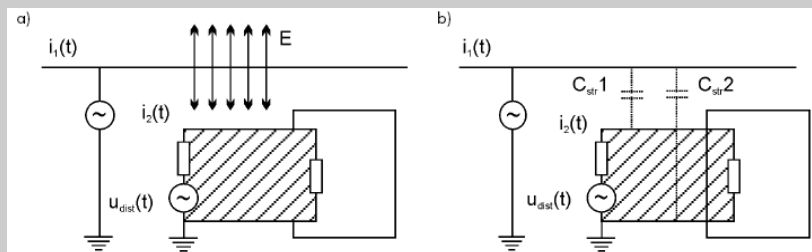
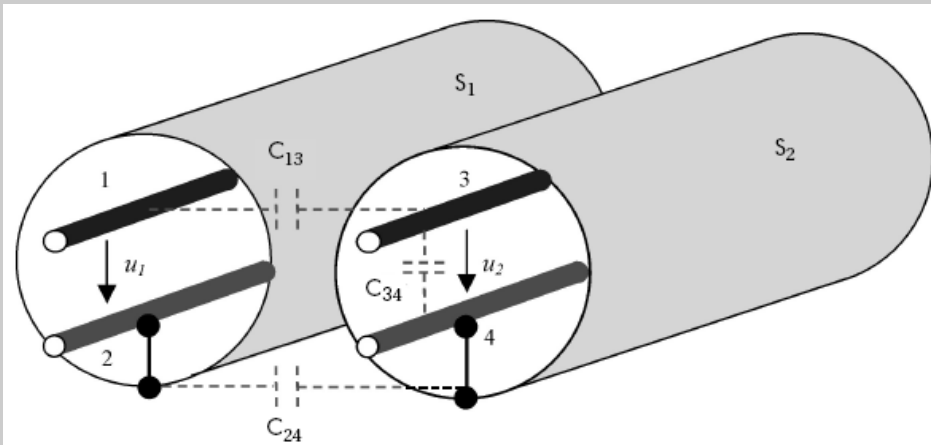


CEM et mise à la terre - Section 6.1.2

Dr rer nat Wolfgang LANGGUTH

Hochschule für Technik und Wirtschaft

Mai 2009



CEM et mise à la terre

fr.leonardo-energy.org

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| <u>1. Introduction</u> | 3 |
| <u>2. Champs électromagnétiques, principales sources de perturbation</u> | 4 |
| <u>3. Les différents modes de couplage</u> | 6 |
| 3.1 Modèle élémentaire de propagation d'une perturbation électromagnétique..... | 6 |
| 3.2 Couplage par impédance commune..... | 7 |
| 3.3 Le couplage inductif | 9 |
| 3.3.1 Influence de la géométrie dans le couplage inductif..... | 10 |
| 3.3.2 Influence de la fréquence dans le couplage inductif..... | 13 |
| 3.4 Le couplage capacitif..... | 16 |
| 3.5 Le couplage par rayonnement..... | 20 |
| 3.6 La complexité des perturbations électromagnétiques en pratique | 22 |
| <u>4. La directive CEM et son intérêt dans les installations de bâtiment</u> | 23 |
| <u>5. Références bibliographiques</u> | 24 |

1. Introduction

Dans le passé, la majorité des équipements constituant les installations électriques des bâtiments conventionnels étaient des charges de type linéaire (moteurs alternatif-continu, charges résistives, lampes halogènes, etc.), dont la particularité est de ne pas (ou peu) interférer avec les différents composants des équipements voisins.

Aujourd'hui, la plupart des équipements sont des charges de type non linéaire (variateurs de vitesse de moteur alternatif, lampes à décharges, lampes à économie d'énergie, etc.). Ces charges ont la particularité de générer du bruit sur des gammes de fréquence ciblées (par exemple, le découpage type MLI génère des fréquences fixes autour de 9 kHz) pouvant, sous certaines conditions, se propager sur tout le réseau électrique. Typiquement, les alimentations à découpage génèrent des perturbations conduites dans une gamme de fréquence de 10 kHz à 100 kHz.

Parallèlement à ce phénomène, on observe une augmentation importante d'utilisation de systèmes numériques, tels que les équipements informatiques pour les systèmes de gestion technique et les systèmes d'automatisation de process industriels, mais aussi les applications de type multimédia ou bureautique.

Il apparaît donc un paradoxe : d'une part, les systèmes d'alimentation sont de plus en plus puissants, et donc susceptibles de générer des phénomènes d'interférences électromagnétiques (EMI) importants et, d'autre part, les réseaux digitaux en pleine expansion sont de plus en plus sensibles et travaillent à des vitesses de transfert de données de plus en plus élevées et sont, par ailleurs, de plus en plus utilisés pour des tâches ayant rapport avec la sécurité.

Pour tous les bâtiments où des problèmes de compatibilité électromagnétique engendrent des surcoûts ou des diminutions inacceptables des normes de sécurité, ce paradoxe entre robustesse des systèmes de traitement de l'information et pollution électromagnétique environnante ne peut être levé qu'en intervenant sur l'installation électrique pour en améliorer la qualité en termes de CEM.

Tous les éléments conducteurs des bâtiments et des installations électriques jouent un rôle vis-à-vis des interférences électromagnétiques, soit comme source (émetteur EMI), soit comme victime (récepteur EMI). En plus des conducteurs électriques installés, les conduits métalliques, les barres de renforcement, les façades métalliques et autres constructions en acier peuvent aussi transmettre les perturbations électromagnétiques.

Il est fréquent que des éléments d'une installation électrique jouent à la fois le rôle de source et de victime simultanément. Les principaux systèmes sont :

CEM et mise à la terre

fr.leonardo-energy.org

- Les câbles d'alimentation de puissance
- Les dispositifs de mesure et de contrôle
- Les systèmes d'alarmes
- Les installations informatiques et les réseaux.

Une installation électrique de mauvaise qualité au regard de la CEM, associée à un schéma de liaison à la terre de type TN-C, favorise la circulation des perturbations dans l'ensemble du bâtiment et même dans les installations électriques voisines. L'importance croissante de la CEM a été mise en évidence par la communauté européenne. En accord avec la directive CEM EU 89/336/EEC (amendée par les directives 91/263/EEC, 92/31/EEC, 93/68/EEC et 93/97/EEC), toute installation électrique de bâtiment doit également respecter les normes internationales de CEM d'émission et d'immunité. La personne ou les personnes responsables de la conception, de l'ingénierie et de la construction est (sont) désignée(s) comme étant le « fabricant » au sens de la directive et assume(nt) l'entière responsabilité de la conformité de l'installation avec l'ensemble des prescriptions de la directive lors de la mise en service.

La mise en œuvre rentable d'une installation électrique de haute qualité en matière de CEM dans un bâtiment nécessite de procéder à une analyse CEM et de développer un plan CEM très tôt dans la planification du projet. Toutes les installations électriques doivent être maintenues et réalisées par du personnel qualifié dès lors que des problèmes spécifiques en matière de CEM sont rencontrés.

Ce fascicule du guide « Power Quality » vous présente une approche synthétique des phénomènes de CEM, les principes physiques relatifs aux interférences électromagnétiques, une introduction aux techniques de protection et, pour finir, les mesures nécessaires à une installation compatible CEM.

2. Champs électromagnétiques, principales sources de perturbation

On entend, par « Compatibilité Electromagnétique », la capacité d'un appareil ou d'un système à fonctionner de façon satisfaisante dans son environnement électromagnétique, sans générer lui-même de perturbations électromagnétiques inacceptables pour les autres appareils présents dans cet environnement.

Les principales sources de perturbations électromagnétiques (EMI) sont les différents champs et courants électrodynamiques. A basses fréquences, les champs électriques et magnétiques agissent indépendamment l'un de l'autre alors qu'à haute fréquence, le champ magnétique est prépondérant.

Tous les champs, qu'ils soient à basses, moyennes ou hautes fréquences, sont produits par des charges et des courants électriques.

Les champs électriques et magnétiques basses fréquences ont des portées spatiales relativement faibles et des intensités de champs inversement proportionnelles à la distance de la source. Les champs basses fréquences sont donc localisés à proximité des conducteurs de tension ou de courant.

