion de graphe de la représentation par la Méthode de Kron

Le formalisme imaginé et proposé par Gabriel Kron a certes engendré par la suite la méthode du même nom, mais permet avant tout de théoriser de nombreux domaines de la physique. Elle en résout rien en elle-même, contrairement à ce que le terme « méthode » pourrait faire penser. Mais permet d'établir l'équation tensorielle d'un système. Cet aspect, peu ou pas connu dans la communauté de la CEM a pourtant donné lieu à de très nombreux travaux scientifiques de hautes volées dans des communautés de physiciens dont entre autre la « Japanese Tensor Society ». volumes de 1000 pages en moyenne portant sur l'application de l'analyse tensorielle des réseaux à des domaines aussi variés que la modélisation de processus phonétiques, celle des cristaux, des déformations inélastiques, de la vision, etc. On peut profiter de l'ensemble de ces travaux pour développer une théorie adaptée au métier de la CEM. Evidemment, une théorie ne peut être présentée de façon exhaustive en un article. Nous évoquons ici simplement ses points principaux et donnons les pistes et références qui permettront à ceux qui le désirent d'en aborder les détails.

### 2. Matrice des impédances

Un quadripôle est un composant ou un circuit (ensemble de composants) à deux entrées et deux sorties qui permet le transfert d'énergie entre deux dipôles. Les signaux électriques en entrée et en sortie peuvent être de nature différente (tension, courant, puissance) On distingue deux types de quadripôles : actifs et passifs.

Par convention, on donne le sens positif aux courants qui pénètrent dans le quadripôle. On doit les premières études sur les quadripôles au mathématicien Allemand Franz BREISIG (1868 - 1934) dans les années 1920.



### 3. Principe général des ondes guidées

Un guide d'ondes est un système physique qui sert à guider les ondes électromagnétiques ou les ondes acoustiques, pour les maintenir confinées dans un milieu particulier, sur une certaine distance.

Les notions de propagation guidée et d'ondes guidées se rencontrent notamment en physique, en optique et en télécommunication, à des échelles métriques, centimétriques ou bien plus petites (dans certains circuits intégrés par exemple).

En pratique un guide d'ondes est un dispositif autrefois toujours métallique, aujourd'hui éventuellement constitué de polymères, permettant la propagation d'ondes par réflexions multiples à la manière d'une fibre optique.

Le modèle le plus simple de guide d'ondes est le guide d'ondes « à saut d'indice ». Il existe des guides d'ondes rigides ou flexibles

#### 4. Signification physique du vecteur de Poynting

Le vecteur de Poynting est défini par le produit vectoriel  $\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H}$  et est censé donner la direction de propagation de l'onde EM et le flux d'énergie par unité de surface. Cette idée de "flux d'énergie" est problématique. D'une part,  $\vec{P}$  n'est défini qu'à partir de  $\vec{E}$  et  $\vec{H}$ , données insuffisantes pour conclure que ce serait une onde EM.  $\vec{E}$  et  $\vec{H}$  pourraient être des champs en zone proche d'une source donc liés à des ondes non planes, ou des champs statiques, ou des champs de sources différentes pour  $\vec{E}$  et  $\vec{H}$ . Que signifie alors  $\vec{P}$  ?

D'autre part, si deux sources synchrones interfèrent quelque part dans l'espace, il y a des zones d'interférences additives et d'autres destructives. L'énergie ne s'est donc pas propagée en ligne droite des sources au point test en suivant les ondes EM, mais s'est redistribuée dans l'espace. Cela a pour corolaire que si l'on avait réellement un flux d'énergie donné par le vecteur de Poynting, l'énergie aurait suivi, dans le même temps que l'onde, un chemin plus long qu'elle, laquelle est supposée se propager à la vitesse  $c$ .

Si l'on s'en tient à ce qu'on observe, l'énergie apparaît seulement dans le champ et non dans l'onde puisque, on vient de le voir, deux ondes EM peuvent se superposer en opposition dans certaines zones d'espace, annulant ainsi leurs champs et donc l'énergie disponible, tout en continuant leur trajet, les champs et l'énergie réapparaissant plus loin.

