



Collection technique

Cahier technique n° 149

La CEM : la compatibilité
électromagnétique

J. Delaballe



Les Cahiers Techniques constituent une collection d'une centaine de titres édités à l'intention des ingénieurs et techniciens qui recherchent une information plus approfondie, complémentaire à celle des guides, catalogues et notices techniques.

Les Cahiers Techniques apportent des connaissances sur les nouvelles techniques et technologies électrotechniques et électroniques. Ils permettent également de mieux comprendre les phénomènes rencontrés dans les installations, les systèmes et les équipements.

Chaque Cahier Technique traite en profondeur un thème précis dans les domaines des réseaux électriques, protections, contrôle-commande et des automatismes industriels.

Les derniers ouvrages parus peuvent être téléchargés sur Internet à partir du site Schneider Electric.

Code : <http://www.schneider-electric.com>

Rubrique : **Le rendez-vous des experts**

Pour obtenir un Cahier Technique ou la liste des titres disponibles contactez votre agent Schneider Electric.

La collection des Cahiers Techniques s'insère dans la « Collection Technique » de Schneider Electric.

Avertissement

L'auteur dégage toute responsabilité consécutive à l'utilisation incorrecte des informations et schémas reproduits dans le présent ouvrage, et ne saurait être tenu responsable ni d'éventuelles erreurs ou omissions, ni de conséquences liées à la mise en œuvre des informations et schémas contenus dans cet ouvrage.

La reproduction de tout ou partie d'un Cahier Technique est autorisée après accord de la Direction Scientifique et Technique, avec la mention obligatoire : « Extrait du Cahier Technique Schneider Electric n° (à préciser) ».

n° 149

La CEM : la compatibilité électromagnétique



Jacques DELABALLE

Docteur de l'Université de Limoges en 1980, entre chez Merlin-Gerin en 1986 après sept années passées chez Thomson. Il est responsable des laboratoires CEM du centre d'essais de Schneider Electric et membre du Comité 77 (Compatibilité Electromagnétique) de la Commission Electrotechnique Internationale (CEI).

Lexique

Compatibilité ElectroMagnétique, CEM (abréviation) (VEI 161-01-07)

Aptitude d'un appareil ou d'un système à fonctionner dans son environnement électromagnétique, de façon satisfaisante et sans produire lui-même des perturbations électromagnétiques intolérables pour tout ce qui se trouve dans cet environnement.

Perturbation (électromagnétique) (VEI 161-01-05)

Phénomène électromagnétique susceptible de créer des troubles de fonctionnement d'un dispositif, d'un appareil ou d'un système, ou d'affecter défavorablement la matière vivante ou inerte.

Note : une perturbation électromagnétique peut être un bruit, un signal non désiré ou une modification du milieu de propagation lui-même.

Niveau de compatibilité (électromagnétique) (VEI 161-03-10)

Niveau maximal spécifié de perturbations électromagnétiques auquel on peut s'attendre que soit soumis un dispositif, appareil ou système fonctionnant dans des conditions particulières.

Note : en pratique le niveau de compatibilité électromagnétique n'est pas un niveau maximal absolu mais peut être dépassé avec une faible probabilité.

Niveau de perturbation

(non défini dans le VEI 161)

Valeur d'une perturbation électromagnétique de forme donnée, mesurée dans des conditions spécifiées.

Limite de perturbation

(VEI 161-03-08)

Niveau maximal, admissible des perturbations électromagnétiques mesuré dans des conditions spécifiées.

Niveau d'immunité

(VEI 161-03-14)

Niveau maximal d'une perturbation électromagnétique de forme donnée agissant sur un dispositif, appareil ou système particulier, pour lequel celui-ci demeure capable de fonctionner avec la qualité voulue.

Susceptibilité (électromagnétique)

(VEI 161-01-21)

Inaptitude d'un dispositif, d'un appareil ou d'un système à fonctionner sans dégradation de

qualité en présence d'une perturbation électromagnétique.

La **figure 1** permet de situer les différents termes ci-avant en terme de niveau.

Décibel

Unité de puissance sonore, aussi utilisée pour exprimer des rapports d'amplitude selon la relation :

$$X/X_0 \text{ (dB @)} = 20 \cdot \log_{10} X/X_0, \text{ avec}$$

X = amplitude mesurée,

X₀ = amplitude de référence,

@ = unité de mesure de X et X₀.

Quelques exemples sont donnés dans le tableau suivant (cf. **fig. 2**).

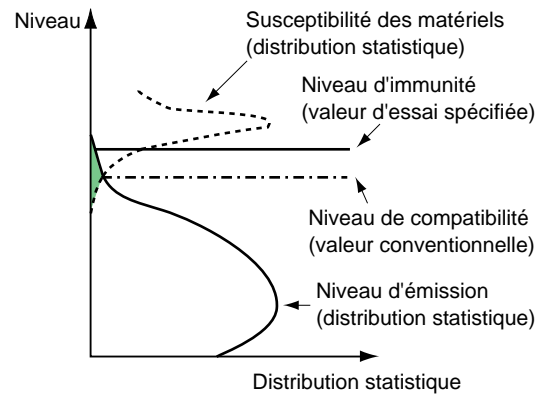


fig. 1 : positionnement des niveaux en Compatibilité électromagnétique.

Rapports des amplitudes X/X ₀	dB
1	0
1,12	1
1,25	2
1,41	3
2	6
3,2	10
4	12
5	14
10	20
100	40
1000	60

fig. 2 : rapports d'amplitude exprimés en dB.

La CEM : la compatibilité électromagnétique

La CEM est prise en compte dès l'étude pour la fabrication des matériels électrotechniques. Elle doit aussi être appliquée à leur mise en œuvre. Ainsi, de l'architecte concepteur des bâtiments jusqu'aux câbleurs d'armoires, sans oublier les ingénieurs d'études de réseaux et les installateurs, tous sont concernés par cette discipline de « paix » ; discipline ayant pour objectif de faire cohabiter en bonne harmonie des matériels susceptibles d'être perturbés et/ou d'être émetteurs de perturbations. Ce Cahier Technique, réalisé à partir d'une longue expérience acquise au sein de Schneider Electric, présente les perturbations rencontrées et quelques solutions pratiques.

Sommaire

1 Introduction	1.1 La Compatibilité Electromagnétique - CEM - est un fait, mais aussi une discipline	p. 4
	1.2 Aujourd'hui la CEM est indispensable	p. 4
	1.3 Sa théorie est complexe	p. 5
2 La source	2.1 Il est important de bien la connaître	p. 6
	2.2 Un exemple de sources permanentes de perturbations conduites	p. 7
	2.3 Un exemple de sources de perturbations rayonnées	p. 8
3 Le couplage	3.1 Différents modes de couplage existent	p. 10
	3.2 Le couplage champ à câble, en mode commun ou différentiel	p. 10
	3.3 Le couplage par impédance commune	p. 12
	3.4 Le couplage câble à câble en mode différentiel ou diaphonie	p. 12
4 La victime	4.1 Les défauts de fonctionnement	p. 14
	4.2 Des solutions	p. 14
5 L'installation	5.1 L'installation est un paramètre important dans la CEM globale d'un système	p. 17
	5.2 A sa conception	p. 17
	5.3 A sa réalisation	p. 18
	5.4 Des exemples pratiques	p. 18
6 Normes, moyens d'essais et essais	6.1 Les normes	p. 20
	6.2 Les moyens d'essais	p. 20
	6.3 Les essais	p. 21
7 Conclusion		p. 27
Annexe 1 : Impédance d'un conducteur en haute fréquence		p. 28
Annexe 2 : Les différentes parties d'un câble		p. 29
Annexe 3 : Essais réalisés aux laboratoires CEM de Schneider Electric		p. 30
Annexe 4 : Bibliographie		p. 32

1 Introduction

1.1 La compatibilité électromagnétique - CEM - est un fait, mais aussi une discipline

Elle est le fait, pour des équipements ou systèmes, de supporter mutuellement leurs effets électromagnétiques.

Selon le vocabulaire électrotechnique international VEI 161-01-07, la CEM est la capacité d'un dispositif, équipement ou système, à fonctionner de manière satisfaisante dans son environnement électromagnétique sans

introduire de perturbations intolérables pour quoi que ce soit dans cet environnement.

Cette définition est également celle adoptée par la norme NF C 15-100, chapitre 33.

Elle est maintenant une discipline, celle d'améliorer la cohabitation entre des éléments susceptibles d'émettre des perturbations électromagnétiques et/ou d'y être sensibles.

1.2 Aujourd'hui la CEM est indispensable

De fait depuis toujours, tout appareil est soumis à diverses perturbations électromagnétiques, et tout appareil électrique en génère peu ou prou.

Ces perturbations sont générées de multiples manières. A la base, leurs faits générateurs sont principalement des variations brusques de grandeurs électriques, tension ou courant.

Une présentation des perturbations électriques les plus courantes (cf. **fig. 3**) dans le domaine électrotechnique basse tension est faite dans le Cahier Technique n° 141. Le Cahier Technique n° 143 traite par ailleurs des perturbations dues aux manœuvres de l'appareillage MT - Moyenne Tension.

Ces perturbations peuvent se propager, par conduction le long des fils et câbles, ou par rayonnement sous forme d'ondes électromagnétiques. Elles engendrent des

phénomènes indésirables ; le brouillage des ondes radio et les interférences des émissions radioélectriques dans les systèmes de contrôle-commande en sont deux exemples.

Ces dernières années, plusieurs facteurs se sont conjugués pour augmenter l'importance de la CEM :

- les perturbations sont de plus en plus importantes car U et I augmentent,
- les circuits électroniques sont de plus en plus sensibles,
- les distances entre les circuits sensibles (souvent électroniques) et les circuits perturbateurs (de puissance), se réduisent.

Pour développer ses nouveaux produits, Schneider Electric a dû approfondir puis mettre en application cette discipline qu'est la CEM. En effet, dans l'appareillage électrique moderne se côtoient étroitement courants faibles et courants

Classes	Types	Origines
Energétiques	Creux de tension	<ul style="list-style-type: none"> ■ Permutation de sources ■ Court-circuit ■ Démarrage de moteurs de forte puissance
Fréquences moyennes	Harmoniques	<ul style="list-style-type: none"> ■ Systèmes à semi-conducteurs de puissance ■ Fours à arc
Hautes fréquences	Surtensions	<ul style="list-style-type: none"> ■ Coups de foudre directs ou indirects ■ Manœuvres d'appareils de commande ■ Coupure de courants de court-circuit par des appareils de protection
	Décharges électrostatiques	Décharges de l'électricité statique accumulée par une personne

Fig. 3 : les perturbations électriques les plus courantes.

forts, électronique de contrôle-commande et électronique de puissance, électronique de protection et appareillage électrique de puissance.

La CEM est donc un critère fondamental à prendre en compte dans toutes les phases de développement et de fabrication des produits (cf. **fig. 4**), mais aussi dans les phases d'installation et de câblage.

La CEM est d'ailleurs maintenant prise en compte dans les normes et devient une contrainte législative.

L'expérience et les réalisations de Schneider Electric ne se limitent pas à la maîtrise du bon fonctionnement de tout système électrique et/ou électronique dans un environnement électromagnétique habituel : par exemple, les équipements réalisés sont aussi capables de résister à l'environnement électromagnétique le plus contraignant, celui des IEM - HA - Impulsions ElectroMagnétiques d'origine nucléaire en Haute Altitude. Pour cela, le durcissement, ou amélioration de la tenue des systèmes soumis à des impulsions électromagnétiques d'origine nucléaire, nécessite la mise en œuvre des techniques les plus performantes de la CEM.



Fig. 4 : un exemple d'application de la CEM : une cellule MT « SM6 » intègre un disjoncteur qui coupe des centaines d'ampères sous quelques dizaines de kilovolts, et une unité programmable SEPAM de protection et de contrôle-commande. L'ensemble doit toujours être opérationnel, sans aléas.

1.3 Sa théorie est complexe

Toute approche de la CEM conduit à l'étude d'un système à trois composantes :

- le générateur de perturbations ou source,
- la propagation ou couplage,
- et l'élément qui subit ou victime.

Bien que ces trois composantes ne soient pas strictement indépendantes, dans la pratique elles sont supposées comme telles.

A noter que l'installation qui sera abordée au chapitre n° 5, a un rôle prépondérant dans la propagation des perturbations.

Cette étude théorique est difficile, car elle impose celle de la propagation des ondes

électromagnétiques régie par un ensemble d'équations différentielles complexes : les équations de Maxwell. Leur résolution n'est généralement pas possible de façon exacte dans des structures physiques réelles, et même avec des moyens informatiques très performants, une résolution numérique approchée est également très difficile.

En pratique il faut donc traiter les problèmes de compatibilité électromagnétique en faisant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, en utilisant des modèles, et surtout en ayant un recours constant à l'expérimentation et à la mesure.

2 La source

2.1 Il est important de bien la connaître

La connaissance, ou plus exactement l'identification et la mesure, des sources est indispensable car elle permet d'arrêter le choix des solutions à mettre en œuvre pour :

- limiter leur perturbation (placer un bloc antiparasite RC en parallèle sur la bobine CA, ou une diode sur la bobine CC, d'un contacteur par exemple),
- éviter les couplages (écarter deux éléments difficilement compatibles par exemple),
- et insensibiliser les victimes potentielles (utiliser des blindages par exemple).

Ses principales causes

Tout appareil ou phénomène physico-électrique qui émet une perturbation électromagnétique, par conduction ou par rayonnement, est qualifié de source. Parmi les principales causes de perturbations, il faut relever : la distribution d'énergie électrique, les ondes hertziennes, les décharges électrostatiques et la foudre.