Le champ électrique étant proportionnel à la tension d'alimentation de l'installation, il pourrait être suffisamment intense pour créer des perturbations électromagnétiques sur un important périmètre aux alentours des installations haute tension. Cependant, on observe que, pour la plupart des installations électriques, les champs électriques ne jouent pas un rôle essentiel, sauf dans le cas particulier de câbles de puissance installés dans des chemins de câbles. Il réside alors, dans le voisinage immédiat du chemin de câble, un champ électrique pouvant être considéré comme une source possible de perturbations électromagnétiques.

Le champ magnétique est proportionnel à l'intensité du courant électrique. En cas de fortes puissances installées, les courants peuvent induire des champs magnétiques de forte intensité et augmenter le risque de perturbations électromagnétiques. C'est le cas notamment pour les installations de type TN-C. Le conducteur de neutre (N) est alors confondu avec le conducteur de protection équipotentielle (PE) et donc raccordé à tous les éléments métalliques du bâtiment (structure, huisseries, conduits, canalisations, etc.). Dans cette configuration, les courants peuvent atteindre toutes les parties du bâtiment et les champs magnétiques résultant peuvent provoquer des interférences électromagnétiques dans pratiquement tout l'environnement. Puisqu'une partie du courant de neutre transite par les parties métalliques, la somme des courants dans le réseau TN-C se trouve alors déséquilibrée et le champ magnétique net résultant du réseau TN-C est augmenté en proportion.

Les écrans d'ordinateur à tubes cathodiques sont facilement affectés (scintillements de l'écran) par des champs magnétiques de l'ordre de $1.5 \mu\text{T}$. Il suffit d'un câble, situé à une distance de 1,3 m du tube cathodique, parcouru par un courant de 10 A à 50 Hz pour produire un tel champ. Les écrans d'ordinateurs à tubes cathodiques (> 17 pouces) sont encore plus sensibles aux champs magnétiques. Si les courants des lignes de puissances possèdent des composantes hautes fréquences, le champ magnétique aura alors plus d'impact.

A hautes fréquences, les champs électriques et magnétiques se combinent et forment un champ électromagnétique se propageant dans le vide à la vitesse de la lumière. Les champs électromagnétiques à hautes fréquences génèrent donc des perturbations sur de plus grandes distances. Les principales sources de champs magnétiques sont : les radars, les transmetteurs TV et radio, les téléphones mobiles, les téléphones numériques DECT, les réseaux sans fils, les périphériques Bluetooth et les installations industrielles dans la gamme de fréquence des micro-ondes. Cependant, les câbles de puissances peuvent faire office d'antenne et propager n'importe quel signal haute fréquence intentionnellement (courants porteurs en ligne) ou involontairement (transitoires rapides) présents sur le réseau. Pour rendre immune une installation électrique aux champs électromagnétiques, il convient de procéder à une conception soignée et de mettre en place des mesures de protection ad hoc.

3. Les différents modes couplages

3.1 Modèle élémentaire de propagation d'une perturbation électromagnétique

Pour décrire le fonctionnement des perturbations électromagnétiques, prenons pour exemple un modèle très simple composé d'une **source** génératrice d'interférences, d'un processus ou d'un mode de **couplage** et d'un système perturbé, **victime** des perturbations électromagnétiques.

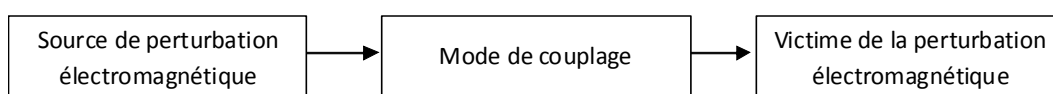


Figure 1 : modèle élémentaire de transmission d'une perturbation électromagnétique.

La source de perturbations mentionnée ci-dessus peut provenir des câbles de puissance d'alimentation du système électrique, des antennes de réseaux LAN sans fil, etc. Le couplage est établi par les courants si des conducteurs communs de différents circuits sont reliés par des champs électriques, magnétiques ou électromagnétiques. Les victimes peuvent être n'importe quel appareil ou partie de l'installation. Bien sûr, l'interaction électromagnétique complète de toute installation dans un bâtiment est une combinaison complexe de ces interactions élémentaires.

Pendant la phase de planification d'une installation neuve ou d'une rénovation d'installation, une matrice contenant toutes les informations relatives aux sources de perturbations possibles, aux modes de couplage et aux équipements susceptibles d'être affectés, est établie. Grâce à cette matrice, la résultante des interférences est estimée dans le but d'identifier toutes les perturbations possibles pouvant apparaître et celles qui semblent être pertinentes.

Suite aux résultats obtenus à partir de la matrice d'interaction des perturbations électromagnétiques, il est possible d'envisager la mise en place de mesures curatives et assurer une mise en service rapide et économique de l'installation.

Il existe quatre types de couplages de perturbation électromagnétiques :

- le couplage par impédance commune
- le couplage capacitif
- le couplage inductif
- le couplage par rayonnement

Les principes physiques de base des différents modes de couplage sont résumés dans le tableau suivant :

| Sources | Domaine de fréquence | Modes de couplage | Portée | Victimes |
|-------------------------|----------------------|-------------------|--------|---------------------------------|
| Champ électrique | Basse fréquence | Capacitif | Courte | Câbles hautes et basse tensions |
| Champ magnétique | Basse fréquence | Inductif | Courte | Câbles hautes et basse tensions |
| Champ électromagnétique | Haute fréquence | Par rayonnement | Longue | Câbles hautes et basse tensions |

Par ordre d'importance, les phénomènes perturbateurs dominants dans les bâtiments ont pour cause des couplages de type inductif, suivis en moindre mesure par des couplages de type capacitif. Enfin, les couplages par impédance commune sont plus rares. Jusqu'à récemment, le couplage par rayonnement n'avait pas ou peu d'incidence du fait de la faible valeur des intensités de champs mis en œuvre (très inférieures aux limites CEM normatives imposées).

On observe, cependant, que le nombre croissant des applications type « sans fils » conduit à une augmentation des perturbations électromagnétiques par rayonnement, et donc une importance accrue de ce type de couplage.

3.2 Couplage par impédance commune

Le couplage par impédance commune apparaît lorsque plusieurs circuits utilisent des lignes communes et/ou des impédances de couplages. Cela arrive, par exemple, lorsque différents circuits sont alimentés par la même source. La figure 2 décrit le schéma de principe du couplage par impédance commune.

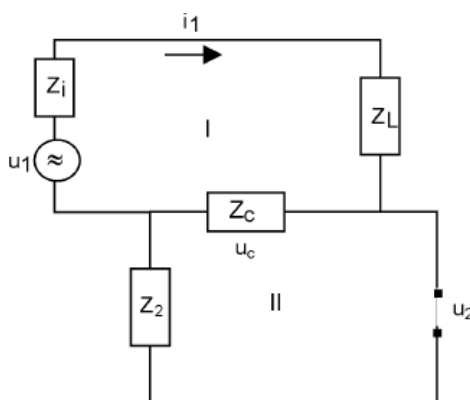


Figure 2 : couplage par impédance commune

CEM et mise à la terre

fr.leonardo-energy.org

Le circuit I représente un réseau d'alimentation type puissance et le circuit II représente un réseau de transfert de données. La tension u_c , qui est superposée au signal u_2 due à l'impédance de couplage commune $Z_c=R_c + j\omega L_c$, en prenant pour hypothèse que celle-ci est donnée par :

$$Z_c \ll Z_I + Z_L$$

est égal à

$$u_c = Z_c \cdot i_1 \approx \frac{u_1}{z_i + z_L} Z_c$$

Si le courant i_1 et/ou l'impédance commune de couplage Z_c ont des valeurs élevées, alors la chute de tension u_c peut être non négligeable par rapport au signal u_2 et venir ainsi perturber la transmission de données.

L'impédance d'une ligne d'alimentation se compose d'une partie résistive et d'une partie inductive $Z_c(\omega) = R_c + j\omega L_c$. La valeur de la partie résistive est invariante en fonction de la fréquence du signal parcourant la ligne (hypothèse vraie si l'on néglige l'effet de peau), alors que la valeur de la partie inductive est proportionnelle à la fréquence du signal et devient donc, pour des signaux hautes fréquences, prépondérante.

