

→ R. Klein, Département
Ingénierie des équipements
de travail, centre de l'INRS-
Lorraine, Nancy

Normes de compatibilité électromagnétique (CEM)

Leur mise en œuvre lors de la validation du niveau de sécurité des systèmes électroniques

ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY STANDARDS (EMC)

IMPLEMENTATION WHEN
VALIDATING THE SAFETY LEVEL
OF ELECTRONIC SYSTEMS

In numerous sectors of activity, the action of electromagnetic disturbance on electronic systems can result in malfunctions liable to engender risks. This is why the validation of the electromagnetic compatibility of systems, which follows the design and development phases, is based on the implementation of well-defined standards.

This article examines the possibilities for implementing these constantly-evolving standards, which are based on the European "EMC" Directive. By means of concrete examples (machinery, large-size machines, personal protective equipment, automotive industry), it also indicates the limits of standardisation and how the diversity of the standards – according to system, sector of activity, requirement level, etc. – is creating a disparity in implementation within different industrial sectors.

A number of points of consideration are also given for a "EMC methodology" that may be worth developing transversally in all processes involving standard making or application of relevant standards when systems safety is concerned.

- *electronic system*
- *electromagnetic compatibility*
- *standardisation* ● *dependability*

Dans de nombreux domaines d'activité, l'action des perturbations électromagnétiques sur les systèmes électroniques peut entraîner des dysfonctionnements susceptibles de générer des risques. C'est pourquoi la validation de la compatibilité électromagnétique (CEM) des systèmes, qui suit les phases de conception et développement, est basée sur l'application de normes bien définies.

Cet article étudie les possibilités de mise en œuvre de ces normes, basées sur la directive européenne « CEM » et qui évoluent constamment. Il indique également, à l'aide d'exemples concrets (machines, machines de grandes dimensions, équipements de protection individuelle, industrie automobile) les limites de la normalisation, dont la diversité des textes - en fonction des systèmes, domaines d'activité, etc., et des niveaux d'exigence - crée une disparité dans l'application aux différents secteurs industriels.

Des pistes de réflexion sont également données pour une « méthodologie CEM » qu'il serait judicieux de développer de façon transversale dans tous les processus de normalisation, ou de mise en œuvre des textes de référence, lorsque la sécurité des systèmes est concernée.

- système électronique ● compatibilité électromagnétique ● normalisation
- sûreté de fonctionnement

L'action des perturbations électromagnétiques sur les systèmes électroniques et les conséquences qui en découlent sont l'objet de préoccupations dans de nombreux domaines, notamment professionnels (transports, télécommunications, industrie...). Faisant suite à la phase de conception et développement, la validation finale de la compatibilité électromagnétique (CEM) des produits et installations est basée sur l'application de normes d'essais, généralement bien définies.

Ces dernières évoluent constamment. Elles nécessitent un travail conséquent de réadaptation et de création, afin de pouvoir tenir compte de la majorité des phénomènes perturbateurs existant dans les environnements concernés.

Ces normes qui découlent des exigences essentielles de la directive européenne CEM [1] sont uniquement destinées à vérifier l'aptitude des dispositifs et installations à assurer correctement la ou

les fonctions pour lesquelles ils sont prévus dans un environnement où sont présentes des perturbations électromagnétiques typiques.

Or, l'action des perturbations électromagnétiques sur certains systèmes peut se traduire par des dysfonctionnements mettant en cause la sécurité des personnes [2]. C'est le cas dans le domaine des machines où l'aspect sécurité lié à l'action des perturbations électromagnétiques est pris en compte dans les différentes normes spécifiques à la sécurité.

Cet article se propose également d'étudier comment sont mises en œuvre les normes CEM pour tenir compte de l'aspect sécurité en fonction des risques liés aux dysfonctionnements dus aux perturbations électromagnétiques.

1. Objet et domaine d'application

La directive CEM est du type « nouvelle approche » ; elle mentionne des exigences essentielles qui peuvent se résumer à :

« un système ne doit pas perturber et ne doit pas être perturbé ».

Ces exigences se rapportent respectivement aux aspects émissivité et immunité. Son double objectif est de favoriser les échanges commerciaux en supprimant les réglementations disparates et d'imposer un code de bonne conduite dans la gestion de l'environnement électromagnétique [3]. Elle ne traite aucunement de l'aspect sécurité des systèmes concernés, bien qu'une meilleure maîtrise de l'environnement électromagnétique s'y rapporte. Elle mentionne qu'il faut appliquer les normes harmonisées, mais ne mentionne pas explicitement qu'il faut effectuer les essais. Les exigences essentielles constituent « le minimum que doivent respecter les constructeurs et le maximum que peut demander la réglementation » [4]. Les fréquentes difficultés d'interprétation que présente la directive ont nécessité l'édition d'un guide d'application [5].

Certains types de produits sont exclus de cette directive car ils sont couverts par une autre directive spécifique (exemple : automobile, dispositifs médicaux implantables...) qui prend en compte la CEM.

Les machines, couvertes par une directive spécifique relative à leur sécurité, dite directive « Machines » [6], ne sont cependant pas exclues du champ d'application de la directive CEM car les objectifs de ces deux directives sont clairement différents.

Elles ne peuvent être considérées comme spécifiques l'une par rapport à l'autre et doivent être appliquées de manière parallèle et complémentaire [5]. Ce concept relève de l'aspect croisé de l'application des directives horizontales et verticales pour le marquage CE [7].

2. Les normes CEM

2.1. Généralités

La compatibilité électromagnétique met en jeu un système « coupable » et un (ou des) système(s) « victime(s) » (fig. 1). Il existe donc des normes relatives à chacun des deux types de systèmes mentionnés ci-dessus : les normes d'émissivité pour les « coupables » et d'immunité pour les « victimes » dont les références sont régulièrement publiées dans le *Journal Officiel des Communautés Européennes*.

Chacune de ces normes se rapporte à un produit, une famille de produits ou à un type d'environnement.

