



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique
Université Dr. Tahar Moulay de Saida
Faculté de Technologie

Département d'Electrotechnique

Compatibilité Electromagnétique (C.E.M.)

Présenté par : **Dr. ARZAG Kaddour**

Maître de conférences « B »

Spécialité : Electrotechnique

Janvier 2018

Avant-propos

Ce polycopié de cours s'adresse aux étudiants de Master- spécialité électrotechnique, électronique, et télécommunication de l'université Dr. Tahar Moulay de Saida. L'objectif visé par ce support de cours étant la vulgarisation de la discipline « compatibilité électromagnétique » ; discipline importante et nécessaire pour faire fonctionner correctement les processus industriels mais malheureusement encore méconnue en Algérie notamment dans les cursus universitaires. Aussi, à travers ce document j'ai voulu faciliter aux étudiants de notre département la compréhension de cette discipline à travers la présentation d'exemples simples mettant en évidence certains phénomènes perturbateurs.

Ainsi, la présentation dans le document proposé des aspects généraux liés à la CEM, de certaines définitions et de l'historique des perturbations électromagnétiques, facilite aux étudiants l'assimilation des notions de base de cette discipline avec les termes linguistiques qui s'y rattachent. Les exemples de perturbations électromagnétiques présentés renforcent la compréhension de ces notions de base.

D'autre part, la connaissance des modes de couplage entre les systèmes sources de signaux perturbateurs et les systèmes victimes de ces perturbations est plus qu'indispensable. Aussi, nous avons jugé utile de présenter dans ce document une description illustrée d'exemples applicatifs, des différents mécanismes de couplage qui existent.

Par ailleurs, l'étude CEM d'un problème donné s'appuie sur l'identification de la source de perturbation pour quantifier l'énergie perturbatrice. Aussi, nous présentons dans ce polycopié différentes sources de perturbations avec une classification basée sur leur fréquence et le mode de couplage mis en jeu.

Le polycopié comprend aussi un chapitre dédié aux techniques de mesures utilisées en CEM en mode conduit et rayonné et un chapitre traitant de la réglementation en CEM à travers la description des normes internationales spécifiques à cette discipline.

Le document se termine par une présentation des remèdes que l'on adopte pour faire face aux effets néfastes des perturbations. Parmi ces remèdes, nous décrivons les solutions spécifiques aux problèmes de couplage et les méthodes de protection contre les effets de la pollution harmonique et de la foudre.

Enfin, nous espérons que ce modeste travail contribuera à l'amélioration de la qualité de l'enseignement que nous dispensons à nos étudiants.

Table des matières

Avant-propos	2
Liste des symboles	6
Introduction générale	8
Chapitre I : Généralités sur la Compatibilité Electromagnétique -CEM-	9
I.1 Introduction	9
I.2 Historique	9
I.2.1 Evolution de l'importance de la CEM	9
I.2.2 Quelques accidents causés par des perturbations électromagnétiques	10
I.3 Définitions de la CEM	10
I.3.1 Définition générale	10
I.3.2 Définition selon les normes de C.E.M.	10
I.4 Représentation symbolique du domaine de la CEM	10
I.5 Nécessité de l'étude CEM	12
I.6 Objectifs de la CEM	12
I.7 Domaine d'application et secteurs d'activités de la CEM	12
I.7-1 Domaine d'application	12
I.7.2 Secteurs d'activités	13
I.8 Notions fondamentale de la CEM	13
I.9 Concepts de base	14
I.9.1 Concept de l'environnement électromagnétique	14
I.9.2 Concept du système coupable et du système victime	17
I.9.3 Concept de la source de perturbation	17
I.10 Conclusion	17
Chapitre II : Mécanismes de couplage	18
II.1 Introduction	18
II.2 Modes de couplage	18
II.2.1 Couplage en mode différentiel	20
II.2.2 Couplage en mode commun	20
II.3 Exemples et applications	21
II.3.1 Couplage en mode commun par impédance commune	21
II.3.2 Couplage capacitif carte à châssis	24

II.3.3 Couplage par diaphonie inductive	26
II.3.3.1 Diaphonie inductive en mode différentiel	27
II.3.3.2 Diaphonie inductive en mode commun	32
II.3.4 Couplage par diaphonie capacitive	33
II.3.4.1 Diaphonie capacitive en mode différentiel	33
II.3.4.2 Diaphonie capacitive en mode commun	34
II.3.5 Couplage champ à fil	36
II.3.5.1 Couplage champ à fil en basse fréquence	36
II.3.5.2 Couplage champ à fil en haute fréquence	37
II.3.6 Couplage champ à boucle	37
II.3.6.1 Couplage champ à boucle en haute fréquence	38
II.3.6.2 Couplage champ à boucle en hyperfréquence	38
II.4 Conclusion	39
Chapitre III : Sources de perturbations électromagnétiques(E.M)	40
III.1 Introduction	40
III.2 Sources de perturbations E.M	40
III.2.1 Perturbations E.M à basses fréquences (BF)	40
III.2.1.1 Perturbation E.M BF en mode conduit (conduction)	40
III.2.1.2 Perturbation E.M BF en mode rayonné (rayonnement)	43
III.2.2 Perturbations E.M à hautes fréquences (HF)	45
III.2.2.1 Perturbations E.M HF en en mode conduit	45
III.2.2.2 Perturbations E.M HF en en mode rayonné	48
III.3 Exercices d'application sur les sources de perturbation	49
III.4 Conclusion	50
Chapitre IV : Normalisation en CEM	51
IV.1 Introduction	51
IV.2 Directive Européenne sur la CEM	51
IV.3 Type de normes CEM	52
IV.3.1 Normes fondamentales	52
IV.3.2 Normes génériques	52
IV.3.3 Normes produit ou de famille de produits	53
IV.4 Les organismes normalisateurs	54
IV.4.1 Les publications CISPR	54
IV.4.2 Les publications CEI	55

IV.4.3 Les publications CENELEC	55
IV.5 Unités spécifiques aux normes CEM	55
IV.6 Conclusion	56
Chapitre V : Mesures en CEM	57
V.1 Introduction	57
V.2 Mesures des perturbations conduites	57
V.3 Mesures des perturbations rayonnées	61
V.4 Conclusion	64
Chapitre VI : Protection contre les perturbations électromagnétiques	65
VI.1 Introduction	65
VI.2 Action sur le couplage : Protection par réduction du couplage	65
VI.2.1 Protection contre l'effet du couplage par impédance commune	65
VI.2.2 protection contre le couplage carte à châssis	65
VI.2.3 Protection contre la diaphonie inductive	66
VI.2.4 Protection contre la diaphonie capacitive	67
VI.2.5 Protection contre le couplage champ à fil	67
VI.2.6 Protection contre les effets du couplage champ à boucle	69
VI.3 Protection contre la pollution harmonique	69
VI.3.1 Solutions traditionnelles	69
VI.3.2 Solutions nouvelles à base de filtrage actif	75
VI.3.3 Solutions non conventionnelles	77
VI.4 Protection contre les effets liés aux coups de foudre	77
VI.4.1 Protection contre la foudre directe	77
VI.4.2 Protection contre la foudre indirecte	78
VI.5 Conclusion	78
Conclusion générale	79
Bibliographie	80

Liste des symboles

Paramètres :

C_i	(pF)	Capacité intrinsèque.
C_p	(pF)	Capacité plane.
C_t	(pF)	Capacité totale.
C_v	(pF)	Capacité totale.
d	(m)	Distance.
D	(m)	Diamètre.
D_{max}		Diaphonie maximale.
e	(m)	Epaisseur.
h	(m)	Hauteur.
l	(m)	Longueur.
L	(H)	Inductance propre.
M	(H)	Inductance mutuelle.
λ	(m)	Longueur d'onde.
Q	(C)	Charge électrique.
R_c	(Ω)	Résistance commune.
R		Coefficient réducteur en temps.
s	(m ²)	Surface.
Z	(Ω)	Impédance.
ρ	($\Omega.m$)	Résistivité.

Grandeurs :

E	(V/m)	Champ électrique.
f	(Hz)	Fréquence.
H	(A/m)	Champ magnétique.
I	(A)	Intensité du courant électrique.
I_{md}	(A)	Courant en mode différentiel.
I_{mc}	(A)	Courant en mode commun.
V_{mc}	(V)	Tension en mode commun.
ΔI	(A)	Courant de crête à crête.
Δt	(sec)	Temps de montée de l'impulsion.
t_m	(sec)	Temps de montée du signal de la diaphonie.
$2T$	(sec)	Temps d'un aller-retour du signal parasite.
P	(W)	Puissance électrique.
G		Gain numérique de la puissance d'antenne.
U	(V)	Tension ou ddp.

Sigles et Abréviations :

ATI	Appareil de traitement de l'information.
BF	Basse fréquence.
CEM	Compatibilité électromagnétique.
CISPR	Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques.
CEI	Commission Electrotechnique Internationale.
CEE	Communauté Economique Européenne.
CENELEC	Comité Européen de Normalisation Electrotechnique à Bruxelles.
ddp	Différence de potentiel.
DES	Décharge électrostatique.
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission System.
FCC	Federal Communication Commission.
HF	Haute fréquence.
HPM	High Power Micro-waves.
HT	Haute tension.
IPQC	Integrate active rectifier and shunt power quality compensator.
ISM	Industrielle, scientifique ou médicale.
IEMN	Impulsion Electromagnétique d'origine Nucléaire.
LISN	Line Impedance Stabilization Network.
LAH	Inductance anti-harmonique.
MC	Mode commun.
RSIL	Réseau stabilisateur d'impédance de ligne
SF6	Hexafluorure de soufre.
SVC	Static Var Compensators.
TRP	Tôle de référence de potentiel.
THT	Très haute tension.
USAPLC	Universal symmetrical active power line conditioner.
UTE	Union Technique de l'Electricité en France.

Introduction générale

Depuis de nombreuses années, la prise en compte des critères de compatibilité électromagnétique (CEM) constitue une étape essentielle dans la conception des systèmes électriques et/ou électroniques. Ceci est dû principalement à l'utilisation croissante des dispositifs électroniques fonctionnant à des niveaux de puissance et de courant de plus en plus faibles, ce qui les rend de plus en plus susceptibles aux perturbations d'origine électromagnétique (EM).

La CEM est la propriété d'un système électrique et/ou électronique à fonctionner correctement dans son environnement en présence d'autres systèmes et en présence de perturbations. Il ne doit pas produire lui-même des perturbations électromagnétiques intolérables pour d'autres systèmes qui se trouvent dans le même environnement que lui. Le terme CEM désigne aussi l'ensemble des techniques qui traitent toutes les perturbations électromagnétiques ainsi que les moyens permettant d'éviter les effets indésirables qu'elles sont susceptibles de provoquer.

L'objectif de ce polycopié de cours est la présentation et la description d'une manière pédagogique de la discipline « compatibilité électromagnétique ».

Le document est subdivisé en six chapitres. Le premier intitulé « Généralités sur la Compatibilité Electromagnétique –CEM » est consacré à la description des fondements généraux de cette discipline (historique des perturbations, définitions, concepts de base). Le deuxième chapitre qui s'intitule « Mécanismes de couplage », traite des modes de couplage existant entre les sources de perturbations et les systèmes victimes de ces perturbations. La présentation de ces modes de couplage est accompagnée d'exemples applicatifs.

Dans le chapitre III, nous présentons les sources de perturbations par l'intermédiaire d'une classification basée sur le spectre fréquentiel des signaux perturbateurs générés par ses sources, ainsi que sur leur mode de couplage par rapport aux victimes (en conduction ou en rayonnement).

Dans le chapitre IV nous abordons l'aspect normalisation en CEM. Ainsi, nous illustrons dans ce chapitre les directives normatives, les organismes normalisateurs, et les différents types de normes.

Dans le cinquième chapitre nous présentons les techniques de mesure des perturbations électromagnétiques en mode conduit et en mode rayonné. Le dernier chapitre est consacré à la présentation des méthodes de protection vis-à-vis des perturbations dues à différentes sources (pollution harmonique, foudre, ...). Le document s'achève par une conclusion générale.

Chapitre I : Généralités sur la Compatibilité Electromagnétique -CEM-

I.1 Introduction

La difficulté des problèmes liés à la compatibilité électromagnétique « CEM » provient d'une part de la concentration dans un même espace d'appareils fonctionnant à des puissances différentes et possédant des sensibilités différentes et d'autre part de la miniaturisation des circuits électroniques et de l'action de la pollution électromagnétique. Il s'ensuit alors l'apparition du phénomène d'interférence électromagnétique causant des perturbations électromagnétiques au niveau des différents systèmes électriques et/ou électroniques. Ces perturbations constituent la problématique fondamentale de la CEM. En effet, les perturbations électromagnétiques peuvent être transitoires provoquant des troubles passagers et réversibles ou permanentes causant l'arrêt total du système (destruction ou dysfonctionnement). Aussi, il est recommandé de prendre toutes les mesures nécessaires pour réduire le plus possible les effets de ces perturbations électromagnétiques à des niveaux acceptables afin de garantir un fonctionnement correct des différents systèmes électriques et/ou électroniques. Ces mesures doivent être prises dès la phase de la conception afin d'éviter les surcoûts liés aux solutions adoptés après la phase de production et aussi pour des raisons d'efficacité de ces mesures.

I.2 Historique [1,2,3,4,5,6]

I.2.1 Evolution de l'importance de la CEM

1930 : Développement des transmissions radioélectriques.

1933 : Création du CISPR (Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques) par la CEI (Commission Electrotechnique Internationale), le CISPR développe des normes pour éviter les interférences.

Durant la deuxième guerre mondiale, l'utilisation d'appareils électroniques (systèmes radios, navigation radar) s'est accélérée, ce qui s'est traduit par plusieurs cas d'interférence entre systèmes radios et systèmes de navigation aérienne.

Le problème d'interférence a augmenté avec l'invention des composants électroniques à haute densité, tel que le transistor bipolaire (**1950**), le circuit intégré (**1960**), et les puces à microprocesseur (**1970**).

1979 : Publication des normes limitant les émissions électromagnétiques de tous les appareils électroniques par la commission fédérale de communications FCC (Federal Communication Commission).

I.2.2 Quelques accidents causés par des perturbations électromagnétiques

- 1967:** Destruction du porte-avions USS-Forrestal par le radar de bord (émission d'un champ électromagnétique ayant une haute fréquence), durant la guerre du Vietnam.
- 1980:** Chute d'un hélicoptère Sikorsky (série UH-60 Black Hawk) en volant à proximité d'émetteurs micro-ondes de forte puissance (radars des navires de guerre).
- 1982:** Destruction du destroyer Britannique HMS Sheffield par un missile Exocet durant la guerre des Malouines (iles Falkland).

I.3 Définitions de la CEM [1,2,3,4,5,6]

I.3.1 Définition générale

La C.E.M. est une discipline scientifique et technique qui a pour objet de trouver des solutions aux problèmes de cohabitation entre les systèmes électriques et/ou électroniques.

I.3.2 Définition selon les normes de CEM

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.

Un système est dit compatible électromagnétiquement s'il :

- Ne produit aucune interférence avec d'autres systèmes.
- Ne produit aucune interférence avec lui-même.
- N'est pas susceptible aux émissions d'autres systèmes.

I.4 Représentation symbolique du domaine de la CEM [1,4,6,7]

L'analyse d'un problème de perturbations électromagnétiques met en jeu trois éléments (Fig. I-1) à savoir : une source de perturbations qui émet de l'énergie électromagnétique, un canal de couplage au travers duquel l'énergie de ces perturbations se propage et enfin un récepteur qui capte cette énergie, la traite et la superpose à sa fonction normale. Si les perturbations reçues par ce dernier sont trop élevées et provoquent des interférences, alors le récepteur est appelé victime de ces perturbations.

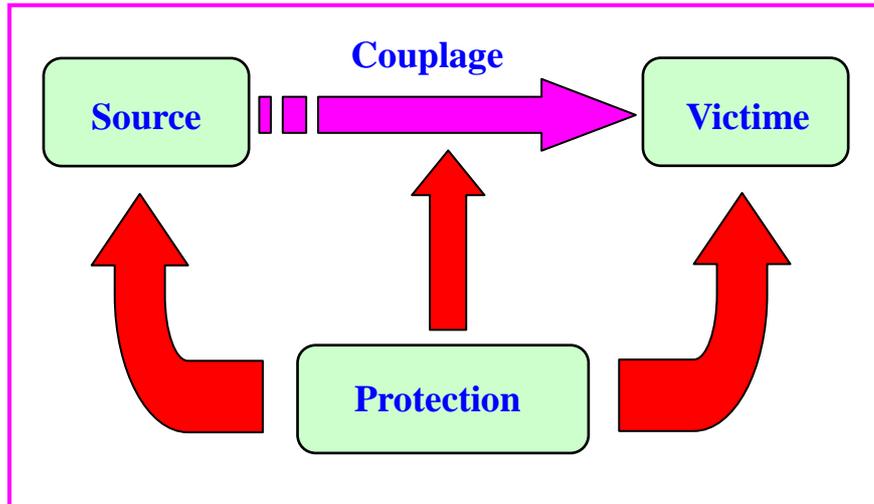


Figure 1.1 : Représentation symbolique d'un problème CEM [1,7].

On parle d'interférence lorsque l'énergie transmise dépasse un niveau critique qui entrave le bon fonctionnement d'un récepteur.

Les moyens de protection contre les interférences sont (Fig. 1.1):

➤ **Action sur la source de perturbation**

L'action sur l'élément perturbateur n'est possible que pour une source de perturbation artificielle. La protection dans ce cas consiste en la réduction de l'intensité des signaux perturbateurs émis par la source à un niveau admissible conforme aux normes CEM. Cette réduction peut se faire de deux manières à savoir :

- a- Le blindage des parties rayonnantes de la source de perturbation.
- b- Le filtrage électrique de ces entrées-sorties.

➤ **Action sur la victime**

Elle consiste en une opération de durcissement de l'élément perturbé de façon à lui assurer une grande immunité vis-à-vis des agressions de son environnement électromagnétique.

➤ **Action sur le moyen de couplage**

Ce type d'action repose sur la réduction du phénomène de captation des signaux parasites par les lignes et les câbles et leur acheminement vers les charges (utilisation d'écrans magnétiques, mises à la masse, filtrage, etc.)

I.5 Nécessité de l'étude CEM [1,2,3,4]

De nos jours la CEM est devenue une discipline indispensable pour la conception des différents systèmes électroniques et/ou électriques à cause de :

- ❑ L'augmentation des grandeurs électriques telles que la tension et le courant causée par la forte demande de l'énergie électrique soit dans les domaines industriel ou domestique.
- ❑ L'utilisation croissante des circuits électroniques dans tous les domaines ce qui rend les systèmes sensibles de plus en plus.
- ❑ Les distances réduites entre les circuits perturbateurs (circuits de puissance) et les circuits sensibles (circuits électroniques) qui provoquent les problèmes de cohabitation entre les deux circuits.
- ❑ La coexistence entre les courants faibles et les courants forts (électronique de contrôle-commande/électronique de puissance, électronique de protection /appareillage électrique de puissance).

I.6 Objectifs de la CEM [1,4]

Les buts et les objectifs de la CEM peuvent être résumés en trois points :

- ✓ Etude et caractérisation de l'énergie électrique transférée entre les systèmes électriques et/ou électroniques.
- ✓ La conception des procédés de limitation des perturbations électromagnétique en tenant compte de la réglementation en vigueur.
- ✓ L'accroissement de l'immunité des systèmes en s'appuyant sur le développement des techniques permettant le durcissement de ses systèmes.

I.7 Domaine d'application et secteurs d'activité de la CEM [1,4,8]

I.7-1 Domaine d'application

L'importance de la CEM a permis son application dans les domaines suivants :

- ❖ Les télécommunications
- ❖ Les activités spatiales,
- ❖ Les activités militaires,
- ❖ Le génie électrique (systèmes de contrôle commande, instrumentation, électronique de puissance, ...).

I.7.2 Secteurs d'activité [1,3,4]

- Les activités de recherche et de développement (Université-industrie) en matière :
 - ✚ De développement de modèles théoriques,
 - ✚ De développement de techniques moins « polluantes »,
 - ✚ D'amélioration des méthodes d'évaluation et des systèmes de métrologie.
- Les activités liées à l'évaluation du comportement des appareils :
 - ✚ Mesures de CEM en phase de fabrication des produits,
 - ✚ Mesures de CEM en phase de qualification (laboratoires spécialisés)
- Les activités liées à la formation et à l'enseignement :
 - ✚ Formations spécialisées en CEM
 - ✚ Enseignement de la CEM dans le cursus de formation de l'ingénieur E/E, télécom.

I.8 Notions fondamentales de la CEM [1,3,4 ,5,9]

a- L'émissivité :

Elle représente le degré d'émission des parasites d'un appareil électrique et/ou électronique.

b- Immunité :

C'est la capacité d'un dispositif, appareil ou système de fonctionner sans subir une dégradation quelconque en présence des perturbations électromagnétiques.

c- Susceptibilité :

Signifie le manque d'immunité ce qui traduit par la tendance d'un dispositif, appareil ou système à devenir défectueux ou subir une dégradation de ses performances sous l'effet de perturbations électromagnétiques.

d- Niveau et marges de CEM

Comme l'illustre la figure (1.2) les marges considérées dans la CEM sont :

- **Marge d'émission** : comprise entre le niveau de compatibilité et la limite d'émission.
- **Marge d'immunité** : comprise entre le niveau de compatibilité et la limite d'immunité.
- **Marge de compatibilité** : comprise entre la limite d'émission et la limite d'immunité.

Remarque : Le fabricant d'appareils électriques et/ou électroniques doit assurer :

- Un *niveau d'émission* < à la *limite d'émission*
- Un *niveau d'immunité* > à la *limite d'immunité*.