Si l'on se base sur le modèle tel que représenté sur la figure ci-dessous :

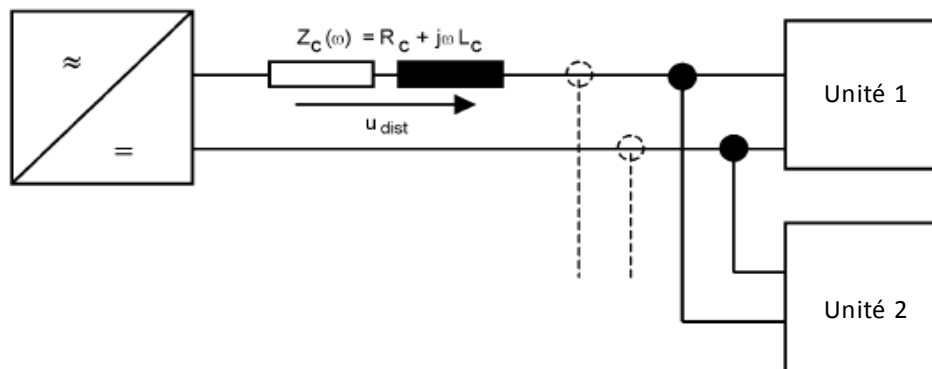


Figure 3 : couplage par impédance commune, modèle de base (unité 1, unité 2)

La tension perturbatrice u_{dist} , présente aux bornes de Z_c , est superposée au signal de l'unité 2, et dépend du courant $i(t)$ parcourant la ligne mais également de la variation temporelle du courant $di(t)/dt$. Pour notre modèle simplifié, la tension perturbatrice peut être calculée comme :

$$u_{dist} = u_{R,dist} + u_{L,dist} = R_c \cdot i(t) + L_c \cdot \frac{di(t)}{dt}$$

Si l'on choisit des paramètres réalistes pour notre modèle (longueur de ligne $l = 2 \text{ m}$, inductance $L_c = 1 \mu\text{H}/\text{m}$, résistance $R_c = 1 \Omega$, courant $i = 1 \text{ A}$ et une variation de courant $di/dt = 1 \text{ A} / 100 \text{ ns}$), nous obtenons les contributions suivantes pour le couplage par impédance :

$$u_{R,dist} = R_c \cdot i(t) = 1 \text{ V}$$

$$u_{L,dist} = L_c \cdot \frac{di(t)}{dt} = 20 \text{ V}$$

$$u_{dist} = u_{R,dist} + u_{L,dist} = 21 \text{ V}$$

A hautes fréquences, c'est la composante inductive de l'impédance de ligne qui est prépondérante. Cela reste vrai même si l'on prend en compte la partie résistive de la ligne due à l'effet de peau dont la valeur n'est pas négligeable, notamment dans les phases de transitoires rapides ou pour des signaux numériques.

D'après la loi de Kirchhoff, la tension perturbatrice peut se transmettre au-delà de l'installation et affecter une installation voisine. Afin de minimiser le couplage par impédance commune, il est nécessaire d'éviter les connections entre différents systèmes indépendants et, dans le cas où ces connections sont nécessaires, de garder leurs inductances de couplage les plus basses possibles.

Généralement, le découplage d'impédance commune des réseaux d'alimentation peut être obtenu plus facilement lorsque le schéma TN-S est utilisé par préférence au schéma TN-C.

3.3 Le couplage inductif

Une variation externe de courant $i_1(t)$ génère un champ magnétique $B(t)$ qui, s'il est capté par une boucle $u_{dist}(t)$ dans un circuit voisin, induit par couplage inductif une tension perturbatrice. Dans un schéma équivalent, ceci peut être décrit comme un couplage des deux circuits par une inductance mutuelle de couplage M . La tension perturbatrice $u_{dist}(t)$ génère un courant de mode commun $i_2(t)$, qui génère lui-même un champ magnétique affaiblissant le champ externe (l'effet s'oppose à la cause qui lui a donné naissance). Le courant $i_2(t)$ est superposé aux courants du système affecté et peut causer des dysfonctionnements. Le couplage de champs magnétiques de différents appareils peut être modélisé par un schéma équivalent composé des inductances mutuelles des circuits alors couplés (figure 4).

CEM et mise à la terre

fr.leonardo-energy.org

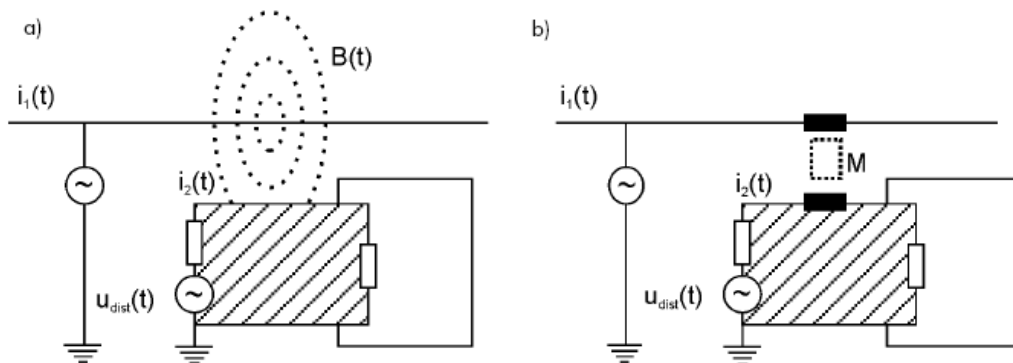


Figure 4 : couplage inductif,

a) schéma avec champ magnétique, b) schéma équivalent

L'intensité de ce couplage dépend de trois paramètres principalement :

- l'intensité du courant perturbateur,
- la distance entre la source et la victime,
- la fréquence du champ perturbateur.

Le signal perturbateur devient important et significatif si :

- les courants parcourant les circuits voisins sont importants,
- les courants de phase (aller) et de neutre (retour) sont très déséquilibrés (ce qui peut être le cas en schéma TN-C),
- les circuits forment des boucles se recouvrant sur de larges surfaces,
- les signaux d'un circuit voisin varient rapidement dans le temps et par conséquent possèdent une importante composante haute fréquence.

Le couplage inductif, cependant, est également utile dans le contrôle des perturbations. Si l'installation des chemins de câbles et des câbles torsadés est réalisée proprement, (i.e. les câbles sont parfaitement connectés avec de courtes connections possédant de faibles impédances également pour les autres fréquences), ils peuvent protéger les câbles (via le couplage inductif) contre les champs magnétiques externes, spécialement à hautes fréquences.

3.3.1 Influence de la géométrie dans le couplage inductif

L'analyse de l'influence de la sensibilité d'un équipement au couplage inductif, ainsi que

de l'influence de la géométrie de l'installation (voir exemple présenté ci-dessous) permet d'établir des conclusions importantes pour la compatibilité des installations en matière de CEM.

Prenons deux circuits : l'un constitué d'une ligne simple d'alimentation de puissance parcourue par un courant $i(t)$, et l'autre constitué de deux lignes aller et retour d'alimentation de puissance, et calculons, pour chacun des cas, l'influence du champ magnétique généré sur une boucle rectangulaire située à une distance r .