- Dans la distribution d'énergie électrique un grand nombre de perturbations proviennent de manœuvres de fermeture et d'ouverture des circuits :
 - en basse tension, les ouvertures des circuits inductifs comme les bobines de contacteurs, les moteurs, les électrovannes... produisent aux bornes des bobines des surtensions très élevées et riches en hautes fréquences (quelques kV et des dizaines, voire centaines de MHz),
 - en moyenne et haute tension l'ouverture et la fermeture des sectionneurs provoquent l'apparition d'ondes à front très raide (quelques nanosecondes). Ces ondes sont particulièrement perturbantes pour les systèmes à microprocesseur.
- Les ondes hertziennes provenant des systèmes de télésurveillance, de télécommande, radio communication, télévision, talkie-walkie..., sont, pour certains équipements électroniques, des sources de perturbation de l'ordre de quelques volts par mètre. Tous ces émetteurs sont de nos jours de plus en plus utilisés et conduisent à durcir (protéger) ces équipements.
- Enfin, l'homme peut se charger électrostatiquement ; par exemple en marchant sur de la moquette.
Par temps froid et sec, son corps peut atteindre un potentiel supérieur à 25 kV ! Tout contact avec un équipement électronique provoque alors

une décharge électrique qui peut pénétrer dans l'appareil par conduction et par rayonnement, et dont le temps de montée très court (quelques nanosecondes) est très perturbateur.

Principales caractéristiques de ces perturbations

Ces sources de perturbations peuvent être intentionnelles (émetteur radio) ou non intentionnelles (soudeuse). Mais d'une façon générale elles se distinguent par les caractéristiques des perturbations qu'elles induisent :

- le spectre,
- la forme d'onde, ou le temps de montée, ou l'enveloppe spectrale,
- l'amplitude,
- l'énergie.
- Le spectre, ou bande de fréquences couverte par les perturbations peut être très étroit, cas des radiotéléphones, ou au contraire large, four à arc par exemple.

Les perturbations impulsionnelles ont en particulier un spectre très large, pouvant aller jusqu'à la centaine de MHz (cf. **fig. 5**). Nous trouvons dans cette dernière catégorie essentiellement les perturbations ayant pour source :

- des décharges électrostatiques,
- le fonctionnement d'appareillage tels que relais, sectionneurs, contacteurs, interrupteurs et disjoncteurs, en BT et en MT/HT,
- et enfin dans un domaine plus « spécifique » les Impulsions ElectroMagnétiques Nucléaires (I.E.M.N.).

Les couplages étant directement fonction de la fréquence, la représentation fréquentielle des perturbations électromagnétiques est couramment utilisée en CEM.

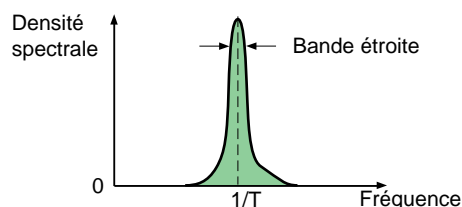
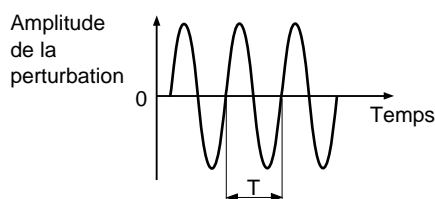
Cette représentation s'apparente, pour un signal répétitif, à sa décomposition en série de Fourier (comme une somme d'harmoniques).

- La forme d'onde est caractéristique de l'allure temporelle de la perturbation, sinusoïdale amortie ou bi-exponentielle par exemple. Elle s'exprime sous la forme d'un temps de montée t_m , d'une fréquence équivalente à ce temps de montée ($0,35 / t_m$), ou simplement de la fréquence de la perturbation si elle est à bande étroite, ou enfin sous la forme d'une longueur d'onde λ qui se ramène à la fréquence f par la relation $\lambda = c/f$ où c est la célérité de la lumière (3.10^8 m.s^{-1}).

■ L'amplitude est la valeur maximale atteinte par le signal, tension (volt), champ électrique (volt/mètre),.....

■ L'énergie de la perturbation est l'intégrale de sa puissance sur toute la durée de cette perturbation (Joule).

Cas d'un signal radio



Cas d'un effet indirect de coup de foudre

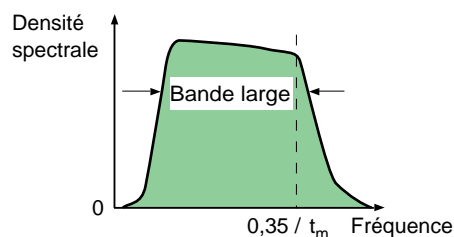
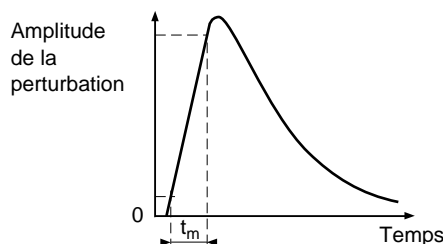


Fig. 5 : exemple de caractéristiques spectrales de perturbations.

2.2 Un exemple de sources permanentes de perturbations conduites en électronique de puissance

En électronique de puissance, les sources de perturbations sont principalement les transitoires de tension, plus rarement de courant. La tension peut varier de plusieurs centaines de volts en quelques dizaines de nanosecondes, ce qui

représente des dV/dt supérieurs à 10^{+9} V/s. Par exemple, la technique de découpage par Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI) (cf. fig. 6) utilisée pour constituer une tension sinusoïdale à partir d'une tension continue,

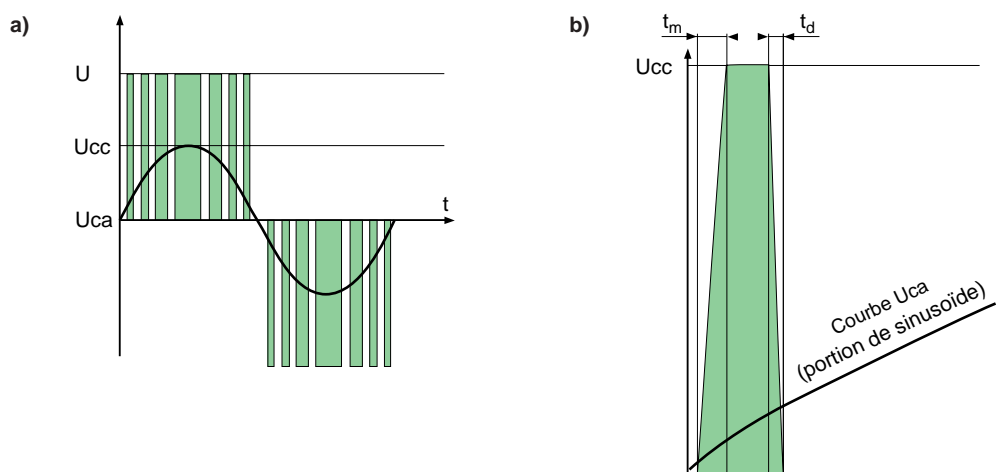


Fig. 6 : une source de perturbations dans les équipements d'électronique de puissance : la technique de découpage par modulation de largeur d'impulsions.

a : principe,

b : une impulsion fortement agrandie, (échelle dilatée de t), la portion de sinusoïde est disproportionnée car elle « s'étale » sur 20 ms ; $t_m \approx 2 \text{ à } 3 t_d$ (10 ns à 1 μ s).

nécessite des variations de tension entre 0 et U_{cc} (660 V en triphasé-redressé) avec des temps très brefs de quelques nanosecondes à microsecondes selon les technologies.

Ces variations brusques de tension engendrent divers phénomènes perturbateurs, dont par expérience le plus gênant est la circulation de courant à travers toutes les capacités parasites. En ne tenant compte que de la capacité parasite C_p , le courant $I_{MC} = C_p \cdot dV/dt$.

Il suffit donc, avec les valeurs de fronts évoqués précédemment, d'une capacité parasite de 100 pF pour générer des courants de plusieurs centaines de mA. Ce courant perturbateur va circuler dans le conducteur de référence de tension de l'électronique (circuit 0 V) et peut modifier des commandes (informations ou ordres), se superposer à des mesures sensibles, voire gêner d'autres exploitants en étant réinjecté sur le réseau de distribution publique.

Prendre en compte ce type de phénomène, donc maîtriser la CEM, pourrait consister à ralentir la montée de la tension. Mais une telle solution entraînerait une augmentation sensible des pertes par commutation dans les transistors et serait donc très défavorable du point de vue des contraintes thermiques. Une autre manière efficace de réduire ces courants est d'augmenter l'impédance de mode commun (entre structures et masse). Ainsi par exemple, pour le montage des composants électroniques de puissance, deux solutions sont couramment utilisées :

- soit laisser flottants (sans liaison électrique) les radiateurs de refroidissement des composants (cf. **fig. 7**), quand les règles de sécurité des personnes le permettent,

- soit diminuer la capacité parasite entre le composant et son radiateur, par l'utilisation d'un isolant à constante diélectrique faible (cf. **fig. 8**).

Autant de précautions qui feront la différence entre un convertisseur pollueur et un convertisseur réinjectant sur le réseau des perturbations minimales.

Il faut noter que l'électronique bas niveau du convertisseur doit être, et est, protégée contre

les perturbations générées par ses propres circuits de puissance.

La compréhension et la maîtrise du phénomène à la source sont nécessaires pour une limitation efficace et économique de l'émission conduite. Il existe d'autres sources de perturbations conduites, à occurrence faible telles que la foudre et les surtensions de manœuvre ; capables de générer des dV/dt et dI/dt importants. Ces perturbations sont également génératrices de champs rayonnés.

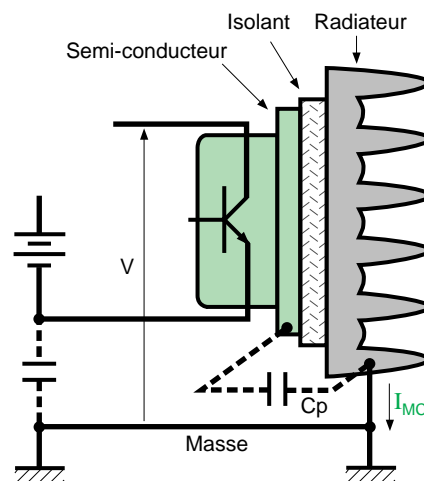


Fig. 7 : la capacité parasite du radiateur de refroidissement des composants électroniques, un élément pris en compte dans la conception des « bras d'onduleur ».

Rondelle isolante pour boîtier TO3	Epaisseur (mm)	Capacité parasite (pF)
Mica	0,1	160
Plastique	0,2	95
Alumine	2	22

Fig. 8 : capacités parasites typiques des principaux isolants utilisés pour le montage des composants électroniques.

2.3 Un exemple de sources de perturbations rayonnées : la fermeture d'appareillage dans les postes moyenne tension et très haute tension

L'environnement dans les postes, particulièrement en moyenne tension et en très haute tension, peut comporter des champs électromagnétiques impulsionnels très intenses.

Certaines manœuvres d'appareillage génèrent des variations de tension bien supérieures aux tensions nominales en des temps extrêmement courts. A la fermeture d'un interrupteur 24 kV par exemple, les claquages dits de préamorçage font varier la tension de plusieurs dizaines de kV

en quelques nanosecondes (10^{-9} s). Des précisions sont apportées à ce sujet dans le Cahier Technique n° 153 « Disjoncteurs au SF6 Fluarc et protection des moteurs MT ».

Des mesures effectuées dans les laboratoires Schneider ont montré qu'à un mètre d'une cellule moyenne tension 24 kV en manœuvre, des champs impulsionnels sinusoïdaux amortis atteignent une valeur crête de 7,7 kV/m et une fréquence de 80 MHz. Ces valeurs de champ

sont extrêmement importantes. A titre de comparaison, un émetteur radio portatif de 1 W (du type talkie-walkie) génère, à un mètre de son antenne, des champs de l'ordre de 3 à 5 V/m. Ces variations se propagent le long des conducteurs, jeux de barres, câbles, lignes aériennes. Etant données les fréquences mises en jeu, autrement dit la rapidité du phénomène, les structures conductrices (jeux de barres) sont de véritables antennes rayonnantes.

Et les champs électromagnétiques qu'elles génèrent ont des caractéristiques qui dépendent fortement de l'environnement physique notamment des enveloppes métalliques (cloisonnements, cellules).

Dans les postes blindés très haute tension, les champs électromagnétiques sont particulièrement importants. Les postes blindés isolés au SF6 sont à structure coaxiale, et présentent donc une impédance caractéristique

constante. Lors de brusques variations de tension, il se crée alors à l'intérieur des enveloppes métalliques tubulaires des phénomènes d'ondes stationnaires. Celles-ci sont dues aux réflexions sur les ruptures d'impédances que représentent par exemple les cônes de traversée de sortie du blindage. L'amplitude et la durée du phénomène s'en trouvent ainsi augmentées.

L'environnement électromagnétique de la moyenne à la très haute tension demande donc des études poussées de compatibilité électromagnétique pour le développement, l'installation des relayages et des dispositifs de contrôle-commande. Ceci d'autant plus que les perturbations rayonnées ne sont pas les seules perturbations générées dans les postes qui sont également sources des transitoires conduits de tension évoqués au début de ce paragraphe (cf. **fig. 9**).

a)



b)



c)



Fig. 9 : trois exemples d'appareils à électronique numérique développés par Schneider Electric et conçus en tenant compte des études de CEM.

a : SEPAM, une unité de protection et contrôle intégrée dans les équipements MT (marque Merlin Gerin) ;

b : une unité de protection et contrôle des disjoncteurs de puissance BT Masterpact (marque Merlin Gerin) ;

c : un variateur de vitesse de type ATV (marque Telemecanique).

3 Le couplage

3.1 Différents modes de couplage existents

Par couplage il faut comprendre liaison, passage ou transmission des perturbations électromagnétiques de la source vers la victime.