L'énergie des champs EM ne se matérialise que lorsqu'un récepteur les absorbe (antenne radio ou effet photo-électrique). Cette énergie est potentielle dans le champ, pas dans l'onde. Bien que la source rayonnante dissipe réellement de l'énergie, le concept d'énergie transportée par l'onde ne tient pas, et celui de "flux" d'énergie me semble ne pas avoir plus de sens que de parler d'un "flux" lumineux pour un spot mouvant, projeté sur un écran.

#### 5. Potentiel et vecteur de Poynting

La propagation de l'énergie se manifeste expérimentalement dans de nombreux cas :

- On peut ressentir son effet si l'on s'expose aux rayons solaires ou au rayonnement d'une source chaude;
- De même tout émetteur radio expédie de l'énergie à travers l'espace, une infime partie de cette dernière étant captée par votre récepteur radio.

Nous allons essayer de relier localement cette énergie qui se propage, au champ électromagnétique qui la transporte. Nous supposerons le milieu de propagation parfait, c'est à dire homogène, isotrope et linéaire.

Le vecteur

$$\vec{\mathcal{R}} = \vec{E} \times \frac{\vec{B}}{\mu_0}$$

$\vec{\mathcal{R}}$  est appelé le vecteur de Poynting. Sa direction donne en chaque point, la direction d'écoulement de l'énergie et son flux à travers une surface est égal à la puissance électromagnétique instantanée rayonnée par cette surface. Les courbes tangentes en chaque point au vecteur de Poynting peuvent être considérées comme des trajectoires de l'énergie; on les appelle les rayons électromagnétiques.

#### 6. Onde plane progressive et uniforme sinusoïdale

Puisque  $(\vec{\mathcal{R}}, \vec{B}, \vec{n})$  forment un trièdre trirectangle direct le vecteur  $\vec{\mathcal{R}}$  a même direction et sens que  $\vec{k}$  c'est à dire que l'énergie s'écoule dans le sens de propagation (ce résultat n'est pas général; en effet dans un milieu anisotrope par exemple  $\vec{\mathcal{R}}$  et  $\vec{k}$  ne sont pas colinéaires).

## Chapitre III. Pénétration dans les blindages de câbles

### III.1 Traitement des boîtiers blindés

Les blindages électromagnétiques ont pour but de protéger des installations électroniques (ou électriques) contre les effets redoutables de certains couplages électromagnétiques. Un blindage permet d'accroître l'immunité électromagnétique d'un équipement ; cette fonction est aussi réversible puisqu'elle peut réduire l'amplitude de rayonnements indésirables. Face aux phénomènes de perturbations électromagnétiques, le blindage réagit comme une frontière physique, isolant les composants sensibles aux perturbations ou confinant les sources rayonnantes dans un volume restreint. Pour diverses raisons, surtout liées à la nature physique des matériaux qui composent le blindage ainsi qu'aux contraintes technologiques imposées par leur fabrication ou leur installation, cette frontière n'est pas totalement imperméable.

Un parasite résiduel peut donc pénétrer dans la zone protégée par le blindage. Comme le précisent les définitions usuelles rappelées dans le premier paragraphe de l'article, on attribue aux blindages une efficacité. Il peut s'agir d'un rapport d'amplitude ou d'un paramètre linéique homogène à une impédance.

La protection apportée par les blindages se résume dans la plupart des cas à une association de composants où se conjuguent des câbles blindés, des enceintes blindées et des connecteurs.



### III.2 Sources de bruit dans les circuits électroniques

Le phénomène est bien connu : les circuits électroniques génèrent un bruit basse fréquence en  $1/f$  qui parasite la qualité des signaux transmis. Depuis sa première identification dans des tubes à vide en 1925, l'omniprésence de ce bruit a incité de nombreux chercheurs à en chercher l'origine. Cependant, ce n'est que récemment qu'une réponse claire a été obtenue, grâce à des expériences basées sur l'utilisation de graphène multi-couches de haute qualité. La découverte est essentielle pour permettre la poursuite de la course à la miniaturisation des dispositifs électroniques conventionnels, et pour améliorer les applications du graphène dans les domaines des capteurs et des communications à haute-fréquence.