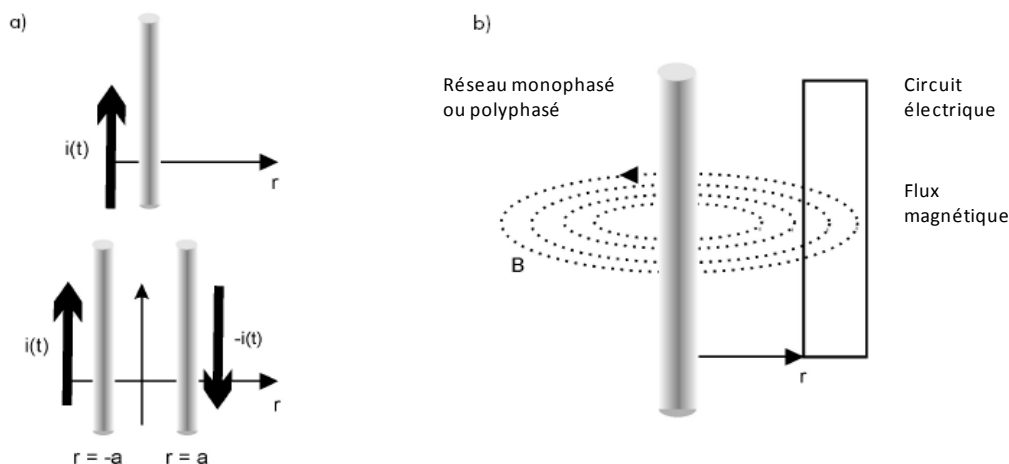
Le champ magnétique de chaque configuration peut être calculé de manière exacte :

$$B_1(r) = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{i(t)}{r}, \quad B_2(r) = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{2a \cdot i(t)}{(r-a)(r+a)}, \quad \text{où } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \left[\frac{Vs}{Am} \right]$$

Dans le premier cas (ligne simple), le champ magnétique est proportionnel au courant $i(t)$ et décroît inversement proportionnellement à la distance r .

Dans le second cas (ligne aller-retour), le champ magnétique décroît de façon inversement proportionnelle au carré de la distance.

Les deux modèles ont donc des comportements très différents, notamment à longues distances. La figure 5 représente l'influence du couplage inductif par unité de longueur pour les 2 cas de figure. Le courant $i(t)$ est choisi comme étant égal à 1 A et la distance $a = 1,5 \text{ mm}$.



**Figure 5 : a) Lignes simple et ligne aller –retour comme source de champs magnétique
 b) Circuit électrique - cible de l'induction**

CEM et mise à la terre

fr.leonardo-energy.org

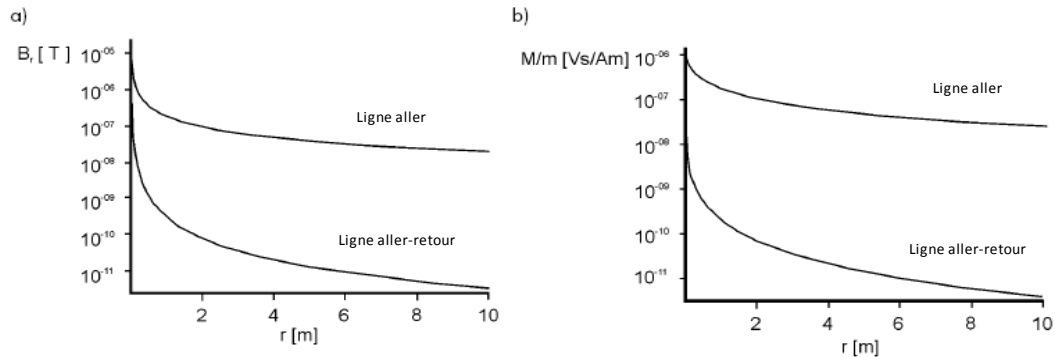


Figure 6 : a) Champ magnétique généré par une ligne aller et par une ligne aller-retour
b) Couplage inductif par unité de longueur respectivement pour une boucle aller et pour une boucle aller-retour

L'amplitude du champ magnétique généré par la ligne aller-retour est environ deux fois plus faible que celle générée par la ligne aller. On observe de plus que la décroissance d'amplitude de champ avec la distance est plus importante dans le cas de la ligne aller-retour que dans le cas de la ligne simple. Ces résultats sont donc équivalents aux résultats obtenus pour le couplage inductif.

La dépendance de la valeur d'inductance de couplage à la surface de la boucle est identique aux résultats de la figure 6b. Grâce à cet exemple, il est possible d'établir un certain nombre de "règles d'or" pour mieux garantir la compatibilité électromagnétique dans une installation électrique :

- garder la zone d'un appareil électrique la plus petite possible
- maximiser la distance aux câbles de puissances
- séparer les lignes de puissances et de données (séparation des courants forts et des courants faibles)
- utiliser schéma de liaison à la terre de type TN-S

Seuls les réseaux TN-S possèdent un excellent comportement en matière de CEM. Lorsqu'un déséquilibre de courant a lieu sur un réseau de type TN-C, cela a pour effet de générer un champ magnétique équivalent à celui d'une ligne simple parcourue par le courant de déséquilibre. Ce champ magnétique a alors une amplitude environ deux fois supérieure au champ magnétique généré par un courant de déséquilibre équivalent dans une installation équivalente en TN-S.

3.3.2 Influence de la fréquence dans le couplage inductif

Le comportement fréquentiel d'un couplage inductif permet d'obtenir des informations précieuses permettant de mieux concevoir les installations électriques et de bénéficier d'une protection optimale face aux perturbations externes hautes fréquences. Nous utiliserons, pour cela, un schéma équivalent (modèle idéal) représenté sur la figure 7 formant une petite boucle constituée d'une self-inductance L_2 et une résistance R_2 . La boucle est affectée par une ligne extérieure parcourue par un courant $i_1(t)$, via une inductance de couplage M .

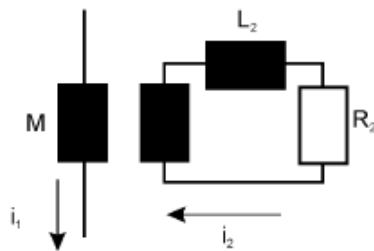


Figure 7 : schéma équivalent du couplage inductif

Pour un courant pulsant à une fréquence définie ω , $i_{1,2}(t) = i_{1,2}(\omega)e^{j\omega t}$ la fonction de transfert $i_2(\omega)$ entre courant perturbateur et courant induit $i_2(\omega)$ pour ce modèle simple peut être calculée de façon exacte (équation 5) :

$$i_2 = \frac{sM}{R_2 + sL_2} i_1 \quad s = j\omega, \quad j^2 = -1$$

Afin de mieux comprendre cette formule pour une installation réelle, considérons une boucle d'une longueur $l = 0,3 \text{ m}$ et d'un diamètre $w = 0,1 \text{ m}$ située à une distance $d = 2 \text{ mm}$ de la ligne perturbatrice. Avec pour valeur de résistance $R_2 = 50 \text{ } \Omega$, de self inductance $L_2 = 0,9 \text{ } \mu\text{H}$, et de mutuelle inductance $M = 0,2 \text{ } \mu\text{H}$ (ces valeurs sont cohérentes par rapport à des situations réelles). L'intensité du courant perturbateur (i_2) par unité de courant externe (i_1), soit le rapport $i_2(\omega) / i_1(\omega)$, est représenté sur la figure ci-après :

CEM et mise à la terre

fr.leonardo-energy.org

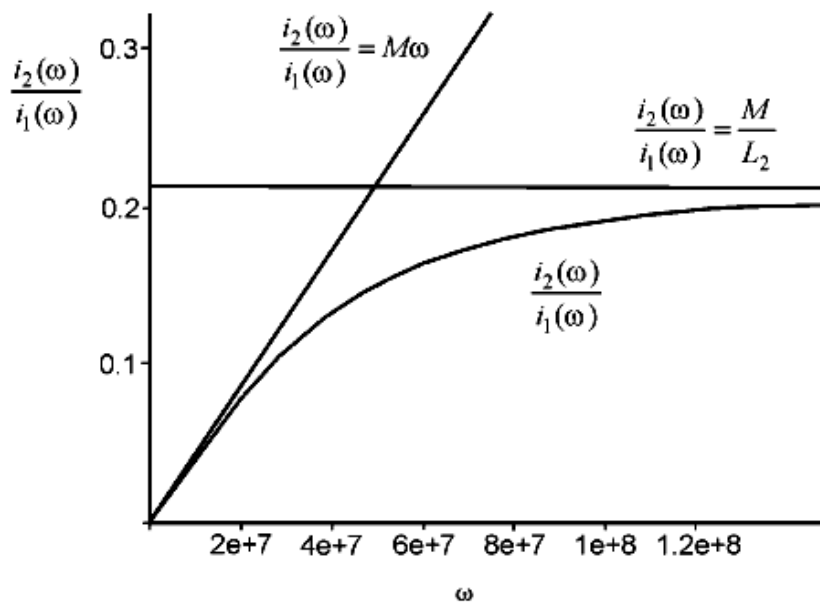


Figure 8 : représentation de la fonction de transfert entre courant perturbateur et courant externe

Le courant perturbateur croît proportionnellement avec le courant extérieur et varie en fonction de la fréquence. A basses fréquences, ce rapport croît proportionnellement à ω , tandis qu'à hautes fréquences, i_2 atteint sa valeur de saturation. Cette valeur de saturation est limitée par le ratio M/L_2 . Afin de minimiser les effets des perturbations électromagnétiques, il convient de minimiser la mutuelle inductance M et de maximiser la self inductance L_2 du circuit couplé.