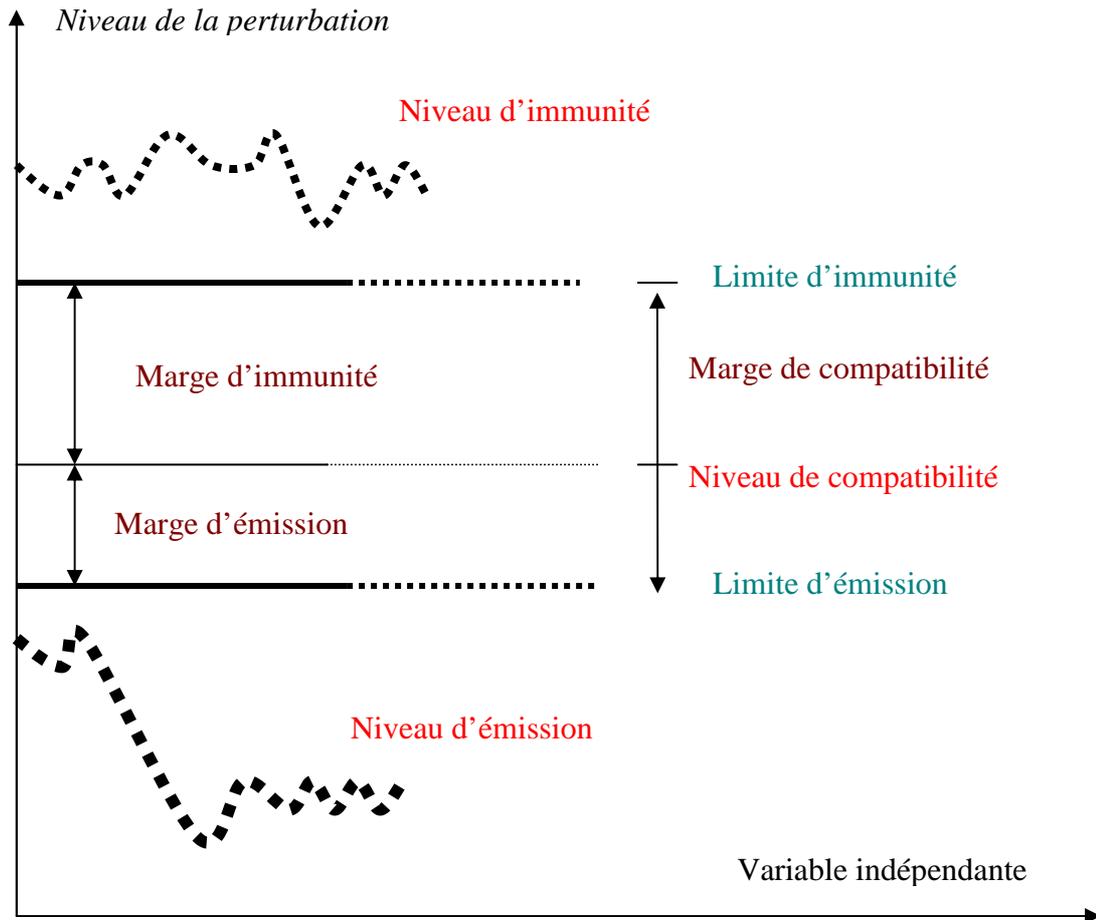


Figure 1.2 Niveaux, limites et marges d'immunité, d'émission et de compatibilité [1,9]

I.9 Concepts de base [1,4]

I.9.1 Concept de l'environnement électromagnétique

a- Définition de l'environnement électromagnétique

L'environnement électromagnétique est défini comme étant un ensemble de phénomènes électriques et magnétiques existant dans un espace physique donné.

La figure (1.3) représente les principaux acteurs décrivant le phénomène d'interférence électromagnétique partant d'une source de perturbation qui génère une énergie perturbatrice, ce qui provoque soit des désagréments simples au niveau des systèmes électriques et/ou électroniques recevant de cette énergie ou bien une perte totale de la fonctionnalité (arrêt total) de ces systèmes, ce qui pose des problèmes de cohabitation.

On peut donner comme un exemple d'environnement électromagnétique, le milieu radioélectrique qui se traduit par les effets indésirables des rayonnements radioélectriques créés par les émetteurs sur les différents systèmes.

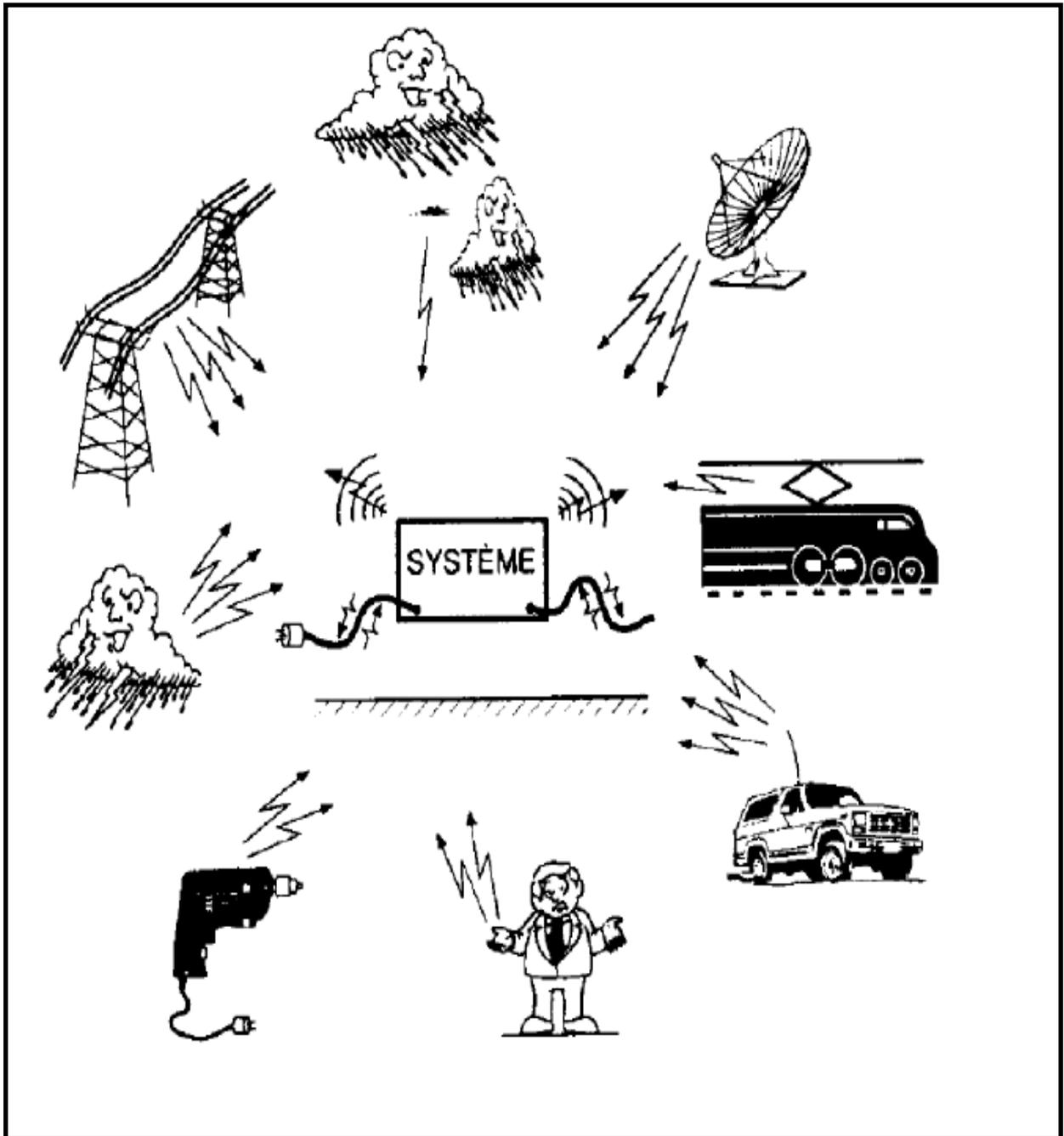


Figure1.4 Environnement EM d'un système Electrique et/ou Electronique. [1]

I.9.2 Concept du système coupable et du système victime

Un système est dit « coupable » s'il peut gêner pendant son fonctionnement normal le fonctionnement des autres dispositifs, équipements ou systèmes situés dans le même environnement que lui.

On dit qu'un système est dit « victime » si son fonctionnement normal est entravé et gêné par le fonctionnement des autres équipements situés dans le même environnement que lui.

Il est à noter qu'un dispositif, appareil ou système peut être à la fois coupable et victime.

I.9.3 Concept de la source de perturbation [1,4,5]

- ✚ **La source de perturbation** est tout phénomène qui peut nuire au bon fonctionnement des autres systèmes électriques et/ou électroniques.
- ✚ **Les interférences électromagnétiques** représentent la gravité de la nuisance provoquée par une source de perturbation, qui est en fonction de la sensibilité du système victime.
- ✚ **Le bruit électromagnétique** est tout phénomène électromagnétique ne portant pas d'informations et susceptible de se superposer à un signal utile. Il est donc équivalent à un signal non désiré.
- ✚ **Le brouillage** est tout trouble apporté à la réception d'un signal utile causé par l'interférence avec un autre signal quelconque.
- ✚ **Le signal parasite** est tout signal qui se superpose à un signal utile.
- ✚ **La perturbation électromagnétique** est toute anomalie signalée au niveau du fonctionnement d'un système, provoquée par le rayonnement d'un champ électromagnétique ou par un signal qui se propage sur un support quelconque. Par conséquent c'est un rayonnement ou signal perturbateur qui entrave le bon fonctionnement ou provoque le dysfonctionnement d'un système.

I.10 Conclusion

L'intérêt de CEM réside dans la recherche de solutions aux problèmes de cohabitation entre les systèmes électriques et/ou électroniques. Ces derniers que l'on retrouve dans l'industrie (notamment pour la commande des process) deviennent de plus en plus vulnérables aux perturbations ce qui nécessite d'effectuer une étude CEM afin de dégager la protection qui s'impose (protection adéquate). L'étude des mécanismes de couplage entre les sources de perturbations et les systèmes victimes fera l'objet du prochain chapitre.

Chapitre II : Mécanismes de couplage

II.1 Introduction

Dans les études de CEM, il est indispensable de savoir la manière de transition des signaux perturbateurs de la source, responsable de la création des perturbations, vers les systèmes victimes affectés par ces signaux. Il s'agit alors d'étudier le mécanisme de couplage entre la source et la victime. Aussi, dans ce chapitre nous allons présenter les différents modes de couplage qui existent en s'aidant d'exemples illustratifs de chaque mode de couplage afin de faciliter leur compréhension.

II.2 Modes de couplage [1,3,4,7,10,26,27,28,29,30]

Les modes de couplage entre une source de perturbation et une victime peuvent être classifiés selon le type de perturbation et selon son support de propagation (Fig. 2.1 et 2.2):

- ❖ **Couplage par conduction** : propagation d'une tension ou d'un courant sur des conducteurs.
- ❖ **Couplage par rayonnement** : propagation d'un champ électromagnétique dans un milieu non conducteur (air, autre type de matériau isolant) ou conducteur (blindage métallique).

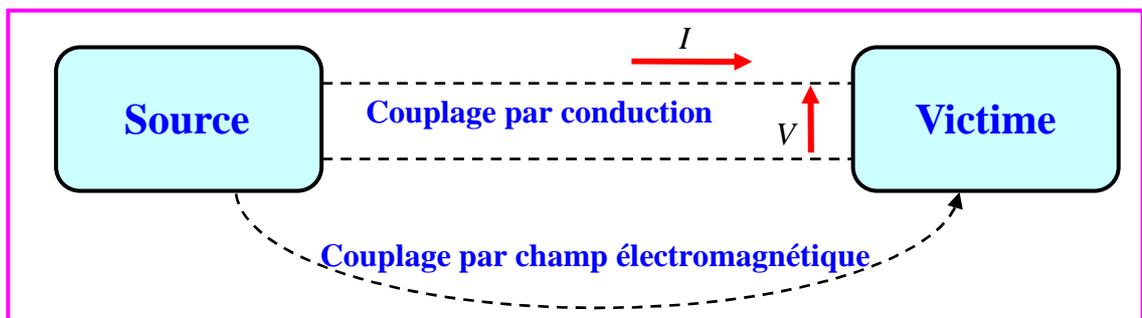


Fig. 2.1 : Couplage entre une source de perturbations EM et une victime[1,7].

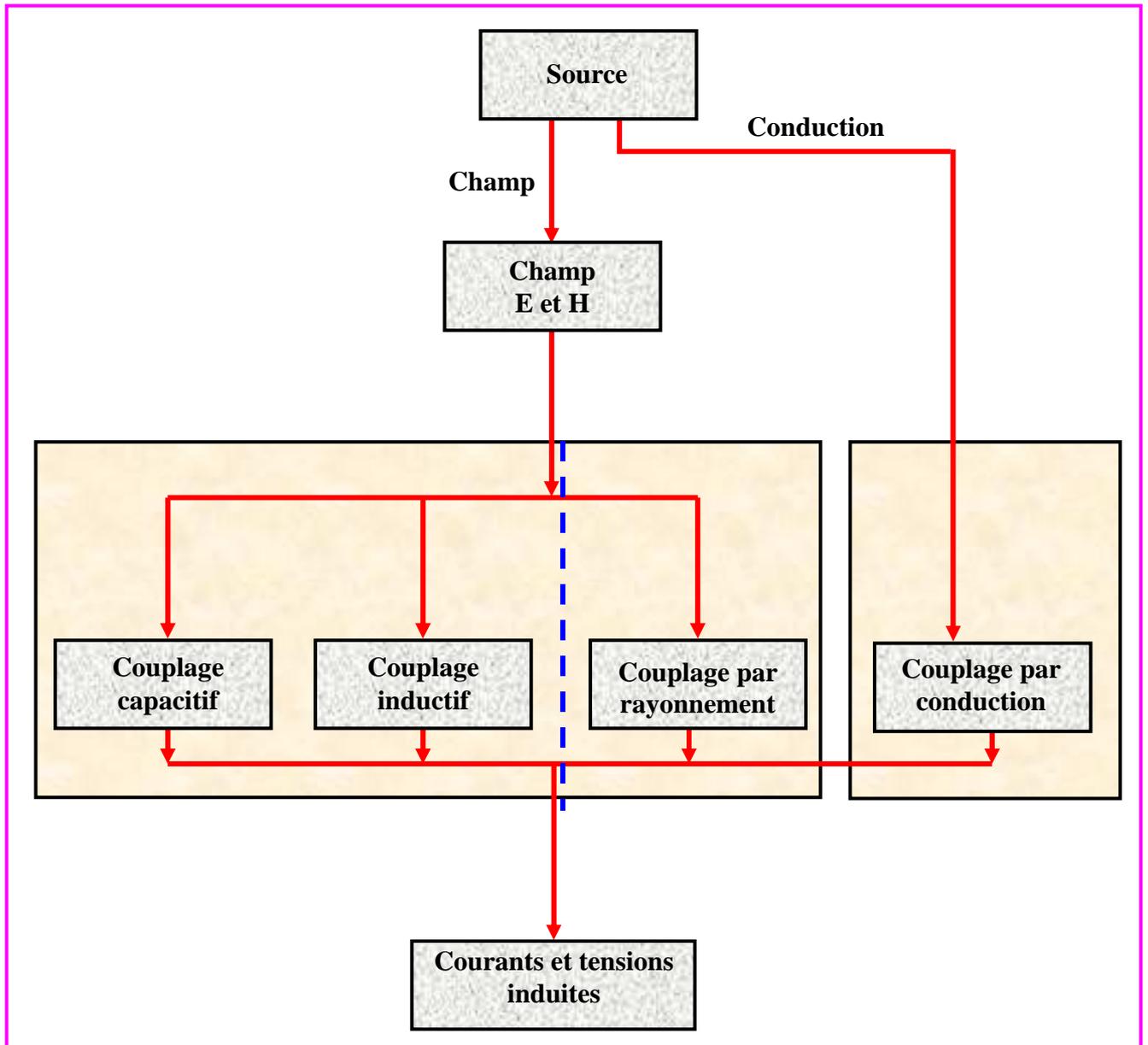


Figure2.2 Couplage par conduction et par rayonnement [7,10].

Les modes de couplage peuvent être classés selon la manière dont la perturbation est couplée à la victime à savoir :

- ❖ Le couplage en mode différentiel.
- ❖ Le couplage en mode commun.

II.2.1 Couplage en mode différentiel

Soit deux équipements interconnectés par une liaison bifilaire. Dans le mode différentiel le courant se propage sur un conducteur et revient en opposition de phase par l'autre conducteur (Fig. 2.3).

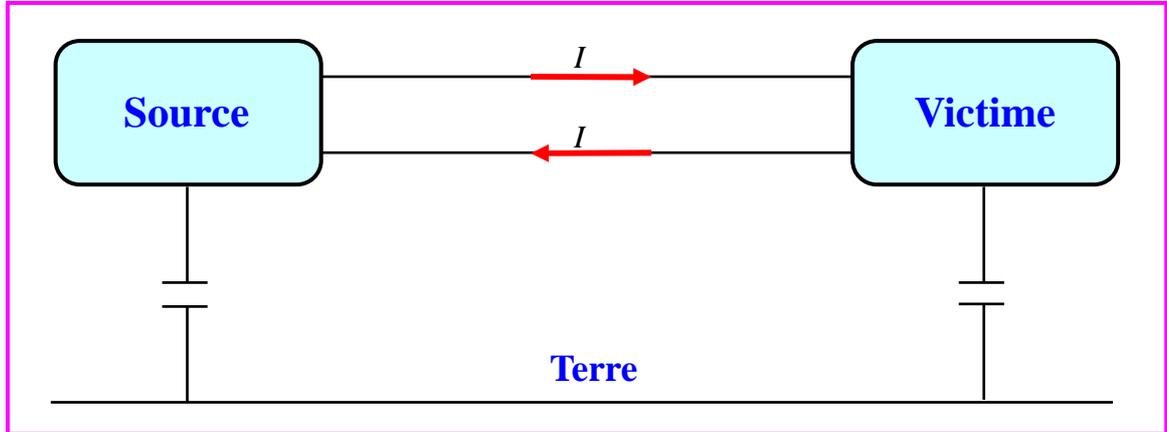


Figure2.3 Couplage en mode différentiel [1,3,7,12].

C'est la façon normale de transmettre les signaux. Etant donné que les conducteurs de la liaison bifilaire sont généralement très proches l'un de l'autre, les perturbations électromagnétiques ne se couplent que très faiblement sur les câbles en mode différentiel. Réciproquement, les émissions rayonnées d'une liaison en mode différentiel sont aussi relativement faibles.

II.2.2 Couplage en mode commun

Dans ce mode de couplage, le courant perturbateur se propage sur les deux conducteurs dans le même sens. Ces courants ne présentent en général aucun signal utile, ils peuvent être induits par un champ externe dans la boucle fermée avec le plan de terre et les impédances de connexion des équipements et la terre. Ils peuvent aussi être causés par des sources de bruit interne entre la terre de référence et la liaison par câble et peuvent engendrer alors des émissions rayonnées (Fig. 2.4).

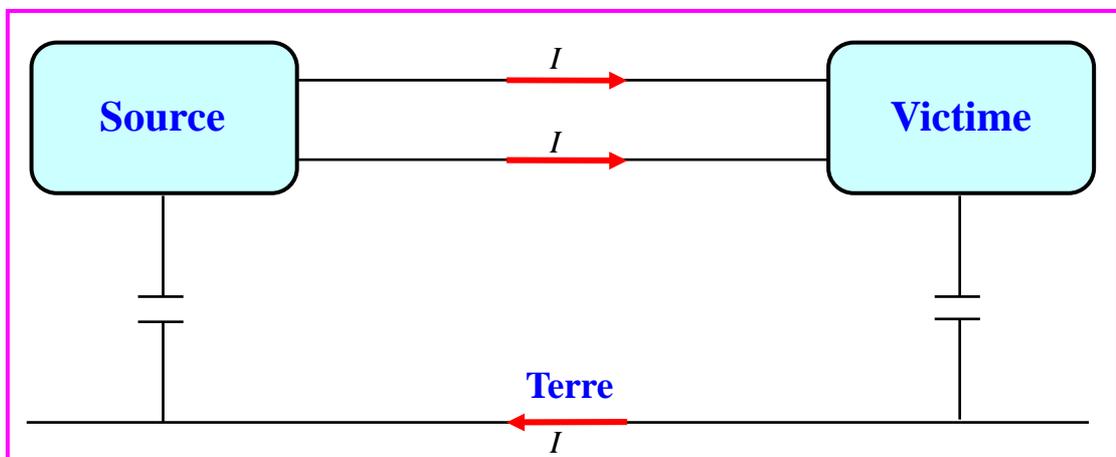


Figure2.4 Couplage en mode commun. [1,3,7,12].

II.3 Exemples et applications

II.3.1 Couplage en mode commun par impédance commune [1,7,11]

Le courant extérieur au dispositif (I) génère une tension parasite en mode commun (V_{mc}) entre les masses des deux systèmes (Fig. 2.5) :

$$V_{mc} = Z.I \quad (2.1)$$

Z est l'impédance commune entre les masses des deux systèmes.

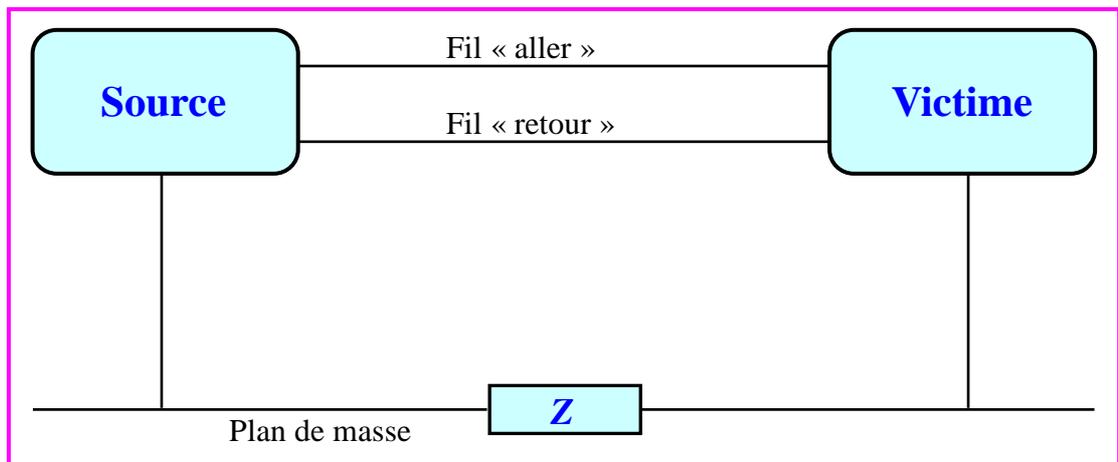


Figure 2.5 Couplage dit « par impédance commune » [1,7,12].