Le but des normes est tout d'abord de servir d'outil, pour démontrer, de manière rigoureuse et reproductible, la présomption de conformité aux exigences essentielles de la directive CEM. Leur application est de nature volontaire. Elles prennent en compte la plupart des phénomènes de perturbations rencontrés et permettent ainsi de valider l'aptitude d'un dispositif ou d'un système à fonctionner de façon satisfaisante dans un environnement électromagnétique prédéterminé, en fonction des niveaux de sévérité appliqués.

Cependant, la prise en compte de normes, dont une partie du contenu va dans le sens de l'amélioration du niveau de sécurité, est insuffisante pour atteindre de façon satisfaisante un objectif de sécurité. Mais on ne peut mettre en cause l'existence des normes car elles constituent, entre autres, un moyen de conserver la maîtrise de l'environnement électromagnétique.

2.2. Emissivité

Les normes fondamentales contiennent à la fois des indications précises sur les méthodes de mesure et des valeurs limites. Ces normes découlent de celles du CISPR (Comité international spécial des perturbations radioélectriques), destinées à protéger les radiocommunications.

La plupart de ces normes concernent une famille de produits (exemple : les appareils de traitement de l'information (équipements informatiques essentiellement), les appareils ISM (industriels, scientifiques et médicaux) (fig. 2), etc.).

Les normes génériques européennes concernant le milieu industriel sont identiques aux normes fondamentales relatives aux ISM.

Il existe depuis peu des normes relatives à certains phénomènes particuliers que l'on peut qualifier de « basse fréquence », par exemple les harmoniques et les papillotements de la tension d'alimentation (en anglais : flicker).

Du fait qu'à l'origine ces normes ne concernaient que la protection des radiocommunications, leur mise en oeuvre actuelle peut s'avérer difficile. En effet, la distance minimale de mesure est de 10 m en laboratoire. Pour les installations industrielles, les valeurs limites sont fixées pour des points de mesure situés à 10 ou 30 m de l'enceinte du bâtiment où est implantée l'installation. De plus, les mesures s'effectuent en valeur moyenne ou « quasi crête ». Or, il suffit d'une impulsion unique, donc de valeurs moyennes et quasi crête nulles, pour perturber un circuit numérique.

De nombreux systèmes potentiellement victimes, dont certains relatifs à la sécurité, sont amenés à être utilisés à proximité des sources de perturbations.

Par conséquent, les mesures effectuées à grande distance ne conviennent pas pour les caractériser. Il est alors possible de mettre en oeuvre les méthodes de mesure décrites dans les normes avec un accroissement des valeurs limites en fonction de la distance de mesure.

Fig. 1. Systèmes « coupables » et « victimes » - « Offender » and « Victim » systems

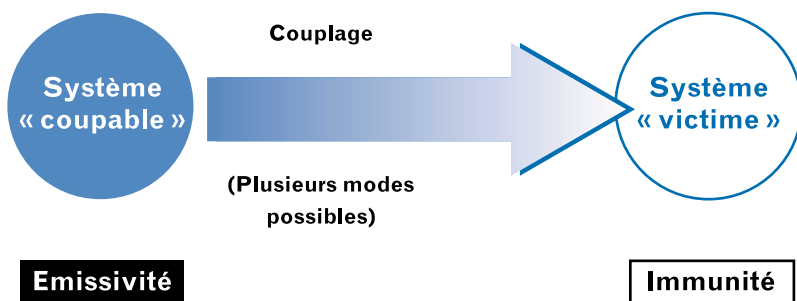




Fig. 2. Installation ISM 27 MHz (presse à souder le PVC) -
27 MHz PVC welding machine

2.3. Immunité

En plus de la nécessaire réduction du niveau d'émissivité des sources de perturbation, s'ajoute l'aspect très important de l'immunité des systèmes.

Une immunité insuffisante face à une source de perturbation conduit à un dysfonctionnement [2].

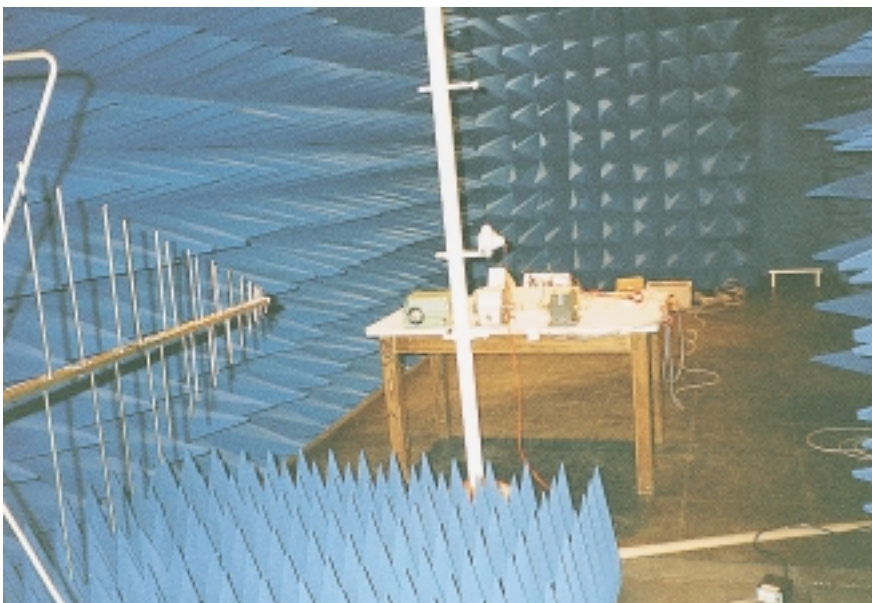
Le manque d'immunité, c'est-à-dire la susceptibilité élevée, nécessite de prendre en compte le comportement d'un système lorsqu'il est perturbé. Il peut donc en découler des conséquences sur la sécurité.