Le couplage est caractérisé par un coefficient k_f dit de couplage, exprimé en dB (-75 dB par exemple), pouvant être défini comme l'efficacité de transmission d'une perturbation de la source à la victime potentielle ($k = 20 \log A_{\text{reçue}}/A_{\text{émise}}$, avec A amplitude de la perturbation).

Définir ce coefficient est important dans la connaissance de la CEM, car plus il est faible

(plus sa valeur absolue en décibel est importante), plus la perturbation effectivement reçue par la victime potentielle est faible, et meilleure est la CEM.

Trois modes de couplage sont classiquement distingués :

- le couplage champ à câble, en mode commun ou différentiel,
- le couplage par impédance commune,
- le couplage câble à câble en mode différentiel ou diaphonie.

3.2 Le couplage champ à câble, en mode commun ou différentiel

Un champ électromagnétique peut se coupler sur toute structure filaire, donc tout câble, et générer sur ces structures des tensions soit en mode commun (par rapport à la masse), soit en mode différentiel (entre fils), soit et d'ailleurs plus généralement les deux. Ces couplages sont appelés champ à câble, c'est l'effet d'antenne des fileries, des pistes de circuits imprimés etc.

■ Les couplages en mode commun sont donc ceux qui mettent en œuvre des perturbations de type tension ou courant de mode commun.

Une tension conduite de mode commun (V_{MC}) est une tension qui s'applique à l'ensemble des conducteurs actifs. Elle est référencée par rapport à la masse ou par rapport à la terre (cas habituel en électrotechnique) : ainsi les essais d'isolement de mode commun, des disjoncteurs basse tension, se font entre toutes les phases reliées et la terre.

Un courant de mode commun (I_{MC}) est un courant qui parcourt tous les conducteurs actifs dans le même sens (cf **fig. 10**). Le courant

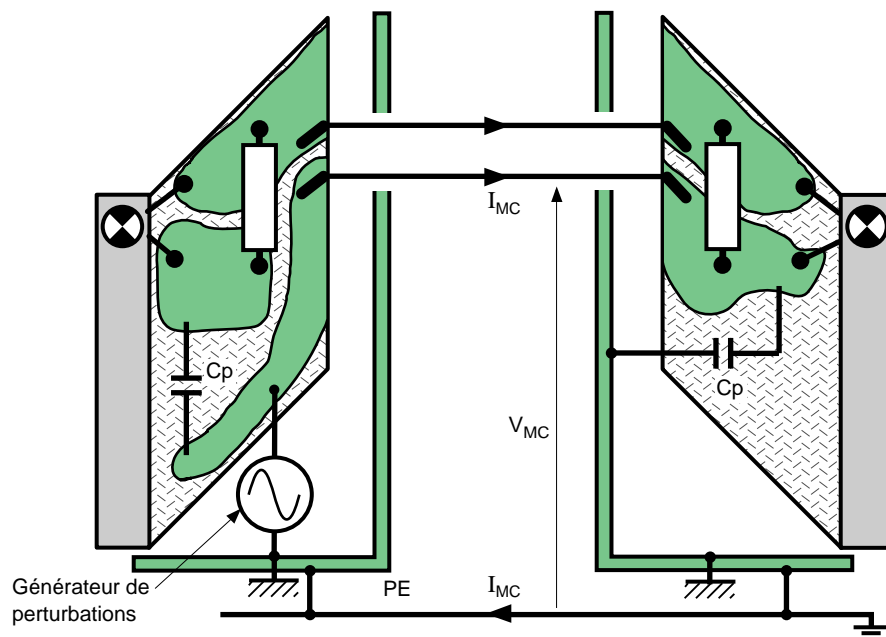


Fig. 10 : tension et courant de mode commun entre deux relais d'un caisson d'appareillage basse tension d'une cellule moyenne tension.

induit par un choc de foudre sur une ligne BT est un courant de mode commun.

■ Les couplages de mode différentiel concernent des tensions ou courants au sens classique du terme, par exemple entre les deux phases d'un disjoncteur ou entre les deux fils qui amènent un signal de mesure à l'électronique.

Les équations qui régissent le couplage entre un champ électromagnétique d'impédance d'onde quelconque et une structure filaire, qui peut elle aussi être quelconque, sont très complexes.

Dans la plupart des cas, elles ne peuvent être résolues ni analytiquement, ni même numériquement.

Cependant l'un de ces couplages, simple et des plus fréquents, peut s'exprimer de manière analytique, il s'agit du couplage entre la composante magnétique d'un champ électromagnétique et une boucle de surface S formée par des conducteurs (cf. **fig. 11**).

La composante magnétique H du champ induit en série dans la boucle une tension égale à :

$$e = \mu_0 S \frac{dH}{dt}$$
 avec μ_0 = la perméabilité du vide ($4 \pi \cdot 10^{-7}$ H/m).
 Ainsi, par exemple, dans un poste moyenne tension, la boucle (d'un fil ou d'un câble) de 100 cm^2 placée à 1 m d'une cellule (cf. **fig. 12**), qui serait soumise à un champ impulsionnel de $5,5 \text{ kVeff/m}$ (valeur mesurée en laboratoire),

verrait en transitoire une tension induite en série égale à 15 V .

Cette loi est considérée comme correcte tant que la plus grande dimension de la boucle n'excède pas un dixième de la longueur d'onde de la perturbation.

Il faut rappeler ici, qu'une telle boucle (cf. **fig. 12**) est vite réalisée dans le « caisson à relayage » avec les fils vert-jaune lorsqu'ils sont reliés en étoile à la masse.

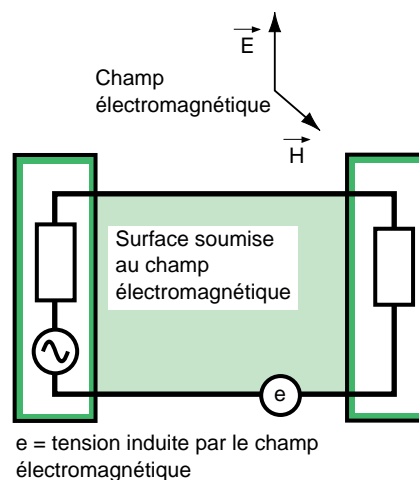


Fig. 11 : un exemple de couplage champ à câble de mode différentiel.

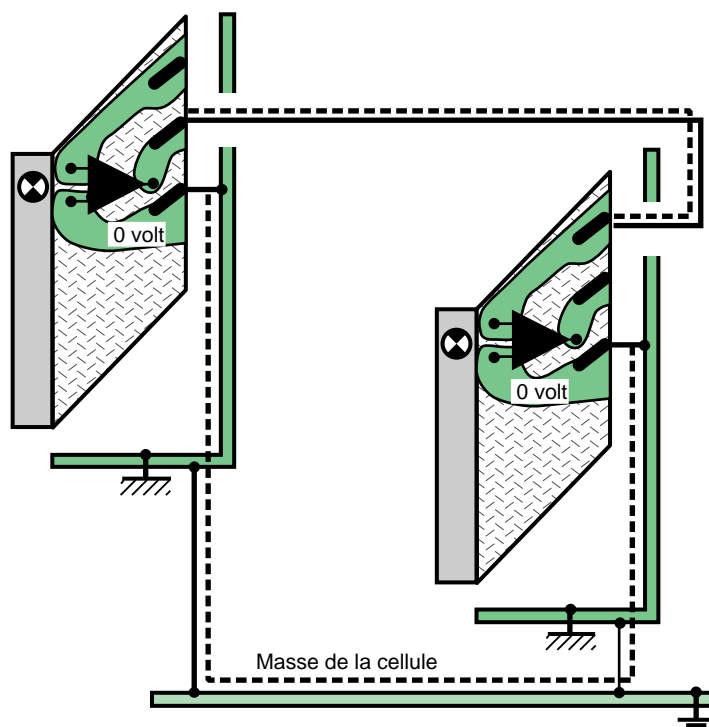


Fig. 12 : exemple de boucle de masse dans un caisson d'appareillage basse tension d'une cellule moyenne tension.

3.3 Le couplage par impédance commune

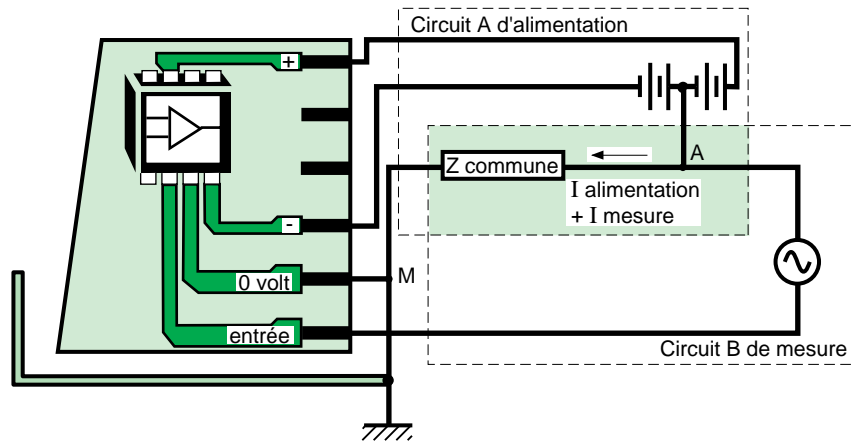


Fig. 13 : les mesures effectuées par l'amplificateur opérationnel seront erronées car un courant perturbateur dans le circuit A (d'alimentation) suffit pour créer dans le circuit B (de mesure) des tensions perturbatrices.

Comme son nom l'indique, le couplage par impédance commune résulte de la présence d'une impédance commune à deux ou plusieurs circuits. Cette impédance commune peut être la liaison de masse, le réseau de terre, le réseau de distribution d'énergie, le conducteur de retour de plusieurs signaux dans une même liaison courant faible, etc. Voici un exemple (cf. **fig. 13**) permettant de comprendre toute l'importance de ce mode de couplage : un courant perturbateur dans un circuit A de l'ordre de la dizaine de mA suffit pour créer dans un circuit B des tensions perturbatrices de plusieurs volts. Le circuit de mesure devrait avoir pour référence le point M et non le point A. Ceci peut assurément être gênant avec des électroniques à circuits intégrés travaillant sous des tensions du même ordre de grandeur.

Dans cet exemple, l'impédance commune peut être les quelques mètres d'un câble commun aux deux circuits A et B.

La perturbation a alors une valeur U_c , telle que $U_c = I_a Z_c$, avec :

- I_a : courant perturbateur,
- Z_c : impédance commune (cf. **fig. 14**).

La valeur de l'impédance commune est généralement extrêmement faible en basse fréquence. Pour un réseau de terre par exemple,

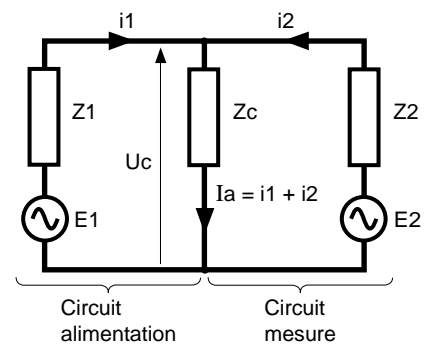


Fig. 14 : schéma d'impédance commune.

la sécurité impose des valeurs minimales de section des conducteurs de protection en fonction du régime du neutre. La valeur de l'impédance à 50 Hz entre deux points du réseau de masse est donc toujours très inférieure à 1Ω .

Mais il importe ici de considérer la valeur de cette même impédance aux fréquences caractéristiques des phénomènes perturbateurs décrits précédemment. Et la valeur de cette impédance prend alors des valeurs beaucoup plus importantes, plusieurs $k\Omega$ voire plus (cf. annexe 1).

3.4 Le couplage câble à câble en mode différentiel ou diaphonie

La diaphonie est un mode de couplage qui se rapproche du couplage champ à câble. Et, selon qu'elle a pour origine une variation de tension ou une variation de courant, elle est nommée diaphonie capacitive ou diaphonie inductive.

Une variation brusque de tension entre un fil et un plan de masse ou entre deux fils (cf. **fig. 15**) génère un champ qui peut être à faible distance, moyennant certaines approximations, considéré

comme principalement électrique. Ce champ peut se coupler dans une autre structure filaire qui lui est parallèle. C'est la diaphonie capacitive.

De la même manière, une variation de courant dans un fil ou câble génère un champ électromagnétique qui, moyennant les mêmes approximations, peut être considéré comme purement magnétique. Ce champ peut alors se coupler dans une paire et induit une tension

perturbatrice. C'est la diaphonie inductive (cf. **fig. 16**).

En fait, diaphonie capacitive et diaphonie inductive interviennent dès que des conducteurs ont un cheminement parallèle et proche. Elles sont donc susceptibles de s'appliquer dans tout chemin de câbles ou goulotte, et tout particulièrement entre les câbles de puissance véhiculant en mode différentiel des perturbations HF et les paires de fils d'un réseau véhiculant des signaux numériques. De plus, elles sont d'autant plus efficaces que la longueur des fils circulant parallèlement est grande, que l'écartement des fils ou paires est faible, et que la fréquence des phénomènes est élevée. Par exemple pour la diaphonie capacitive et avec les notations de la **figure 15**, le coefficient de couplage, en tension, s'exprime de la manière suivante :

$$\frac{V_N}{V_1} = \frac{j 2\pi f \left[\frac{C_{12}}{C_{12} + C_{20}} \right]}{j 2\pi f + \left[\frac{1}{R (C_{12} + C_{20})} \right]}$$

avec :

- V_1 , tension source,
- V_N , tension perturbatrice induite par le couplage,
- C_{12} , capacité de transfert entre les deux fils, proportionnelle à la longueur des fils et à un coefficient approché égal à $\text{Log}[1+(h/e)^2]$ où h est l'écartement entre les deux fils de la paire, et e l'écartement entre les paires,
- C_{20} , capacité de fuite entre les deux fils de la paire perturbée,
- R , impédance de charge de la paire perturbée.