**Le graphène** est un matériau bidimensionnel cristallin, forme allotropique du carbone dont l'empilement constitue le graphite. Bien que connu depuis de nombreuses années et théorisé dès 1947 par Philip R. Wallace (en)<sup>1</sup>, il n'a pu être extrait qu'en 2004 par Andre Geim, du département de physique de l'université de Manchester. Pour cette découverte, Andre Geim a reçu, avec Konstantin Novoselov, le prix Nobel de physique en 2010.

### III.3 Évolution des technologies

Les problèmes de compatibilité électromagnétique proviennent pour la plupart des câbles d'alimentation ou de circulation d'informations. Il est donc important de bien pouvoir choisir les câbles appropriés pour limiter les risques. On peut notamment prendre :

1. les câbles avec blindage métallique (écran, tresse, feuillard). L'écran autour du câble permet d'atténuer l'influence des champs perturbateurs de hautes fréquences.
2. la paire torsadée. Il s'agit d'un câble dont le conducteur aller et le conducteur retour sont torsadés afin que les effets d'un champ magnétique sur les 2 conducteurs s'annulent.
3. la paire torsadée blindée. Ce type de câble combine les 2 aspects ci-dessus. Il est préconisé dans les applications très sensibles.
4. la fibre optique. Insensible aux perturbations électromagnétiques, la fibre optique est de plus en plus utilisée, d'autant plus que les fabricants proposent maintenant des câbles fiables, robustes et d'utilisation facile. Une des contraintes réside dans l'utilisation des convertisseurs courant/optique et inverse. D'autre part, pour la CEM, la fibre optique contenant un renfort métallique est à éviter, et plus particulièrement pour des liaisons entre bâtiments.
5. les câbles avec blindage ferrite (ou métallique et ferrite). Le blindage ferrite est constitué d'un élastomère chargé de poudre de ferrite. Son efficacité est bonne en hautes fréquences. Un tresse ou un feuillard métallique épais peut être utilisé comme deuxième blindage, si nécessaire, pour arrêter les champs basse fréquence. Ce type de câble convient parfaitement pour assurer, par exemple, l'alimentation basse fréquence d'un appareil sensible.

Il est difficile pour un utilisateur ou un installateur de choisir parmi les câbles ci-dessus le type de câble le plus approprié à utiliser pour raccorder un appareil dans de bonnes conditions de compatibilité. Par conséquent, le choix doit être généralement guidé par les recommandations des fabricants des appareils concernés.

### III.4 Conséquences sur la CEM

- Blindage des câbles: L'efficacité du blindage dépend de la fréquence des signaux perturbateurs, de la nature du blindage et de son raccordement.
- Fréquences: Le type du blindage doit être choisi en fonction de la fréquence du signal perturbateur. Par exemple, dans le cas d'un blindage par tresse, plus la fréquence du signal perturbateur est élevée, plus la liaison courant faible risque d'être perturbée et nécessitera protection.
- Nature du blindage: On peut obtenir des fabricants de câbles les caractéristiques CEM de leurs produits, telles que les courbes d'efficacité du blindage des différents câbles en fonction de la fréquence, ainsi que l'impédance de transfert.

- Continuité du blindage: Pour être efficace, le blindage doit être continu. Il faut s'assurer qu'il n'y a pas d'interruptions au niveau des raccordements et des dérivations.
- Raccordement du blindage: Il est très important de réaliser correctement le raccordement du blindage à la masse équipotentielle, sinon le blindage lui-même agirait comme une source de perturbations, captant et émettant des signaux parasites. Le blindage doit être raccordé aux parois et enveloppes métalliques qu'il traverse. Le raccordement de certains blindages légers, par exemple, les feuillards en plastique métallisé, peut présenter des difficultés en particulier pour assurer la qualité de contact souhaitée, sur 360°.

### **III.5 Modélisation CEM et composants**

De par l'importance actuelle des services de télécommunication dans l'économie, il est important de pouvoir assurer la sécurité et la fiabilité des réseaux de télécommunication. Les phénomènes électromagnétiques qui peuvent perturber leur fonctionnement sont extrêmement nombreux. Les différents travaux sur la compatibilité électromagnétique permettent de limiter les impacts de ces perturbations, et les équipements, lorsqu'ils sont conformes aux spécifications et aux normes de CEM, peuvent être considérés comme fiables.