Il existe trois types de normes relatives à l'immunité des systèmes :

- les normes fondamentales qui décrivent un phénomène de perturbation électromagnétique et la méthodologie d'essai correspondante (exemple : immunité aux décharges électrostatiques) [8] ;
- les normes génériques qui se réfèrent aux normes fondamentales et fixent des niveaux de sévérité en fonction de deux types d'environnements relatifs aux milieux domestique et industriel [9, 10] ;
- les normes spécifiques aux produits ou familles de produits qui, en plus des normes génériques ci-dessus, tiennent compte de la spécificité des équipements concernés en décrivant par exemple le mode de fonctionnement en essai [11].

Ce dernier type de norme prévaut sur les deux premiers. Les normes génériques sont des normes de défaut en l'absence de normes spécifiques de produits. Ces trois types de normes permettent de s'assurer d'une manière assez rigoureuse que les systèmes possèdent un niveau d'immunité minimal correspondant au niveau de perturbations présentes dans un environnement d'utilisation. Comme mentionné précédemment, elles ne sont destinées qu'à vérifier le fonctionnement d'un système en présence de divers types de perturbations électromagnétique, sans que l'aspect sécurité soit particulièrement concerné. Leur mise en œuvre en laboratoire s'avère généralement facile. Par contre, les essais d'immunité de grands dispositifs et d'installations sont plus ou moins délicats à effectuer, du fait de la nécessité de disposer d'installations d'essais de grandes dimensions (*fig. 3*) et de la difficulté de maîtriser certains paramètres. L'application de perturbations rayonnées en dehors d'un milieu de confinement (cage de Faraday) est interdite dans le but notamment de protéger les radiocommunications (CISPR). Des méthodes de substitution sont à l'étude (injection de courant dans divers types de liaisons, cf. § 5.2).

Fig. 3. Chambre anéchoïque électromagnétique -
Electromagnetic anechoic chamber



3. CEM et sécurité

3.1. Généralités

La sécurité des systèmes implique des prescriptions normatives supplémentaires à celle de la CEM. De nombreux produits ou systèmes conformes aux normes d'immunité ont présenté des dysfonctionnements en exploitation. A partir de l'analyse de risque qui doit précéder toute démarche d'amélioration et de validation du niveau de sécurité, il est nécessaire de déterminer les parties critiques sur le plan sécurité, de définir une marge de compatibilité en tenant compte de l'environnement dans lequel sera utilisé le système et un mode de défaillance.

Un exemple de cette démarche nous est donné dans un document de la NASA [12]. La prise en compte de l'aspect sécurité nécessite donc un travail de conception relatif à la CEM plus approfondi. Cela se traduit par l'adjonction de composants destinés à améliorer l'émissivité et l'immunité et à obtenir, le cas échéant, un repli en position sécurité. La validation de cette démarche est obtenue à l'aide de tests CEM spécifiques.

En conséquence, l'amélioration du niveau de sécurité attaché à la CEM ne doit pas se baser uniquement sur les normes CEM. L'application des règles de base (ou de l'art) permet de solutionner les trois quarts des problèmes d'immunité et/ou d'émissivité et d'avoir une marge de compatibilité suffisante entre les conditions d'environnement électromagnétique et les caractéristiques du produit. Avec l'avènement de calculateurs de plus en plus puissants et le développement de la modélisation mathématique, il devient de plus en plus courant d'effectuer, au stade de la conception, des démarches prédictives concernant l'émissivité et l'immunité, constituant à elles deux uniquement la CEM des systèmes.

La sécurité ne se limitant pas à ces deux aspects, il convient d'aller au-delà, en s'intéressant au comportement en mode perturbé. Or, la modélisation correspondante s'avère nettement plus difficile à réaliser car elle doit mettre en œuvre un nombre élevé d'altérations possibles des informations numériques résultant de l'action des perturbations.

Dans le but d'informer les experts constituant les groupes de travail chargés de la normalisation spécifique à certains produits ou familles de produits (appelés

communément « comités de produits »), ainsi que les concepteurs et les installateurs sur l'aspect sécurité qui, dans de nombreux cas, est lié à la CEM, la CEI (Commission électrotechnique internationale) élabore un projet de rapport technique [13].

Ce document de portée générale indique la nécessité de la prise en compte de la CEM à différents stades du cycle de vie d'un produit et d'un système, dont l'analyse de risque a montré que l'action des perturbations électromagnétiques pouvait avoir une conséquence sur la sécurité (fig. 4). Il indique aussi les conditions particulières de validation du niveau de sécurité lié à l'action des perturbations, en préconisant des règles de base spécifiques à appliquer lors des essais.

Il s'agit de l'unique document de portée générale issu de la normalisation qui établit clairement le lien entre les perturbations électromagnétiques et la sécurité des personnes et qui préconise une méthodologie de prévention allant au-delà de la simple application des normes.