Dans cette formule le premier terme du dénominateur est généralement négligeable par rapport au deuxième terme. On peut donc écrire en première approximation que :

$$\begin{aligned} \left| \frac{V_N}{V_1} \right| &\approx 2\pi f \frac{\frac{C_{12}}{C_{12} + C_{20}}}{\frac{1}{R (C_{12} + C_{20})}} \\ &= 2\pi f R C_{12} \\ &= \omega R C_{12} \end{aligned}$$

Pour fixer les idées, considérons deux paires de fils cheminant parallèlement sur 10 m, avec $h = 1 \text{ cm}$, $e = 2 \text{ cm}$ et $R = 1 \text{ k}\Omega$. Le calcul donne pour un signal à 1 MHz, un coefficient de couplage de -22 dB soit :

$$\frac{V_N}{V_1} = \frac{1}{12}$$

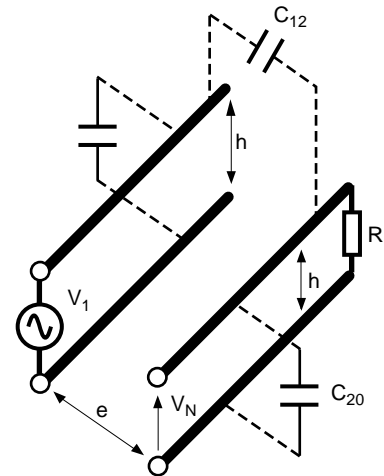


Fig. 15 : une variation brusque de tension V_1 entre deux fils génère un champ qui, à faible distance, peut être considéré comme principalement électrique, et induire une tension V_N dans une autre structure filaire qui lui est parallèle ; ce mode de couplage est appelé diaphonie capacitive.

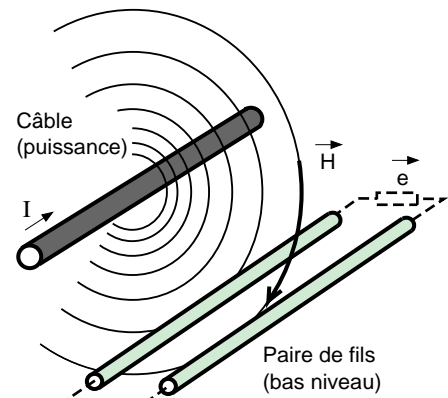


Fig. 16 : une variation de courant dans un câble génère un champ électromagnétique qui, à faible distance, peut être considéré comme purement magnétique et induit alors une tension perturbatrice dans des fils formant une boucle ; ce mode de couplage est appelé diaphonie inductive.

Dans la réalité, les couplages capacitifs et inductifs de ce type sont considérablement réduits par l'utilisation de paires torsadées, voire blindées.

4 La victime

La victime, dans la trilogie source/couplage/victime, représente tout matériel susceptible d'être perturbé.

Il s'agit généralement d'un équipement comprenant une partie électronique, qui

présente un dysfonctionnement dû à la présence de perturbations électromagnétiques généralement d'origine extérieure à l'équipement.

4.1 Les défauts de fonctionnement

Ils sont classés en quatre types :

- permanent et mesurable,
- aléatoire non répétitif survenant lors de l'apparition des perturbations,
- aléatoire non répétitif persistant après l'apparition des perturbations,
- défaut permanent subi par l'équipement (destruction de composant(s)).

Ces quatre types sont caractéristiques de la durabilité d'un défaut, mais ils ne caractérisent pas sa gravité.

La gravité d'un défaut est un critère dépendant de la fonctionnalité, de la criticité de chaque équipement.

Certains défauts peuvent être temporairement acceptés, telle une perte momentanée d'affichage ; d'autres sont inacceptables : appareillage de sécurité ne remplissant plus sa fonction.

4.2 Des solutions

De nombreuses dispositions constructives permettent d'avoir à coûts réduits des matériels présentant une bonne tenue aux perturbations électromagnétiques. Ces précautions concernent :

- la conception des circuits imprimés (leur découpage fonctionnel, leur tracé, leur connectique),
- le choix des composants électroniques,
- la réalisation des enveloppes,
- l'interconnexion des masses,
- le câblage.

Ces choix concernent de nombreux intervenants, ils doivent donc être faits au stade de l'étude pour éviter des surcoûts toujours importants en cas de modifications en fin de conception, voire après la mise sur le marché.

La mise en œuvre de toutes ces précautions demande un savoir-faire qui dépasse les actions de filtrage et de blindage, souvent préconisées pour durcir un matériel après coup même si leur efficacité n'est nullement remise en cause.

La conception des circuits imprimés

Lors du dessin des cartes, un certain nombre de règles sont à respecter. Ces règles concernent le découpage fonctionnel des cartes et le tracé des pistes.

Tout d'abord à l'implantation, il est déjà possible de réduire les couplages entre composants dus

à leur proximité ; par exemple le regroupement des circuits par type : numérique - analogique - puissance, en fonction de leur susceptibilité réduit leurs interférences.

D'autre part le tracé des pistes (routage) sur un circuit imprimé a une incidence importante sur la susceptibilité d'une carte : le même schéma électrique, implanté de différentes manières aura une immunité aux perturbations pouvant varier d'un facteur un à plusieurs dizaines. Par exemple un tracé des circuits à l'anglaise (cf. **fig. 17**) en retirant le minimum de cuivre réduit leur rayonnement et leur sensibilité.

Le choix des composants électroniques

De nombreux composants permettent d'assurer une protection efficace contre les perturbations conduites. Le choix de ces composants est guidé par la puissance des circuits à protéger (alimentation, contrôle-commande,...), et en fonction du type de perturbations. Ainsi, contre les perturbations de mode commun sur un circuit de puissance, un transformateur sera utilisé si elles sont de basses fréquences (< 1 kHz), et un filtre sera préféré pour les hautes fréquences.

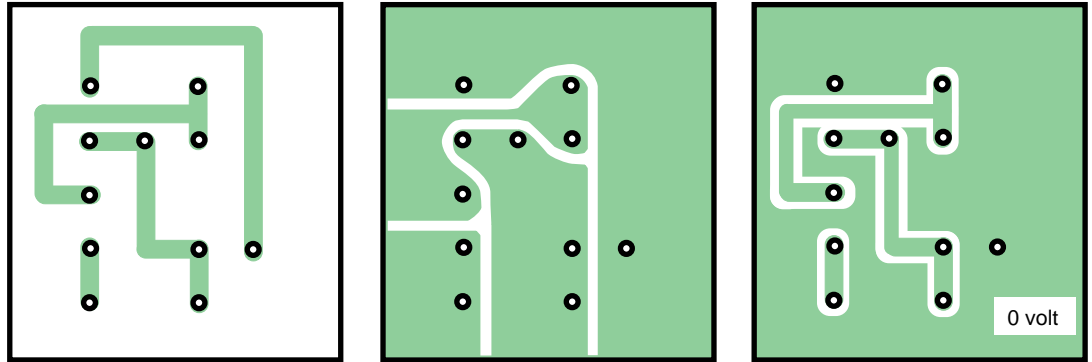
Le tableau de la **figure 18** donne une liste non exhaustive de composants de protection. Tous ne sont pas équivalents : un filtre ne protège pas des surtensions, et un parasurtenseur n'élimine pas les perturbations HF.

La réalisation des enveloppes

La réalisation d'une enveloppe conductrice (blindage) autour des équipements sensibles est un moyen de les protéger contre les champs électro-magnétiques.

Pour une bonne efficacité, l'épaisseur du matériau conducteur utilisé doit dépasser la valeur de son

épaisseur de peau aux fréquences perturbatrices considérées (cf. **fig. 19**). Face à une perturbation, très haute fréquence ou à un champ électrique, un vernis conducteur peut être utilisé avec efficacité. Mais seule une enveloppe en matériaux à forte perméabilité permet d'arrêter les champs magnétiques en BF.



Tracé circuits fins

Tracé à l'anglaise

Tracé avec plan de masse

Fig. 17 : le tracé des circuits peut réduire la susceptibilité d'une carte : soit par minimisation des impédances (tracé à l'anglaise), soit par réduction des couplages dus au champ électromagnétique (tracé avec plan de masse).

Types	Exemples	Applications
Parasurtenseur	Eclateur, parafoudre, limiteur Varistance, diode Zener	Installation, alimentation, contrôle-commande Circuits électroniques
Composants pour filtrage	Transformateur, inductance, condensateur, filtre	Alimentation, contrôle-commande (installations et circuits électroniques)
Composants pour blindage	Grillage, plan de masse, câble blindé, joint hyperfréquence, doigt de contact	Transmission d'information (armoire en site perturbé)

Fig. 18 : liste de composants de protection.

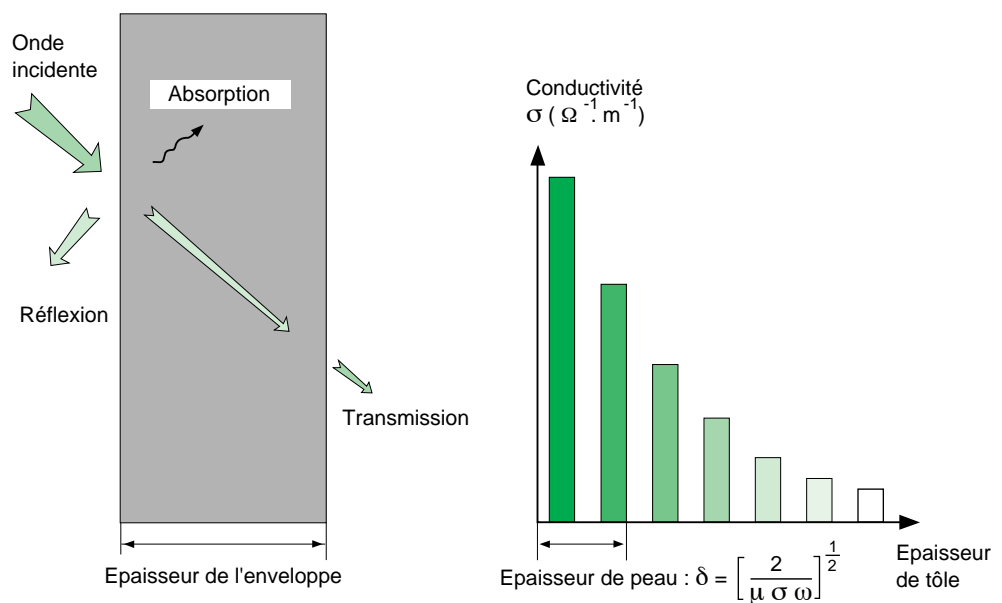


Fig. 19 : phénomène écran d'une enveloppe métallique.

L'interconnexion des masses

Dans ce domaine, la continuité électrique entre les différentes parties du boîtier est extrêmement importante. Leur connexion doit être réalisée avec soin, par exemple en protégeant leurs zones de contact de tout dépôt de peinture, mais aussi en utilisant des tresses larges et courtes (recherche d'une réduction maximale de leur impédance).

Le câblage

De même, le blindage des câbles, parfois appelé écran (cf. vocabulaire des câblers), est une extension de l'enveloppe conductrice réalisée autour de l'équipement sensible. Il est donc relié à celle-ci au plus court, et si possible sur toute sa circonférence pour une protection contre des perturbations de fréquences élevées.

Tout comme les couplages entre un champ électromagnétique et une structure filaire (cf. paragraphe 3), la théorie sur le blindage des câbles, très complexe, est difficilement abordable dans le cadre de ce document. Des ouvrages de référence sont cités dans la bibliographie.

La prise en compte de toutes ces règles de conception et de réalisation permet au produit ou au système d'avoir une immunité aux perturbations électromagnétiques suffisante compte tenu du milieu dans lequel il est placé.

Cependant, cette immunité ne peut être validée qu'expérimentalement par des mesures qui permettent alors de quantifier l'efficacité des différentes solutions. Ainsi par exemple, chez Merlin Gerin, les différentes maquettes des projets de déclencheurs électroniques des disjoncteurs sont soumises à un ensemble d'essais sévères, représentatifs des perturbations maximales auxquelles pourront être soumis ces déclencheurs.

L'objectif final de ces essais étant de vérifier que le déclencheur n'engendre pas de déclenchement intempestif et que le disjoncteur ouvre bien, lorsqu'il le doit, dans le temps requis.

Les normes « produits » intègrent maintenant ces contraintes, c'est le cas, par exemple des normes :

■ CEI 60947-2, concernant les disjoncteurs industriels,

■ CEI 61131-2, relative aux automates programmables.

5 L'installation

5.1 L'installation est un paramètre important dans la CEM globale d'un système

Pour preuve, la norme NF C 15-100, norme générale d'installation en BT, consacre à la compatibilité électromagnétique un chapitre complet, le chapitre 33.

Les deux chapitres précédents démontrent bien l'importance que peut avoir l'installation dans les phénomènes de CEM, et cela de par sa conception comme de sa réalisation.

5.2 A sa conception

Lors des études et des implantations deux facteurs peuvent tout particulièrement influencer la CEM : le choix des matériels et leurs dispositions relatives (cf. **fig. 20**).

Car le premier facteur concerne tout à la fois la sélection des sources et des victimes : un appareil choisi pour une fonction donnée peut être plus ou moins générateur de perturbations et/ou susceptible.

Par exemple, si deux appareils doivent fonctionner à proximité l'un de l'autre, ils devront :

- soit associer une source faiblement perturbatrice et une victime « ordinaire » (moyennement sensible),

- soit au contraire associer une source « ordinaire » (moyennement perturbatrice) et une victime peu sensible,
- ou du moins satisfaire à un compromis entre ces deux extrêmes.