Aux très basses fréquences (BF), Z est une résistance, noté R , et elle donnée par la relation mathématique suivante :

$$R_c = \frac{\rho l}{s} \quad (2.2)$$

Avec :

- R_c : est la résistance ($m\Omega$)
- l : est la longueur du conducteur (m)
- ρ : est la résistivité du matériau de construction du conducteur (Ω/m)
- s : est la section du conducteur (mm^2)

Pour le cuivre à température ambiante : $R_c = \frac{17l}{s}$

La résistance d'une piste de cuivre d'épaisseur ($35 \mu m$), se calcule par la formule pratique suivante :

$$R_c = \frac{0.5l}{d} \quad (2.3)$$

Avec :

- R_c : la résistance de la piste ($m\Omega$)
- l : la longueur de la piste (m)
- d : largeur de la piste (m)

Applications

a) **Question** : Quelle est la différence de potentiel (ddp) entre deux points de mesure distant de 10 cm sur une piste de circuit imprimé de 1 mm de large, parcourue par un courant continu de 1 A ? [11]

Réponse :

$$\begin{aligned} R_c &= \frac{0.5 l}{d} \\ &= 0.5 \times 100/1 = 50 m\Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U &= R_c \times I \\ &= 0.05 \times 1 = 50 mV \end{aligned}$$

b) **Question** : Quelle est la résistance d'un conducteur de terre de cuivre de section égale à 35 mm² et de longueur = 10 m ? [11]

Réponse

$$\begin{aligned} R_c &= \frac{17 l}{s} \\ &= \frac{17 \times 10}{35} = 5 m\Omega \end{aligned}$$

En haute fréquence (HF), l'impédance Z du conducteur devient inductive c'est-à-dire croissante proportionnellement à la fréquence. Donc, en HF tout conducteur se comporte comme une inductance (self inductance), et l'impédance Z se présente par la formule suivante :

$$Z = 2 \pi f L \quad (2.4)$$

Avec :

- Z : impédance du conducteur (Ω).
- f : fréquence en (Hz).
- L : inductance du conducteur (H)

- c) **Question** :Quelle est la ddp entre les deux points de mesure distant de 10 cm d'une piste de circuit imprimé de 1mm de large parcourue par un courant de 1 A à la fréquence de 10 MHz, sachant que l'inductance d'une piste de 0.1m et de 0.1μH ? [11]

Réponse

$$Z = 2 \pi f L$$

$$= 6.28 \times 10 \times 10^6 \times 0.1 \times 10^{-6} = 6.28 \Omega$$

$$U = Z \cdot I$$

$$= 6.28 \times 1 = 6 V$$

- d) **Question** : Quelle est l'impédance d'un conducteur de terre en cuivre d'une surface de section de 35 mm² et d'une longueur de 10 m à la fréquence de 1MHz, sachant que l'inductance d'un conducteur de 10 m est voisine de 10 μH ? [11]

Réponse

$$Z = 2 \pi f L$$

$$= 6.28 \times 1 \times 10^6 \times 10 \times 10^{-6} \approx 63 \Omega.$$

La longueur d'onde dans l'air se calcul à partir de la fréquence par la relation simple :

$$\lambda = 300 / f \tag{2.5}$$

Avec :

- λ : la longueur d'onde (m)
 - f : la fréquence (MHz)
- e) **Question** : On souhaité réduire d'un facteur de 5 une perturbation à 300 MHz sur un circuit d'une impédance de 100 Ω. Quelle est la longueur maximale du conducteur à utiliser, sachant la longueur d'inefficacité d'une strap est $\lambda / 30$?[11]

Réponse

$$\lambda = 300 / f = 300 / 300 = 1 m.$$

La longueur d'inefficacité est :

$$l = \lambda / 30 = 1 / 30 = 3 cm.$$

Pour gagner un facteur de 5, il ne faut pas dépasser le cinquième de cette longueur, donc :

$$L = 0.03 / 5 = 6 \text{ mm.}$$

Dans le cas d'un courant dont le temps de montée est connu, il est facile de calculer la ddp maximale aux bornes d'une self par la relation :

$$U = L. \Delta I / \Delta t \quad (2.6)$$

Avec :

- ΔI : est le courant de l'impulsion mesurée de crête à crête (A)
- Δt : est le temps de montée de l'impulsion (sec)

f) **Question** : Quelle est la ddp entre deux points de mesure distant de 10 cm d'une piste de circuit imprimé de 1 mm de large parcourue par un courant impulsionnel de 10 A, avec un temps de montée de 5 ns, si on sait que l'inductance d'une piste de 0.1 m est voisine de 0.1 μH ? [11]

Réponse

$$U = L. \Delta I / \Delta t$$

$$= 0.1 \times 10^{-6} \times 10 / 5 \times 10^{-6} = 200V.$$

II.3.2 Couplage capacitif carte à châssis [11]

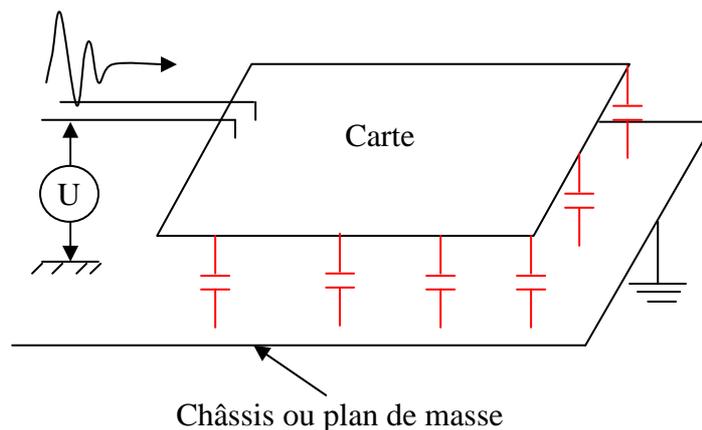


Figure 2.5 : Couplage capacitif carte-châssis [11,12]

La capacité d'une carte posée sur une table de bois par rapport à la masse n'est pas nulle (Fig. 2.5), elle est égale à la capacité d'un disque conducteur de diamètre égale à la diagonale de la carte.

✚ **Pour une carte éloignée des masses**

$$C_i = 35. D \quad (2.6)$$

Avec :

- C_i : la capacité intrinsèque (pF).
- D : le diamètre du disque, ou la diagonale de la carte (m).

✚ **Pour une carte proche :**

$$C_p = 9. S / h \quad (2.7)$$

Avec:

- C_p : est la capacité plane (pF).
- S : est la surface des électrodes, ou celle de la carte (m²).
- h : est la hauteur de la carte par rapport au plan conducteur (m).

✚ **La capacité réelle (capacité totale) vaut :**

$$C_t = C_i + C_p \quad (2.8)$$

✚ **La capacité d'une carte victime**

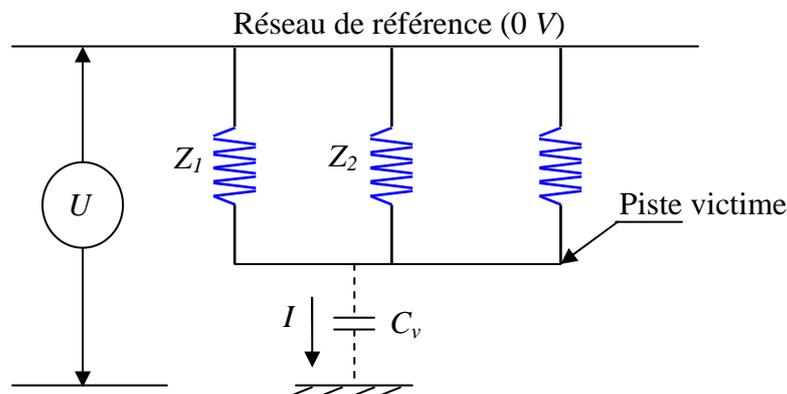


Figure 2.6 : Schéma illustratif de la capacité d'une carte victime

Dans ce cas le courant I est donné par la formule suivante :

$$I = 2 \pi f C_v U \quad (2.9)$$

Avec :

- I : est le courant parasite collecté par la victime (A).
- f : est la fréquence de la ddp entre la carte et la masse (Hz).
- C_v : est la capacité entre la piste victime et la masse fraction de C_t (F).
- U : est la ddp appliquée entre la carte et la masse (V).

Application

Question : Une carte de 30 cm de diagonale en diagonal d'un coffret de plastique posé sur une table isolante est testé en mode commun (par rapport à la terre) avec une sinusoïde amortie à 1 MHz de 1000 V crête. Sachant que la piste la plus sensible de la carte collecte 1% des lignes de champ, quel courant parasite va-t-elle collecter ?[11]

Réponse

$$C_i = 35 \times D$$

$$= 35 \times 0.3 = 10 \text{ pF}$$

Puisque H est grand, $C_p \approx 0$ et $C_t = C_i$, ce qui donne : $C_t = 10 \text{ pF}$

La capacité C_v de la piste sensible vaux 1% de la capacité totale : $C_v = C_t / 100 = 10 / 100 = 0.1 \text{ pF}$

Le courant parasite collecté est donc :

$$I = 2 \pi f C_v U$$

$$= 6.28 \times 10^6 \times 0.1 \times 100 = 0.6 \text{ mA}$$

II.3.3 Couplage par diaphonie inductive [4,9,11]

Un courant dans un conducteur source génère un champ magnétique. Un conducteur voisin se comporte comme une boucle intercepte une partie du champ magnétique. La variation du courant électrique et par conséquent du flux magnétique induit une différence de potentiel (ddp) dans les conducteurs (circuits) voisins.

Cette différence de potentiel (tension) peut être exprimée par les relations mathématiques suivantes :

$$U = 2 \pi f M I \quad (2.10)$$

Où

$$U = M .\Delta I / \Delta t \quad (2.11)$$

Avec :

- U : est la ddp induite dans la boucle victime (V).
- f : est la fréquence du courant source (Hz).
- M : est l'inductance mutuelle entre la source et la victime (H)
- I : est le courant source (A)

- ΔI : est la valeur crête à crête du courant source (A).
- Δt : temps de montée (*sec*) du courant source, correspondant à une augmentation de 10% à 90%

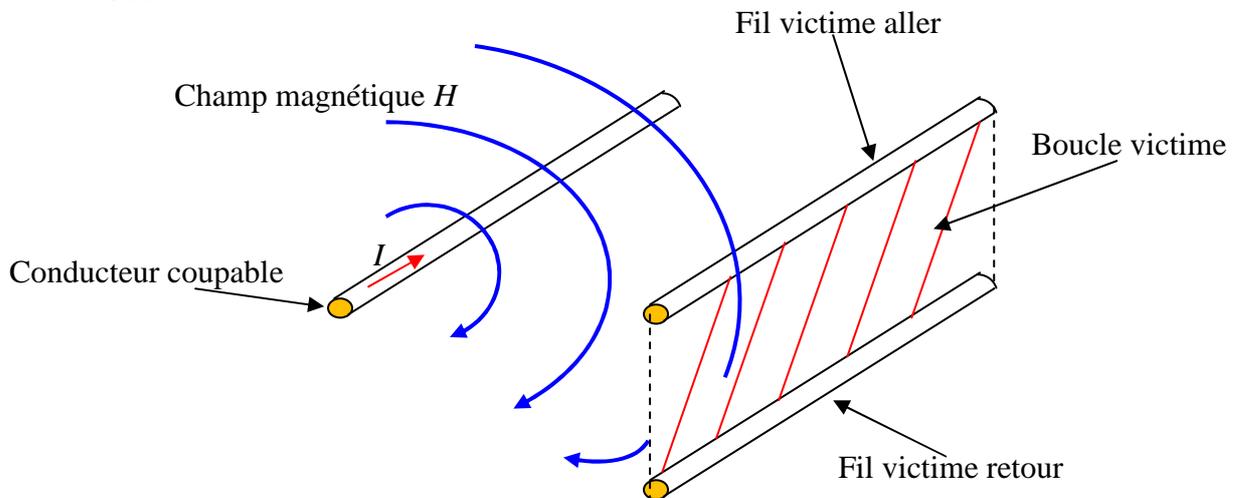


Figure 2.7 Couplage par diaphonie inductive.

II.3.3.1 Diaphonie inductive en mode différentiel [11]

Dans ce cas :

- Une impulsion de 1 V induit 0.8 V dans le fil voisin.
- La diaphonie maximale est de 80 %.
- Si t_m est le temps de montée, et $2T$ la durée d'un aller-retour du signal, et si $2T / t_m < 1$, donc la diaphonie bénéficie d'un coefficient réducteur $R = 2T / t_m$ ce qui permet d'écrire:
Diaphonie crête = diaphonie maximale. $2T / t_m$.

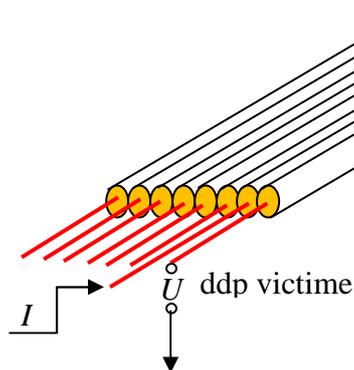


Figure 2.8 Exemple d'un couplage par diaphonie inductive en mode différentiel. [11]

Applications

- a) **Question** : Un câble en nappe long de 28 cm n'a qu'un seul conducteur de 0 V. Les signaux transmis à la vitesse de 5.5 ns/m (en aller simple) ont une amplitude de 4 V et un temps de montée de 6 ns. Quelle est l'amplitude et la durée du signal de diaphonie sur le conducteur voisin d'un conducteur source ? [11]

Réponse : La diaphonie dure le temps de propagation aller-retour $2T$ d'un signal en mode différentiel le long du câble.

$$T = 5.5 \times 0.2 = 1.5 \text{ ns}$$

Nous en déduisons : $2T = 3 \text{ ns}$

Sachant que la diaphonie maximale vaut 80%, soit $D_{max} = 0.8$ nous obtenons alors :

$$\begin{aligned} U_{max} &= D_{max} \cdot U_c \\ &= 0.8 \times 4 = 3.2 \text{ V} \end{aligned}$$

$$2T/t_m = 3 / 6 = 0.5$$

Puisque $2T/t_m < 1$, il faut donc multiplier U_{max} par $2T/t_m$ pour obtenir la diaphonie réelle :

$$\begin{aligned} U &= U_{max} \cdot 2T/t_m \\ &= 3.2 \times 0.5 = 1.6 \text{ V} \end{aligned}$$

b) Problème : Un câble de puissance est placé parallèlement à des câbles sensibles sur une grande longueur. Ces derniers forment une boucle de surface non négligeable et risquent d'être perturbés. On se propose de déterminer la tension perturbatrice V_{cp} recueillie sur la charge R_c de la ligne victime (Fig. 2.9) [13]

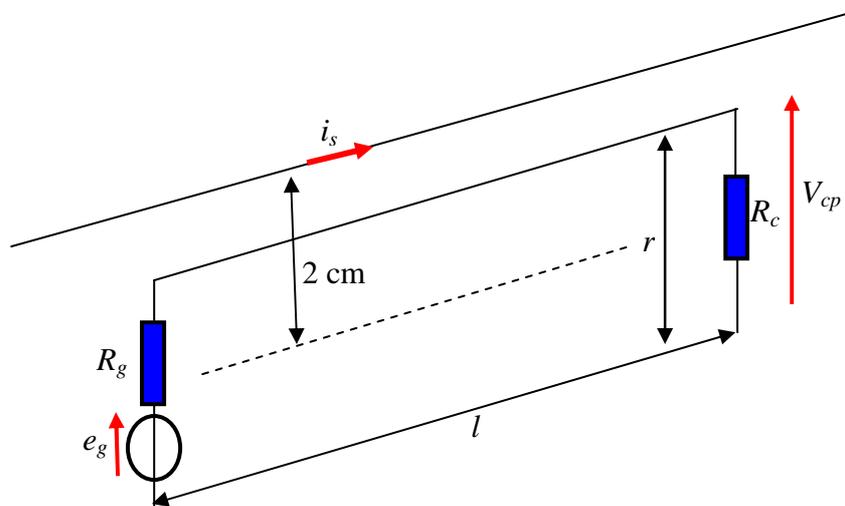


Figure 2.9 Apparition d'une tension perturbatrice aux bornes de la résistance R_c (couplage par diaphonie inductive)

- Signal perturbateur : $i_s = I_s \sqrt{2} \cos \omega t = 10 \sqrt{2} \cos \omega t$ ($f = 50 \text{ Hz}$),
- Caractéristique de la boucle victime : $R_g = 50 \Omega$ et $R_c = 1 \text{ k}\Omega$,
- Longueur : $l = 100 \text{ m}$,
- Largeur : $r = 2 \text{ cm}$,
- Distance moyenne du câble perturbateur : 2 cm ,

- Section des conducteurs : 0.09 mm^2 ,
- Permittivité relative de l'isolant : $\epsilon_r = 2.3$,
- Perméabilité relative de l'isolant et de l'air : $\mu_r = 1$.

On considère que la ligne victime est sans pertes et on néglige les capacités linéiques. L'impédance de la ligne victime est donc équivalente à une inductance L .

Questions

- 1/ Calculer l'inductance mutuelle M exprimant le couplage entre le fil perturbateur et la boucle victime.
- 2/ Calculer la self inductance L équivalente à la boucle victime. On donne l'inductance linéique bifilaire symétrique (deux conducteurs identiques et parallèles) (Fig. 2.10) :

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r}{\pi} \text{Argh} \frac{r}{d} = \frac{\mu_0 \mu_r}{\pi} \ln \left(\frac{r}{d} + \sqrt{\frac{r^2 - d^2}{d^2}} \right) \quad (2.12)$$

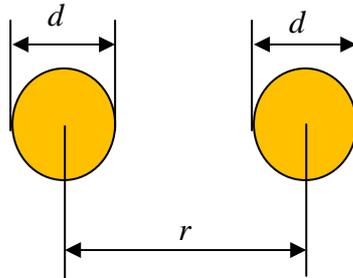


Figure 2.10 Ligne bifilaire symétrique.

Avec :

- $\mu_0 : 4\pi 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$,
 - r : distance séparant les conducteurs,
 - d : diamètre des conducteurs.
- 3/ Donner le schéma électrique équivalent.
 - 4/ Calculer la valeur efficace V_{cp} de la tension perturbatrice $V_{cp}(t)$.
 - 5/ Etude fréquentielle : Etablir la fonction de transfert $\frac{V_{cp}(j\omega)}{I_s(j\omega)}$

Réponses :

1/ En considérant que le fil de puissance est de très grande longueur, le champ magnétique créé par le courant i_s à une distance r vaut :

$$B = \mu_0 H = \frac{\mu_0 i_s}{2\pi r} \quad (2.13)$$

La tension perturbatrice récupérée sur la boucle victime de surface S vaut :

$$e_r = -\frac{d\phi}{dt} = \frac{\mu_0 S}{2\pi r} \times \frac{di_s}{dt} \quad (2.14)$$

Calcul de l'inductance mutuelle M (Fig. 2.11) :

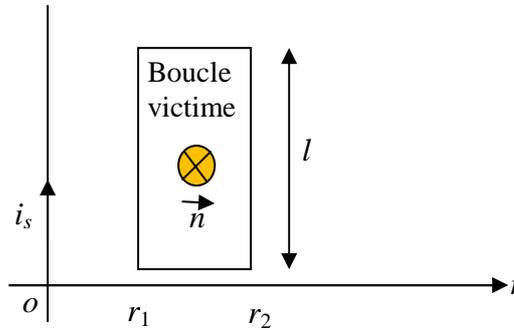


Figure 2.11 : Calcul de l'inductance mutuelle

Le flux coupé par la boucle victime vaut :

$$\phi = \int_S \vec{B} \cdot \vec{n} \cdot dS = \int_S \frac{\mu_0 i_s}{2\pi r} ds \quad (2.15)$$

Avec

$$dS = l dr \Rightarrow \phi = \frac{\mu_0 l i_s}{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r}$$

$$\Rightarrow \phi = \frac{\mu_0 l i_s}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

Application numérique : $r_1 = 1 \text{ cm}$, $r_2 = 3 \text{ cm}$, $l = 100 \text{ m}$, d'où $M = 2 \mu\text{H}$.

2/ Section = $(\pi d^2)/4$, d'où $d = 0.3385 \text{ mm}$, ce qui donne $L = 1.91 \mu\text{H/m}$, et en considérant que la ligne à une longueur de 100 m , on donc $L = 0.191 \text{ mH}$.

3/ Schéma équivalent de la boucle victime (Fig. 2.12)

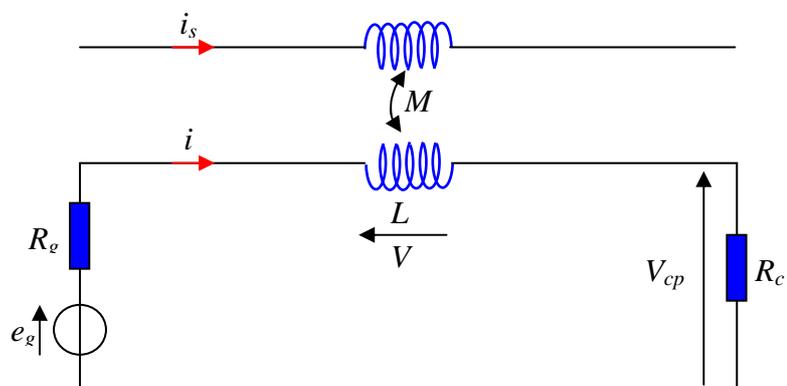


Figure 2.12 Schéma électrique équivalent du couplage par diaphonie inductive

$$e_g(t) = R_g i(t) + L \frac{di(t)}{dt} + M \frac{di_s(t)}{dt} + R_c i(t) \quad (2.16)$$

Un courant perturbateur $i_p(t)$ superposé au courant utile fourni par le générateur e_g prend naissance dans la boucle victime (Fig. 2.13). Pour calculer ce courant perturbateur dû à $i_s(t)$, on écrit $e_g(t) = 0$. On obtient donc :

$$V(t) = L \frac{di_p(t)}{dt} + M \frac{di_s(t)}{dt} \Leftrightarrow V(t) = L \frac{di_p(t)}{dt} - e_p(t) \quad (2.17)$$

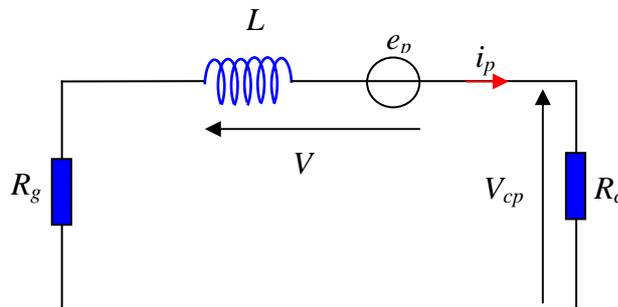


Figure 2.13 : Schéma équivalent simplifié du couplage par diaphonie inductive.