Les perturbations transitoires ayant pour caractéristiques des spectres fréquentiels riches à hautes fréquences, on comprend dès lors qu'elles sont source de dysfonctionnements importants. La figure 9 représente la valeur du courant perturbateur résultant d'un courant trapézoïdal (équivalent à un signal numérique).

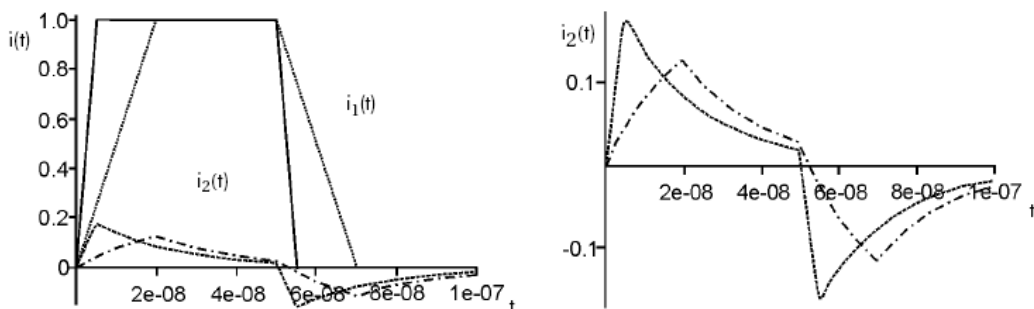


Figure 9 : caractéristiques du couplage inductif pour des courants trapézoïdaux basses et hautes fréquences

Nous pouvons voir, en figure 9, que le courant perturbateur peut atteindre 10 % de l'amplitude du signal lent et plus de 15 % de l'amplitude du signal rapide. Ces valeurs extrêmes résultent du temps de montée extrêmement rapide des signaux numériques. Des valeurs extrêmes similaires sont créées par des processus de découpage tels que des gradateurs à angle d'ouverture contrôlé. Le découpage du gradateur peut être modélisé par la forme d'onde d'un signal trapézoïdal. La partie résultante du signal à 50 Hz a alors une contribution négligeable.

Nous avons jusqu'à maintenant considéré une boucle de court-circuit comme victime d'une perturbation électromagnétique et constaté que les propriétés électriques doivent être optimisées afin de minimiser le courant perturbateur induit $i_2(t)$. Le courant induit $i_2(t)$ est par ailleurs générateur d'un champ magnétique qui vient affaiblir le champ extérieur. Cette propriété peut être utilisée comme blindage pour protéger des systèmes électriques ou électroniques sensibles. Dans ce cas, les paramètres de la boucle de court-circuit doivent être choisis de façon à optimiser le champ opposé généré par le courant $i_2(t)$ et minimiser le flux magnétique net à travers la boucle. Des exemples pratiques de cette application sont le blindage tel que réalisé pour les câbles blindés, les chemins de câbles, les âmes de câbles non utilisés, etc. Le flux magnétique net à travers la superficie de la boucle de court circuit de notre modèle peut être calculé comme suit :

$$\Phi_{loop}(i_2) = \frac{MR_2}{R_2 + sL_2} i_1, \quad s = j\omega, \quad j^2 = -1$$

D'après la formule ci-dessus, plus la valeur de la résistance R_2 est petite et plus le flux magnétique net est faible. Les propriétés de blindage de notre modèle de boucle de court-circuit, pour différentes valeurs de R_2 , sont représentées en figure 10.

L'efficacité du blindage augmente de façon importante lorsque la valeur de la résistance R_2 décroît (∞ , 500 Ω , 50 Ω , 5 Ω).

De ce résultat, on peut déduire les règles essentielles d'installation électrique dans les bâtiments. Toutes les connexions de blindage d'une installation telle que les chemins de câbles, les supports de câbles, les armoires électriques, etc. doivent avoir des résistances équivalentes très faibles à hautes fréquences. A cause du phénomène d'effet de peau, la résistance de n'importe quel conducteur électrique augmente avec la fréquence du signal, il convient alors de choisir la forme des conducteurs de façon à minimiser la résistance apparente à hautes fréquences. La forme optimale pour un conducteur est d'être plat, soit rigide soit souple, et de présenter une surface de contact la plus large possible et sur une faible épaisseur. Les conducteurs standard à section circulaire ne sont donc pas recommandés.

Il est évident que la fonction de blindage telle que réalisée par la boucle de court-circuit ne fonctionne efficacement que si le courant peut circuler facilement et que la boucle de court circuit n'est jamais interrompue.

Les blindages doivent donc être connectés à la terre aux extrémités et permettre un écoulement facilité du courant parcourant le blindage.

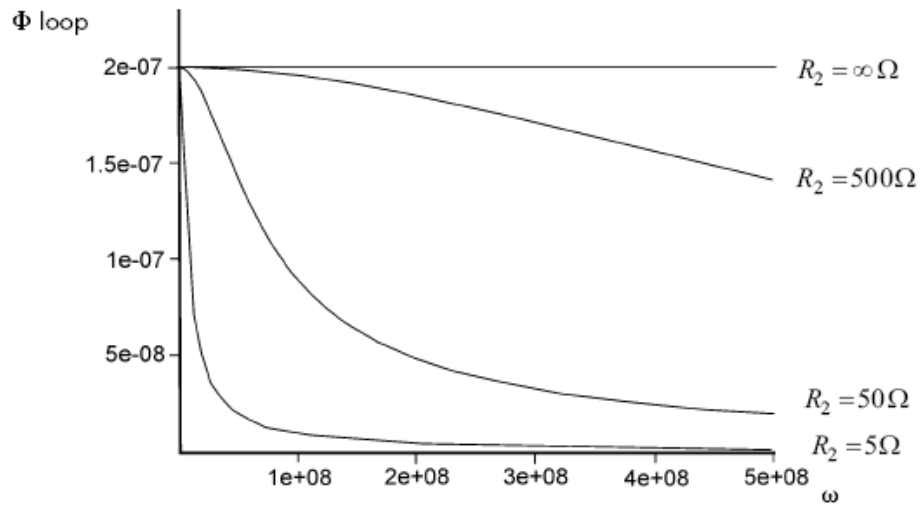


Figure 10 : efficacité du blindage de la boucle de court-circuit pour différentes valeurs de R_2

3.4. Le couplage capacitif

Les variations temporelles d'un champ électrique d'un système génèrent des variations de charges sur un équipement situé dans le voisinage. L'écoulement des courants peut être modélisé sur un schéma équivalent par des condensateurs qui viennent connecter les deux systèmes et provoquent les perturbations de tension.

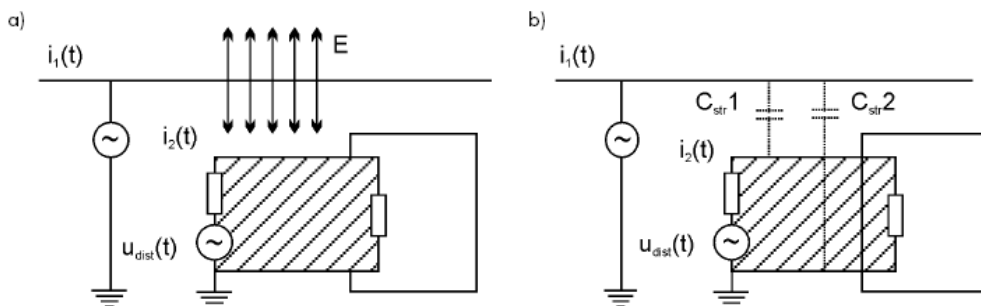


Figure 11 : couplage capacitif a) schéma avec champ électrique, b) schéma équivalent

De la même façon que le couplage inductif, le couplage capacitif devient important si :

- les deux équipements sont connectés entre eux,
- la différence de potentiel entre les équipements est élevée,

- les signaux des circuits voisins varient rapidement dans le temps et se caractérisent donc par un spectre à hautes fréquences.