Et le second facteur directement dépendant du premier consiste à positionner les matériels, déjà définis et selon leurs caractéristiques relatives, pour satisfaire aux besoins de CEM.

Il est aisé de comprendre que cette sélection doit alors prendre en compte les coûts des matériels, mais aussi ceux de leur mise en œuvre.

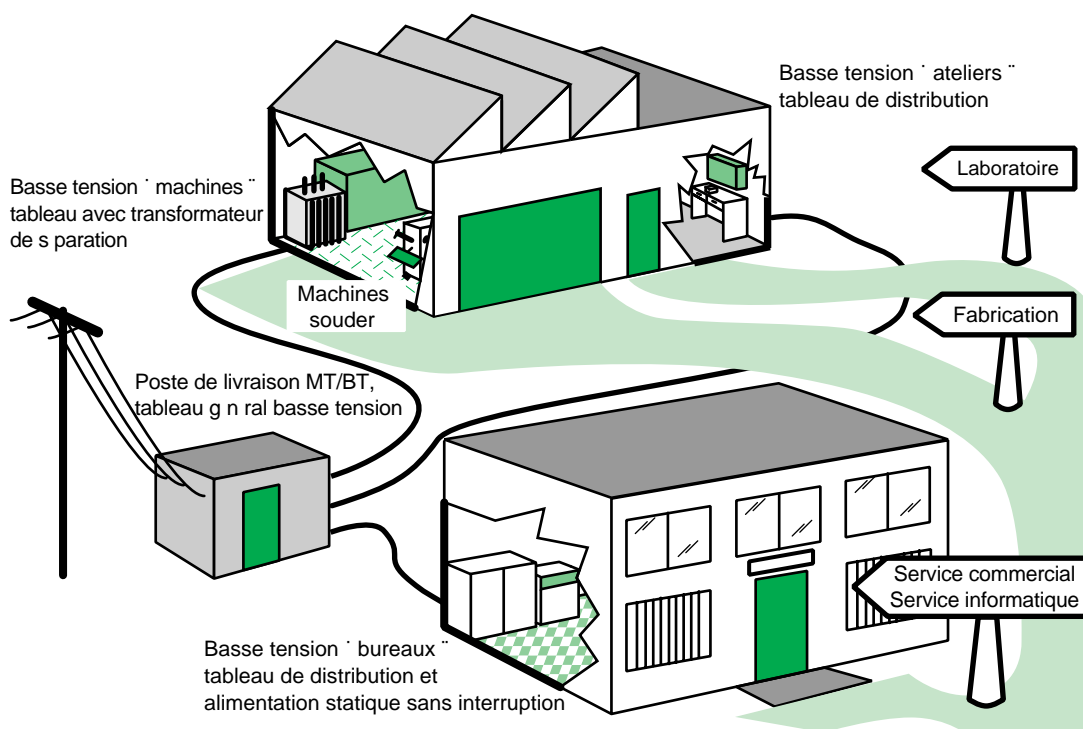


Fig. 20 : exemple d'une implantation d'équipements électriques tenant compte de la CEM.

5.3 A sa réalisation

La mise en œuvre des différents éléments, d'une installation électrique comme d'un équipement électronique, obéit aux principes déjà énoncés dans les chapitres précédents. Dans la pratique, ce sont les différents modes de couplage coexistant simultanément qui seront à étudier et à réduire pour satisfaire aux objectifs de CEM.

Et pour cela différentes solutions ou techniques devront être utilisées :

- le maillage des circuits et des réseaux de masses et de terre,
- la séparation électrique des circuits,
- un câblage bien pensé.

5.4 Des exemples pratiques

Le maillage des circuits et des réseaux de masses et de terre

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 (cf. **fig. 21**).

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.

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 autotransformateurs) 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

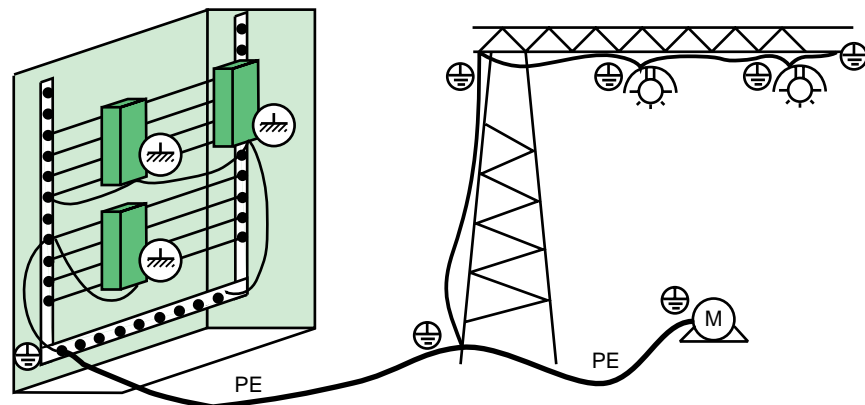


Fig. 21 : les maillages des circuits et des réseaux de masses et de terre sont très souvent confondus dans les armoires électriques.

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.

Un câblage bien pensé

Enfin, les trois mécanismes de couplage décrits précédemment seront limités si les chemins de câblage sont réalisés selon les règles suivantes :

- Tous les circuits ne pouvant pas être séparés les uns des autres pour des raisons économiques évidentes, les câbles doivent être regroupés par catégorie. Le cheminement des diverses catégories sera physiquement séparé : en particulier seront rassemblés les câbles de puissance d'un côté, les câbles bas niveau (téléphonie, contrôle-commande, ...) de l'autre.

Si le nombre de tranchées, de chemins de câbles ou de goulottes le permet, les câbles de puissance, d'intensité dépassant quelques ampères sous 230 V, et les câbles bas niveau cheminent dans deux passages différents. Sinon, une distance minimale est à respecter entre les deux catégories, de l'ordre d'une vingtaine de centimètres (cf. **fig. 22**). Entre ces deux catégories sera soigneusement évité tout élément commun.

Les circuits nécessitant des informations bas niveau auront également, autant que faire se peut, leur propre fil de retour (0 volt) pour éviter les couplages par impédance commune. En particulier, la plupart des systèmes de communication par bus nécessitent une paire de fils strictement et exclusivement réservée à l'échange des informations.

- Dans tous les cas, la surface globale d'une boucle, donc la distance entre un conducteur et

son retour, doit être minimisée. Pour la transmission d'informations, le torsadage des lignes permet encore de diminuer la susceptibilité aux couplages de mode différentiel. L'emploi de paires torsadées est donc à privilégier devant celui de la simple paire.

- Les câbles de mesures, et de transmissions d'informations à faible niveau, doivent être si possible à écran et, sauf précision particulière du fournisseur, leur écran est relié à la masse en un maximum de points.

- Les goulottes support du cheminement des câbles doivent être, dans la mesure du possible, des goulottes métalliques. Ces goulottes sont interconnectées entre elles avec un contact électrique correct, par vis par exemple et interconnectées avec le réseau maillé de masse.

- Les câbles les plus sensibles, ceux de mesure par exemple, sont placés dans un angle. Ils bénéficient ainsi d'une protection accrue contre les rayonnements électromagnétiques. Leur écran, s'il existe, est relié régulièrement à la goulotte.

L'utilisation des canalisations préfabriquées dans lesquels les câbles sont positionnés et connectés correctement, comme les Canalis de marque Télémécanique avec câble de télécommande incorporé, est donc tout à fait préconisée.

Toutes ces précautions de câblage, très efficaces dans la prévention des problèmes de CEM, sont d'un surcoût faible au stade de la conception de l'installation. Des modifications après coup, sur une installation déjà existante avec des couplages électromagnétiques trop forts, sont par contre d'un coût nettement plus important.

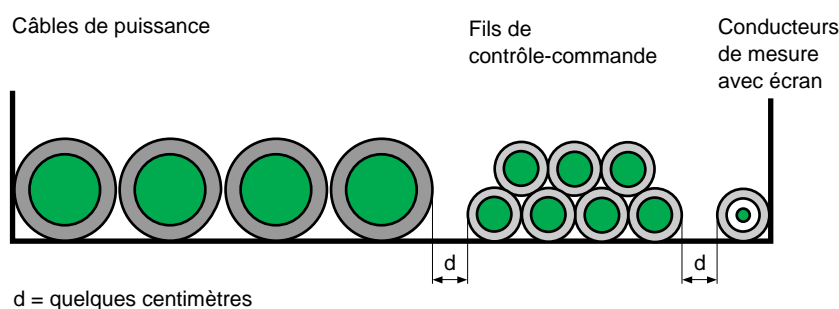


Fig. 22 : un exemple de cheminement de câbles.

6 Normes, moyens d'essais et essais

6.1 Les normes

Depuis longtemps, des textes normatifs régissent la compatibilité électromagnétique des matériels.

Les premières réglementations ont été édictées par le Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques (C.I.S.P.R.). Elles limitaient essentiellement le pouvoir émissif des différents appareils, principalement pour protéger la transmission et la réception des ondes radios.

Les comités nationaux, la Commission Electrotechnique Internationale (CEI) ont édicté des textes normatifs couvrant l'ensemble de la CEM, émission et immunité, dans le domaine civil.

Les textes normatifs militaires sur la CEM sont rassemblés dans la GAM EG 13 en ce qui concerne la France, et dans les normes MIL-STD pour les Etats Unis.

Le fort développement de la compatibilité électromagnétique et l'avènement de l'Europe ont modifié le paysage normatif civil.

Sur ce sujet le Conseil des Communautés Européennes a publié en mai 1989 une Directive Européenne, référencée 89/336/CEE. Elle concerne le rapprochement des législations des états membres relatives à la compatibilité électromagnétique.

En France, son application est rendue obligatoire par le décret n° 92.587.

La Directive Européenne se préoccupe non seulement des limitations des perturbations à l'émission, mais également de la tenue minimale aux perturbations électromagnétiques ou immunité. Ainsi cette Directive se réfère à des normes qui définissent des niveaux perturbateurs maximaux.

Des comités techniques, ont été créés par le Comité Européen de Normalisation Electrotechnique (CENELEC). Ils ont rassemblé les normes existantes qui correspondent à l'application de la directive et rédigé celles qui faisaient défaut.

Les travaux du TC 210 se sont appuyés sur les pratiques du milieu industriel.

Pour les mesures d'émission, les normes allemandes VDE 871 et VDE 875 ont pendant un temps fait référence sur le sujet. Les textes normatifs européens récents EN 55011, EN 55022, s'imposent maintenant. La norme CEI 61000 (anciennement CEI 1000) est la référence concernant la CEM, elle comporte plusieurs parties :

- 61000-1 : Application - définitions,
- 61000-2 : Environnement - niveaux de compatibilité,
- 61000-3 : Limite des perturbations,
- 61000-4 : Techniques d'essai et de mesure.
- 61000-5 : Guides d'installation et d'atténuation
- 61000-6 : Normes génériques

La partie 4 comporte de nombreuses sections concernant les essais d'immunité, en particulier :

- 1 - généralités,
- 2 - décharges électrostatiques,
- 3 - champs radio-fréquence,
- 4 - transitoires électriques en salves,
- 5 - ondes de choc de foudre,
- 6 - perturbations conduites > 9 kHz,
- 7 - harmoniques,
- 8 - champs magnétiques 50 kHz,
- 9 - champs magnétiques impulsionnels,
- 10 - champs magnétiques oscillatoires amortis,
- 11 - creux de tension, coupures brèves et variation de tension,
- 12 - ondes oscillatoires,
- 13 - harmoniques et interharmoniques,
- etc...

Elles correspondent bien aux perturbations typiques du monde électrotechnique moderne. Largement reconnues dans la communauté internationale, ce sont celles que Schneider applique pour ses produits. Le paragraphe suivant présente plus en détail les essais correspondant à ces textes normatifs.

6.2 Les moyens d'essais

Comme expliqué précédemment, le respect des réglementations impose des mesures et des essais, eux-mêmes définis par des normes.

De par son métier, la compatibilité électromagnétique est depuis longtemps une préoccupation majeure de Schneider Electric. Des moyens importants, comme une cage de Faraday, étaient utilisés dès les années 1970. Le centre d'essais Schneider dispose depuis de nombreuses années de deux laboratoires CEM.

Ils sont les outils indispensables à la capitalisation et à la diffusion de la compétence. Ils sont prestataires de service pour des clients extérieurs à l'entreprise.

Ainsi, ils réalisent des essais dans tous les domaines de la CEM :

- décharges électrostatiques,
- immunité conduite et rayonnée,
- émission conduite et rayonnée.

Comme toute mesure, les mesures de compatibilité électromagnétique doivent être reproductibles à la fois dans le temps et dans l'espace, c'est-à-dire que deux mesures effectuées dans deux laboratoires différents doivent avoir les mêmes résultats.

Dans cette discipline, cela implique des moyens très importants, donc des investissements substantiels, et une démarche Qualité rigoureuse. La démarche Qualité des laboratoires CEM de Schneider, s'appuie sur des manuels Qualité et un ensemble de procédures. Ces procédures

concernent aussi bien les suivis d'étalonnage, le raccordement aux étalons, que chaque type de mesure lui-même. La liste des essais normatifs que peuvent réaliser les laboratoires est en annexe 3.

Concrétisant cette démarche Qualité :

- le laboratoire Grenoblois est accrédité par le COFRAC (COMité FRançais d'ACcréditation),
- le laboratoire de Nanterre est accrédité par l'ASEFA (Association des Stations d'Essais Françaises d'Appareils électriques).

6.3 Les essais

Décharges électrostatiques

Ces essais sont destinés à tester l'immunité des cartes, équipements et systèmes aux décharges électrostatiques.