3.2. Dans le domaine des machines

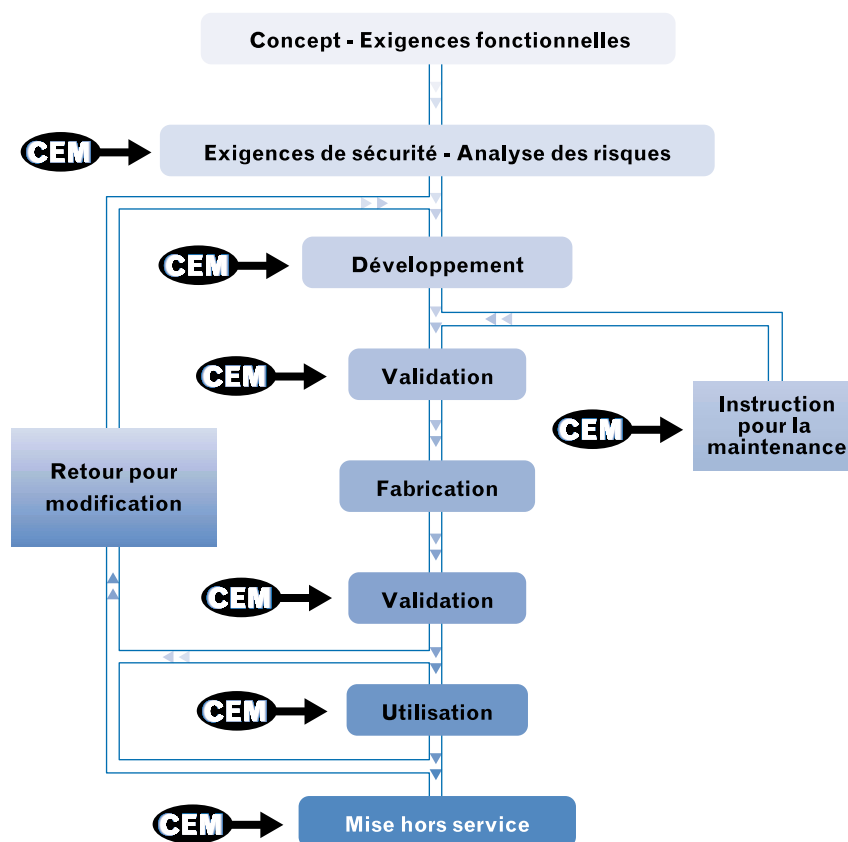
3.2.1. Situation actuelle

Parmi les exigences essentielles de sécurité figurant dans la directive « Machines », on trouve d'une part, l'aptitude des systèmes de commande à résister aux influences extérieures et d'autre part, la suppression des risques dus à des situations anormalement prévisibles. Les perturbations électromagnétiques font partie des influences extérieures.

La directive est encore plus explicite en ce qui concerne les rayonnements extérieurs, ces derniers ne devant pas perturber le fonctionnement du système.

La diminution occasionnelle du niveau d'immunité d'un dispositif, de même que la variation des caractéristiques de l'environnement électromagnétique allant dans le sens d'une plus grande agressivité, sont des situations anormales prévisibles.

Fig. 4. Prise en compte de la CEM aux différents stades de la vie d'un système - EMC must be taken into account at the various stages of the life of a system



La directive « Machines » [6] exige une limitation de l'émissivité des agents physiques, donc de l'émissivité rayonnée. Même si cette limitation est tout d'abord prévue pour éviter l'exposition des personnes au rayonnement, on pourrait supposer qu'elle contribue néanmoins à limiter l'émissivité rayonnée qui peut perturber d'autres systèmes relatifs à la sécurité. Mais les valeurs limites du niveau d'émissivité, donc d'exposition de l'opérateur, sont dans ce cas nettement plus élevées que celles préconisées dans les normes CEM (cf. § 2.2). La directive « Machines » prend donc en compte le phénomène des perturbations électromagnétiques, mais l'aspect CEM n'est pas mentionné de façon explicite.

La prise en compte de la CEM est réelle dans toutes les normes de différents niveaux (A, B1, B2, C) relatives à la sécurité des machines qui découlent de la directive. Il ne s'agit cependant que de la mise en œuvre de normes d'immunité aux perturbations. Elles sont un critère d'aptitude du système à assurer la fonction de sécurité jusqu'à un niveau donné selon le type de perturbation, c'est-à-dire l'un des critères de disponibilité nécessaires à tout dispositif de sécurité sous peine de retrait de l'installation.

Les différents niveaux des normes machines, ainsi que la variété de normes faisant partie d'un même niveau, conduisent à une disparité des préconisations CEM dans ce domaine. Cela est dû non seulement au nombre élevé de groupes de normalisation qui travaillent de façon indépendante, mais aussi à la difficulté pour les experts en sécurité des machines de bien connaître les normes CEM en vigueur, d'autant plus que ces dernières évoluent constamment. Il en résulte un manque d'homogénéité entre les chapitres de normes relatifs aux prescriptions en matière d'immunité, tant sur les types d'essais que sur les niveaux de sévérité. *L'annexe* résume sous forme de tableaux les divers modes de prise en compte de l'aspect CEM dans les principaux textes « Machines ».

Le mode de fonctionnement du dispositif en essai n'est pas toujours bien défini. Or ce paramètre est nécessaire pour détecter tout dysfonctionnement qui entraîne un abaissement du niveau de sécurité. Pour certains dispositifs, par exemple les automates programmables, il est également nécessaire de prévoir un mode de fonctionnement pour une application donnée. Cela permet d'analyser l'impact d'un dysfonctionnement sur le niveau de sécurité de l'ensemble du système formé par le dispositif et son application. Il faut

cependant noter que les niveaux de sévérité préconisés pour les essais CEM ne permettent pas toujours d'obtenir un dysfonctionnement. Ce sont généralement ceux figurant dans les normes génériques CEM relatives à tous les types de produits et systèmes destinés à être utilisés en milieu industriel, indépendamment de tout aspect de sécurité. Cela amène à s'interroger sur la nécessité d'une plus grande sévérité lorsque la sécurité est concernée, tout en restant réaliste par rapport aux conditions d'environnement réellement rencontrées.

3.2.2. Machines de grandes dimensions

Compte tenu de leur taille, l'analyse du niveau de sécurité liée à l'effet des perturbations électromagnétiques ne peut être effectuée en appliquant simplement les normes relatives aux systèmes pouvant être testés en laboratoire. Un projet de norme CEM concernant ces machines prend en considération le volet sécurité qui en découle [14]. Il préconise la distinction entre sous-ensembles selon leur criticité par rapport à la sécurité ainsi que des méthodes d'essais et niveaux de sévérité appliqués à chacun de ces sous-ensembles. Ce projet propose d'accroître les niveaux de sévérité pour les sous-ensembles critiques. Comme le mode de fonctionnement de la machine et/ou du sous-ensemble concerné ne peut être décrit précisément dans ce type de norme, le projet recommande de se placer dans le cas le plus critique.