Considérons, par exemple, les câbles d'un circuit d'alimentation et les câbles d'un réseau informatique local, courant parallèlement sur une distance de 10 mètres dans un chemin de câbles. Si le courant dans les câbles de puissances est purement sinusoïdal à 50 Hz sous 230 V, alors le signal perturbateur dans le câble de données peut atteindre une amplitude de 10 V, ce qui est tolérable. Si le courant dans les câbles de puissance possède des composantes à des fréquences élevées générées par des charges non linéaires, le signal perturbateur dans le câble de données peut alors atteindre une amplitude supérieure à 90 V, et donc engendrer des dysfonctionnements ou de faibles rendements des réseaux LAN.

Si les recommandations de câblage et de blindage sont réalisées dans les règles de l'art, ces types de perturbations peuvent être évités ou au moins minimisés à un niveau tolérable.

Afin d'aborder les aspects importants du couplage capacitif, prenons de nouveau un schéma simple, qui peut être résolu analytiquement. Ce schéma est composé de deux circuits utilisant un retour commun. Le circuit équivalent de ce système est représenté sur la figure 12.

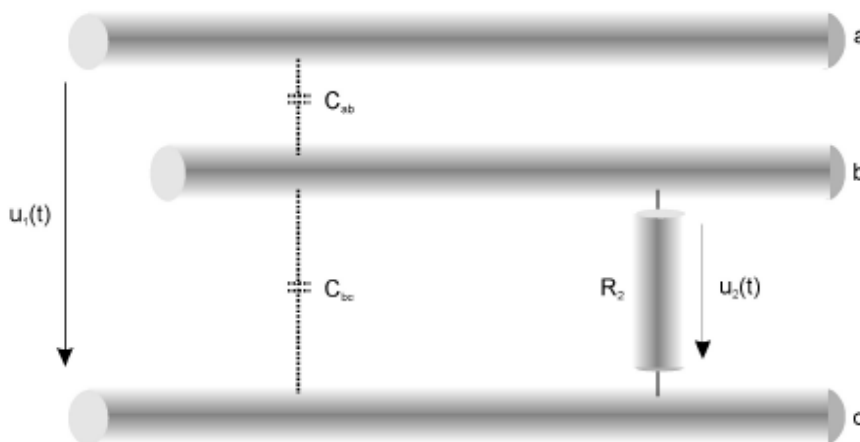


Figure 12 : modèle du couplage capacitif comprenant trois conducteurs

Les lignes a et c font partie du système externe, et les lignes b et c appartiennent au système affecté. Prenons des tensions définies à une fréquence ω , tels que $u_{1,2}(t) = u_{1,2}(\omega)e^{j\omega t}$ que la relation qui lie la tension perturbatrice $u_1\omega$ et la tension de couplage $u_2\omega$ pour ce modèle de base peut être calculée simplement comme :

$$u_2 = \frac{sR_2C_{ab}}{1 + sR_2(C_{ab} + C_{bc})} u_1 \quad s = j\omega, \quad j^2 = -1$$

CEM et mise à la terre

fr.leonardo-energy.org

Nous choisissons pour les composants $R_2=1k\Omega$, $C_{ab}=C_{cb}=100\text{ pF}$ qui sont des valeurs réalistes pour des câbles en parallèle de 1 mm d'épaisseur, espacés d'une distance de 5 mm pour une longueur supérieure à 10 m et une tension externe u_1 de 220 V. Le comportement fréquentiel de la tension de couplage capacitive u_1 est indiqué en figure 13.

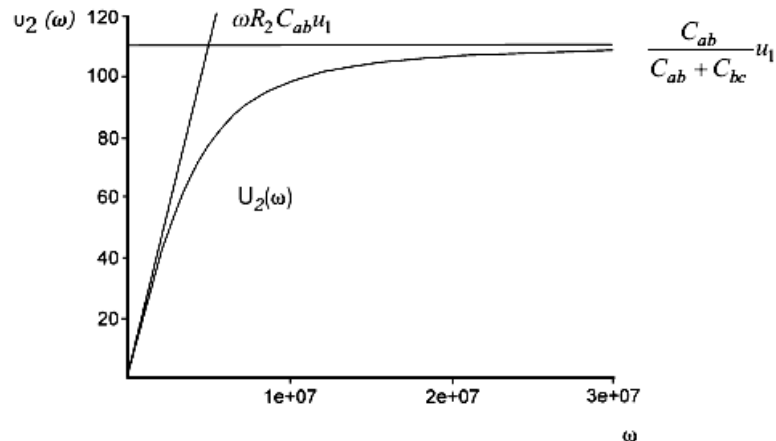


Figure 13 : comportement fréquentiel du couplage capacif

Le comportement du couplage capacif est similaire à celui du couplage inductif. La tension perturbée U_2 croît linéairement dans les basses fréquences, en fonction de la fréquence du signal perturbateur et atteint une valeur de saturation dans les hautes fréquences. Ainsi, les signaux perturbateurs transitoires riches en composantes hautes fréquences influenceront de façon importante le circuit affecté. La figure 14 montre la tension de couplage d'une sinusoïde à 50 Hz de 220 V et un gradateur à contrôle par angle de phase.

L'onde sinusoïdale produit un signal perturbateur sinusoïdal d'une amplitude de 7 mV, qui peut être négligé dans la plupart des cas contrairement au système de commutation d'un gradateur qui génère des tensions crêtes de 110 V.

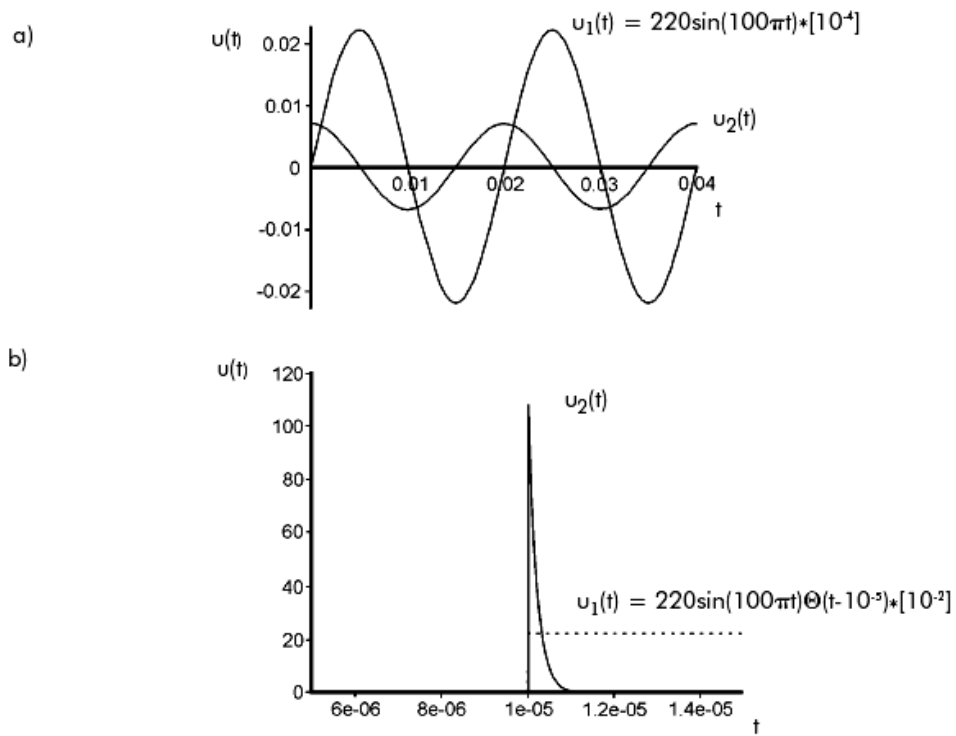


Figure 14 : couplage capacitif pour
a) un signal sinusoïdal à 50 Hz,
b) pour gradateur à angle de phase

La capacité de couplage peut être réduite en utilisant des câbles blindés. Le schéma ci-dessous représente une paire de câbles blindés.