Les décharges électrostatiques résultent des charges accumulées par un individu, par exemple en marchant sur un sol isolant. Quand cet individu touche un matériel conducteur relié par une impédance à la masse, il se décharge brusquement à travers celui-ci. Plusieurs études ont montré que la forme d'onde dépend des caractéristiques de la source et des circuits de décharge, mais aussi d'autres paramètres, humidité relative de l'air (cf. **fig. 23**), vitesse d'approche du corps chargé, ici la main de l'homme, etc.

Ces études ont débouché sur des essais de décharges types. Ils sont réalisés à l'aide d'un générateur (pistolet) qui simule l'homme, dans des configurations déterminées (cf. **fig. 24**). Les décharges sont appliquées sur toutes les parties accessibles de l'appareil à contrôler, sur son environnement immédiat, et sont répétées un nombre de fois suffisant pour garantir une tenue statistique. Ces mesures nécessitent donc un stand approprié.

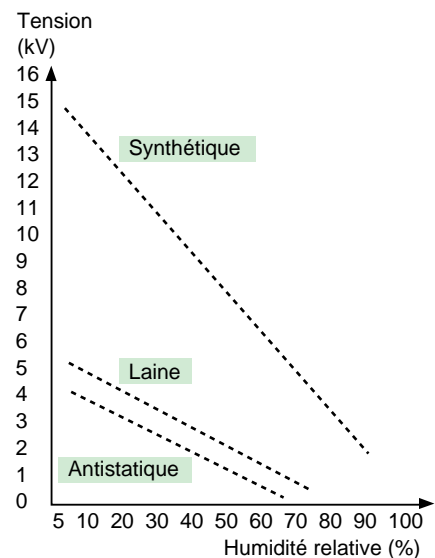


Fig. 23 : influence de l'humidité relative de l'air sur la tension de décharge électrostatique en fonction du revêtement de sol.

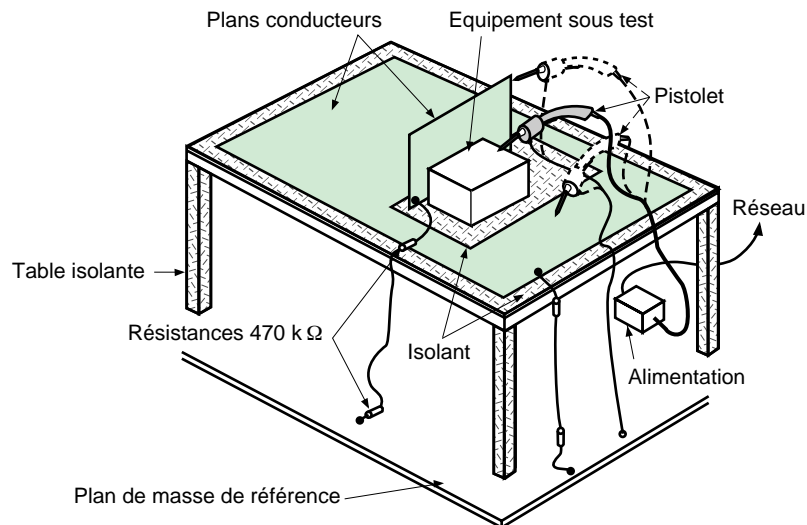


Fig. 24 : site d'essais de décharge électrostatique défini par la norme CEI 61000-4-2.

Tous ces essais sont parfaitement définis par la norme CEI 1000-4-2 avec les niveaux de sévérité du tableau de la **figure 25**.

Immunité conduite

Ces essais permettent de qualifier la tenue d'un appareil aux perturbations amenées par le câblage extérieur de cet appareil (entrées, sorties, et alimentation). Comme il a été expliqué précédemment ces perturbations sont différentes suivant la nature, et l'installation des câbles.

Les signaux électromagnétiques ou transitoires retenus dans ces essais ont pour caractéristiques (amplitude, forme d'onde, fréquence, ...) des valeurs typiques.

Des mesures de perturbations effectuées sur de nombreux sites ont permis de dégager principalement trois essais types :

■ Le premier essai, CEI 61000-4-4, est caractéristique des perturbations induites par les manœuvres d'appareillage de commande.

Il considère des transitoires électriques rapides en salves. Ces salves se répètent à une fréquence de 3 Hz. Chaque salve est constituée d'une centaine de transitoires espacés d'environ 100 μ s. Chaque transitoire a un front de montée très raide, 5 ns, avec une amplitude de plusieurs kV, variable suivant les sévérités demandées (cf. **fig. 26 et 27**).

Tous les câbles peuvent être soumis à des transitoires rapides. Ce type de perturbations se couple en effet très facilement, par exemple par diaphonie (cf. chapitre « Le couplage »), et il suffit donc qu'un câble génère cette perturbation pour que tous ceux circulant dans le même chemin de câbles y soient soumis.

L'essai est donc fait sur tous les câbles : en mode commun sur ceux où la perturbation est a priori induite (en l'occurrence les câbles autres que l'alimentation), en mode commun et en mode différentiel sur les câbles reliés au secteur. Les perturbations sont injectées sur les câbles testés soit par couplage capacitif direct dans le cas

Niveaux de sévérité selon la norme	Tension d'essai en kV $\pm 10\%$	
	Décharge dans l'air	Décharge au contact
1	2	2
2	4	4
3	8	6
4	15	8

Fig. 25 : tensions de décharge électrostatique devant être supportées par des matériels selon la CEI 61000-4-2.

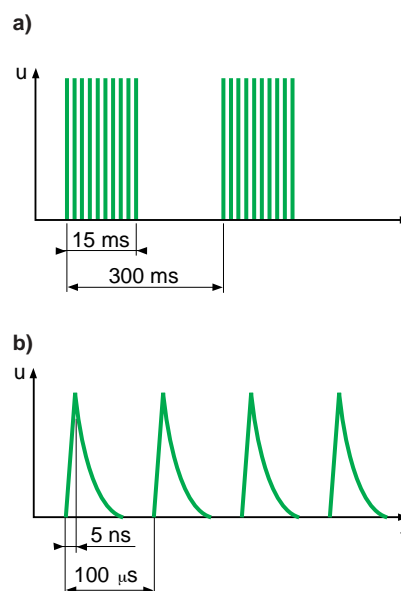


Fig. 26 : allure des salves (a) et des transitoires rapides qui les composent (b).

Niveaux de sévérité selon la norme	Tension d'essai appliquée ($\pm 10\%$) en kV sans altération du fonctionnement (sortie en circuit ouvert)	
	Sur le circuit d'alimentation	Sur les lignes d'entrée et de sortie (de signal, données, et commande)
1	0,5	0,25
2	1	0,5
3	2	1
4	4	2
x	spécial	spécial

Le niveau x est un niveau défini contractuellement entre un fabricant et son client.

Fig. 27 : tableau des niveaux de sévérité définis par la CEI 61000-4-4.



Fig. 28 : mesure de l'immunité aux transitoires rapides d'une centrale Isis (test 61000-4-4) dans une cage de Faraday. Sur cette photo sont visibles : le générateur de perturbation manipulé par l'opérateur, la valise en bois contenant la pince de couplage et la centrale Isis (à gauche) raccordée au réseau Batibus.

des alimentations, soit à l'aide d'une pince de couplage, deux plaques métalliques enserrant les câbles secondaires (cf. **fig. 28**). L'appareil testé ne doit pas présenter de dysfonctionnement pendant une durée déterminée (1 mn).

Cet essai est le plus significatif de l'immunité d'un équipement car les transitoires rapides sont les plus fréquents.

■ Le deuxième essai réalisé est caractéristique des effets secondaires de la foudre. Il est représentatif des perturbations conduites circulant sur le réseau BT après un coup de foudre sur une ligne (norme CEI 61000-4-5).

Ces perturbations sont caractérisées par une énergie, aussi se traduisent-elles par :

□ des ondes de tension $1,2 \mu\text{s} - 50 \mu\text{s}$ si l'impédance présentée par l'appareil testé est élevée, l'amplitude pouvant atteindre plusieurs kV, voir **figure 29** pour les tensions d'essai préconisées par la norme.

□ des ondes de courant $8 \mu\text{s} - 20 \mu\text{s}$ si cette même impédance est faible, l'amplitude atteignant alors plusieurs kA.

Le front de montée de ces perturbations est mille fois plus long, de l'ordre de la microseconde, que celui des transitoires rapides en salves (cf. **fig. 26**). Le couplage d'essai est réalisé capacitivement, en mode commun et en mode différentiel avec des niveaux appropriés. Sa procédure est semblable à celle de l'essai aux transitoires rapides : l'appareil ne doit pas présenter de dysfonctionnement.

Niveaux de sévérité selon la norme	Tension d'essai de sortie en circuit ouvert (kV)
1	0,5
2	1
3	2
4	4
x	spécial

x est un niveau défini contractuellement entre un fabricant et son client.

Fig. 29 : niveaux en fonction des sévérités définies par la norme CEI 61000-4-5 (impédance du générateur = 2Ω).

■ Le troisième essai réalisé selon la norme CEI 61000-4-6, se rapporte aux prescriptions relatives à l'immunité des matériels aux perturbations HF sur les câbles, dans la plage de 150 kHz À 80 MHz (voire 230 MHz). Les sources de perturbations sont des champs électromagnétiques qui peuvent affecter la longueur totale des câbles raccordés à ces matériels et y induire des tensions et courants.

Au cours de l'essai, les perturbations sont couplées aux câbles par l'intermédiaire de Réseaux de Couplage-Découplage (RCD) dont l'impédance en mode commun, égale à 150Ω représente l'impédance caractéristique de la majorité des câbles. Toutefois, il faut noter qu'au cours de l'essai, les perturbations ne sont

appliquées qu'à un câble à la fois, alors qu'en réalité le champ électromagnétique illumine tous les câbles connectés. Cela constitue une différence notable à laquelle on ne peut pas échapper. En effet, cela rendrait l'essai très complexe et excessivement onéreux que de coupler des signaux HF sur tous les câbles simultanément.

Lorsque les RCD ne sont pas adaptés, par exemple quand l'intensité du courant est trop élevée, on utilise des pinces de couplage.

Les perturbations HF, préconisées par la norme CEI 61000-4-6 ont des niveaux de 1, 3 ou 10 volts. Elles sont modulées en amplitude à 80 % par une onde sinusoïdale à 1 kHz.

Avant l'essai, le signal à injecter pour obtenir le bon niveau de perturbation est calibré et mémorisé, puis appliqué sur les câbles normalement connectés au matériel en essais.

■ Le quatrième essai consiste à effectuer des interruptions brèves et/ou des creux de tension sur les câbles d'alimentation des équipements en essais. La norme CEI 61000-4-11 est la publication fondamentale de référence. Ces perturbations sont provoquées par des défauts du réseau d'alimentation, de l'installation ou par des changements brusques et importants de la charge. Ces phénomènes, de nature aléatoires, sont caractérisés en terme de déviation à partir de la tension assignée et en terme de durée.

Les niveaux des creux sont égaux à 30, 60 ou 100 % (coupure) de la tension assignée. Leurs durées peuvent être comprises entre 0,5 et 50 périodes.

■ Le cinquième essai est réalisé en conformité avec la norme CEI 61000-4-12 qui définit deux types d'ondes :

□ les ondes sinusoïdales amorties (connues également sous le nom de " ring waves ") qui apparaissent de manière isolée sur les câbles basse tension des réseaux publics ou privés suite à des manœuvres,

□ les ondes oscillatoires amorties qui se présentent sous la forme de salves. Ces dernières se manifestent généralement dans des postes, des centrales, ou encore de grandes installations industrielles, notamment suite à des manœuvres de sectionneurs accompagnées de réamorçages d'arc.

Les tensions et courants transitoires résultant de ces manœuvres se caractérisent par une fréquence d'oscillation qui dépend des temps de propagation et de la longueur des jeux de barres sur lesquels apparaissent ces ondes. Cette fréquence varie entre 100 kHz et quelques MHz pour des postes à haute tension ouverts, et peut

atteindre la dizaine de MHz, voire davantage, pour des postes à haute tension blindés.

Au cours des essais, les ondes sont couplées aux câbles par l'intermédiaire de réseaux de couplage-découplage. Selon le mode d'injection, l'amplitude des perturbations peut varier entre 0,25 et 4 kV. Les matériels dits " de table " sont disposés sur un support isolant, alors que les matériels " de sol " ou " en armoires " sont isolés du plan de masse d'une distance de 0,1 m.

Immunité rayonnée

Les essais d'immunité rayonnée permettent de garantir le bon fonctionnement des appareils lorsqu'ils sont soumis à des champs électromagnétiques.

Ces essais étant particulièrement sensibles à l'environnement, les moyens et les compétences à mettre en œuvre pour réaliser des mesures fiables et reproductibles d'immunité rayonnée sont importants.

Le milieu ambiant doit être suffisamment propre pour ne pas être gêné par les ondes de toutes façons existantes, car (comme évoqué au chapitre « La source ») des champs électromagnétiques entretenus de plusieurs V/m sont fréquents, tels ceux générés par des talkies-walkies, et des champs impulsionnels d'amplitude plus élevée encore existent en milieu industriel. Ces essais sont donc réalisés dans des cages de Faraday dont les parois sont recouvertes d'absorbants hyperfréquence. Ces cages sont qualifiées d'anéchoïques lorsque toutes les parois y compris le plancher sont recouvertes, et de semi-anéchoïques lorsque le plancher ne l'est pas.

Dans ces cages, les champs sont générés par différentes antennes suivant les types de champ, les gammes de fréquence et les polarisations (cf. **fig. 30** ci-contre). Ces antennes sont alimentées à partir d'un générateur bobiné dont le signal passe par un amplificateur de puissance à large bande.

Les champs générés sont calibrés à l'aide de capteurs isotropiques à large bande : le schéma de la **figure 31** ci-contre présente une disposition typique de test.