La qualité de service est un objectif permanent dans l'industrie des télécommunications, et les effets d'une étude de compatibilité électromagnétique, même s'ils ne sont pas immédiatement bénéfiques, le sont à moyen ou à long terme.

Il est avant tout important de se préoccuper :

- de la protection des équipements contre les agressions électromagnétiques telles que la foudre, qui est le premier élément perturbateur des réseaux de télécommunication, des surtensions diverses (industrielles ou liées aux réseaux de transport d'énergie), des décharges électrostatiques et des émissions radioélectriques.
- Des perturbations produites entre équipements implantés sur un même site, qu'ils soient radioélectriques ou non.
- Des émissions parasites créées par les équipements de télécommunication et pouvant brouiller la réception radioélectrique (services mobiles, radionavigation aérienne, radiodiffusion et télévision).

Ainsi, il faut prendre garde à ce que les équipements ne soient pas sensibles aux perturbations électromagnétiques et ne soient pas eux-mêmes source de perturbation.

#### ***Câblage dans un coffret ou dans une armoire contenant du matériel électronique sensible.***

Les interconnexions réalisées de manière quelconque sont à proscrire. Pour réduire les perturbations, il est recommandé d'opter pour un cheminement des câbles et filerie le long des parois métalliques, en prenant soin de séparer les courants faibles des courants forts.

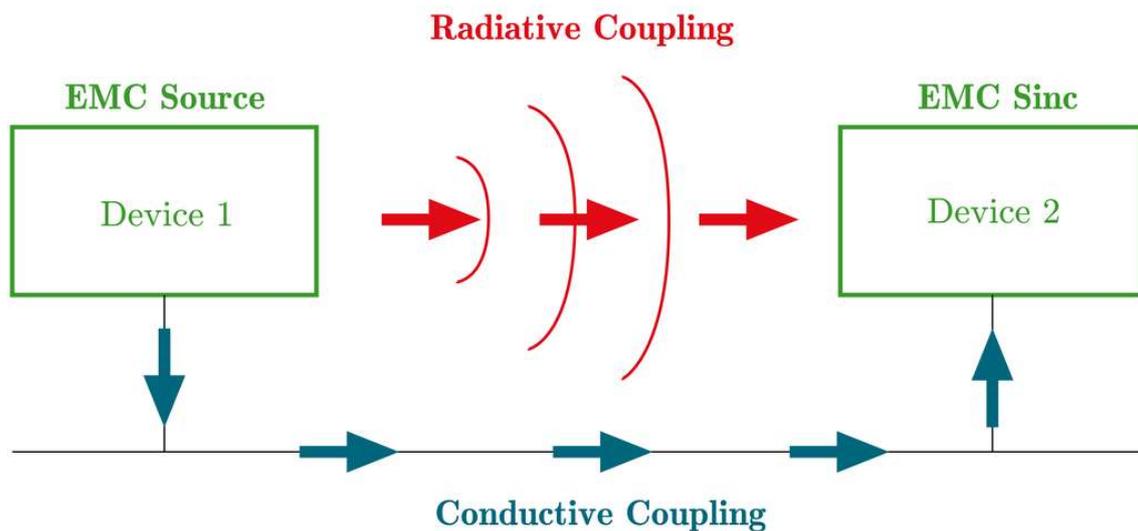
### III.6 Rayonnement E, H.

On classe les couplages en deux catégories :

Couplage par rayonnement : champ électrique, champ magnétique, champ électromagnétique ;  
couplage par conduction : transmission du signal par un conducteur (n'importe quel conducteur, et pas nécessairement un morceau de fil destiné à conduire le courant électrique : un tuyau de climatisation fait parfaitement l'affaire).

La frontière entre les deux comporte une part d'arbitraire, certaines normes classant certains couplages par champ électrique ou magnétique (mais pas tous...) dans la case « conduction ».

Par ailleurs, pour les couplages par rayonnement, les normes font aussi la distinction entre champs proches et champs lointains: Une source de perturbations électromagnétiques crée au départ souvent soit un champ électrique, soit un champ magnétique.