Une démarche similaire est adoptée pour les engins mobiles de chantier [15]. Elle s'inspire à la fois des directives « Véhicules routiers » [16] et CEM. La norme permet de procéder à des essais sur l'engin lui-même et sur les sous-ensembles électriques et/ou électroniques. Pour ces machines, les fonctions critiques pour la sécurité sont celles qui permettent le contrôle de la machine. Les niveaux de sévérité sont alors plus exigeants. La taille des machines ne permet pas différents modes d'activation des fonctions de commande, par exemple le déplacement de l'engin pour s'assurer d'une absence d'accélération intempestive. Seule la position d'arrêt avec les commandes prêtes à fonctionner est possible.

3.2.3. Installations fixes

La directive CEM s'applique également aux installations fixes car elles peuvent émettre des perturbations électromagnétiques et subir les effets de celles provenant d'autres équipements. D'après son guide d'application [5], les compétences réunies des constructeurs de sous-ensembles et des installateurs permettent d'obtenir un fonctionnement correct de l'installation. La directive « Machines » s'applique également aux installations ; par conséquent, il convient d'adopter une démarche identique à celle concernant les systèmes relatifs aux machines, mentionnée précédemment. Cependant, comme pour les machines de grandes dimensions, il est difficile d'appliquer les normes CEM existantes sans adopter quelques aménagements.

3.3. Dans le domaine des équipements de protection individuelle (EPI)

Actuellement, certains EPI sont dotés de systèmes électroniques qui remplacent les systèmes mécaniques et physiques utilisés jusqu'à présent. Il s'agit des filtres électro-optiques pour soudeurs à arc (protection de l'œil), de protecteurs antibruit (protection de l'ouïe) et d'appareils de protection respiratoires. Dans le cadre de la sûreté de fonctionnement, la directive spécifique aux EPI [17] exige qu'ils aient une résistance suffisante aux effets des facteurs physiques d'environnement. Comme dans le cas des exigences de la directive « Machines », les effets dus à l'action des perturbations électromagnétiques sont inclus dans ces facteurs. Par conséquent, la directive EPI prend en considération l'aspect CEM et, plus précisément, le volet « immunité aux perturbations ».

Malheureusement, les normes [18] spécifiques à ces dispositifs abordent peu, voire même pas du tout l'aspect sûreté de fonctionnement, et par conséquent l'effet des perturbations électromagnétiques, alors que ces derniers sont existants. La prise en compte de la CEM, dans ces normes devrait être incluse dans une démarche de l'analyse de sûreté de fonctionnement de ces protecteurs individuels [19]. Compte tenu de la spécificité de ces produits, il serait nécessaire de développer une méthodologie CEM dans laquelle il importerait notamment de définir les modes de fonctionnement des dispositifs en essai. Cela permettra de constituer la base technique nécessaire à l'élaboration de projets de normes.

3.4. Dans un autre domaine de la sécurité (automobile)

Comme les équipements industriels, les automobiles sont de plus en plus équipées de sous-ensembles électroniques, dont les dysfonctionnements de certains d'entre eux ont des conséquences directes sur la sécurité des utilisateurs (commande du moteur, freinage) et des autres usagers de la route (contrôle du véhicule). Conscient du risque élevé dû à la probabilité d'occurrence et la gravité des événements dangereux, le Conseil des Communautés Européennes a émis une directive spécifique CEM s'appliquant aux véhicules [16]. Elle complète une directive existant précédemment et l'élargit, en incluant l'aspect immunité.

Cette directive est de type « ancienne approche » car en plus des exigences essentielles, elle décrit les essais à réaliser. Les fonctions contrôlées en premier sont celles qui sont critiques pour la sécurité des passagers et des autres usagers de la route. Les essais préconisés sont plus sévères que ceux relatifs aux machines [20]. En effet, les bandes de fréquence sont élargies et les niveaux de perturbation à appliquer sont deux à trois fois plus élevés. En plus de cette sévérité accrue, les constructeurs vont encore plus loin en faisant effectuer des essais dont le niveau de sévérité est par exemple, pour les perturbations rayonnées, vingt fois supérieur à celui préconisé par la norme relative aux équipements industriels (200 V/m dans l'automobile, comparé à 10 V/m pour les équipements industriels).

Il est à noter que ces essais sont effectués sur les sous-ensembles relatifs à la sécurité et concernent le fabricant d'équipements. Ce type d'essai partiel offre la possibilité technique d'appliquer des niveaux de sévérité élevés.

L'aspect émissivité des véhicules a été déjà pris en compte dans la première directive. La seconde directive lui fait revêtir toute son importance car une émissivité élevée d'un sous-ensemble quelconque du véhicule peut agir de façon critique sur le circuit électronique d'une fonction relative à la sécurité des usagers.

4. L'environnement électromagnétique

La question de la représentativité des paramètres préconisés par les normes d'essais (niveaux de sévérité, formes d'ondes, installation d'essai) par rapport à l'environnement se pose fréquemment, en particulier lorsque des aspects de sécurité sont concernés. Les normes d'immunité actuelles sont, bien sûr, basées sur les connaissances de différents types d'environnement et certaines évoluent au fur et à mesure de l'apparition de nouvelles sources de perturbations (exemple : téléphones portables) [21].

La caractérisation actuelle de l'environnement électromagnétique est suffisante pour apporter des éléments nécessaires à la normalisation concernant l'immunité minimale nécessaire au fonctionnement attendu des équipements. La connaissance est plutôt générale et basée sur des valeurs moyennes de paramètres. La gestion par des équipements spécifiques de fonctions de sécurité nécessite une connaissance plus approfondie des perturbations. Si, en fonction des résultats de l'analyse de risques sur un dispositif, on se limite par exemple à préconiser un niveau d'immunité à respecter, il est nécessaire de tenir compte de toutes les perturbations présentes et comme le précise la directive « Machines », des situations anormales prévisibles. Or, une aggravation inopinée de l'agression électromagnétique est dans de nombreux cas très probable, donc à prévoir. On peut également envisager que l'utilisation de tout dispositif de sécurité peut conduire à une dégradation du niveau de sécurité, si son immunité est insuffisante pour un environnement mal caractérisé.