4/La tension induite (perturbatrice) vaut :

$$e_p = -M \frac{di_s(t)}{dt} \Leftrightarrow e_p = \mu_0 l I_s f \sqrt{2} \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right) \sin wt \quad (2.18)$$

En valeur efficace :

$$E_p = \mu_0 l I_s f \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right) \Leftrightarrow E_p = 69 \text{ mV}$$

Le calcul du courant perturbateur i_p , s'effectue à l'aide de l'égalité : $e_g(t) = 0$.

La valeur efficace de ce courant perturbateur s'écrit alors sous la forme suivante :

$$I_p = \frac{E_p}{\left| R_g + R_c + Z_L \right|} \approx \frac{E_p}{R_g + R_c} \quad (2.19)$$

($Z_L = L\omega = 0.6 \text{ m}\Omega$ est négligeable devant les valeurs des résistances)

Ce qui donne :

$$I_p = 66 \mu A.$$

De cette valeur du courant on peut déduire la valeur efficace de la tension perturbatrice aux bornes de la charge : $V_{cp} = R_c \cdot I_p = 66 \text{ mV}$

5/ Etude fréquentielle: calcul de la fonction de transfert :

$$0 = R_g I_p + jL\omega I_p + jM\omega I_s + R_c I_p \quad (\text{Avec } I_p = \frac{V_{cp}}{R_c}) \quad (2.20)$$

D'où

$$\frac{V_{cp}(j\omega)}{I_s(j\omega)} = \frac{R_c}{R_g + R_c} \times \frac{-jM\omega}{1 + j\frac{L\omega}{R_g + R_c}} = K \times \frac{jM\omega}{1 + j\omega\tau} \quad (2.21)$$

Avec $\tau = L / (R_g + R_c)$: est la constante du temps.

II.3.3.2 Diaphonie inductive en mode commun [9,11,12]

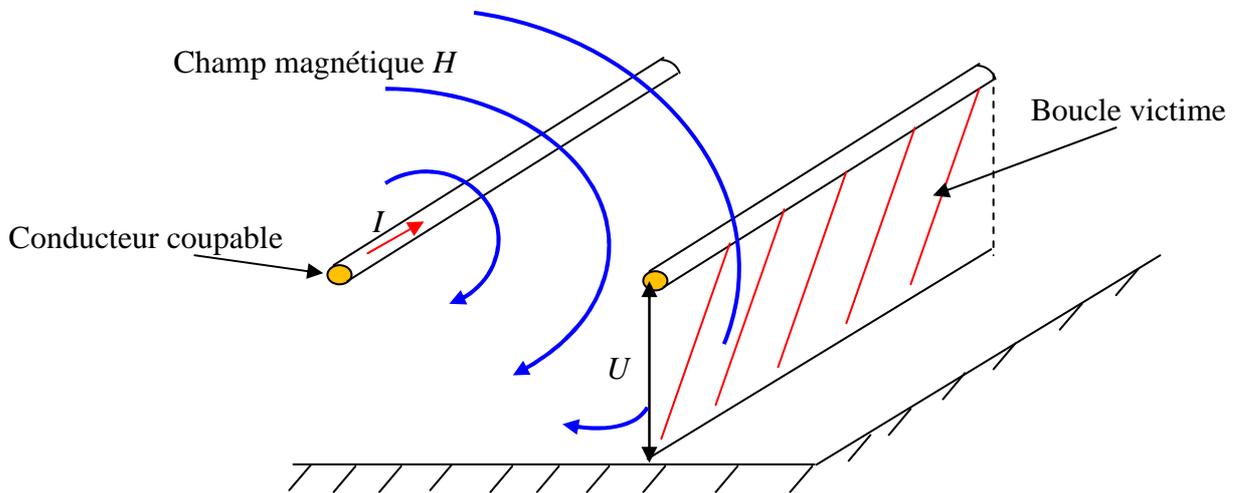


Figure 2.14 Couplage par diaphonie inductive en mode commun [9,11,12].

- ✓ La diaphonie en mode commun peut atteindre 80%.
- ✓ Si l'éloignement « e » entre les câbles est inférieur à leur hauteur h, la diaphonie maximale est voisine de 50%.
- ✓ Si $h < e \Rightarrow D_{\max} = \left(\frac{h}{e}\right)^2$
- ✓ Lorsque t_m est plus long que le temps de propagation ($2T$) du signal pour un aller-retour alors:

$$D_{\text{réel}} = D_{\max} \cdot \frac{2T}{t_m}$$

Application

Question : Deux câbles longs posés au sol cheminent en parallèle sur une longueur supérieure à 1 m. Les fers à béton sont situés à $h = 15 \text{ cm}$ sous la surface de la dalle. Un des câbles propage un courant en mode commun de 20 A avec un temps de montée de 5 ns. Sachant que la durée d'un aller-retour sur une longueur d'1 m est 7 ns, quel est le courant induit en mode commun sur l'autre

câble distant de $e = 10 \text{ cm}$? Même question pour des câbles éloignés d'une distance $e = 50 \text{ cm}$? [11].

Réponse

Puisque $t_m = 5 \text{ ns} < 7 \text{ ns}$, il n'y a donc aucun effet réducteur en temps.

✓ **1^{er} cas** : $e = 10 \text{ cm} < h = 15 \text{ cm} \Rightarrow D_{max}$ est de 50%

$$\Rightarrow D_{max} = 0.5$$

Le courant induit dans le câble vaut : $I_{max} = D_{max} \cdot I_c = 0.5 \times 20 = 10 \text{ A}$ (*forte perturbation*).

✓ **2^{eme} cas** : $e = 50 \text{ cm} > h = 15 \text{ cm} \Rightarrow D_{max} = (H/e)^2$

$$\Rightarrow D_{max} = (0.15 / 0.5)^2 = 0.09$$

Le courant induit dans ce cas est : $I_{max} = D_{max} \cdot I_c = 0.09 \times 20 = 1.8 \text{ A}$

II.3.4 Couplage par diaphonie capacitive [9,11,12]

Une différence de potentiel (ddp) entre deux conducteurs génère un champ électrique. Un conducteur voisin intercepte une partie des lignes de ce champ électrique et collecte ainsi un courant perturbateur dont les formules mathématiques sont les suivantes :

$$I = 2\pi \cdot f \cdot C \cdot U \quad (2.22)$$

Où: $I = C \cdot \Delta U / \Delta t \quad (2.23)$

Avec :

- I : est le courant collecté par le conducteur victime (A).
- f : est la fréquence de la ddp source (Hz).
- C : est la capacité de couplage entre la source et la victime (F).
- ΔU : est la ddp crête à crête de la source (V).
- U : est la ddp de couplage (V).
- Δt : est le temps de montée de l'onde de tension (ddp) source de 10% à 90% (sec).

II.3.4.1 Diaphonie capacitive en mode différentiel [11,12]

- ✓ Le courant parasite est collecté entre le conducteur « aller » et le conducteur « retour » du circuit victime.
- ✓ La différence de potentiel peut atteindre 8% c'est-à-dire qu'une ddp de 1 Volt induit une tension de 0.8 volts.
- ✓ Ce phénomène dure pendant un « aller-retour » $2T \approx 11 \text{ ns}$ par mètre.
- ✓ Le coefficient réducteur en temps $R = 2T / t_m$.

- ✓ Si un conducteur sur deux est connecté au 0 Volts, la diaphonie maximale vaut 8%.

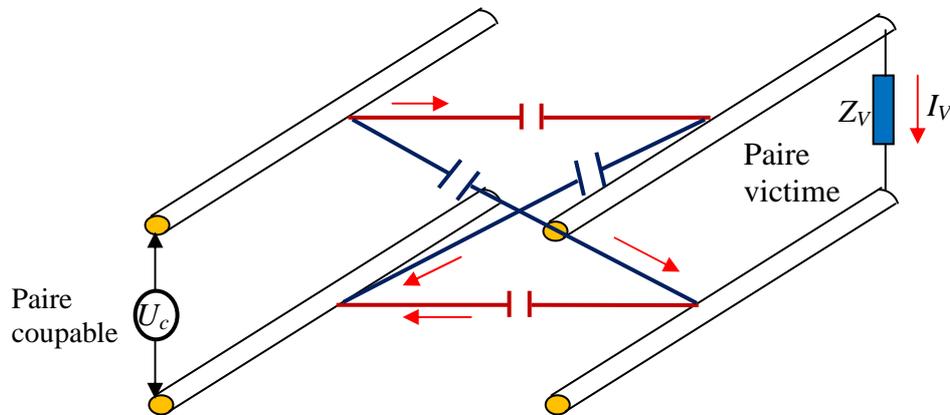


Figure 2.15 Couplage par diaphonie capacitive en mode différentiel [11,12].

La figure (2.15) illustre le couplage par diaphonie capacitive en mode différentiel entre une paire de conducteurs coupables ayant une ddp U_c et une paire de conducteurs victimes collectant un courant parasite I_v .

Application

Question: Un câble en nappe de 50 *cma* un conducteur sur deux connecté au 0 V. Les signaux transmis ont une amplitude de 4 V. Leur temps de montée est de 3 ns. Quelle est l'amplitude et la durée du signal de diaphonie sur le conducteur voisin d'un conducteur source ? [11]

Réponse

Dans tous les cas de diaphonies qui durent $2T$, le temps de propagation « aller-retour » d'un signal est de 11 ns/m, donc : $2T = 11 \times 0.5 \approx 6$ ns

Puisque $t_m < 2T$, il n'y a pas de coefficient réducteur en temps, ce qui permet d'écrire que la diaphonie maximale est de 8% :

$$D_{max} = 0.8$$

$$U_v = D_{max} \cdot U_c = 0.8 \times 0.4 = 0.32 \text{ V (très faible).}$$

II.3.4.2 Diaphonie capacitive en mode commun [11,12]

- ✓ Le champ électrique est généré par la ddp de mode commun entre câble et masse.
- ✓ D_{max} est voisin de 50%.
- ✓ Si la hauteur h du câble par rapport à la masse est inférieure à l'éloignement « e » entre les câbles ($h < e$) donc : $D_{max} = (h/e)^2$.
- ✓ $R = 2T / t_m$.
- ✓ Dans ce cas $2T = 7$ ns par mètre de longueur.

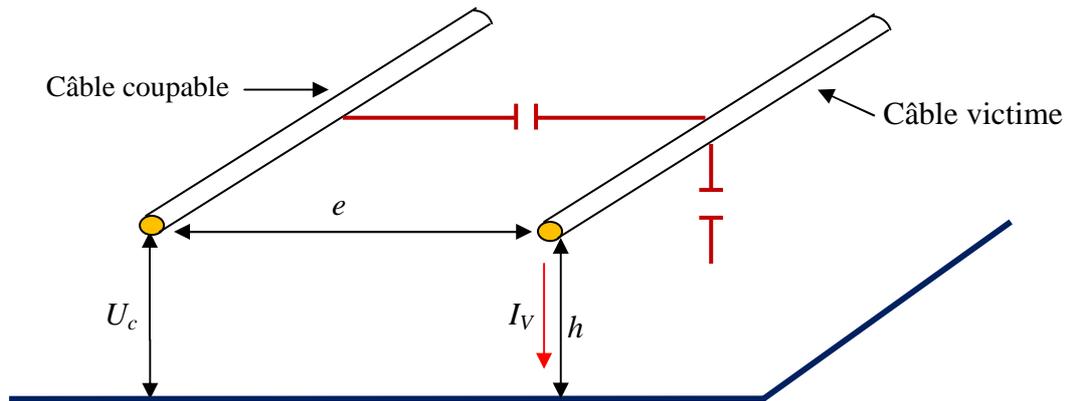


Figure 2.16 Couplage par diaphonie capacitive en mode commun [11,12].

La figure (2.16) présente le couplage par diaphonie capacitive en mode commun entre un câble coupable dont le rôle est la production des signaux perturbateurs et un câble victime affecté par la présence de ces signaux parasites.

Application

Question : Deux câbles terminés par des isolements galvaniques sont posés sur une dalle de béton où ils cheminent en parallèle sur une longueur de 3 m, les fers à béton de la dalle sont situés à une profondeur $h = 15 \text{ cm}$ sous les câbles. Un des câbles collecte une différence de potentiel (ddp) en mode commun de 2000 V avec un temps de montée de 1.2 μs . Quelle est la ddp induite en mode commun sur l'autre câble distant d'une distance $e = 10 \text{ cm}$? Même question si les câbles sont éloignés de 50 cm ? [11]

Réponse

La durée d'un « aller-retour » sur 3 m vaut :

$$2T = 3 \times 7 = 21 \text{ ns}$$

Puisque $t_m = 1.2 \mu\text{s} > 2T = 21 \text{ ns}$, la diaphonie bénéficie de l'effet réducteur en temps de :

$$R = 2T / t_m = 21 / 1200 = 0.0175$$

🚧 **1^{er} cas** : $e = 10 \text{ cm} < h = 15 \text{ cm} \Rightarrow D_{max} = 50 \% = 0.5$

La ddp crête collectée par le câble victime est donc :

$$\begin{aligned} U &= U_c \cdot D_{max} \cdot R \\ &= 2000 \times 0.5 \times 0.0175 = 18 \text{ V.} \end{aligned}$$

🚧 **2^{eme} cas** : $e = 50 \text{ cm} > h = 15 \text{ cm} \Rightarrow D_{max} = (h / e)^2 = (0.15 / 0.5)^2 = 0.09$

La ddp induite sur le câble victime vaut :

$$U = U_c \cdot D_{max} \cdot R = 2000 \times 0.09 \times 0.0175 = 3.2 \text{ V}$$

II.3.5 Couplage champ à fil [9,10,11,12]

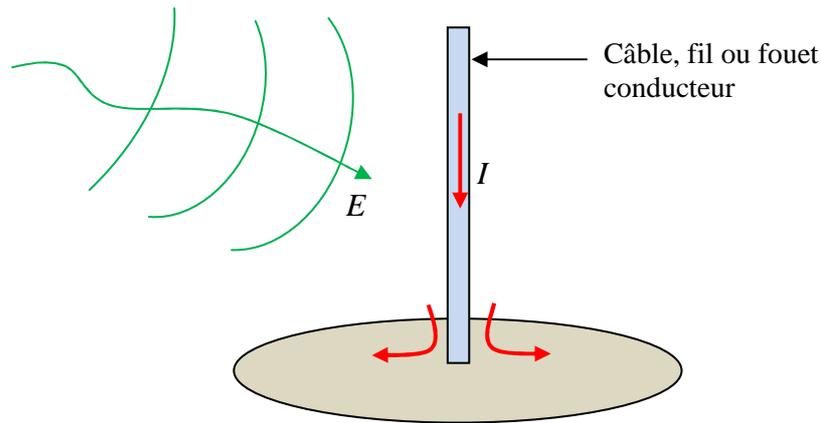


Figure 2.17 Couplage champ à fil [11,12]

Lorsqu'un champ électrique éclaire un conducteur, ce dernier est le siège d'un courant induit (Fig. 2.17) qui peut entraver le bon fonctionnement de tout dispositif, appareil ou système raccordé à ce conducteur.

II.3.5.1 Couplage champ à fil en basse fréquence [11]

Dans ce cas le courant collecté (induit par le champ électrique perturbateur) par le conducteur victime vaut :

$$I = E \cdot l^2 / (100 \cdot \lambda) \quad (2.24)$$

Avec :

- I : le courant collecté par le conducteur (A).
- E : l'intensité du champ électrique perturbateur (V/m).
- l : la longueur du conducteur (m).
- λ : la longueur d'onde = $300 / f$ (f est en MHz et λ est en m)

Application

Question : Une installation électronique sensible située à 1 Km d'un émetteur d'ondes longues de forte puissance se trouve plongée dans un champ électrique de 10 V/m à la fréquence de 200 KHz. Quel est le courant collecté en mode commun du côté électronique par un câble de capteur galvanique isolé de 3 m de longueur ? [11]

Réponse

La longueur d'onde vaut $300 / f$: $\lambda = 300 / 0.2 = 1500$ m.

Un câble galvaniquement isolé se comporte pratiquement comme un fouet de même longueur. Le courant collecté est donc voisin de :

$$I = E \cdot l^2 / (100 \cdot \lambda) = 10 \times 9 / (100 \times 1500) = 0.6 \text{ mA}$$

II.3.5.2 Couplage champ à fil en haute fréquence [11]

En HF le courant induit par un champ électrique perturbateur sur un câble, fil ou fouet conducteur peut s'écrire à l'aide de la relation mathématique suivante :

$$I = E \cdot \lambda / 240 \quad (2.25)$$

Avec :

- I : le courant maximal collecté (A).
- E : le champ électrique (V/m).
- λ : la longueur d'onde = $300 / f$ (f est en MHz et λ est en m).

Application

Question : Un câble long est illuminé par une radio locale par un champ électrique de 8 V/m à une fréquence de 100 MHz. Quel est le courant en mode commun induit sur le câble ? [11]

Réponse

La longueur d'onde $\lambda = 300 / f = 3 / 100 = 3 \text{ m}$

Le courant induit est : $I = E \cdot \lambda / 240 = 8 \times 3 / 240 = 100 \text{ mA}$.

II.3.6 Couplage champ à boucle [11,12]

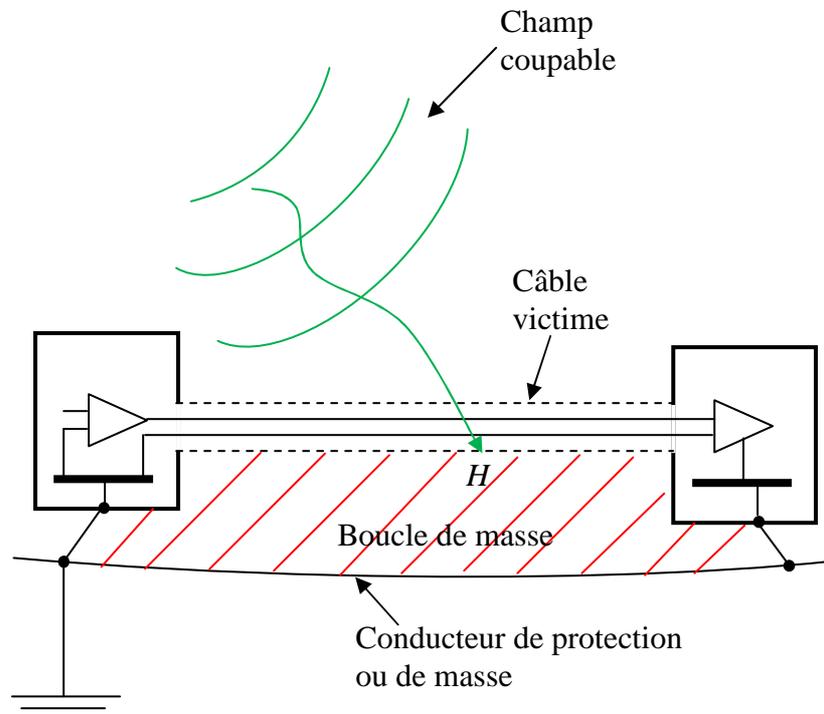


Figure 2.20 Couplage champ à boucle [11,12]

- ✓ La cause est un champ magnétique variable.
- ✓ L'effet est une différence de potentielle (ddp) induite dans une boucle interceptant du flux magnétique.

✓ Le courant circulant est :

$$I = U / Z \quad (2.26)$$

Avec :

- U : la ddp induite (V).
- Z : l'impédance totale de la boucle (Ω).

✓ L'impédance caractéristique du champ vaut :

$$\begin{aligned} Z_c &= E / H \quad (2.27) \\ &= \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120 \pi = 377 \Omega \end{aligned}$$

II.3.6.1 Couplage champ à boucle en haute fréquence [11]

En haute fréquence (HF) la différence de potentiel (ddp) induite par le champ magnétique perturbateur sur la boucle victime peut être écrite comme suit :

$$U = 600 \cdot e \cdot H \quad (2.27)$$

Avec :

- U : ddp maximale collectée par la boucle victime (V).
- e : éloignement entre conducteurs aller et retour $< \lambda / 4$, (m).
- H : intensité du champ magnétique (A/m).

Application

Question : Si une bombe atomique explosait à plus de 50 km, une impulsion en onde plane de 50 kv/m crête et de 200 ns à mi-hauteur pourrait être rayonnée (phénomène IEMN « Impulsion Electromagnétique d'origine nucléaire »). Ce champ illumine une ligne téléphonique de quelques centaines de mètres de long suspendue à 6 m au-dessus du sol. Que serait la ddp crête en mode commun, c'est à dire entre les fils et le sol, au bout de la ligne ? [11]

Réponse

$$H = E / Z = 50000 / 377 = 133 \text{ A/m}$$

$$\text{Donc la ddp vaut : } U = 600 \cdot e \cdot H = 600 \times 6 \times 133 = 480 \text{ kV.}$$

II.3.6.2 Couplage champ à boucle en hyperfréquence [11]

Pour cette gamme de fréquence la différence de potentiel induite est exprimée par les relations suivantes :

$$U = 150 \cdot \lambda \cdot H \quad (2.29)$$

Où :

$$U = 0.4 \times \lambda \times E \quad (2.30)$$

Avec :

- U : ddp maximale induite (V).
- λ : longueur d'onde (m).
- H : intensité du champ magnétique (A/m).
- E : intensité du champ électrique (V/m).

Application

Question On place une carte électronique dans un four à micro-ondes. Quelle est la tension induite dans les boucles de la carte, sachant que le champ électrique à 2.45 GHz dans un four à vide atteint 10 kV/m (plus de 100 0V/m dans un for en charge) ?[11]

Réponse

La longueur d'onde est : $\lambda = 300 / f = 300 / 2450 = 12 \text{ cm}$

La tension induite vaut : $U = 0.4 \times \lambda \times E = 0.4 \times 0.12 \times 10000 = 480 \text{ V}$

II.4 Conclusion

La connaissance de la nature de la propagation des signaux perturbateurs de la source vers les systèmes victimes est primordiale ce qui justifie l'étude des mécanismes de couplage source-victime. Le chapitre suivant sera consacré à la présentation et l'étude des différentes sources de perturbations.

Chapitre III : Sources de perturbations électromagnétiques

III.1 Introduction

Une perturbation électromagnétique (E.M) se traduit par l'apparition d'un signal électrique indésirable venant s'ajouter au signal utile. C'est ce signal inopportun qui peut dégrader le fonctionnement d'un équipement. Les sources des émissions électromagnétiques peuvent être d'origine *naturelle* (atmosphérique, solaire, bruit thermique terrestre,) ou *artificielle*. Parmi ces sources artificielles, certaines sont *intentionnelles* (émetteur radioélectrique, fours micro-ondes, fours à induction,) ou *non intentionnelles* (systèmes d'allumage des moteurs à explosion, tous les systèmes d'enclenchement et de coupure d'un signal électrique, lampes à décharges, horloge des systèmes informatiques, ...) [1,7]. Les perturbations électromagnétiques peuvent être également classées selon la valeur de la fréquence du signal perturbateur : *perturbation basses et moyennes fréquences* (inférieures à 5 MHz) ou *perturbation haute fréquence* (supérieures à 5 MHz).