Mais à une certaine distance de cette source, l'onde observée sera une onde électromagnétique « plane » (dite aussi « lointaine »), combinaison d'un champ H et d'un champ E, avec le rapport  $E/H = 120 \pi (\approx 377)$ .

Cette distance est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde. Ainsi, pour les fréquences élevées, on aura toujours une onde plane dès que l'on s'éloigne un peu de la source.

La norme pourra exiger un test de susceptibilité au champ E, au champ H ou encore à l'onde plane (ou champ lointain). Les normes exigeront des tests à l'onde plane aux fréquences les plus élevées, puisque dans le cas des fréquences élevées, on aura toujours en pratique une onde « plane »

## Chapitre 4. Les techniques d'investigation en CEM

### IV.1 Tests d'immunité aux décharges électrostatiques et magnétiques

Lors de l'étude de la CEM d'un nouveau produit, il est essentiel de commencer par connaître l'environnement dans lequel ce produit sera placé. La directive CEM est claire dans ces exigences. Le produit devra ni perturber, ni être perturbé par l'environnement dans lequel il est censé être situé. D'après la directive le respect des normes harmonisées démontre le respect des exigences essentielles. Mais à contrario :

- Beaucoup de normes produits, pourtant figurant toujours comme norme harmonisée, n'ont pas évoluées depuis plus de dix ans :

- L'environnement électromagnétique a par contre vu apparaître de nouveaux perturbateurs radios utilisant des fréquences plus élevées qu'auparavant (3 G, Wifi...).
- Les technologies mêmes de certaines gammes de produits ont subi une telle évolution, que l'application de sa norme dédiée n'est plus adéquat (les récepteurs TV, les ordinateurs multimédia par exemple).

- L'environnement dans lequel sera placé le produit n'est peut-être pas celui qui a été pris en compte lors de l'écriture de la norme. Dans ces cas, l'application de la norme harmonisée n'est pas satisfaisante pour le respect des exigences essentielles de la directive. D'après l'article 6 de la directive, il est normalement prévu que l'information soit remonté et traité au niveau européen. Dans les faits, cette procédure est peu appliquée.

Deux possibilités sont donc offertes :

- Appliquer la norme harmonisée en l'état. Cette possibilité apporte :

- un risque que le produit perturbe ou soit perturbé chez l'utilisateur
- un risque que lors d'un contrôle de marché, celui-ci soit interdit à la vente par non-respect des exigences essentielles de la directive.

- Appliquer un programme d'essai dédié. En ce cas, la validation de ce programme par un organisme notifié est recommandée, mais pas obligatoire. Celui-ci est en général au courant des projets de norme en cours. Cette possibilité apporte :

- une assurance que le produit ne perturbera et ne sera pas perturbé chez l'utilisateur
- que la future évolution de la norme produit pourra déjà probablement être prise en compte. Cela évite pour les produits à longue durée de vie l'obligation de repasser des essais lors du changement de version de norme.

## IV.2 Tests d'immunité aux perturbations conduites,

il existe deux principales approches :

- la simulation numérique : on crée un modèle du système à valider, ainsi qu'un modèle de l'environnement électromagnétique, et on applique un algorithme définissant les couplages,
- la simulation analogique, encore appelée essais CEM : on place un exemplaire du système à valider dans un environnement électromagnétique de référence, et on réalise des mesures, l'ensemble étant habituellement défini dans la réglementation.

Quelle que soit l'approche, il faut trouver un optimum entre des exigences contradictoires :

### 1- la représentativité :

- l'environnement choisi (ou son modèle) sont ils représentatifs de la réalité ? (Par exemple, tester jusqu'à 1 GHz un matériel destiné à être placé dans un environnement plein de GSM, de bornes WiFi/Airport, voire de radars d'aide à la conduite de voiture (vers 70 GHz), est-ce représentatif de la réalité ? Modéliser systématiquement une onde plane, est-ce réaliste ?)
- le matériel testé est-il représentatif de la série ? L'instrumentation permet-elle de mesurer les grandeurs qui importent réellement ?
- Le modèle ne chipote-t-il pas sur des détails futiles en laissant de côté les grandeurs réellement fondamentales ? Par exemple, dans le cas d'une enveloppe mécanique :
  - prise en compte de l'épaisseur du métal, mais pas de la tolérance des fentes entre constituants au risque de reproduire une antenne patch (état de surface, conduction superficielle...)
  - capots modélisés « à la masse » alors qu'ils ne le sont que par une liaison filaire, et donc inductive.
  - Omission des câbles de liaison (traduire par « antennes »)