En effet, soit, du fait de sa réactivité élevée aux défaillances, le dispositif remplit sa fonction en mode perturbé et provoque des mises en sécurité intempestives, soit il ne sera plus en état de remplir la fonction de sécurité de façon satisfaisante. Dans le premier cas, il sera retiré et la fonction de sécurité sera inexistante.

Dans les deux cas, on en déduit aisément qu'il y a aggravation du risque pour les utilisateurs (cf. § 3.2.1).

La connaissance approfondie des paramètres de l'environnement électromagnétique est difficile à obtenir. Ce dernier est parfois constitué par des perturbations fréquemment présentes, caractéristiques du milieu industriel et/ou professionnel

concerné et de perturbations aux paramètres aléatoires : fréquence et moment d'apparition, niveaux, forme d'onde, durée, etc. Ces perturbations aléatoires peuvent être causées par un équipement utilisé occasionnellement (outil portatif, téléphone portable) ou bien par la dégradation inopinée du niveau d'émissivité d'un équipement industriel. Comme ces situations sont difficilement maîtrisables, ces perturbations sont à prendre en compte. Il est donc nécessaire de pouvoir disposer de systèmes de mesure dotés d'enregistreurs, permettant des mesures sur une période suffisamment grande, afin de pouvoir capturer le maximum de perturbations. Les enregistreurs actuels télécommandables effectuent des mesures sur une période qui s'étend sur plusieurs mois et télétransmettent les résultats.

5. Prise en compte de la CEM liée à l'aspect sécurité - Amélioration

5.1. Textes de normes

Le manque d'homogénéité des prescriptions relatives aux essais d'immunité amène à s'interroger sur la place que ces dernières doivent occuper dans la normalisation relative à la sécurité des machines. Elles peuvent figurer en amont, c'est-à-dire dans les normes générales ou bien dans chaque norme de dispositif ou famille de dispositifs.

En prenant comme exemple la norme générale EN 954 [22], il serait par exemple possible de définir dans une telle norme des méthodes d'essais, de préconiser des niveaux de sévérité et des critères de défaillance (exemple : non dangereux, dangereux, tolérés) en fonction des catégories définies dans cette norme. Le mode de fonctionnement du dispositif sous test serait lui défini dans la norme le concernant spécifiquement. Une autre mesure pourrait consister, comme dans la norme EN 61496 [23], relative à une famille de détecteurs électroniques de personnel, d'inclure la méthode d'essai, les niveaux de sévérité ainsi que le mode de fonctionnement du dispositif lors de l'essai dans la norme de produit le concernant. Cette disposition risquerait en contrepartie d'avoir pour conséquence de perpétuer l'actuelle disparité des méthodes d'essais en l'absence de concertation entre les différents groupes de travail en normalisation.

5.2. Validation de la sûreté de fonctionnement des systèmes électroniques

Dans le cadre normatif des machines, une prochaine version du document, relatif aux dispositifs de sécurité assurant la détection de personnel, comporte un accroissement d'un facteur trois les niveaux de sévérité appliqués pour l'essai aux perturbations rayonnées et conduites entretenues. Cette disposition permet d'obtenir un accroissement du niveau d'immunité du dispositif allant dans le sens d'une meilleure disponibilité (cf. § 3.2.1 et 4) et d'en obtenir le dysfonctionnement lors d'applications de perturbations, donc d'en analyser les conséquences sur la sécurité. Certains constructeurs de dispositifs de sécurité ont déjà anticipé le relèvement des niveaux lors de la conception et effectuent eux-mêmes des essais de qualification plus sévères que le cadre normatif.

Cela a été fait notamment pour tenir compte de l'environnement d'utilisation possible des dispositifs et d'une dispersion possible des caractéristiques CEM lors de leur production en grand nombre. De par leur conception et les exigences de sécurité auxquelles ils doivent répondre, de nombreux dispositifs de sécurité sont par nature très réactifs, c'est-à-dire qu'ils doivent activer leur fonction de sécurité à la moindre défaillance détectée. Par conséquent, il peut s'avérer difficile de leur conférer un niveau d'immunité élevé.

Dans une démarche d'étude et d'investigation, la validation permet plus aisément d'obtenir le mode de dysfonctionnement d'un dispositif. Dans ce cas, il est moins question de représentativité des expérimentations par rapport à l'environnement réel et la configuration de l'équipement en exploitation. Il faut toutefois veiller à ne pas s'en éloigner excessivement. Les investigations conduisent à aller au-delà des paramètres normatifs tels que les bandes de fréquence, les niveaux, etc. Il est également possible de faire varier la configuration physique et le mode de fonctionnement de l'équipement. Pour obtenir le dysfonctionnement d'un dispositif il n'est pas toujours nécessaire de lui appliquer des niveaux de perturbation élevés. Le retrait des « barrières » de protection (blindages, filtres) est parfois suffisant. Il est également possible d'activer de certaines parties de logiciels mettant en œuvre des traitements d'informations plus particulièrement susceptibles aux perturbations électromagnétiques [24].

La validation du niveau de sécurité nécessite de déterminer les circuits critiques. Il est alors nécessaire de connaître leur fonctionnement et appliquer les perturbations les plus pertinentes, c'est-à-dire celles qui sont susceptibles d'interférer avec les signaux relatifs à la sécurité. Dans ce cas, l'application de perturbations de niveau élevé peut s'avérer inutile pour obtenir un dysfonctionnement que l'on veut analyser.

Des méthodes alternatives d'application des perturbations peuvent également être mises en œuvre. Par exemple, l'injection de perturbations conduites à l'aide d'une pince de couplage BCI (Bulk Current Injection) peut remplacer l'application de perturbations rayonnées lorsque celles-ci sont difficiles à mettre en œuvre.