III.2 Sources de perturbations E.M

III.2.1 Perturbations E.M à basses fréquences (BF) [3,4,11,14,15,16,17,18,19,20,32]

III.2.1.1 Perturbation E.M BF en mode conduit (conduction)

❖ Le Flicker

Rend en compte des légères mais fréquentes baisses de la tension du réseau provoquées par des à-coups de courant (Fig. 3.1) dus par exemple au démarrage des gros moteurs ou des chaudières électriques.

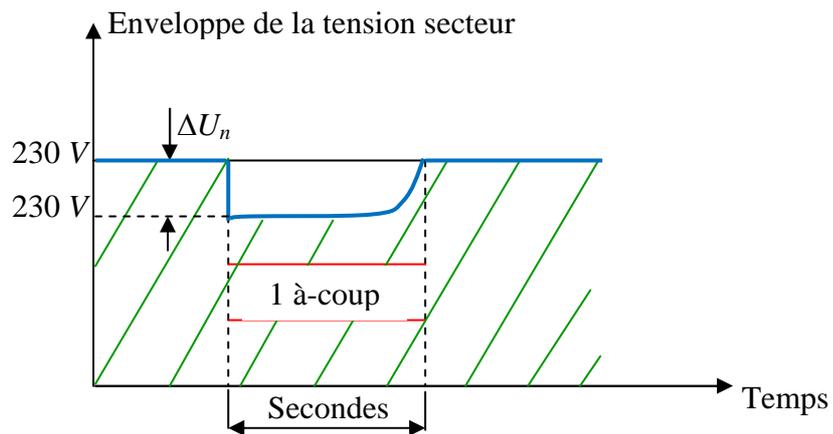


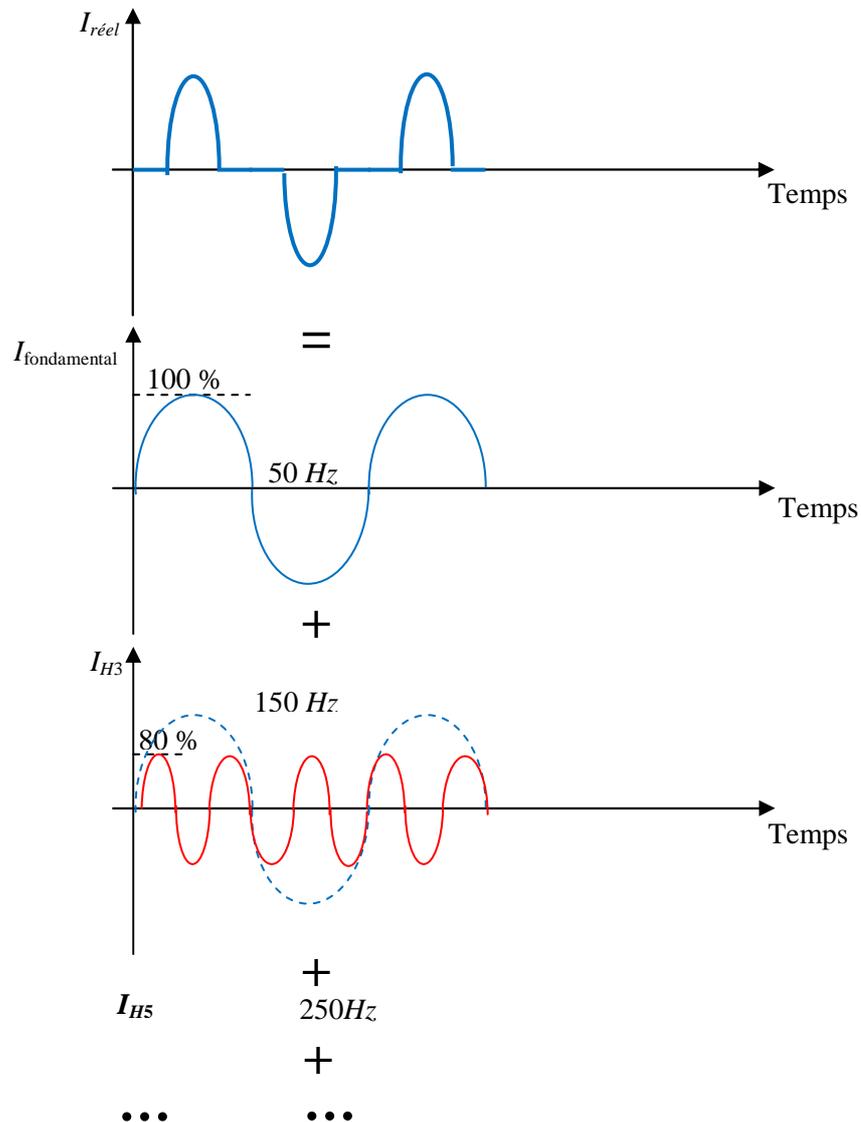
Figure 3.1 Exemple d'un à-coup de flicker [11,16]

❖ Variations de fréquence des réseaux électriques

L'origine de ce phénomène est la production de l'énergie électrique en utilisant les groupes électrogènes dont la fréquence d'entraînement n'est pas régulée.

❖ Les harmoniques

Toute charge non linéaire consomme un courant sinusoïdal, composé d'un courant fondamental dont la fréquence est égale à la fréquence du réseau (exemple : 50Hz) et de courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples de la fréquence de la fondamentale (100, 150, 200 Hz...) (Fig. 3.2). Les alimentations électroniques, les régulateurs de puissance à pont de Grectz ... etc génèrent beaucoup de courants harmoniques.



❖ Les interharmoniques

Le courant interharmonique est un courant dont la fréquence et non multiple de la fréquence du réseau. Les interharmoniques sont générés par les cyclo-convertisseurs (pour entrainer des moteurs à très basse vitesse), les gros moteurs asynchrones à encoches profondes, ce qui provoque à long terme un échauffement excessif. Le risque principal des interharmoniques est de perturber les systèmes de télécommande centralisée.

❖ Les résidus de découpage en mode commun

Certains hacheurs, variateurs de vitesse, commande des moteurs pas à pas et convertisseurs de puissance (redresseurs commandés, chargeurs, onduleurs) sont mal filtrés. Des perturbations sont couplées en mode commun avec le réseau électrique et les charges de puissance.

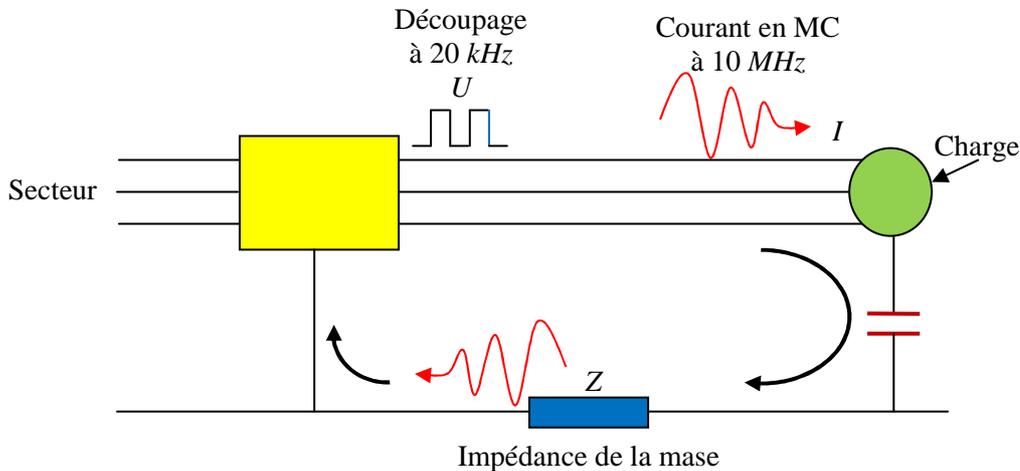


Figure 3.3 Génération du courant en mode commun par un convertisseur statique [11].

❖ Perturbations transitoires en mode conduit (conduction)

✚ Les fluctuations de tension

Ce sont des variations rapides de la tension d'alimentation (entre 6% et 10%) pendant le fonctionnement normal du réseau électrique. Ces types de perturbations sont produits par des à-coups de charge. Malgré leur caractère transitoire, ils ont des amplitudes supérieures à celles du Flicker.

✚ Les creux de tensions et coupures brèves

Les creux de tension apparaissent en un point du réseau électrique si un court-circuit a lieu dans un autre point de ce réseau. Ils se traduisent par une baisse de tension de 10 % à près de 100 % de la tension nominale du réseau pendant une durée comprise entre 10 ms et quelques secondes. Les coupures brèves et très brèves, dues à des phénomènes transitoires, se caractérisent par une absence de tension (baisse de tension de 100 %) pendant 1 s à 1 mn pour les premières et entre 10 ms et 1 s pour les secondes. Quant aux microcoupures, elles se traduisent elles aussi par la disparition totale de la tension d'alimentation pendant une durée inférieure à 10 ms.

✚ Les surtensions lentes

Les surtensions lentes sont des surtensions longues. Elles sont causées généralement par l'enclenchement de bancs de condensateurs. L'inductance du réseau et la capacité de la charge forment un circuit $L-C$ parallèle ce qui provoque le phénomène de la résonance. La surtension produite dans ce cas peut atteindre près de deux fois la tension crête du réseau.

Les surtensions lentes peuvent être causées par la fusion d'un fusible de protection vis-à-vis des courts-circuits (les surintensités).

⚡ Les surtensions sinusoïdales amorties

Ce genre des surtensions est causé par les manœuvres (ouverture et fermeture) sur l'appareillage du réseau électrique haute tension HT (disjoncteur, contacteur, sectionneur...).

⚡ La foudre directe

Lorsqu'un coup de foudre tombe directement sur une ligne aérienne, un immeuble ou système de puissance, il en résulte une onde de choc (surtension) caractérisée par un temps de front (temps de montée) très rapide et une grande amplitude.

Deux types d'ondes de foudre normalisées existent à savoir l'onde en tension et l'onde en courant (Fig. 3.4). Ces ondes sont utilisées pour tester le matériel électrique.

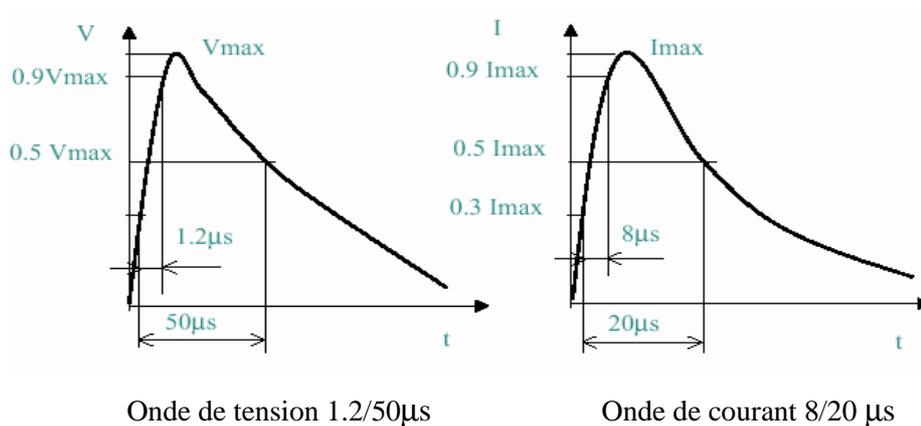


Figure 3.4 : Variations temporelles de l'onde de tension et de courant normalisées [18,19,20].

III.2.1.2 Perturbation BF en mode rayonné (rayonnement)

❖ Champ de fuite d'un transformateur

L'induction crête dans le fer (circuit magnétique d'un transformateur) dépasse 1.5 *Tesla* et peut même dépasser 2 *Tesla*, ce qui peut saturer le fer alors que le champ magnétique peut dépasser 100 *A/m* à proximité d'un transformateur. Cette intensité du champ magnétique de fuite des transformateurs (Fig. 3.5) peut perturber les électroniques sensibles qui se trouvent au voisinage du transformateur.

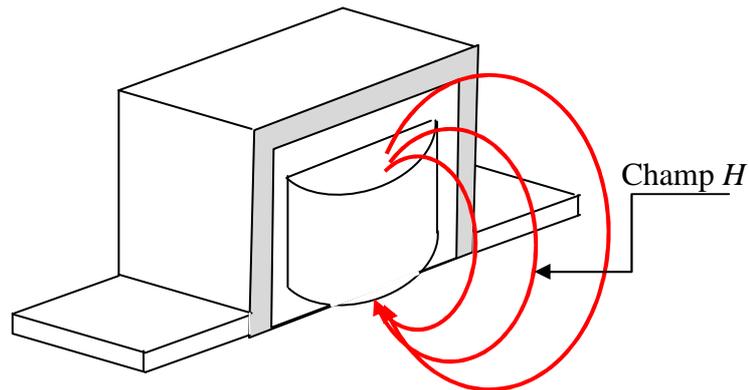


Figure 3.5 Champ de fuite d'un transformateur [11].

❖ Rayonnement des lignes aériennes

Les lignes aériennes de transport d'énergie électrique à haute tension (HT), ainsi que les caténaies de traction électrique sont considérées comme des antennes longues qui génèrent un champ magnétique H . Le couplage entre ce champ magnétique perturbateur rayonné avec les différents systèmes voisins peut soit entraver leur bon fonctionnement soit provoquer leur arrêt total.

❖ Les courants de fuites à la terre

Certains équipements d'installations industrielles comme les spectromètres de masse et les microscopes électroniques sont trop sensibles au champ magnétique à basse fréquence. La surface de la boucle de masse et souvent plus grande et les courants de fuites circulant dans les structures de masse ou dans les conducteurs de protection (conducteurs de la mise à la terre) se comportent comme des sources de radiation de champs magnétique ce qui influe négativement sur les différents systèmes sensibles.

❖ Les fours à induction

Les inducteurs des fours industriels de forte puissance sont des sources très intenses de perturbations électromagnétiques. Ainsi, lors de leur fonctionnement normal le rayonnement d'un champ magnétique perturbe les appareils sensibles se trouvant dans leur environnement.

❖ Perturbations transitoires basse fréquence

⚡ Les courts-circuits

Il y a plusieurs effets des courts-circuits sur les lignes d'alimentation. L'amplitude importante du courant de court-circuit génère un champ magnétique transitoire qui peut par son couplage avec les systèmes voisins provoquer l'induction de surtensions à front rapide ce qui peut gêner

l'électronique sensible soit des systèmes de contrôle-commande des réseaux électriques ou même tous systèmes électroniques qui se trouvent dans l'environnement de ce type de défauts.

✚ **L'enclenchement des lignes aériennes**

Lors du réenclenchement d'une ligne électrique aérienne à haute tension en défaut il s'apparait un phénomène de perturbation électromagnétique très sévère. La surtension générée en extrémité par une ligne aérienne à vide peut atteindre deux fois la tension nominale. Ainsi, sur ces lignes électriques aériennes en défaut un courant oscillatoire va circuler entre les conducteurs aller et retour. Un tel phénomène a des effets indésirables sur le fonctionnement des appareils voisins créés par l'induction d'une différence de potentiel dans toutes les boucles de masse du voisinage.

✚ **La foudre indirecte**

Lorsqu'un coup de foudre nuage-sol se produit au voisinage d'un système électrique, électronique ou de télécommunication (lignes électriques aériennes, lignes de transmission, immeubles, sites industriels ...), son canal ionisé se comporte comme un conducteur long parcouru par un courant électrique (courant d'arc en retour). Ainsi, cette propagation du courant le long du canal provoque le rayonnement d'un champ électromagnétique. Le couplage de ce champ avec les différents systèmes cause l'apparition d'une surtension caractérisée par une amplitude élevée et un temps de front très rapide.

III.2.2 Perturbations E.M. à hautes fréquences (HF) [3,4,11,14,15,16,17,32]

III.2.2.1 Perturbations E.M. HF en mode conduit (conduction)

❖ **Bruit de commutation des moteurs à collecteur**

Les moteurs à balais génèrent des étincelles pendant leur fonctionnement. Une étincelle se comporte comme un interrupteur très rapide. Les câbles d'alimentation deviennent le siège de courant HF avec des temps de montée de quelques dizaines de nanosecondes. Ces perturbations caractérisées par leur haute fréquence peuvent perturber directement la carte de régulation ou bruyier par diaphonie les câbles voisins.

❖ **Le courant de mode commun des convertisseurs statiques**

Tout convertisseur à découpage (alimentation à découpage, hacheurs-convertisseurs continu-continu, variateurs de vitesse, commande de moteurs pas à pas...) génère entre l'alimentation et la sortie des courants de mode commun à haute fréquence entre 5 et 50 MHz. Avant l'étape du filtrage, ces courants ont la forme d'impulsions sinusoïdales amorties. Ces courants parasites en mode commun HF ont pour effet de perturber les électroniques sensibles.

❖ Perturbations transitoires HF

✚ Coupure de bobine

Lorsqu'une charge inductive est alimentée, de l'énergie magnétique est stockée dans le bobinage (Fig. 3.6). Si un contact sec coupe ce courant, l'énergie emmagasinée dans la bobine charge la capacité entre les deux conducteurs, ce qui produit une surtension aux bornes de la bobine.

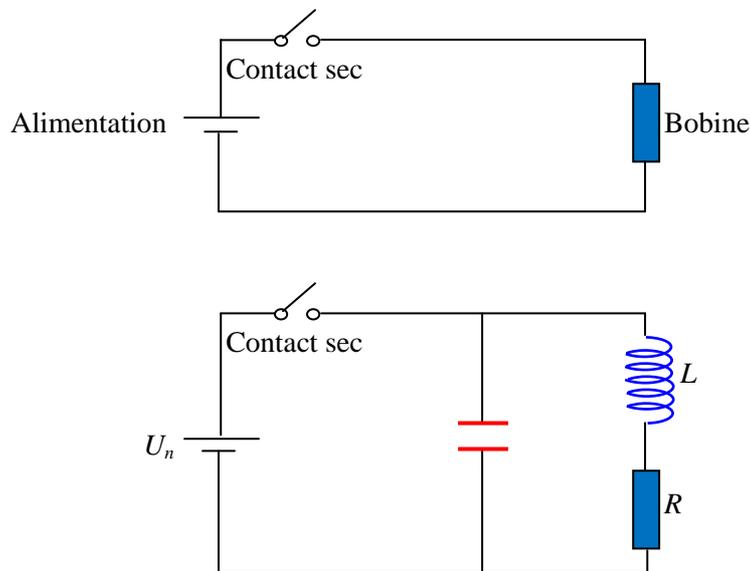


Figure 3.6 Schéma équivalent d'une bobine [11,16]

✚ Les décharges électrostatiques « DES »

Une décharge électrostatique (DES) se traduit par le déplacement de charges électriques vers un corps isolé qui provoque une électrisation de ce dernier. La DES est causée par :

- ✓ Frottement (la tribo-électricité)
- ✓ Contact (transfert direct de charges)
- ✓ Influence (par champ électrique)
- ✓ Ionisation (émission d'ions sous haute tension)
- ✓ Balloélectricité (agitation de particules dans un gaz).

Les décharges électrostatiques ont des effets très dangereux et couteux pour les industries. Le corps humain est l'un des principaux générateurs de DES ; il possède une capacité d'environ 200 pF par rapport à l'environnement. Lors d'un déplacement, sous des conditions bien définies (l'humidité de l'air, la nature du revêtement de sol, la nature des semelles de chaussures), une personne peut se charger à plusieurs kilovolts, cette tension peut atteindre une valeur de 20 kV voire plus. Le corps humain peut être modélisé à l'aide de sa capacité par rapport à la masse, sa résistance lors de la décharge, et la différence de potentiel avant la décharge (Fig. 3.7).

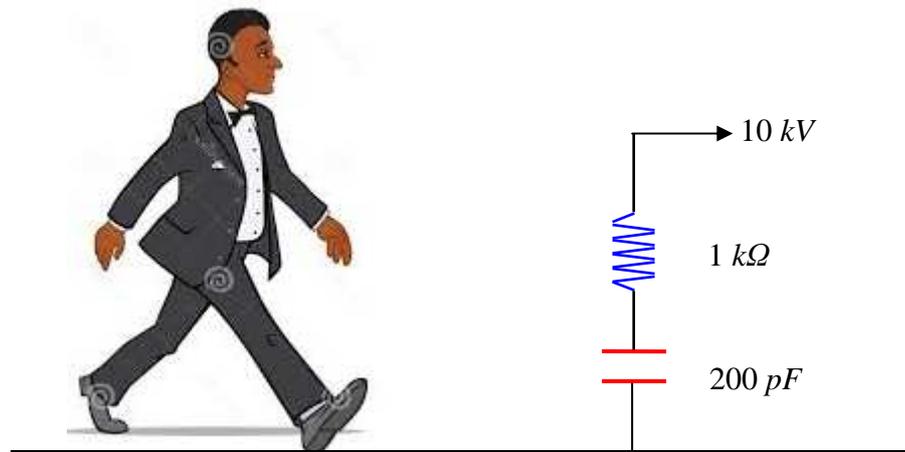


Figure 3.7 Schéma équivalent typique du corps humain pour une DES [11].

La forme d'onde typique d'un courant généré par une DES est donnée par la figure (3.8). Cette onde courant est caractérisée par une amplitude maximale de 10 A, une constante du temps de décharge d'environ 200 ns, et un temps de montée de 1 ns.

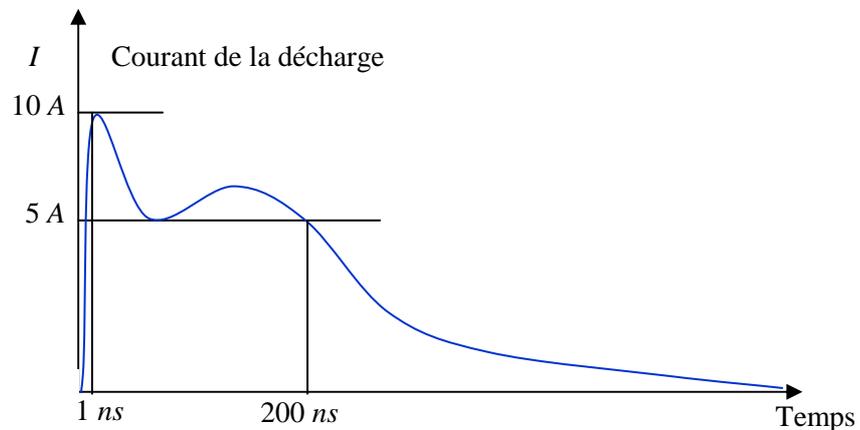


Figure 3.8 Forme d'onde d'une DES typique [11,16,17].