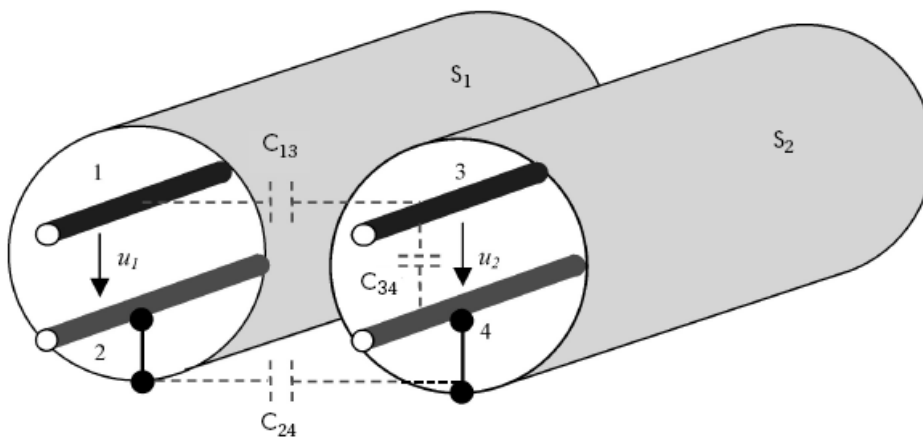


Figure 15 : couplage capacitif de deux câbles blindés

CEM et mise à la terre

fr.leonardo-energy.org

Les blindages des conducteurs S_1 et S_2 sont connectés en un même point du système. Le comportement fréquentiel de la tension perturbée u_2 , correspond à la même équation que l'équation 7, où :

$$C_{ab} \text{ est remplacé par } C_1 = \frac{C_{13}C_{24}}{C_{13} + C_{24}} \text{ et } C_{bc} \text{ par } C_{34}$$

$$\text{Le maximum de tension de mode commun s'élève à } u_2 = \frac{1}{1 + C_{34}/C_{13} + C_{34}/C_{24}} u_1$$

ce qui montre bien qu'une bonne capacité C_{34} entre le conducteur et le blindage augmente l'efficacité du blindage.

La figure suivante représente l'efficacité d'un câble blindé face à une impulsion transitoire rapide pour plusieurs valeurs de capacité de couplage.

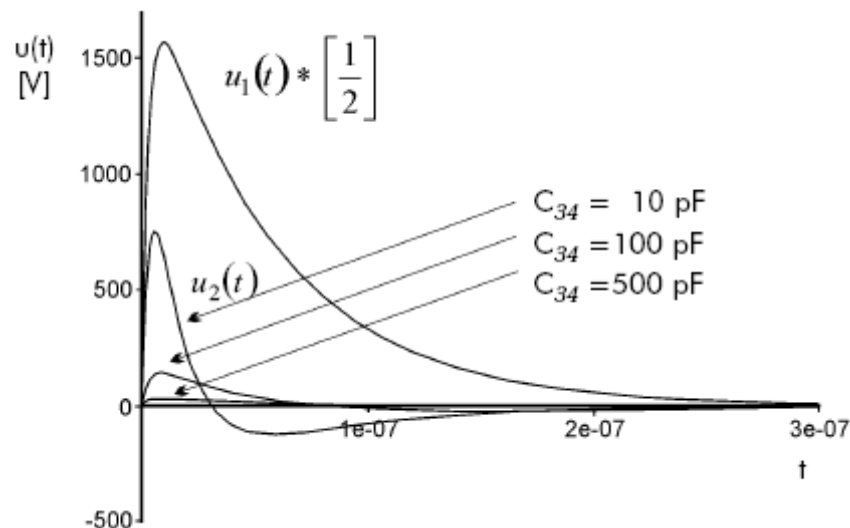


Figure 16 : efficacité d'un câble blindé face à une impulsion transitoire rapide pour plusieurs valeurs de capacité de couplage

3.5 Couplage par rayonnement

Les champs électromagnétiques transitent à travers l'espace à la vitesse de la lumière $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$ et peuvent influencer des installations situées plus ou moins loin de la source. Les sources les plus communes de champs électromagnétiques rayonnés sont les transmetteurs radio et TV, les téléphones mobiles ou tout autre objet utilisant les technologies sans fil. Les composantes hautes fréquences des signaux rapides ou transitoires (décharge électrostatique, surtension transitoire) peuvent générer des rayonnements électromagnétiques via les câbles ou tout autre partie conductrice de l'installation et provoquer des dysfonctionnements sur des systèmes électriques annexes situés dans n'importe quelle partie de l'installation.

Si les perturbations au niveau de la source d'alimentation ou du réseau informatique contiennent des composantes hautes fréquences, tout élément de l'installation peut faire

office d'antenne et propager le champ électromagnétique. Le dipôle de Hertz peut servir de modèle élémentaire afin d'estimer l'intensité des champs rayonnés. Toute partie conductrice de l'installation peut agir comme une antenne, y compris :

- les câbles,
- les ouvertures au niveau des armoires électriques,
- les pistes des circuits imprimés.

Les ouvertures au niveau des armoires électriques facilitent la propagation des perturbations dans la zone environnante ou à l'intérieur des boîtiers et perturbe des équipements situés dans le voisinage en propageant les champs électromagnétiques depuis l'extérieur jusqu'à l'intérieur du système.

Prenons l'exemple particulier d'une décharge électrostatique entre une personne et une surface métallique. L'arc de la décharge électrostatique véhicule un courant très faible mais génère un champ électromagnétique pouvant aisément atteindre une intensité de champ de 0,5 à 4 kV sur une distance inférieure à un mètre.

Ces champs électromagnétiques peuvent perturber des systèmes électriques contenus à l'intérieur d'une armoire électrique non adaptée à cause des propriétés d'antenne des ouvertures.

Les éléments conducteurs tels que les câbles et les ouvertures commencent à rayonner dès que leur longueur dépasse approximativement la moitié de la longueur d'onde. La longueur d'onde d'une onde électromagnétique et sa fréquence f sont exprimées en fonction de la vitesse de la lumière d'après la relation : $\lambda = c / f$. Quelques valeurs sont données dans le tableau 2.

| f [MHz] | λ [m] |
|---------|---------------|
| 0.1 | 3000 |
| 1 | 300 |
| 10 | 30 |
| 100 | 3 |
| 1000 | 0.3 |

Tableau 2 : fréquences et longueurs d'ondes correspondantes

En pratique, les boîtiers ne peuvent pas être complètement clos. Les ouvertures comme les passages de câbles et les emplacements de ventilation et les trous autour des portes sont inévitables. Ces ouvertures réduisent l'efficacité de la protection de tout boîtier. Toutefois, des conceptions intelligentes de boîtier permettent de parvenir à des niveaux acceptables de protection.

Le niveau de fuite créé par une discontinuité dans la protection dépend principalement de trois facteurs :

- la longueur maximale de l'ouverture
- l'impédance du champ
- la fréquence de la perturbation

CEM et mise à la terre

fr.leonardo-energy.org

Pour des ouvertures d'une longueur de $l = \lambda / 2$, l'efficacité du blindage est donné par :

$$S = 20 \log\left(\frac{\lambda}{2l}\right)$$

En divisant la longueur de l'ouverture par deux, on accroît la protection de 6 dB. La figure 17 montre l'efficacité de la protection pour différentes fréquences en fonction de la longueur de l'ouverture.