Les perturbations électromagnétiques peuvent être considérées comme une cause commune de défaillance et aboutir à un mode commun de même nom. Dans le cas de certains équipements composés de sous-ensembles, l'analyse du mode de dysfonctionnement est à effectuer sur l'ensemble du système. La défaillance d'un sous-ensemble peut très bien être prise en compte par un autre, sans qu'il y ait des conséquences sur la sécurité de l'ensemble. Cela est également valable pour d'autres types de défaillances rencontrés. Il s'agit là d'un principe général appliqué lors de l'analyse de la sûreté de fonctionnement.

L'analyse systémique peut également conduire à déterminer des sous-ensembles propres à un système dont les défaillances sont critiques pour la sécurité ou pour la disponibilité dans le cas de dispositifs de sécurité. Bien que la profondeur d'analyse soit volontairement limitée aux sous-ensembles, elle peut déboucher sur l'évaluation intrinsèque de composants électroniques tels que des circuits intégrés élémentaires (portes logiques) ou plus complexes (mémoires) [25]. Ces derniers sont alors isolés de tout circuit du système d'origine et évalués spécifiquement [26]. Les résultats en découlant peuvent apporter des éléments utiles au stade de la conception.

CONCLUSION

Le volet CEM doit avoir sa place dans les normes relatives aux systèmes concernés en totalité ou en partie par la sécurité. C'est le cas en particulier pour les parties de systèmes de commande relatives à la sécurité et pour les machines en général. Cependant dans ce domaine, les exi-

gences CEM sont au même niveau que celles relatives aux équipements industriels en général. Il s'agit simplement d'une exigence de performance jusqu'à un niveau de perturbation déterminé. Or, il est nécessaire d'approfondir les analyses, en particulier celle concernant les dysfonctionnements dus aux effets des perturbations, afin de s'assurer d'un repli en position de sécurité. Sans aller aussi loin que dans l'exemple du domaine de l'automobile, une plus grande sévérité en matière de CEM devrait être incluse dans la validation du niveau de sécurité. Une volonté allant dans ce sens est actuellement exprimée par quelques normalisateurs. Elle a conduit dans un premier temps à accroître certains niveaux de perturbation appliqués pour les détecteurs électrosensibles de personnes.

Une meilleure prise en compte de la CEM dans les normes relatives aux machines passe aussi par une amélioration de la cohérence entre les différents chapitres concernés. Cette tâche est rendue difficile par le nombre élevé de groupes de normalisation. Une meilleure coordination en matière de CEM dans ce domaine éviterait les disparités entre les chapitres concernés. La prise en compte de la CEM ne doit pas se limiter à l'accroissement des niveaux de sévérité. Elle nécessite de développer une méthodologie permettant de connaître le mode de dysfonctionnement du dispositif analysé. Cette démarche est similaire à celle adoptée pour analyser le comportement d'un dispositif électronique en présence de défaillance de composants. La personne chargée de l'analyse dispose d'une méthodologie dont l'essentiel est décrit dans des normes. Il convient néanmoins de la compléter par des éléments d'évaluation pertinents. Il est également important de pouvoir analyser les dispositions prises pour ne pas affecter le niveau de sécurité d'un système, compte tenu qu'il est admis qu'il peut être perturbé au-delà du seuil d'immunité. La validation du niveau de sécurité lié à l'action des perturbations électromagnétiques ne peut se faire par simple application des normes. Elle nécessite une démarche de type exploratoire spécifique à chaque type de dispositif, qui consiste notamment à tenir compte des paramètres entrant dans la gestion des fonctions relatives à la sécurité.

Cette méthodologie CEM, qu'il serait judicieux de développer par des études est la base technique nécessaire à tout projet de norme dont l'aboutissement est le résultat d'un consensus entre les différents partenaires.