✚ Les manœuvres en haute tension

Lors d'une manœuvre sur un disjoncteur ou contacteur à SF₆ (hexafluorure de soufre) placé dans un réseau HT, les amplitudes maximales des courants impulsionnels dépassent 100 A avec un temps de montée (temps de front) inférieure à 1 ns. Il est à noter que dans le cas d'erreur d'ouverture ou fermeture d'un sectionneur sous tension, l'arc entre les électrodes du sectionneur dure plusieurs secondes. Ce type de perturbations caractérisé par leur haute fréquence a des effets indésirables pour les dispositifs et les appareils placés dans son voisin environnement.

III.2.2.2 Perturbations E.M HF en mode rayonné (rayonnement)

❖ Les appareils industriels, scientifiques et médicaux (ISM)

Ce sont des équipements qui utilisent des émetteurs radioélectriques de puissance pour céder de la chaleur dans les matériaux. La puissance d'émission de ces machines peut dépasser 100 kW. La gamme de leur fréquence est entre 1 MHz et 3 GHz. Avec cette grande puissance et ces niveaux de fréquence, des signaux parasites indésirables peuvent être rayonnés et perturber ainsi le fonctionnement de tout système sensible voisin.

❖ Les émetteurs hertziens (radioélectriques)

La puissance moyenne d'émission des émetteurs radioélectriques est comprise entre quelques milliwatts jusqu'à plusieurs MW. La relation ci-dessous exprime le champ électrique rayonné par un émetteur radio :

$$E = \frac{(\sqrt{30 P G})}{D} \quad (3.1)$$

Avec :

- E : est l'intensité du champ électrique (V/m).
- P : est la puissance rayonnée par l'émetteur radio (W).
- G : est le gain numérique de la puissance de l'antenne.
- D : est la distance entre l'antenne et le point de mesure (m).

❖ Les armes micro-ondes

Les armes HPM (High Power Micro-waves) sont des nouvelles armes qui utilisent un émetteur hyperfréquence puissant et une antenne directive. L'effet de ces systèmes caractérisés par leur puissance destructrice (de l'ordre de 1 – 10 GW) peut atteindre tous les systèmes sensibles qui se trouvent même à une distance de 10 km. Leur gamme de fréquence est comprise entre 1 et 10 GHz.

❖ Perturbations transitoires HF

🚧 Les décharges électrostatiques

L'injection d'un courant par une DES sur une masse provoque le rayonnement d'un champ électromagnétique intense avec une intensité dont la valeur est environ 10 A/m (3000 V/m). Aussi, en l'absence d'une bonne protection, les effets de ces champs électromagnétiques ne sont pas négligeables.

✚ Les arcs dans l'air

Les arcs entre pantographes et caténaies d'une ligne ferroviaire peuvent gêner la réception radioélectrique locale. Les postes à souder, générant des arcs électriques, peuvent aussi perturber les équipements mal câblés ou mal filtrés dans un rayon de quelques mètres.

✚ L'IEMN « Impulsion Electromagnétique d'origine Nucléaire »

Les crêtes de courant et de la différence de potentiel collectées par les structures longues suite à une impulsion électromagnétique d'origine nucléaire IEMN de haute altitude sont de 10 kA et 4 MV dans les cas extrêmes. La tension induite dans une petite boucle par le champ magnétique peut atteindre 50 kV/m.

III.3 Exercices d'application sur les sources de perturbation [11]

a) Application sur le Flicker

Question : Un réseau BT est alimenté par un transformateur triphasé de $P_n = 250 \text{ kVA}$. Sa puissance de court-circuit est $P_{cc} = 5 \%$ inductive. On enclenche un moteur asynchrone de 10 kVA, qui durant son démarrage consomme un courant inductif de $5 I_n$. Quelle est l'amplitude du Flicker générée ?

Réponse

Une P_{cc} de 5 % signifie que si l'on consomme une puissance inductive nominale ($= P_n$), la tension chute de 5 %.

La consommation du moteur au démarrage est de $5 I_n$ soit une puissance réactive :

$$P_r = 50 \text{ kVA}$$

L'amplitude du Flicker est donc :

$$\begin{aligned} \Delta U / U &= P_{cc} \cdot P_r / P_n & (3.2) \\ &= 0.05 \times 50 / 250 = 0.01 \end{aligned}$$

Le Flicker est donc de 1 % de la tension nominale.

b) Application sur la DES

Question : Soit une décharge électrostatique d'un individu mettant en jeu une capacité de 150 pF, une résistance de 330 Ω et une tension de charge 8 kV. Quelle est la charge stockée, l'énergie disponible et la tension développée le long d'une piste de 3 cm supportant le courant DES ?

Réponse

La charge stockée vaut :

$$\begin{aligned} Q &= C \cdot U & (3.3) \\ &= 150 \times 10^{-12} \times 8000 = 1.2 \mu\text{C} \end{aligned}$$

L'énergie totale stockée vaut :

$$W = 0.5 C U^2 \quad (3.4)$$

$$= 0.5 \times 150 \times 10^{-12} \times 8000^2 = 4.8 \text{ mJ}$$

L'énergie maximale récupérable qui vaut la moitié de cette valeur, n'est donc pas importante.

Le courant crête normalisé est $\Delta I \approx 30 \text{ A}$ (voisin de $8000 / 330$). Le temps de montée de ce courant est $\Delta t \approx 1 \text{ ns}$.

L'inductance d'une piste de 3 cm vaut : $L \approx 30 \text{ nH}$. La tension à ses bornes est donc :

$$\begin{aligned} U &= L \cdot \Delta I / \Delta t \text{ (3.5)} \\ &= 30 \times 10^{-9} \times 30 / (1 \times 10^{-9}) \approx 900 \text{ V} \end{aligned}$$

On voit donc qu'une impulsion de faible énergie mais rapide peut générer une sévère surtension.

III.4 Conclusion

Tous les systèmes électriques, électroniques, ou de télécommunication peuvent être victimes de perturbations électromagnétiques à hautes et à basses fréquences se propageant en mode conduit (sur un support physique tel qu'un câble électrique) ou en mode rayonné dans l'air. Nous avons vu dans ce chapitre que ces perturbations engendrent des effets néfastes sur les appareillages et installations électriques se traduisant par un dysfonctionnement ou un arrêt total de ces derniers ce qui peut être préjudiciable pour la sécurité le site industriel dans lequel on retrouve ce type de matériel en plus des dégâts économiques accompagnant ces incidents. Le chapitre suivant traitera de l'aspect réglementaire et juridique relatif à la CEM puisqu'on abordera l'aspect normatif de cette discipline.

Chapitre IV: Normalisation en CEM

IV.1 Introduction

Comme toute autre discipline, la CEM est régie par une législation et des normes qui doivent être respectés lors de la conception et la production de différents produits électriques et/ou électroniques. Dans le domaine civil les premières normes en CEM ont vu le jour juste avant la deuxième guerre mondiale (années 30). Elles ont été établies par le comité international spécial des perturbations radioélectrique (CISPR) qui en fait est un sous-comité de la commission électrotechnique internationale (CEI). Cette réglementation de la CISPR avait pour objectif de limiter le pouvoir émissif des différents appareils pour garantir une bonne transmission et une bonne réception des ondes radios. Dans le domaine militaire les textes normatifs sur la CEM sont rassemblés dans la GAM EG 13 en France, et aux Etas Unis ils sont rassemblés dans la gamme MIL-STD.

IV.2 Directive Européenne sur la CEM [1,8,11,30,33,34]

A cause du développement rapide de la CEM, le conseil des communautés Européennes a publié en date du trois mai 1989 une directive européenne relative au rapprochement des législations des états membres concernant la CEM.

C'est ainsi qu'à partir du premier janvier 1996, la directive Européenne N° 89/366/CEE, impose à tous produits électriques et électroniques mis en vente au sein de l'union Européenne, l'apposition du marquage (CE) qui apporte la garantie de la conformité de l'appareil face aux exigences d'immunité et d'émission électromagnétiques. Donc, selon cette directive tous les appareils susceptibles de générer des perturbations électromagnétiques ou ceux dont le fonctionnement peut être affecté par ce genre de perturbations ne peuvent être commercialisés dans les pays membres de la CEE (Communauté Economique Européenne).

Cette directive a été abrogée à partir du vingt juillet 2009 par la directive N°2004/108/CE qui reprend les deux exigences essentielles pour tout équipement ou système mis en marché à savoir:

1. les appareils doivent bénéficier d'une immunité intrinsèque leur permettant de fonctionner dans leurs environnement conformément à leurs destination ;
2. les appareils ne doivent introduire aucune gêne pour qui que soit dans leur environnement. Les appareils radio et de communication ainsi que les appareils électriques et électroniques doivent donc pouvoir fonctionner conformément à leur destination.

IV.3 Type de normes CEM [1,8,17,30,33,34]

Une norme est un recueil de règles, de descriptions, de méthodologies qu'un constructeur peut utiliser comme référence lorsqu'il définit et test à un de ses produits. Il existe deux principales catégories de normes CEM :

- ✓ Les normes qui définissent les niveaux tolérés d'émission conduite ou rayonnée ;
- ✓ Les normes qui définissent la susceptibilité électromagnétique d'un équipement, appareil ou système, à savoir sa tolérance aux agressions électromagnétique.

On distingue trois types de normes CEM à savoir :

- ✚ Les normes fondamentales ;
- ✚ Les normes génériques ;
- ✚ Les normes de produits ou de famille produits.

IV.3.1 Normes fondamentales

Ce sont des normes ou guides définissant de manière générale les prescriptions relatives à la « CEM » à savoir :

- Les phénomènes électromagnétiques concernés ;
- Les procédures de tests ;
- Les caractéristiques des dispositifs de mesures et des générateurs ;
- Les niveaux de compatibilité et limites spécifiques recommandées ;
- Les critères de dysfonctionnement.

Elles sont applicables à tous les produits et servent de référence, notamment aux comités devant élaborer des normes spécifiques (normes génériques et les normes de produits). Les normes fondamentales n'ont pas été harmonisées au niveau Européen.

Exemple : CEI 61000, norme de référence en CEM.

IV.3.2 Normes génériques

Ces normes définissent les exigences essentielles en termes de niveau à tenir par type d'essai. Elles spécifient les limites d'émission et d'immunité applicables aux appareils électriques et électroniques.

En l'absence de norme de produits ou famille de produits, elles s'appliquent à tout produit installé dans un environnement défini.

Ces normes s'appliquent soit au secteur « résidentiel, commercial, industrie légère » soit à l'environnement industriel ; elles précisent notamment :

- La nature des essais et tests ;

- Les niveaux spécifiques à respecter ;
- Les critères d'aptitudes

Exemples :

En 50 081 partie 1 : 1992

Titre : Compatibilité électromagnétique-norme générique émission- 1^{ère} partie : résidentiel, commercial et industrie légère.

Domaine d'application : Tous les appareils destinés à être utilisés dans un environnement résidentiel, commercial et dans l'industrie légère, et pour lesquels aucune norme spécifique de produits ou de famille produits sur l'émission n'existe.

En 50 082 partie 1 : 1997

Titre : Compatibilité électromagnétique-norme générique immunité- 1^{ère} partie : résidentiel, commercial et industrie légère.

Domaine d'application : Tous les appareils destinés à être utilisés dans un environnement résidentiel, commercial et dans l'industrie légère, et pour lesquels aucune norme spécifique de produits ou de famille produits sur l'immunité n'existe.

IV.3.3 Normes de produits ou de famille de produits

Ces normes définissent, pour des produits ou familles de produits donnés, les dispositions constructives, caractéristiques, méthodes et niveaux d'essais applicables.

Lorsque ce type de normes existe, pour un produit donné, la norme produit doit être appliquée. Dans le cas où elle n'existe pas on revient aux normes génériques. Ces normes de produits font appel aux normes fondamentales.

Ces normes stipulent :

- Les essais et tests à réaliser ;
- Les niveaux spécifiques à respecter ;
- Les critères de dysfonctionnement éventuels.

Exemples

En 55011 : ISM (appareils industriels scientifiques et médicaux).

Relatives aux limites et méthodes de mesures des caractéristiques de perturbations radioélectriques.

En 55014 : Appareils électrodomestiques.

Relatives aux limites et méthodes de mesures des caractéristiques de perturbations radioélectriques.

En 55015 : Appareils électriques d'éclairage et analogues.

Relatives aux limites et méthodes de mesures des caractéristiques de perturbations radioélectriques.

En 55020 : récepteurs de radiodiffusion et équipements associés.

Exigences sur l'immunité.

En 55022 : ATI (appareil de traitement de l'information).

Relatives aux limites et méthodes de mesures des caractéristiques de perturbations radioélectriques.

En 55104 : Exigences en immunité des appareils et outils domestiques.

IV.4 Les organismes normalisateurs [17]

Les organismes qui fixent les normes de CEM à respecter sont les suivant:

-  **CISPR** : Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques,
-  **CEI** : Commission Electrotechnique Internationale (installée à Genève-Suisse),
-  **CENELEC** : Comité Européen de Normalisation Electrotechnique (installé à Bruxelles-Belgique),

Les références des documents commencent par les lettres EN, ENV, HD...

-  **UTE** : Union Technique de l'Electricité en France. C'est le membre français du CENELEC. Les références des documents UTE commencent par les lettres NF...

IV.4.1 Les publications CISPR

Comme déjà mentionné dans la section (IV.2), les premières publications CISPR ont été éditées à partir de 1934. Elles visent la protection de la transmission et de la réception des ondes radioélectriques. Elles définissent en particulier les conditions d'essai et limites d'émission des produits électriques et électroniques.

Quelques exemples de publications de la CISPR :

CISPR 11 – 1990 :

Limites et méthodes de mesure des caractéristiques de perturbations électromagnétiques des appareils industriels, scientifiques et médicaux(ISM) à fréquence radioélectrique.

CISPR 14 – 1993 :

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 portatifs électriques et par les appareils électriques analogues.

CISPR 16 – 1993 :

Spécifications des méthodes et des appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques.

1ère partie : appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques.

IV.4.2 Les publications CEI

a- Normes de la série CEI 801-X

Les normes de la série CEI 801-X sont apparues au début des années 1970. Elles concernent la CEM des matériels de mesure et de commande dans les processus industriels. Elles s'adressent aux constructeurs et utilisateurs de ces types de matériels. Ces normes sont actuellement en cours de remplacement par les normes de la série CEI 1000-4-X.

b- Normes de la série CEI 1000-X-X

Les publications CEI 1000-X-X, entièrement dédiées à la CEM regroupent depuis 1991 l'ensemble des normes CEI relatives à ce domaine.

IV.4.3 Les publications CENELEC

Les publications EN ou ENV déclinent les normes applicables dans le cadre de l'espace économique Européen.

Elles sont actuellement en cours d'harmonisation vis à vis de la Directive «CEM». Elles sont généralement des reproductions des normes internationales existantes.

Exemples :

EN 55011 reprise de la CISPR 11

EN 61000-4-1 reprise de la CEI 1000-4-1

IV.5 Unités spécifiques aux normes CEM

En basses fréquences BF :

Les unités utilisées dans la gamme BF sont :

- Pour la tension : Volt
- Pour le courant : Ampère
- Pour la puissance : Watt ou Var

En radiofréquence (HF):

Pour les radiofréquences (HF dont la fréquence est supérieur à 1MHz) l'unité universelle utilisée est le *décibel (dB)*. Cette dernière est applicable aux grandeurs suivantes:

- Tension
- Courant
- Puissance
- Champ électrique
- Champ magnétique

IV.6 Conclusion

Les normes CEM ont pour rôle d'assurer la conformité des produits électriques et électroniques par rapport aux exigences de la CEM. Dans ce qui suit (cinquième chapitre), nous allons présenter les différentes techniques de mesure utilisées en CEM.

Chapitre V : Mesures en CEM

V.1 Introduction

Il est tout aussi important de spécifier clairement comment mesurer les émissions du produit en essayant de vérifier la conformité avec les limites que de spécifier clairement les limites. La mesure des émissions rayonnées et conduites est un sujet complexe. Il est juste de dire que si les procédures de mesure ne sont pas clairement définies mais sont laissées à l'interprétation du personnel de mesure, on peut obtenir différents ensembles de données mesurées sur différents sites de mesure pour le même produit. Chaque norme fixant des limites aux émissions rayonnées et conduites définit clairement la façon dont les données doivent être mesurées. Cela comprend la procédure d'essai, l'équipement d'essai, la bande passante et les antennes d'essai. Donc, la question qui se pose est comment on peut effectuer des mesures de perturbations en conduction et en rayonnement ? C'est ce que nous allons essayer de voir dans ce cinquième chapitre.

V.2 Mesures des perturbations conduites [1,4,8,9,21,29,30,31,33,34]

Ce genre de mesure est effectué pour caractériser les perturbations créées par un objet ou un appareil en test, et qui sont susceptibles d'être conduites sur les fils d'alimentation ou sur les câbles d'interconnexion avec d'autres appareils.

Pour réaliser une telle mesure, dans la plage de fréquences s'étalant de 150kHz à 30MHz , l'appareil sous essai doit être connecté soit à un réseau stabilisateur d'impédance de ligne (**RSIL**) ou **LISN** « Line Impedance Stabilization Network ». Pour les fréquences allant de 30MHz à 300MHz , on utilise une *pince absorbante*.

V.2.1 Mesures à l'aide du RSIL

V.2.1.1 Principe de mesure

Les tests doivent être réalisés au-dessus d'une surface conductrice reliée à son tour au plan de masse du banc de mesure. Les distances entre les différents dispositifs de mesure ainsi que les longueurs des différentes connexions sont spécifiées dans la norme.

La figure (5.1) représente les dispositifs nécessaires pour effectuer les mesures des perturbations conduites ainsi que leur câblage. Ces dispositifs comprennent le réseau d'alimentation, le RSIL, l'appareil en essai, l'analyseur de spectre, la charge ainsi que le plan de masse. Il est intéressant de noter que les signaux parasites captés à l'aide du RSIL sont envoyés à un analyseur de spectre pour extraire les différentes informations (fréquence, amplitude...) qui caractérisent ces signaux.

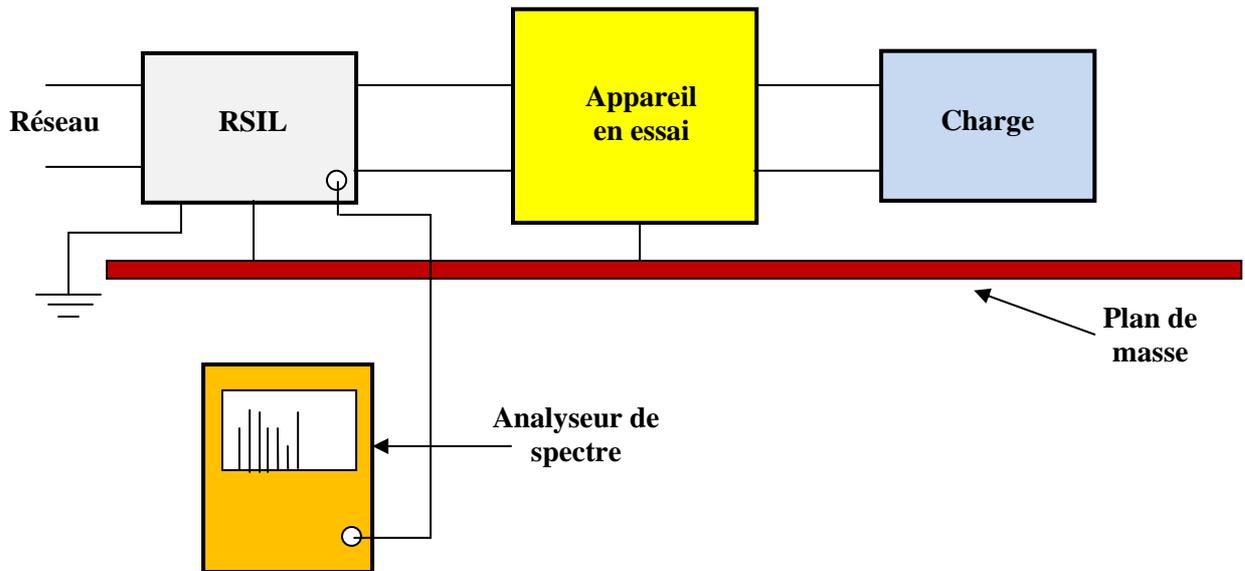


Figure 5.1 Dispositifs utilisés dans les mesures des perturbations conduites [1].

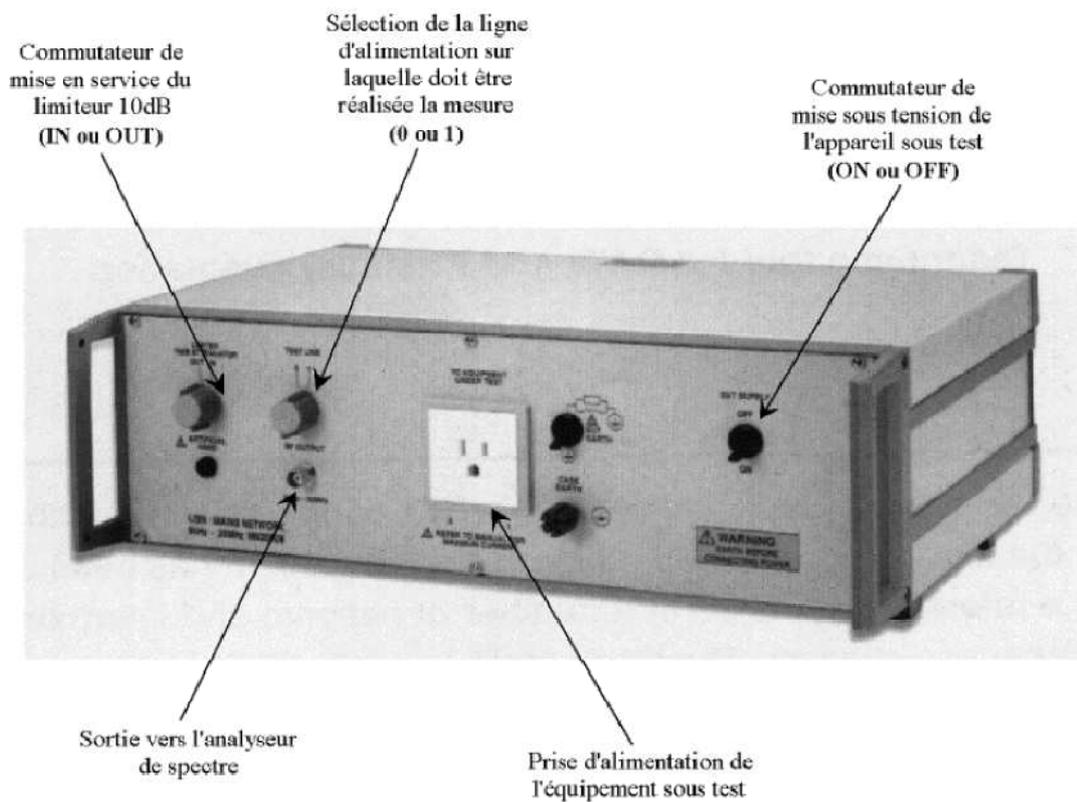


Figure 5.2 Présentation du RSIL [35]

La figure (5.2) présente une photo d'un RSIL, avec illustration des différents éléments appartenant sur sa face avant.