**2- la reproductibilité** (surtout un problème pour les essais, car la simulation numérique l'ignore purement et simplement) :

- deux essais successifs d'un même exemplaire donneront-ils le même résultat ?
- deux exemplaires successifs donneront-ils le même résultat ?
- deux essais dans des laboratoires différents donneront-ils le même résultat ?

### 3- l'éthique

- En cas de doute, prend-on la décision du plus simple chemin vers la conformité de façade pour réduire les coûts, où par assurance technique ?
- L'utilisateur, sera-t-il satisfait de mon produit si dès que son téléphone sonne mon produit s'éteint ?

### IV.3 Tests d'immunité aux perturbations rayonnées.

On distingue deux familles de techniques :

- les techniques dites d'émission ;
- les techniques dites de susceptibilité ou d'immunité
- Techniques traitant des émissions :

Tout équipement électrique ou électronique, en dehors de son fonctionnement de base, fabrique à notre insu des courants alternatifs ou d'impulsion dont le spectre en fréquence peut être très étendu (de quelques hertz à plusieurs gigahertz). Ces courants circulent dans les différents câbles ou circuits imprimés de l'appareil et donc quand ces conducteurs sont, de par leur longueur, de plus ou moins bonnes antennes, il y a émission de champ électromagnétique.

Les émissions sont mesurées soit de manière conduite (phénomènes plutôt basse fréquence), soit de manière rayonnée (phénomènes plutôt haute fréquence) avec l'appareil sous test en mode de fonctionnement le plus perturbateur.

- Dans le cadre des émissions conduites, l'appareil sous test est en général placé dans une cage de Faraday pour s'isoler de l'environnement extérieur. L'appareil sous test est alors connecté à un réseau de stabilisation d'impédance. Celui-ci a plusieurs fonctions : supprimer la composante d'énergie, standardiser l'impédance d'une ligne pour améliorer la reproductibilité de l'essai, et relier le récepteur de mesure ou l'analyseur de spectre pour permettre la mesure.

- Dans le cadre des émissions rayonnées, l'appareil sous test est communément placé sur le plateau tournant de soit sur un site de mesure en espace libre, soit dans une cage de Faraday semi anéchoïque (d'autres systèmes existent comme la cage anéchoïque ou la chambre réverbérante à brassage de modes (CRBM), mais leur utilisation dans le cadre des émissions est encore soumis à discussion). La mesure est réalisée avec l'aide d'antennes relié à un récepteur à l'aide de cordons. Il est d'usage que l'ensemble de cette chaîne de mesure soit étalonné. Le protocole de test pour le marquage CE ou FCC prévoit une recherche de la position la plus défavorable de l'appareil sous test.

En modifiant la conception de l'appareil, on peut réduire considérablement le niveau émis. Toutefois, une mauvaise conception d'un point de vue CEM peut nécessiter des modifications profondes, y compris en termes de routage. Il est essentiel que la problématique CEM soit prise en compte dès le début du projet de conception.

Les niveaux acceptables sont en général normalisés. Ainsi, les équipements électriques d'avions civils sont traités par la norme RTCA/DO160E (dernière version), les équipements grand public européens sont traités par les normes européennes (copies quasi-conformes des publications CISPR et CEI) et font l'objet du marquage « CE ».

- Techniques traitant des susceptibilités :

Terminologie :

On appelle niveau de susceptibilité d'un appareil le niveau de perturbation auquel l'appareil présente un dysfonctionnement. On appelle niveau d'immunité le niveau auquel l'appareil a été soumis lors des essais et pour lequel il doit fonctionner normalement.

On appelle niveau d'aptitude (ou critère de bon fonctionnement) le niveau des paramètres observés sur le produit considéré comme normal pour un bon fonctionnement du produit. (Exemples : la variation de vitesse du moteur ne doit être modifiée de plus de 5 % par rapport à la valeur de consigne, le rapport signal à bruit du système doit rester meilleur que 50dB...)