Des normes précisent les limites de perturbations acceptables, ainsi la norme CEI 61000-4-3 préconise des essais sur la bande de fréquences 80 MHz – 2000 MHz avec trois niveaux de sévérité (1, 3, 10 V/m), et sur les bandes 800 MHz – 960 MHz et 1,4 GHz – 2 GHz avec quatre niveaux de sévérité 1, 3, 10 et 30 V/m. Des essais d'immunité au champ magnétique à la fréquence du réseau sont également effectués conformément à la norme CEI 61000-4-8. Ce champ magnétique est engendré par le courant

circulant dans les câbles, ou plus rarement par d'autres appareils situés à proximité, tel le flux de fuites de transformateurs.
 Les niveaux d'essais de champ permanent ont des intensités comprises entre 1 et 100 A/m, alors que ceux de champ de courte durée –de 1 à 3 s – ont des intensités de 300 ou 1000 A/m. Le champ magnétique est obtenu par la circulation d'un courant dans une bobine d'induction. Il est appliqué au matériel en essai selon la méthode par immersion, c'est à dire qu'il

est placé au centre de la bobine. Cet essai ne doit être effectué que pour des matériels qui contiennent des dispositifs sensibles au champ magnétique (écrans cathodiques, capteurs à effet Hall, ...).

En ce qui concerne l'immunité en champ électrique impulsionnel, tel que celui qui est observé à proximité des ouvrages HT, il n'existe pas de mesures normalisées.

Dans ce domaine, les matériels Schneider sont donc testés suivant des procédures internes.

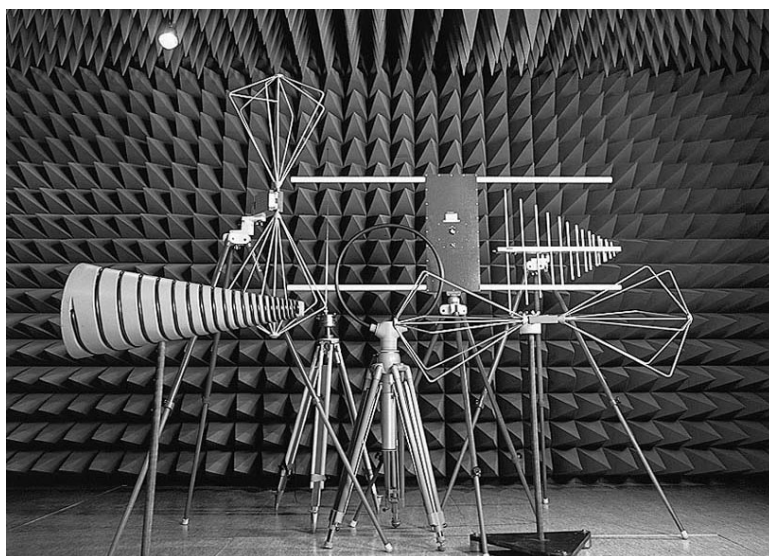


Fig. 30 : la cage de Faraday semi-anéchoïque et quelques antennes d'un laboratoire CEM de Schneider Electric.

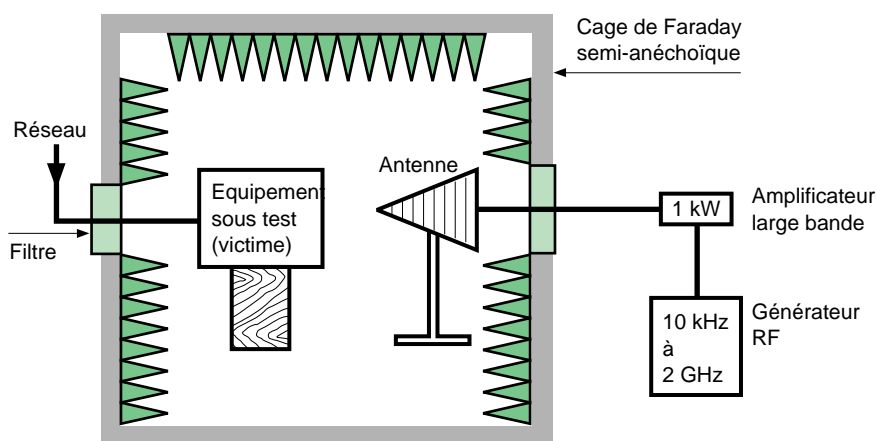


Fig. 31 : disposition typique de test dans une cage de Faraday. Les mesures se font en deux étapes :
 1 - calibrage du champ pour une gamme de fréquences donnée, en l'absence d'équipement,
 2 - vérification de l'immunité de l'équipement.

Emission conduite

Les mesures d'émission conduite quantifient le niveau des perturbations réinjectées par l'appareil testé sur tous les câbles qui lui sont reliés. Le niveau de ces perturbations dépend étroitement de la charge haute fréquence qui est connectée aux câbles, l'appareil en essai étant alors considéré comme le générateur (cf fig. 32).

Pour effectuer des mesures reproductibles et en particulier éviter les problèmes liés à l'impédance

caractéristique du réseau, les mesures d'émission conduite sont réalisées à l'aide d'un Réseau Stabilisateur d'Impédance de Ligne (RSIL). Un appareil de mesure, en fait un récepteur Haute Fréquence, est connecté à ce RSIL, il permet de quantifier le niveau pour chaque fréquence. Le niveau de perturbations réinjectées ne doit pas excéder les limites fixées par les normes, limites qui dépendent du type de câbles et de l'environnement. Le relevé suivant (cf. fig. 33) présente un résultat obtenu sur un

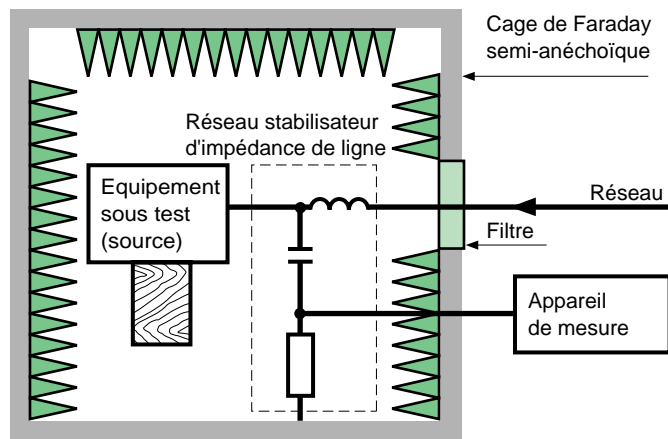


Fig. 32 : configuration de mesure d'émission conduite. L'EST - Equipement Sous Test - est considéré comme un générateur, le RSIL comme une charge.

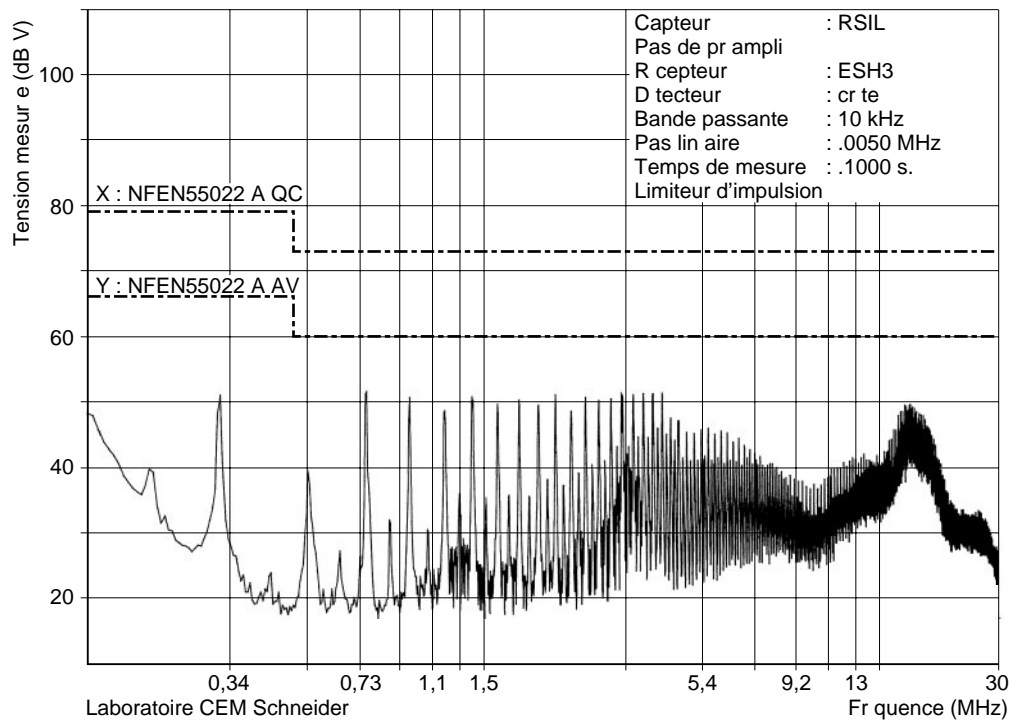


Fig. 33 : mesures des émissions radioélectriques d'une centrale de traitement de l'information d'un Tableau Général Basse Tension - TGBT -.

TGBT (Tableau Général Basse Tension) et sa comparaison à la norme EN 55 022.

Emission rayonnée

Les mesures d'émission rayonnée quantifient le niveau des perturbations émises par un appareil sous forme d'ondes électromagnétiques.

Tout comme pour les essais d'immunité rayonnée, les mesures d'émission rayonnée ne doivent pas être altérées par les ondes déjà existantes, CB, radio, etc. De même, ces mesures ne doivent pas être modifiées par les réflexions des ondes sur des obstacles environnants. Ces deux contraintes sont antagoniques et de ce fait coexistent deux méthodes de mesure.

La première méthode consiste à se placer en champ libre, plus précisément sans aucun obstacle dans un périmètre donné : le milieu ambiant est alors ce qu'il est.

La deuxième méthode consiste à se placer dans une cage de Faraday ; les réflexions sur les parois de la cage sont volontairement diminuées par la présence d'absorbants hyperfréquence (cf. fig. 30) : le milieu est alors parfaitement maîtrisé.

Les laboratoires Schneider exploitent la deuxième méthode. Elle a comme avantage de permettre l'automatisation de la mesure, et de limiter le nombre de déplacements d'un appareil, car les mesures d'émission et d'immunité peuvent être réalisées sur le même site moyennant quelques aménagements. Tout

comme pour l'émission conduite, les niveaux d'émission rayonnée doivent être inférieurs à des limites fixées par un cahier des charges ou une norme.

Mesure de champ impulsionnel

Les essais normatifs permettent de mesurer l'émission et de tester l'immunité des appareils ou systèmes aux principales perturbations électromagnétiques rencontrées dans les milieux industriels.

Cependant, l'environnement des matériels développés par le Groupe Schneider présente quelques caractéristiques encore mal prises en compte par les textes normatifs.

Il n'existe pas encore, par exemple, de procédures de test CEM spécifiques aux matériels placés dans les postes moyenne tension. C'est pourquoi Schneider a mené des campagnes de mesure pour mieux connaître les perturbations typiques dans l'environnement de ses matériels, principalement la proximité d'appareillage basse tension, moyenne tension et très haute tension.

Dans une deuxième phase, des essais internes, avec des moyens d'essais spécifiques, ont été mis au point. Ils permettent de tester la compatibilité électromagnétique des matériels sans avoir à procéder à des essais en vraie grandeur. Les essais sont ainsi mieux reproductibles et moins coûteux. Ils sont alors réalisés au plus tôt dans la conception, ce qui permet d'optimiser les protections CEM au moindre coût.

7 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.

Annexe 1 : impédance d'un conducteur en haute fréquence

Le niveau de CEM dans un équipement est fonction des couplages entre les circuits, ces couplages étant eux-mêmes directement fonction des impédances entre ces circuits, particulièrement en hautes fréquences. Pour améliorer la CEM, il convient donc de connaître puis réduire ces impédances.

Il existe un certain nombre de formules approchées permettant de déterminer l'impédance en haute fréquence des principaux conducteurs utilisés. Ces formules sont lourdes et leur précision n'est qu'illusoire si la position précise de chaque élément n'est pas parfaitement définie. Or qui connaît la position exacte d'un fil par rapport à un autre dans un chemin de câbles ? En fait la réponse est donnée par l'expérience de ces phénomènes jointe à la connaissances des règles théoriques élémentaires de l'électricité.

Tout d'abord il est important d'avoir à l'esprit que l'impédance d'un conducteur est principalement fonction de sa partie selfique, prépondérante à partir du kHz pour un câble standard. Ainsi, pour un câble fictif infini dans l'air, sa valeur de self inductance linéique varie de manière logarithmique avec le diamètre, donc très faiblement : pour des câbles dont la longueur n'excède pas le quart de la longueur d'onde de

la perturbation prise en compte, une valeur de l'ordre du μH par mètre quel que soit le diamètre peut être retenue (cf. **fig. 34**).

Si le câble est correctement plaqué sur un plan conducteur, cette valeur est fortement diminuée. Elle dépend alors de la distance entre le câble et le plan. Des gains de 10 dB sur la valeur de la self inductance sont ainsi facilement obtenus. Aux plus hautes fréquences, ce câble doit être considéré comme une ligne de transmission, et la grandeur importante est alors son impédance caractéristique (de l'ordre de la centaine d'ohms). Avec ces considérations, une self inductance commune de plusieurs μH est facilement atteinte, avec quelques mètres de fil vert-jaune par exemple. Ceci représente donc plusieurs ohms à 1 MHz, et plusieurs centaines d'ohms à 100 MHz.

En conclusion, le plan métallique conducteur est le moyen de relier électriquement deux points avec l'impédance la plus faible. Et ce, quelle que soit son épaisseur dès lors qu'elle est supérieure à l'épaisseur de peau ($415 \mu\text{m}$ pour le cuivre à 10 kHz).