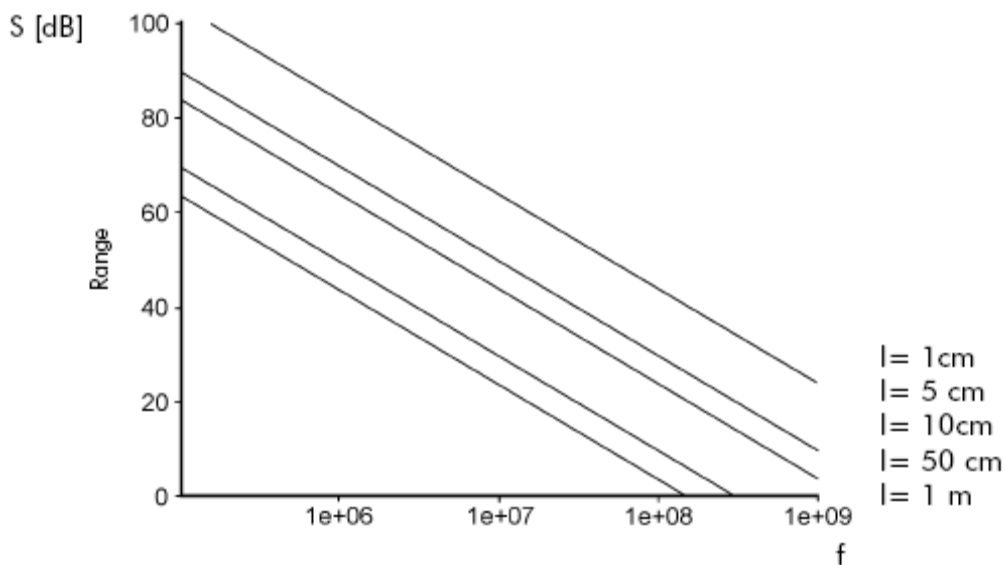


Figure 17 : efficacité du blindage pour différentes longueurs d'ouverture en fonction de la fréquence

En pratique, il faudrait respecter une longueur maximale d'ouverture de 1 / 20 de la longueur d'onde pour garantir une efficacité de blindage d'au moins 20 dB.

A partir de l'équation 8 ou de la figure 17, la longueur maximale d'ouverture correspondant à une efficacité du blindage peut être calculée.

3.6 La complexité des perturbations électromagnétiques en pratique

Dans le cadre d'une installation réelle, la compatibilité électromagnétique s'exprime comme la résultante de tous les couplages élémentaires cités précédemment et coexistant de façon complexe dans l'ensemble du système. Un exemple aussi simple qu'un système automatisé, tel que représenté figure 18 montre bien la complexité des couplages en jeu dans son environnement.

Tout système est incorporé dans un réseau complexe constitué d'autres systèmes formant ainsi un ensemble complexe au regard de la compatibilité électromagnétique. Afin de garantir un fonctionnement correct du système dans son ensemble, une matrice CEM doit être réalisée et évaluée dans le but de définir les impacts des perturbations dans le cadre de planification pour des installations neuves et pour des remises à neuf.

4. La directive CEM et son intérêt dans les installations de bâtiments

Les directives européennes ont pour but de garantir que tous les produits fabriqués ou vendus en Europe sont conformes aux normes et peuvent être vendus à tous les Etats membres sans réglementation supplémentaire. Dans le cas de la CEM, les directives EU 89/336, amendées par les directives 91/263/EEC, 92/31/EEC, 93/68/EEC et 93/97/EEC fournissent les normes standards permettant de garantir une compatibilité électromagnétique pour tout type de produit en imposant un niveau maximal d'émissivité et un niveau minimal d'immunité. Tout fabricant d'équipements transportables doit certifier être conforme aux normes européennes. Le produit doit alors être marqué du sigle CE qui certifie sa conformité en matière de CEM et autres directives, et ce vis-à-vis du consommateur.

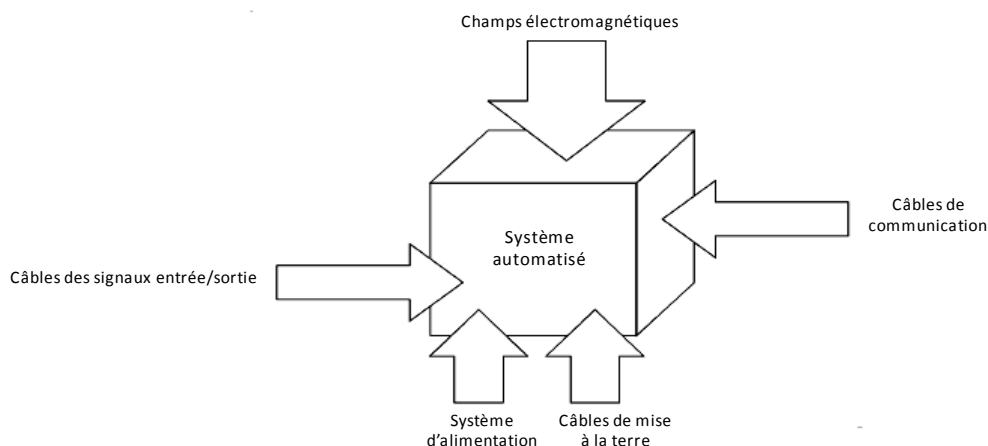


Figure 18 : différents types de couplage en jeu dans un système automatisé

Bien que le sigle CE et la déclaration de conformité ne soient pas obligatoires pour les installations électriques, la conformité aux directives européenne doit cependant être garantie. C'est la tâche qui incombe aux responsables de la conception, des études et de la réalisation des installations électriques. Il existe des méthodes permettant de garantir et de vérifier la conformité. La première étant bien entendue l'installation, par du personnel qualifié, d'équipements répondant aux contraintes spécifiques CEM.

La seconde consiste à utiliser n'importe quel type d'équipement disponible et de certifier la compatibilité électromagnétique de l'ensemble de l'installation grâce à des mesures réalisées par un laboratoire ou une personne qualifiée.

Dans tous les cas, le projet doit se soumettre aux recommandations CEM des différentes directives européennes et fournir les documents appropriés.

CEM et mise à la terre

fr.leonardo-energy.org

De plus, l'entité en charge de la réalisation de l'installation doit fournir des instructions claires pour l'exploitation et la maintenance de l'installation et ce en référence à l'annexe III des directives Européennes. Ces instructions doivent obligatoirement fournir des informations sur les conditions d'utilisation, d'installation, de montage, d'ajustement, de mise en service, d'utilisation et de maintenance, et émettre des avertissements sur les limites d'exploitation.

La manière la plus sûre de garantir la conformité de l'installation électrique d'un bâtiment est de suivre les recommandations suivantes :

- se préoccuper, dès la phase de conception, des contraintes de compatibilité électromagnétique, et se doter des services d'un expert en CEM si nécessaire.
- n'utiliser que des équipements et matériels certifiés CEM
- faire appel à des personnes compétentes en matière de CEM pour la réalisation de l'installation
- faire appel à des ingénieurs spécialisés CEM pour superviser la réalisation

La CEM est un thème relativement nouveau dans la formation professionnelle et on ne trouve assez peu de personnel qualifié dans ce domaine.

5. Références bibliographiques

- [1] G Durcansky: EMC Correct Design of Apparatus (in German), Francis, 1995
- [2] Electromagnetic Compatibility (EMC), Guide to the Application of Directive 89/336/EEC, European Communities 1997
- [3] S Fassbinder: Disturbances of the Power Supply Network by Active and Passive Components (in German), VDE Verlag 2002
- [4] J Goedbloed: Electromagnetic Compatibility (in German), Pflaum Verlag, 1990
- [5] M Grapentin: EMC for the Installation of Buildings (in German), Verlag Technik, 2000 .
- [6] E Habiger: Electromagnetic Compatibility (in German), Hüthig, 1998
- [7] B Keiser: Principles of EMC, Artech House, 1987

- [8] VP Kodali: Engineering Electromagnetic Compatibility, IEEE Press, 1996

- [9] A Kohling: EMC of Buildings, Facilities and Apparatus (in German), VDE-Verlag, 1998

- [10] G Lehner: Theory of Electromagnetic Fields (in German), Springer, 1994

- [11] H W Ott: Noise Reduction Techniques in Electronic Systems, A Wiley, 1988

- [12] C R Paul: Introduction to Electromagnetic Compatibility, John Wiley, 1992

- [13] C R Paul: Introduction to Electromagnetic Compatibility, John Wiley, 1992

- [14] A Rodewald: Electromagnetic Compatibility (in German), Vieweg, 1995

- [15] W Rudolph, O Winter: EMC according VDE 0100 (in German), VDE-Verlag, 2000

- [16] W Rudolph: An EMC Primer for Electricians (in German), VDE-Verlag, 2001

- [17] Guideline Electromagnetic Compatibility (in German), EMC-Guideline ZX62920D, 1998, Groupe Schneider

- [18] A Schwab: Electromagnetic Compatibility (in German), Springer, 1996