**Généralités :**

Certains appareils utilisés en environnement très pollué ont un niveau d'immunité beaucoup plus élevé, par exemple ceux utilisés sous le capot des automobiles. Il existe des techniques pour modifier la conception de l'appareil afin qu'il soit conforme à la norme.

Comme on peut l'imaginer, la cohabitation de nombreux appareils dans un avion ou dans une automobile, implique que tous ces équipements ne soient pas intégrés au véhicule sans que des tests sévères soient réalisés.

La CEM va déterminer : les écarts entre câbles, les compositions des câbles, les filtres à installer sur les équipements, la structure mécanique entourant l'équipement...

Les essais prévus par les normes permettent de vérifier que le niveau d'immunité est respecté mais si le test est conforme (pas de dysfonctionnement), ils ne permettent pas de connaître le niveau de susceptibilité de l'appareil.

**Critères d'aptitudes :**

Pour chaque type d'essai, il est défini si l'équipement :

- ne doit pas avoir de perte de fonction au delà de son niveau d'aptitude pendant l'essai
- peut avoir une dégradation ou perte de fonction pendant l'essai, mais doit retrouver son niveau d'aptitude sans intervention de l'utilisateur.
- peut avoir une dégradation ou perte de fonction pendant l'essai, mais doit retrouver son niveau d'aptitude avec intervention de l'utilisateur.

Essais types :

- essais d'immunité aux champs électromagnétiques rayonnés :

Les autres équipements électroniques et les émetteurs intentionnels produisent des champs électromagnétiques. L'équipement sous test doit fonctionner normalement lorsqu'il est soumis à ces champs électromagnétiques. L'appareil sous test configuré dans son mode de fonctionnement le plus susceptible est placé dans une chambre anéchoïque (ou dans une chambre réverbérante à brassage de modes (CRBM)).

Dans cette cage est placée une antenne émettrice, reliée à un amplificateur de puissance, lui-même alimenté par un générateur de signal radiofréquence. L'ensemble du spectre requis est alors balayé en fréquence avec le niveau de champ et la modulation requis.

L'écrasante majorité des appareils électroniques mis actuellement sur le marché grand public européen a un niveau d'immunité aux champs électromagnétiques rayonnés de 3 V/m pour les fréquences de 80 MHz à 2,7 GHz.

Le niveau d'immunité de 10 V/m est requis pour les appareils destinés à être utilisés en environnement industriel, et les appareils électro-médicaux de maintien de la vie (dont un dysfonctionnement peut tuer immédiatement).

- essais d'immunité aux perturbations conduites :

Plusieurs phénomènes sont testés :

- immunité aux perturbations fréquences radioélectrique induite : complément de l'essai d'immunité au champ électromagnétique, mais dans une bande de fréquence plus basse (en général de 150 kHz à 80 MHz)

- immunité aux transitoires électriques rapides en salves : immunité aux perturbations rapides provoquée par la commutation de petit relais, thermostats...

- immunité aux ondes de foudre : immunité aux impacts indirects de la foudre, ou aux perturbations dues aux commutations électriques de forte puissance

- immunité aux creux de tension : immunité aux perturbations provoquées par les coupures de tension, ou les baisses de tension suite à des appels de charges sur le réseau.

- immunité aux transitoires véhicules : immunité aux variations de tension provoquées par les appels de courant des systèmes du véhicule.

En général, le protocole de test consiste à connecter à un générateur de perturbation dédié, via un réseau de couplage/découplage, à l'équipement sous test.

- essais d'immunité aux décharges électrostatiques

- essais d'immunité aux champs magnétiques : ceux-ci peuvent être soit impulsions (dus à la foudre par exemple) ou à la fréquence du réseau d'alimentation.

## **Chapitre 5. Les Techniques de protection en CEM**

### **5.1 Protection des composants et des blindages**

Il est difficile pour un utilisateur ou un installateur de choisir parmi les câbles le type de câble le plus approprié à utiliser pour raccorder un appareil dans de bonnes conditions de compatibilité. Par conséquent, le choix doit être généralement guidé par les recommandations des fabricants des appareils concernés.