Ainsi, une plaque de cuivre présente une self de $0,6 \text{ nH}$ à 10 kHz, soit une impédance par carré de $37 \mu\Omega$, (l'impédance reste la même quelle que soit la surface du carré considéré).

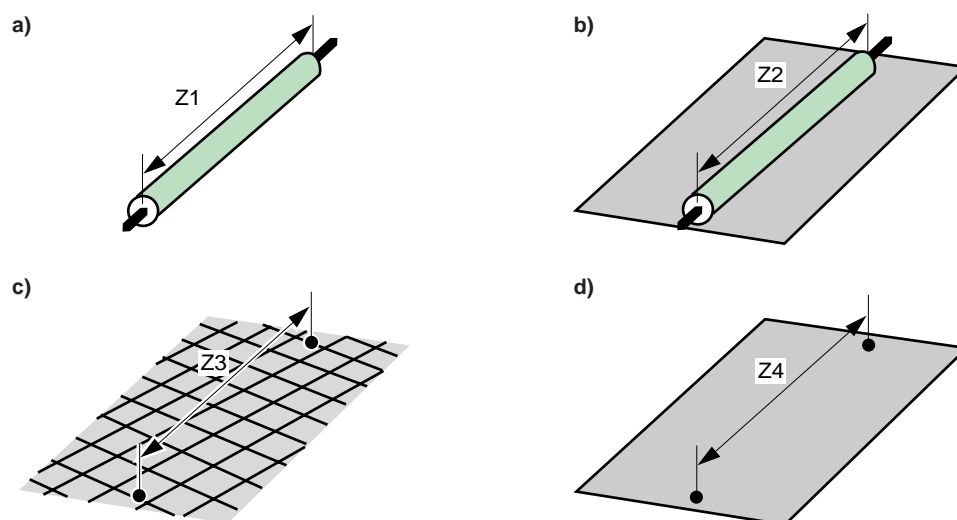


Fig. 34 : suivant les différents cas :

a : câble dans l'air ($L \approx 1 \mu\text{H/m}$),

b : câble plaqué sur une surface métallique,

c : treillis métallique avec contact à chaque croisement (par exemple fer à béton soudé),

d : plan métallique,

et pour une même longueur, les impédances linéiques sont dans l'ordre $Z_1 > Z_2 > Z_3 > Z_4$.

Annexe 2 : les différentes parties d'un câble

Les termes employés pour distinguer les différentes parties d'un câble changent quelque peu de signification selon la destination du câble (câble de transport d'énergie, câble de transport d'informations téléphoniques ou de contrôle-commande), (cf **fig. 35**).

Les définitions notées en italique sont celles de la CEI.

Armure : protection mécanique du câble, généralement constituée de deux feuillets en acier doux enroulés en hélice.

Pour les câbles destinés au transport d'informations, elle peut également avoir un rôle électrique, tenir lieu de blindage électrostatique et plus souvent de blindage électromagnétique.

Blindage : *synonyme d'écran, matériau élaboré et destiné à réduire l'intensité de rayonnement pénétrant dans une région.*

L'armure ou l'écran d'un câble, qu'il soit destiné au transport d'énergie ou d'informations, peuvent constituer des blindages.

Ecran : *dispositif utilisé pour réduire la pénétration d'un champ dans une région déterminée.*

Plusieurs fonctions sont remplies par cet élément :

- créer une surface équipotentielle autour de l'isolant,

- prévenir les effets des champs électriques externes et internes,

- assurer l'écoulement du courant capacitif ainsi que du courant de défaut terre (court-circuit homopolaire),

- assurer la protection des personnes et du matériel en cas de perforation. Pour cela il est généralement métallique et continu (tube de plomb, nappe ou tresse de fils, ou rubans posés en hélice).

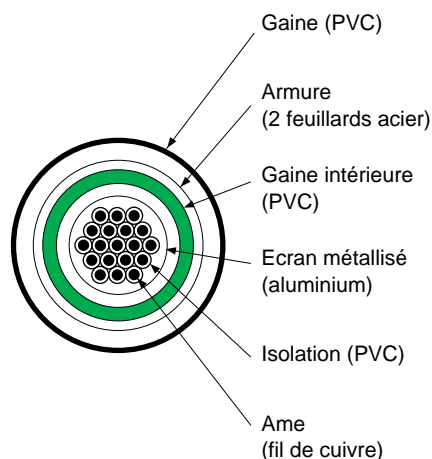
Pour les câbles véhicules d'informations, l'écran, plus souvent appelé blindage, est constitué de rubans ou nappes de fils, en cuivre ou en aluminium, enroulés pour réaliser un blindage contre les influences électriques et magnétiques.

Il peut être collectif, pour l'ensemble des conducteurs composant le câble, lorsque les influences perturbatrices sont extérieures.

Il peut être individuel, pour un certain nombre de conducteurs du câble, afin de les protéger des influences des autres conducteurs de ce même câble.

Gaine : enveloppe ayant pour rôle d'assurer l'étanchéité du câble.

Exemple d'un câble téléphonique



Exemple d'un câble de transport d'énergie moyenne tension

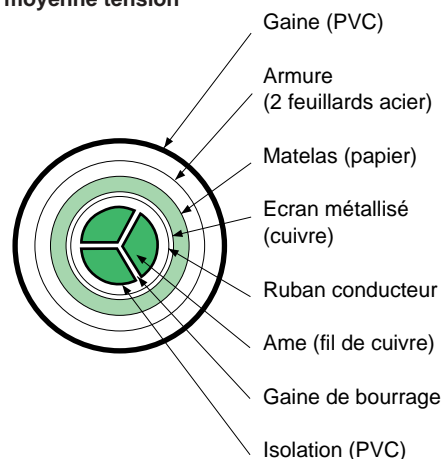


Fig. 35

Annexe 3 : essais réalisés par les laboratoires CEM de Schneider Electric

Les laboratoires CEM de Schneider Electric ont les compétences et le matériel nécessaires pour réaliser des essais conformément à de nombreuses normes ou des spécifications particulières.

Le client, interne ou externe à l'entreprise, est assisté s'il le souhaite par les spécialistes des laboratoires dans la recherche des normes et

sévérités applicables à son matériel. Il lui incombe aussi de définir quels sont les critères fonctionnels d'acceptabilité, soit en référence aux normes régissant son produit, soit à défaut de normes selon les impératifs d'utilisation du produit (sécurité, continuité de service, confort ...).

Essais normatifs

Il serait fastidieux de tous les citer, d'autant plus que l'évolution du paysage normatif est très rapide notamment concernant les normes de produits. Nous indiquons ci-après les principaux textes de référence pour la conduite des essais.

Immunité

■ CEI 61000-4-2 [= EN 61000-4-2
= NF EN 61000-4-2 (NF C 91-004-2)]
Compatibilité électromagnétique (CEM)
Partie 4-2 : techniques d'essai et de mesure -
essai d'immunité aux décharges électrostatiques

■ CEI 61000-4-3 [= EN 61000-4-3
= NF EN 61000-4-3 (NF C 91-004-3)]
Compatibilité électromagnétique (CEM)
Partie 4-3 : Techniques d'essai et de mesure -
essai d'immunité aux champs
électromagnétiques rayonnés aux fréquences
radioélectriques

■ CEI 61000-4-4 [= EN 61000-4-4
= NF EN 61000-4-4 (NF C 91-004-4)]
Compatibilité électromagnétique (CEM)
Partie 4-4 : techniques d'essai et de mesure -
essais d'immunité aux transitoires électriques
rapides en salves

■ CEI 61000-4-5 [= EN 61000-4-5
= NF EN 61000-4-5 (NF C 91-004-5)]
Compatibilité électromagnétique (CEM)
Partie 4-5 : techniques d'essai et de mesure -
essai d'immunité aux ondes de choc

■ CEI 61000-4-6 [= EN 61000-4-6
= NF EN 61000-4-6 (NF C 91-004-6)]
Compatibilité électromagnétique (CEM)
Partie 4-6 : techniques d'essai et de mesure -
immunité aux perturbations conduites, induites
par les champs radioélectriques

■ CEI 61000-4-8 [= EN 61000-4-8
= NF EN 61000-4-8 (NF C 91-004-8)]
Compatibilité électromagnétique (CEM)
Partie 4-8 : techniques d'essai et de mesure -
essai d'immunité au champ magnétique à la
fréquence du réseau

■ CEI 61000-4-11 [= EN 61000-4-11
= NF EN 61000-4-11 (NF C 91-004-11)]
Compatibilité électromagnétique (CEM)
Partie 4-11 : techniques d'essai et de mesure -
essais d'immunité aux creux de tension, coupures
brèves et variations de tension

■ CEI 61000-4-12 [=EN 61000-4-12
= NF EN 61000-4-12 (NF C 91-004-12)]
Compatibilité électromagnétique (CEM)
Partie 4-12 : Techniques d'essai et de mesure -
Essai d'immunité aux ondes oscillatoires

■ CEI 61000-6-1 [=EN 61000-6-1
= NF EN 61000-6-1 (NF C 91-006-1)]
Compatibilité électromagnétique (CEM)
Partie 6-1 : Normes génériques -
Immunité pour les environnements résidentiels,
commerciaux et de l'industrie légère

■ CEI 61000-6-2 [=EN 61000-6-2
= NF EN 61000-6-2 (NF C 91-006-2)]
Compatibilité électromagnétique (CEM)
Partie 6-2 : Normes génériques -
Immunité pour les environnements industriels

Emission

■ CISPR 11
[= EN 55011 = NF EN 55011 (NF C 91-011)]
Limites et méthodes de mesure des caractéristiques de perturbations radioélectriques des appareils industriels, scientifiques et médicaux (ISM) à fréquence radioélectrique

■ CISPR 14
[= EN 55014 = NF EN 55014 (NF C 91-014)]
Limites et méthodes de mesure des perturbations radioélectriques produites par les appareils électrodomestiques ou analogues comportant des moteurs ou des dispositifs thermiques, par les outils électriques et par les appareils électriques analogues (partie émission conduite)

■ CISPR 22
[= EN 55022 = NF EN 55022 (NF C 91-022)]

Limites et méthodes de mesure des caractéristiques de perturbations radioélectriques produites par les appareils de traitement de l'information

■ CEI 61000-6-3

Compatibilité électromagnétique (CEM)
Partie 6 : Normes génériques

Section 3 : sur l'émission pour les environnements résidentiels, commerciaux et de l'industrie légère

■ CEI 61000-6-4

Compatibilité électromagnétique (CEM)
Partie 6 : Normes génériques

Section 4 : sur l'émission pour les environnements industriels

■ EN 50081-1

[= NF EN 50081-1 (NF C 91-081-1)]

Compatibilité électromagnétique (CEM)
Norme générique émission

Partie 1 : résidentiel, commercial et industrie légère

■ EN 50081-2

[= NF EN 50081-2 (NF C 91-081-2)]

Compatibilité électromagnétique (CEM)
Norme générique émission

Partie 2 : environnement industriel

Normes spécifiques

■ Centres de télécommunications

I 12-10, 1993

éditée par le Comité des Spécifications des Equipements (CSE) France Télécom.

Environnement électromagnétique des équipements des centres.

(partie immunité aux perturbations rayonnées et partie perturbations rayonnées et conduites)

■ Militaires

GAM - EG -13

essais généraux en environnement des matériels

fascicules 62 et 63

■ MIL STD 461/462

Electromagnetic emission and susceptibility requirements for the control of electromagnetic interference

Essais hors normes

Dans le cadre de leurs possibilités et de leurs compétences, les laboratoires peuvent effectuer des essais conformément à d'autres textes.

Annexe 4 : bibliographie

Normes

- CEI 60364, NF C 15-100 : Installations électriques à basse tension.
- CEI 61000-2 :
Compatibilité électromagnétique (CEM).
Partie 2 : Environnement.
Section 1 : Description de l'environnement - Environnement électromagnétique pour les perturbations conduites
Section 2 : niveaux de compatibilité pour les perturbations conduites basse fréquence et la transmission de signaux sur les réseaux publics d'alimentation a basse tension
Partie 4 : Techniques d'essai et de mesure.
Partie 6 : Normes générales.
- NF EN 55011, CISPR 11 (Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques) : Appareils industriels, scientifiques et médicaux (ISM) à fréquence radioélectrique. Caractéristiques de perturbations radioélectriques. Limites et méthodes de mesure.
- NF EN 55022, CISPR 22
Limites et méthodes de mesure des caractéristiques de perturbations radioélectriques produites par les appareils de traitement de l'information.

Cahiers Techniques Schneider Electric

- Les perturbations électriques en BT
Cahier Technique n° 141
R. CALVAS
- Disjoncteurs au SF6 Fluarc et protection des moteurs MT
Cahier Technique n° 143
J. HENNEBERT et D. GIBBS
- Coexistence courants forts - courants faibles
Cahier Technique n° 187
R. CALVAS et J. DELABALLE

Publications diverses

- Compatibilité électromagnétique - bruits et perturbations radioélectriques -
P. DEGAUQUE et J. HAMELIN
Dunod éditeur
- Compatibilité électromagnétique
M. IANOVICI et J.-J. MORF
Presses Polytechniques Romandes
- La compatibilité électromagnétique
A. KOUYOUMDJIAN, avec R. CALVAS et J. DELABALLE
Institut Schneider Formation
Février 1996, réf. MD1CEM1F
- Les harmoniques et les installations électriques
A. KOUYOUMDJIAN
Institut Schneider Formation
Avril 1998, réf. MD1HRM1F
- RGE n° 10 consacré à la compatibilité électromagnétique
Novembre 1986.

Schneider Electric

Direction Scientifique et Technique,
Service Communication Technique
F-38050 Grenoble cedex 9
Télécopie : 33 (0)4 76 57 98 60
E-mail : fr-tech-com@mail.schneider.fr

Réalisation : AXESS - Valence (26).
Edition : Schneider Electric

- 20 € -