V.2.1.1 Exemples

✓ Mesure de perturbations conduites émises sur des conducteurs d'alimentation

Cet exemple est illustré par la figure (5.3). Le but principal est de mesurer les courants parasites qui passent à travers les conducteurs d'alimentation du produit sous test (source de perturbation).

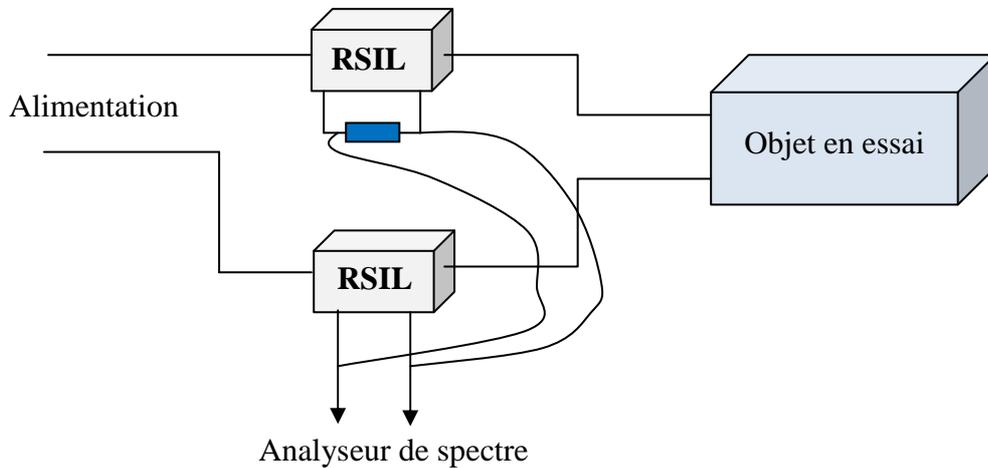


Figure 5.3 Mesure de perturbations conduites émises sur des conducteurs d'alimentation [1].

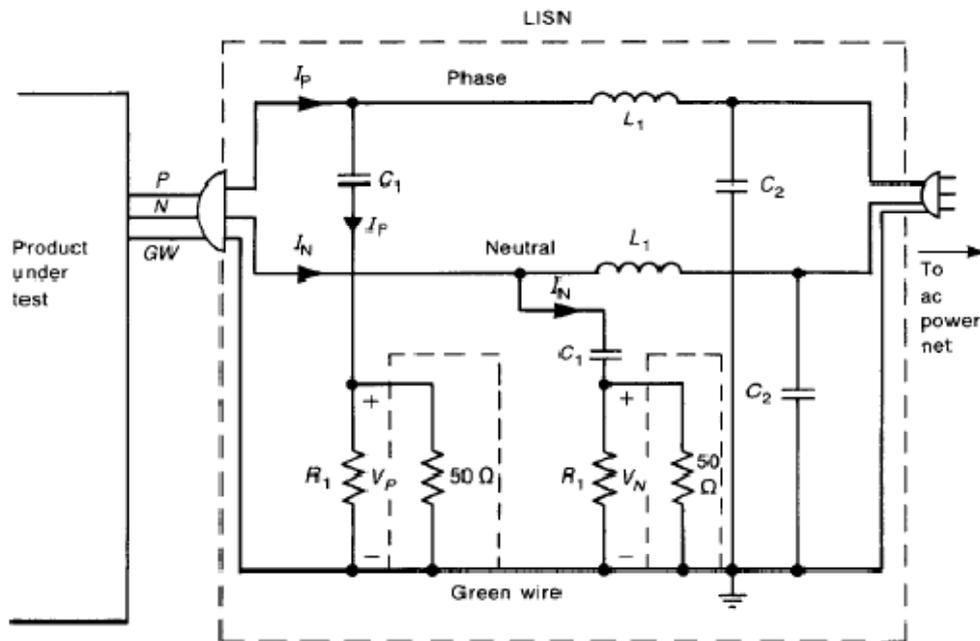


Figure 5.4 Schéma électrique d'un RSIL [4]

Pour obtenir les courants parasites circulant sur le conducteur phase et le conducteur neutre d'alimentation, on fait raccorder le RSIL au réseau d'alimentation d'un côté et au produit sous test d'un autre côté comme l'illustre la figure (5.4). Donc, le rôle du RSIL est de stabiliser l'impédance entre le conducteur phase (P) et le conducteur de la mise à la terre (GW), ainsi que l'impédance entre le conducteur neutre (N) et celui de la mise à la terre (GW) pour avoir une valeur de 50 Ω . Les

résistances 50Ω représentent l'impédance standard d'entrée vers l'analyseur de spectre ou vers le récepteur utilisé pour mesurer la tension phase V_P et la tension neutre V_N . Maintenant, il est clair que les tensions mesurées sont reliées directement au courant parasites I_P et I_N qui passent sur les conducteurs phase et neutre par les équations suivantes:

$$I_P = (1/50) V_P \quad (5.1)$$

$$I_N = (1/50) V_N \quad (5.2)$$

✓ **Mesure de perturbations conduites émises sur des conducteurs d'interconnexion**

Dans cette manipulation le même principe de mesure (présenté dans le paragraphe ci-avant) est utilisé pour avoir les deux courants parasites qui passent par les conducteurs d'interconnexion, sauf que dans le présent cas le RSIL est raccordé entre le produit sous (source de perturbation) test et la charge (utilisation) comme l'illustre la figure (5.5).

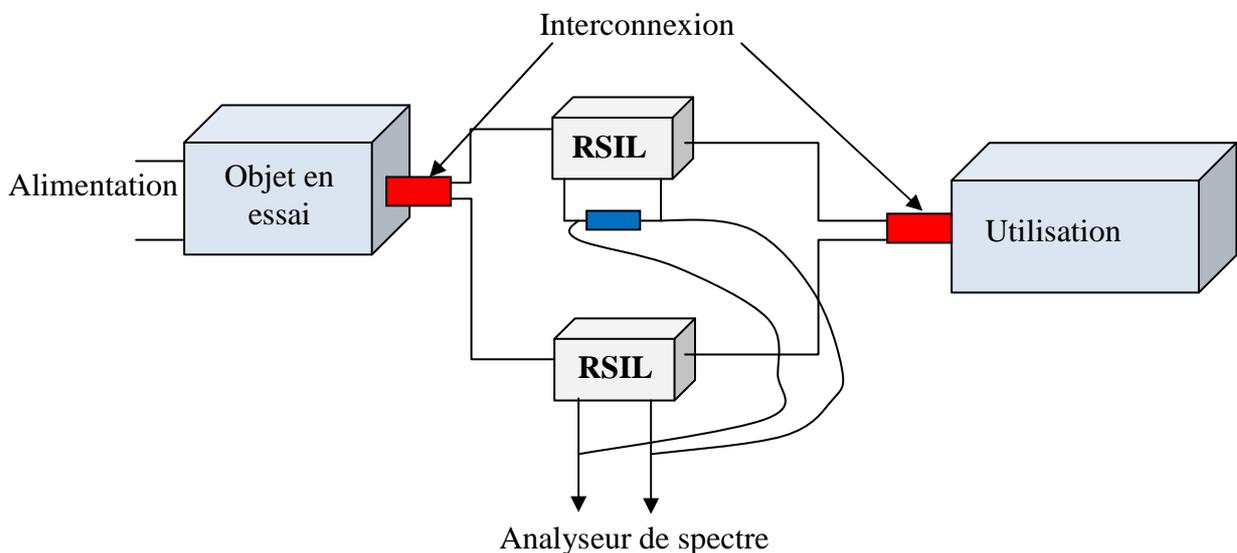


Figure 5.5 Mesure de perturbations conduites émises sur des conducteurs d'interconnexion [1].

b.3 Mesure de perturbations conduites en mode commun ou en mode différentiel

Dans ce cas il faut utiliser deux RSIL. L'analyseur de spectre ou le récepteur utilisé pour mesurer les tensions permet d'avoir les tensions V_{RSIL1} et V_{RSIL2} (Fig. 5.6). Ces deux tensions sont reliées au courant en mode commun I_{mc} , et au courant en mode différentiel I_{md} par les relations suivantes :

$$V_{RSIL1} = - 50 (I_{mc} + I_{md} / 2) \quad (5.3)$$

$$V_{RSIL2} = + 50 (I_{md} - I_{mc} / 2) \quad (5.4)$$

Donc, nous avons un système de deux équations avec deux inconnues. Par la résolution de ce simple système d'équations nous obtenons les courants parasites du au couplage en mode commun et en mode différentiel.

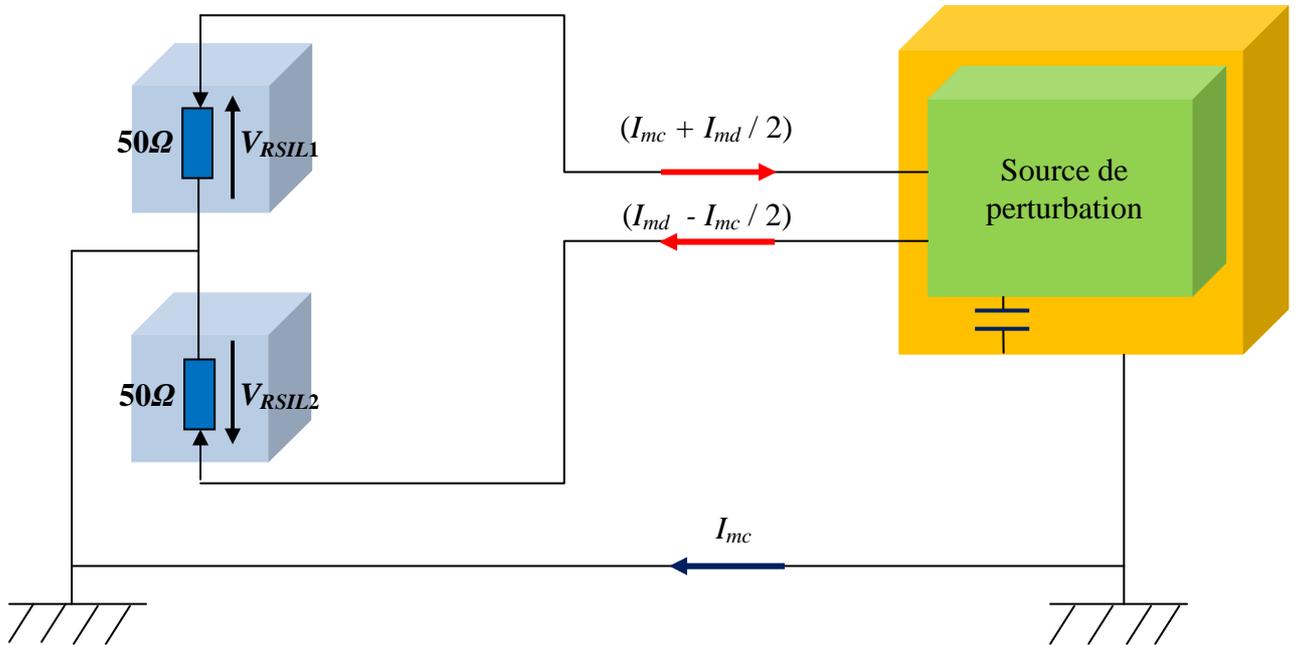


Figure 5.6 Mesure de perturbations conduites en *mode commun* ou en *mode différentiel* [1].

V.3 Mesures des perturbations rayonnées [1,4,8,9,21,22, 29,30,31,33,34]

Il y a deux types d'appareil qui sont utilisées pour mesurer le champ rayonné par une source à savoir :

- **Les récepteurs de mesure :** ce sont des microvoltmètres sélectifs fonctionnant comme des récepteurs radio, leur rôle est de mesurer la tension ou la puissance radiofréquence à leur entrée.
- **L'analyseur de spectre :** son rôle est d'extraire les informations contenues dans un signal pour le représenter dans le domaine fréquentiel.

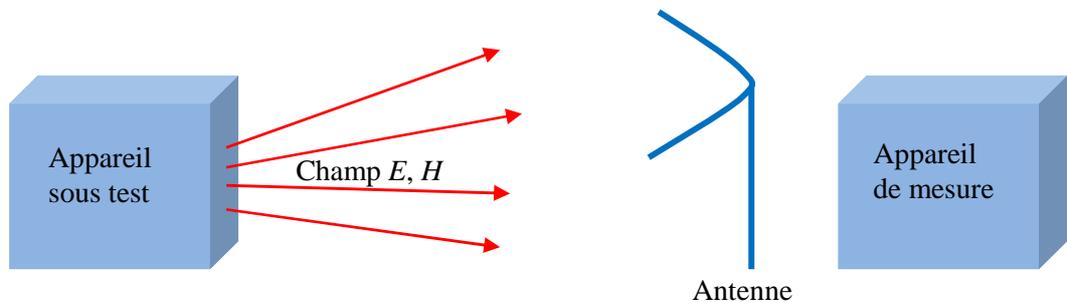


Figure 5.7 Illustration sur l'utilisation des antennes et des appareils de mesure pour mesurer les perturbations rayonnées [1,4,21].

Dans la figure (5.7) on peut distinguer trois différents dispositifs. Le premier dispositif est l'appareil sous test dont le rôle est la génération du champ électromagnétique (champ perturbateur). Le deuxième dispositif est l'antenne qui est utilisée pour coupler le champ à l'entrée du récepteur de mesure (noté sur le schéma « appareil de mesure ». Ce récepteur (qui constitue donc le troisième dispositif) est un appareil de mesure utilisé pour mesurer la tension ou la puissance radiofréquence. Par ailleurs, sur les figures (5.8, 5.9 et 5.10), nous présentons des photographies de trois types d'antennes couramment utilisées dans la mesure de champ EM rayonné à savoir :

- Les antennes bi-coniques ;
- Les antennes log-périodiques ;
- Les antennes bilog.



Figure 5.8 Antennes bi-coniques [22]



Figure 5.9 Antennes log-périodiques [22]

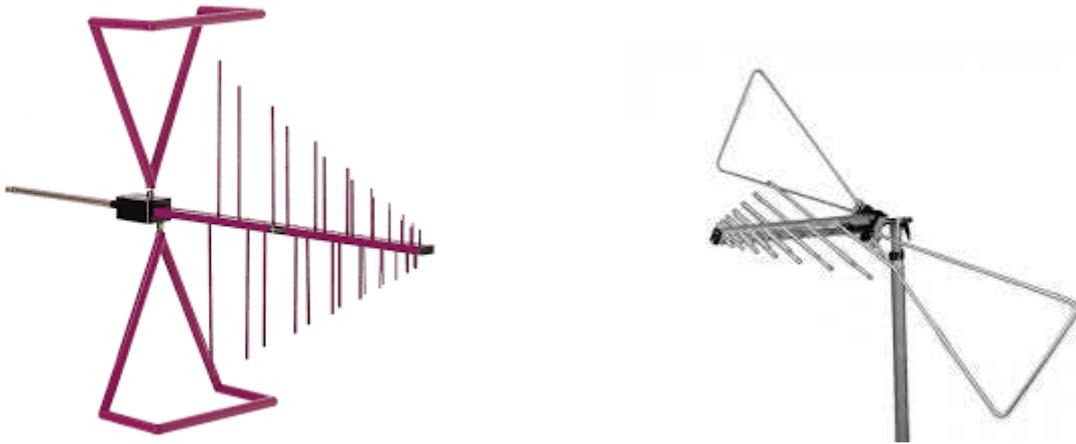


Figure 5.10 Antennes bilog [22]

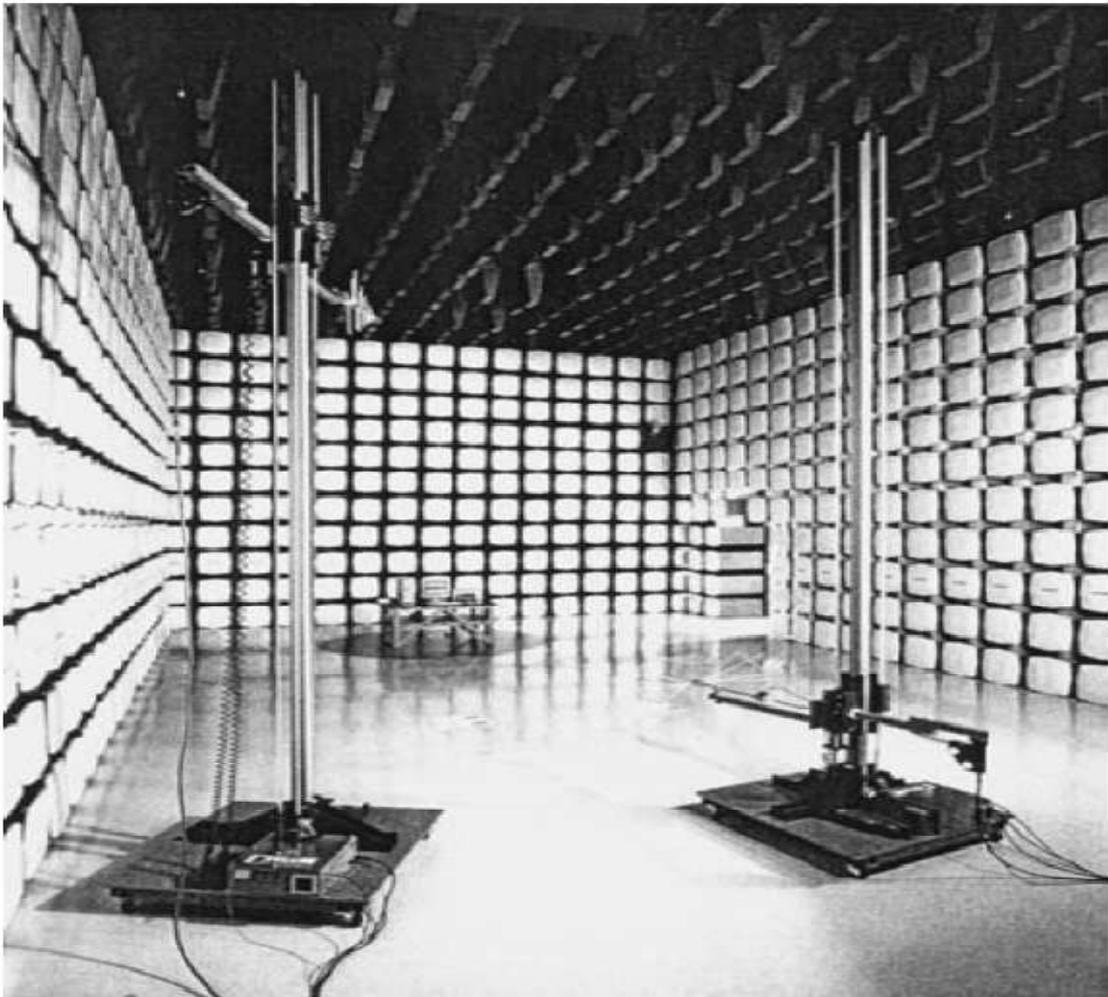


Figure 5.11 Chambre anéchoïque [4].

Enfin, dans la figure (5.11), nous présentons la photographie d'une chambre anéchoïque utilisée pour mesurer les perturbations rayonnées d'un dispositif digital. Il est à noter que ces chambres sont utilisées aussi pour tester le matériel ayant des grands volumes tel que les voitures et engins militaires. Ainsi, ces chambres sont exploitées pour tester l'émissivité des différents dispositifs et appareils et aussi pour tester l'immunité de ces derniers face à différentes agressions

V.4 Conclusion

L'exposé des différentes techniques utilisées pour la mesure des perturbations électromagnétiques en CEM nous amène à conclure que ces techniques se différencient essentiellement par la nature du couplage existant entre la source de perturbations EM et la victime à savoir le couplage en mode conduit ou en mode rayonné. L'étude des techniques de mesures associées à ces deux modes a permis de voir le type de matériel utilisé et le principe de mesure à mettre en œuvre pour caractériser les différentes perturbations.

Dans le prochain et dernier chapitre, nous abordons le principe de la protection contre les différentes perturbations EM.

Chapitre VI : Protection contre les perturbations électromagnétiques

VI.1 Introduction

La finalité de toute étude CEM est d'arriver à protéger toute victime (système, dispositif ou appareil) vis-à-vis des effets de perturbations EM générées par des sources présentes dans l'environnement de cette dernière.

La protection contre les perturbations EM peut être réalisée par action sur la source en réduisant son émissivité, par durcissement de la victime, ou par action sur le couplage d'une manière à le rendre le plus inefficace possible. Dans ce qui suit, nous allons, dans un premier temps, décrire les solutions de protection contre les perturbations présentées dans la section (II.3) du deuxième chapitre. Nous abordons ensuite, les solutions de protection vis-à-vis des perturbations harmoniques (pollution harmonique). Le chapitre se termine par la présentation des solutions de protection contre les effets de la foudre.

VI.2 Action sur le couplage : Protection par réduction du couplage

VI.2.1 Protection contre l'effet du couplage par impédance commune [11,8]

Pour réduire l'effet de ce couplage il faut multiplier les liaisons entre les masses afin d'améliorer leur équipotentialité, ce qui permet de limiter la circulation du courant de mode commun. De plus, pour résoudre les problèmes de mode commun en basse fréquence, il suffit d'utiliser un isolement galvanique ou un montage différentiel bien équilibré.