BIBLIOGRAPHIE

1. Directive 89/336/CEE du Conseil du 3 mai 1989 concernant le rapprochement des législations des Etats membres relatives à la compatibilité électromagnétique *Journal officiel des Communautés Européennes*, L 139, 23 mai 1989, pp. 19-26.
2. KLEIN R., CLAUZADE B. - Effets des perturbations électromagnétiques sur certains équipements. Risques liés aux dysfonctionnements. *Cahiers de Notes Documentaires - Hygiène et Sécurité du Travail*, 1991, 142, ND 1811, pp. 5-20.
3. Maîtrise de la CEM. Technologie, Réglementation, Normes. Paris, les Référentiels Dunod, 1998, partie 3, pp. 30001-415075.
4. BROUYDE F. - La grande aventure de la directive CEM 1^{re} partie. *La Lettre d'EXCEM Consultants*, déc. 1995, vol. 1, n° 2, pp. 1-3.
5. Commission Européenne - DG III - Industrie. Guide d'application de la directive 89/336 (CEM). Traduction non officielle FIEEC et FIM, 26 mai 1997, pp. 1-54.
6. Directive du parlement Européen et du Conseil du 22 juin 1998 concernant le rapprochement des législations des Etats membres relatives aux machines (98/37/CE). *Journal Officiel des Communautés Européennes*, L 207, 23 juillet 1998, pp. 1-46.
7. HIGEL B. - Association Française de CEM (AFCEM). Aspects croisés de l'application des directives horizontales et verticales pour le marquage CE. *Congrès CEM EXPO 98*, nov. 98, actes du congrès, pp. 1-4.
8. NF EN 61000-4-2 - Compatibilité électromagnétique. Partie 4 : techniques d'essais et de mesure. Section 2 : essais d'immunité aux décharges électrostatiques. Paris - La Défense, AFNOR, juin 1995, pp. 1-35.
9. NF EN 50082-1 - Compatibilité électromagnétique. Norme générique immunité Partie 1 : Environnement résidentiel, commercial et industrie légère. Paris - La Défense, AFNOR, juin 1995, pp. 1-16.
10. NF EN 50082-2 - Compatibilité électromagnétique. Norme générique immunité. Partie 2 : Environnement industriel. Paris - La Défense, AFNOR, juin 1995, pp. 1-16.
11. NF EN 55104. Compatibilité électromagnétique - exigences d'immunité pour les appareils électrodomestiques, outils électriques et appareils analogues - Norme de famille de produits. Paris-La Défense, AFNOR, sept. 95, pp. 1-18.
12. LAWTON R.W. - NASA System guidelines for EMC safety-critical circuits - design, selection and margin demonstration. NASA, sept. 1996, A3-C10, pp. 1-32.
13. EC/TC77/WG14 EMC - Methodology for the achievement of functional safety of electrical and electronic equipment, 1998, pp. 1-44.
14. Procedure for the EMC testing of large industrial machines. Document de travail issu de la normalisation européenne. CKZ task force on EMC V.2, juin 97, pp. 1-27.
15. CETIM Engins mobiles de travaux publics - Des normes et essais pour la CEM. *CETIM Informations*, n° 154, juin 1997, pp. 53-55.
16. Directive 95/54/CE de la Commission du 31 octobre 1995 portant adaptation au progrès technique de la directive 72/245/CEE concernant le rapprochement des législations des Etats membres relatives à la réception des véhicules à moteur et de leurs remorques. *Journal Officiel des Communautés Européennes*, L 266, 8 nov. 1995, pp. 1-66.
17. Directive 89/686/CEE du Conseil du 21 décembre 1989 concernant le rapprochement des législations des Etats membres relatives aux équipements de protection individuelle. *Journal Officiel des Communautés Européennes*, L 399, 30 déc. 1989, pp. 18-38.
18. EN 379 - Spécifications concernant les filtres de soudage avec facteur de transmission dans le visible commutable et les filtres avec double échelon de transmission dans le visible, mai 94, 10 p.
Pr EN 352 - Protecteurs contre le bruit - Exigences de sécurité et essais, août 93, 25 p.
EN 137 - Appareils de protection respiratoire autonomes à circuit ouvert à air comprimé, mai 93, 23 p. Paris-La Défense, AFNOR.
19. BUCHWEILLER J.P., MAYER A., KLEIN R., IOTTI J.M., KUSY A., CHRIST E., REINERT D. - Equipements de protection individuelle comportant des circuits électroniques. Sûreté de fonctionnement. *Cahiers de Notes Documentaires - Hygiène et Sécurité du Travail*, 2000, 179, ND 2128, pp. 51-60.
20. FICHEUX S. - Exigences de la directive et des normes en matière de compatibilité électromagnétique des véhicules. *Monlhéry, UTAC*, mai 1997, pp. 1-5.
21. ENV 50204 - Radiated electromagnetic field from digital radiotelephones. Immunity test. Bruxelles, CENELEC, Secrétariat central, mars 1995, pp. 1-9.
22. EN 954-1 - Sécurité des machines- Parties des systèmes de commande relatives à la sécurité. Partie 1 : Principes généraux de conception. Paris - La Défense, AFNOR, sept. 1995, pp. 1-45.
23. EN 61496-1 - Sécurité des machines. Equipements de protection électrosensibles. Partie 1 : prescriptions générales et essais. Paris - La Défense, AFNOR, juin 1997, amendement 44/206A/FDIS, p. 2.
24. ROY O. - Optimiser l'immunité de vos produits avec le logiciel embarqué. *Electronique*, nov. 1998, 86, pp. 75-77.
25. KLEIN R., DISCOURS B. - Les mémoires non volatiles face aux perturbations électromagnétiques. *Electronique*, janv. 2000, 99, pp. 76-78.
26. MAURICE O. - Evaluer la susceptibilité des composants électroniques. *Electronique*, nov. 97, 75, pp. 65-71.

Article reçu en mai, accepté en août 2000 ■

ANNEXE - Prise en compte de l'aspect sécurité lié à la CEM - Safety-related aspects of EMC in European directives and standards

Nature du document normatif	Mode de prise en compte
Directive CEM 89/336/CEE et normes CEM associées	Documents non prévus pour traiter cet aspect (exigences minimales de fonctionnement correct pour le marquage CE relatif à la CEM)
Directive « Machines » 98/37/CE	Fonctionnement non perturbé exigé (limitation de l'exposition des personnes au rayonnement électromagnétique)
Norme « Sécurité des machines - principes généraux » EN 292	Exigences de la directive « machines » reprises en annexe (mention du risque lié au rayonnement non-ionisant)
Norme « Equipement électrique » EN 60204	« Réduction des interférences électriques ». Renvoi aux normes CEM, sévérité des essais au choix
Normes « Parties des systèmes relatives à la sécurité » EN 954-1 et pr EN 954-2	« Faire face aux influences électriques ». Perte de fonction de systèmes électroniques à prendre en compte. Fonctionnement correct, pas de repli en sécurité demandé. Sévérité inférieure aux normes CEM pour certains essais
Norme « Dispositifs sensibles à la pression » EN 1760-X	Fonctionnement correct, pas de repli en sécurité demandé. Renvoi aux catégories EN 954 Liste d'essais incomplète. Sévérité supérieure aux normes CEM pour certains essais
Norme « Commandes bimanuelles » EN 574	« Résister aux influences extérieures »
Normes EPI EN 137, 352-4 et 379	Pas de prise en compte de la sûreté de fonctionnement, donc de la CEM

INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE ET DE SÉCURITÉ - 30, rue Olivier-Noyer, 75680 Paris cedex 14

Tiré à part des Cahiers de notes documentaires - Hygiène et sécurité du travail, 4^e trimestre 2000, n° 181 - ND 2139 - 1 200 ex. N° CPPAP 804 AD/PC/DC du 14-03-85. Directeur de la publication : J.-L. MARIÉ. ISSN 0007-9952 - ISBN 2-7389-0874-8