VI.2.2 Protection contre le couplage carte à châssis [11,8]

Pour ce type de couplage, l'utilisation d'un écran en champ électrique appelé aussi écran électrostatique sous la forme d'un feuillard conducteur (Fig. 6.1) est efficace pour intercepter le courant capacitif entre la carte et la masse. Pour augmenter l'efficacité de cette solution, l'écran doit être relié au « 0V » au plus court, car un écran non relié peut favoriser le couplage capacitif. Ce point de liaison d'écran au « 0V » devrait être placé au voisinage du point d'entrée du courant parasite, pour ne pas lui permettre de perturber un autre circuit.

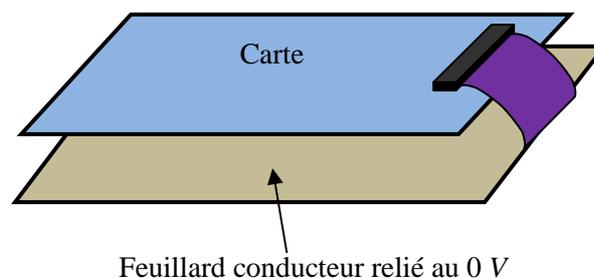


Figure 6.1 Protection par écran électrostatique [11].

VI.2.3 Protection contre la diaphonie inductive [11,8,31]

a- En mode différentiel

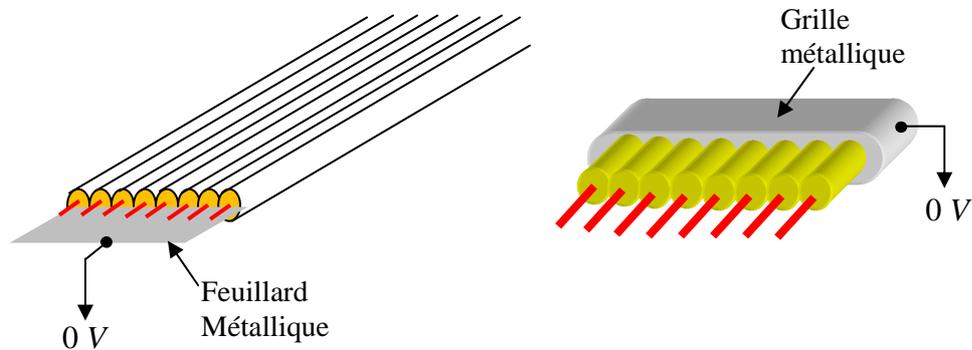


Figure 6.2 Protection d'une nappe de conducteurs en utilisant le blindage par grille ou feuillard métallique [11,8].

Pour les câbles en nappe, l'effet du couplage par diaphonie inductive en mode différentiel peut être réduit en réalisant un blindage de ces câbles soit par une grille ou un feuillard métallique relié au « 0V » (figure 6.2).

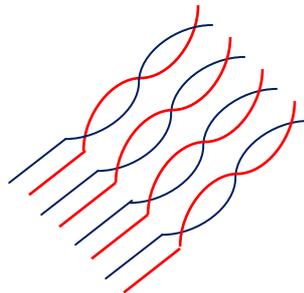


Figure 6.3 Câbles en paires torsadées pour réduire la diaphonie en mode différentiel [11,8].

Une autre technique basée sur les paires de câble torsadées constitue une solution efficace pour réduire l'effet de la diaphonie inductive en mode différentiel comme illustré sur la figure (6.3).

b- En mode commun

Pour rendre la diaphonie en mode commun la plus inefficace possible on fait appel en général à deux solutions à savoir :

- ✓ Eloigner les conducteurs coupables en mode commun de 30cm des câbles sensibles quand le plan de masse est proche (< 10 cm), et d' 1m quand il est éloigné.
- ✓ Blinder, filtrer ou ajouter les tores de ferrite sur les câbles sensibles.

VI.2.4 Protection contre la diaphonie capacitive [11,8]

a- En mode différentiel

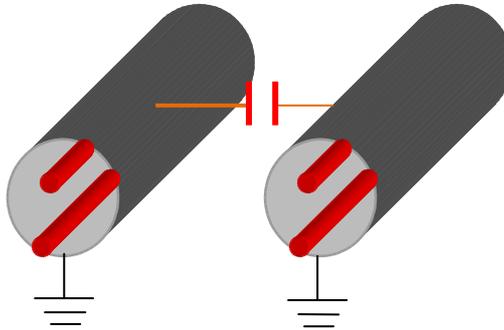


Figure 6.4 Réduction du couplage par diaphonie capacitive à l'aide d'écrans [11]

L'utilisation d'écrans conducteurs ou par un simple feuilard plastique rendu conducteur par aluminage, est efficace contre la diaphonie capacitive (figure 6.4). Il est possible de blinder au choix la paire des câbles coupables ou la paire victime, ou, mieux encore, les deux.

b- En mode commun

Dans ce cas on adopte les mêmes recommandations citées auparavant pour la diaphonie inductive en mode commun. De plus, il faut séparer les câbles de mesure des autres câbles lors du câblage initial des systèmes (car il serait difficile de le faire une fois l'installation réalisée). Il est recommandé aussi séparer les câbles en trois familles : câbles d'énergie, câbles de contrôle-commande et câbles signaux.

VI.2.5 Protection contre le coulage champ à fil [11,8,31]

A- En basse fréquence

En basse fréquence, il est facile réduire l'effet du champ électrique sur les câbles victimes en utilisant les méthodes suivantes :

- ✓ Protection par un écran de câble quelconque ;
- ✓ Protection par un simple feuilard aluminium avec drain longitudinal ;
- ✓ Protection par élastomère conducteur.

Il est à noter que le raccordement de l'écran du câble à la masse peut être effectué seulement du côté réception. On peut aussi, dans ce cas, raccorder directement l'écran au « 0 » V électronique au lieu du châssis pour obtenir de bons résultats en termes de protection contre les effets du champ électrique.

B- En haute fréquence

Il n'existe que deux méthodes pour réduire le couplage d'un champ à un fil en haute fréquence :

- ✓ **La méthode consistant à plaquer** le câble victime de bout en bout très près d'un conducteur de masse afin de réduire *les effets produits*.
- ✓ **La méthode des blindages globaux** : Il s'agit d'utiliser plusieurs enveloppes concentriques, chacune apportant une contribution au blindage. Il faut noter, cependant que cette méthode de protection est très coûteuse. Aussi, afin de minimiser le coût de cette technique de protection, on préfère généralement tolérer la collecte de courants de mode commun par les câbles puis on les écoule à la masse mécanique en entrée de chaque équipement. Pour réaliser cet objectif on peut :

- ✚ Blinder les câbles avec reprise périphérique des écrans de chaque côté ;
- ✚ Filtrer chaque conducteur en traversée de paroi à la masse mécanique.

A noter que le blindage et le filtrage correct d'un équipement exige l'utilisation d'une **tôle de référence de potentiel « TRP »** en entrée de chaque boîte.

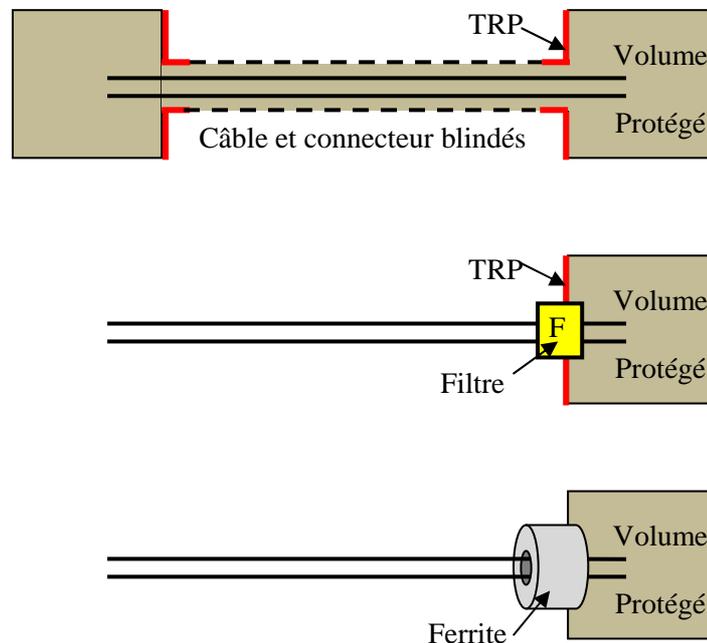


Figure 6.5 Illustration des trois techniques de protection contre les effets perturbateurs de mode commun à haute fréquence [11].

La figure (6.5) illustre le principe de la protection contre les effets perturbateurs de mode commun en haute fréquence qui s'appuie sur :

- ✓ Le blindage des câbles et des connecteurs avec la présence de la TRP
- ✓ Le filtrage à la TRP
- ✓ L'utilisation d'un tore de ferrite sur les câbles.

VI.2.6 Protection contre les effets du couplage champ à boucle [11,8]

En haute fréquence il n'y a pas de différence entre le couplage champ à câble et le couplage champ à boucle puisque les champs électriques et magnétiques sont liés. Il suffit donc de collecter le courant en mode commun, c'est-à-dire dans la grande boucle de masse entre le câble et le sol.

VI.3 Protection contre la pollution harmonique [15,16,25]

Comme nous avons déjà vu dans le chapitre III, les harmoniques sont responsables de la dégradation de la qualité de l'énergie électrique. Quelles sont alors les méthodes qui permettent d'éviter, ou de réduire les effets néfastes des harmoniques ?

Trois solutions sont possibles à savoir :

- ✓ Les solutions traditionnelles ;
- ✓ Les solutions nouvelles à base de filtrage actif;
- ✓ Les solutions non conventionnelles

VI.3.1 Solutions traditionnelles

Ces solutions se résument dans les actions suivantes :

- **Action au niveau de l'installation électrique** : surdimensionnement ;
- **Action sur le couplage des transformateurs** : utilisation de transformateurs à couplage spécial ;
- **Action sur les convertisseurs d'électronique de puissance** : modification de la topologie des convertisseurs polluants ;
- **Action au niveau du neutre** : injection d'harmoniques dans le neutre ;
- **Action sur la production d'énergie électrique** : compensation de l'énergie réactive ;
- **Filtrage**
- **Installation d'inductance anti-harmonique (LAH).**

A- Action sur le dimensionnement de l'installation

Dans ce cas, les harmoniques ne subissent aucune action curative de la part de l'utilisateur. Les effets néfastes de la pollution harmonique sont à éviter pendant une durée limitée. Pour les installations nouvelles, on procède au surdimensionnement des équipements afin d'assurer leur tenue aux surcharges harmoniques. Dans le cas d'installations existantes, on déclasse les équipements de distribution électrique soumis aux harmoniques (câbles du neutre, transformateur). Cette méthode ne permet pas de tirer profit du potentiel réel de l'installation. Il en résulte un accroissement important du coût de l'installation [36].

B- Action sur le couplage des transformateurs

B.1- Transformateur à secondaire Zig-Zag

Le choix de couplages appropriés des transformateurs permet de limiter la circulation des courants harmoniques. L'utilisation d'un transformateur d'isolement, de rapport 1/1 à couplage triangle-étoile ou triangle-zigzag (Fig. 6.6), empêche la propagation des courants harmoniques de rang 3 et leurs multiples circulant dans le neutre. Ce procédé n'a aucun effet sur les autres rangs harmoniques. Il limite au contraire la puissance disponible de la source et augmente l'impédance de ligne. Il en résulte une augmentation de la distorsion en tension due aux autres rangs harmoniques.

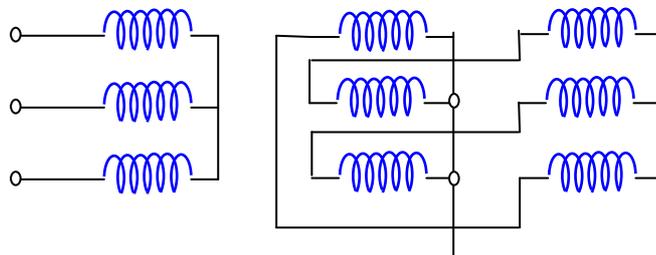


Figure 6.6 Montage Zig-Zag du secondaire du transformateur [23,36].

L'utilisation des transformateurs primaires couplés en étoile (sans neutre) et à secondaires zig-zags est une solution intéressante. Ce couplage permet d'avoir le minimum de distorsion au secondaire. En effet, dans ce cas, les courants harmoniques de rang $3 \cdot h$ ne circulent pas au primaire du transformateur.

B.2- Montage avec autotransformateurs (figure 6.7)

Cette stratégie nécessite l'utilisation des autotransformateurs en bénéficiant de leurs variables rapport de transformations qui permet la régulation de la tension au niveau de leurs enroulements secondaires, ce qui permet la limitation de quelque rang d'harmonique. Cette solution de dépollution des harmoniques est adaptative suivant le type de charge.

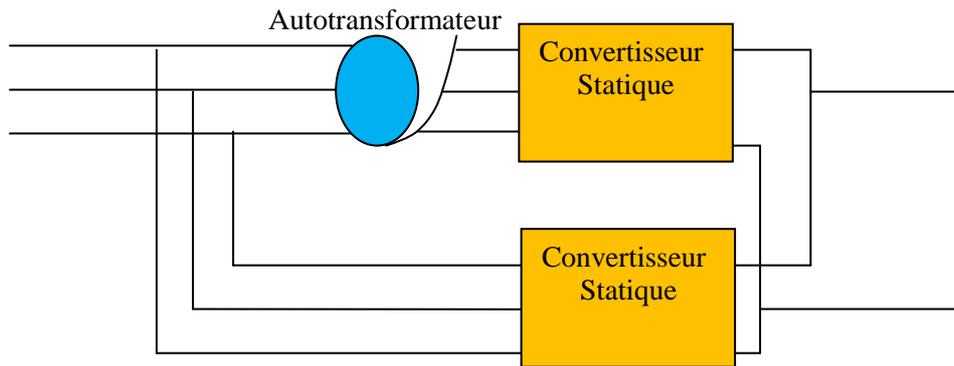


Figure 6.7 Montage avec autotransformateur [23]

C- Action sur la topologie des convertisseurs d'électronique de puissance

C-1 Topologie à double pont avec autotransformateur (voir la figure 6.7)

C-2 Redresseurs dodécophasés

Il s'agit de connecter deux ponts triphasés, judicieusement déphasés, en parallèle côté réseau et reliés côté redressé (figure 6.8). Le déphasage est obtenu à l'aide d'un transformateur à 2 secondaires bobinés l'un en triangle et l'autre en étoile (figure 6.9).

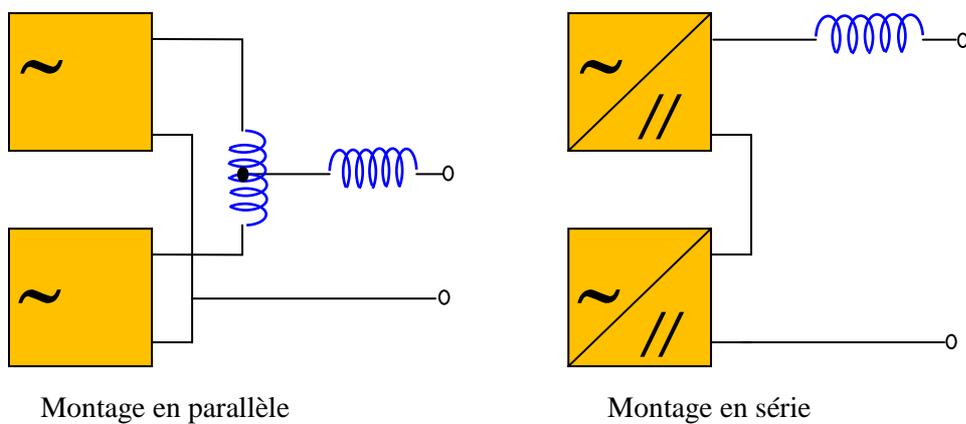


Figure 6.8 Montage en série ou en parallèle des redresseurs [23,36]

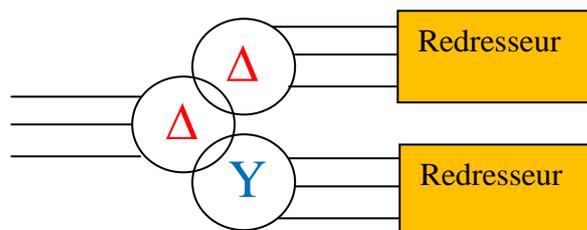


Figure 6.9 Structure de convertisseur à double pont avec transformateur à deux secondaires [23].

D- Action sur la production d'énergie électrique : compensation de l'énergie réactive

Un mauvais facteur de puissance ($\cos \varphi$) implique :

- Une surconsommation de l'énergie réactive ;
- Un excès de pertes joules dans les transformateurs ;
- Un accroissement des chutes de tension dans les câbles ;
- Une surfacturation ;
- Une dégradation de la capacité de transport de l'énergie électrique;
- Un surdimensionnement des installations ;
- Une tension d'utilisation faible et une intensité du courant plus grande ;
- Un faible rendement des appareillages.

Ce qui nécessite :

- Des alternateurs et des transformateurs plus importants ;
- L'élévation de la tension au départ de la ligne ;
- L'élévation de la section de la ligne.

Le facteur de puissance peut être amélioré par l'emploi de :

✚ **Condensateurs (*Shunt ou série*)** : qui peuvent être utilisés :

- ❖ De manière individuelle : en mettant en parallèle un condensateur à chaque équipement ;
- ❖ Par secteur au niveau de chaque branche ;
- ❖ De manière globale au niveau des postes.

✚ **Compensateurs synchrones** : ce sont des moteurs synchrones non saturés surexcités qui peuvent compenser la puissance réactive. Le compensateur synchrone permet une régulation permanente, précise et sans à-coup de tension. Il tend en outre à réduire la distorsion de la tension, les creux de tension, et l'impédance de court-circuit du réseau.

✚ **Compensateurs statiques** tels que les compensateurs d'énergie réactive (**SVC** : « Static Var Compensators ») et les systèmes de transmission à courant alternatif flexibles (**FACTS** « Flexible Alternating Current Transmission Systems »).

E- Filtrage

L'utilisation de filtres passifs consiste à piéger les harmoniques dans des courts-circuits, au moyen d'un montage associant un condensateur et inductance branchés en série. Le montage est accordé sur un rang riche en harmoniques (figure 6.10).

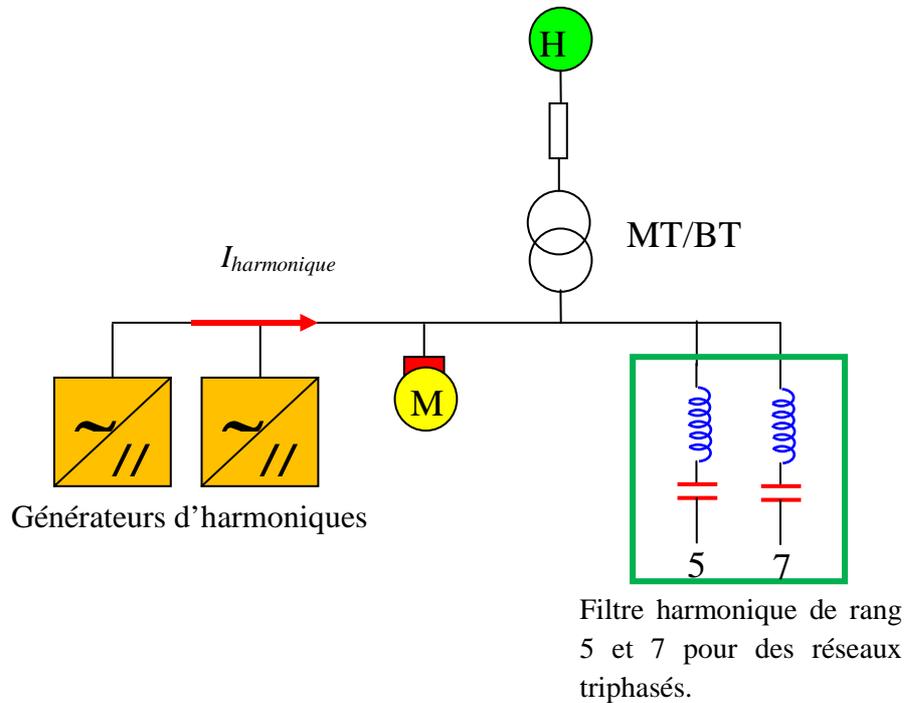


Figure 6.10 Schématisation d'un réseau triphasé équipé d'un un filtre passif d'harmoniques [15,16,23].

Deux types de filtres passifs peuvent être utilisés à savoir :

- ✓ **Le filtre passif amorti** (figure 6.11) : son efficacité est moins importante au rang d'accord, mais il est efficace pour des fréquences supérieures à la fréquence d'accord.
- ✓ **Le filtre passif résonant** (figure 6.12) : son efficacité est importante au rang d'accord, mais il n'est pas efficace pour les harmoniques de rang supérieur.

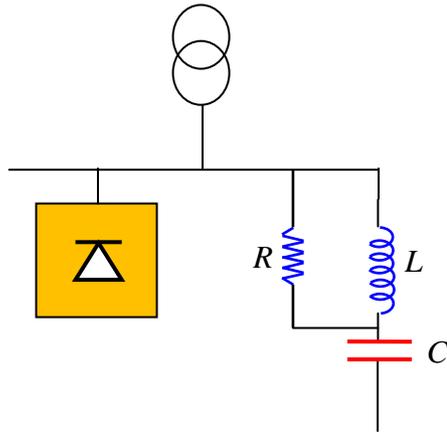


Figure 6.11 Filtre passif amorti [15 ,16,23]

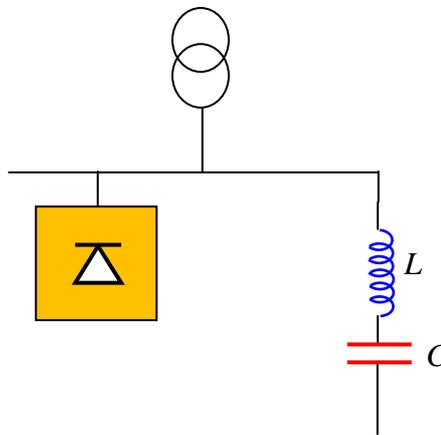


Figure 6.11 Filtre passif résonant [15,16,23]

F- Installation d'inductance anti-harmonique (LAH)

Le but est de réaliser l'accord du circuit LAH à une fréquence pauvre en harmoniques pour supprimer les risques de forts courants harmoniques dans les condensateurs en s'appuyant sur un montage, en série avec le condensateur, d'une inductance dite anti-harmonique (LAH) comme il est illustré dans la figure (6.12).

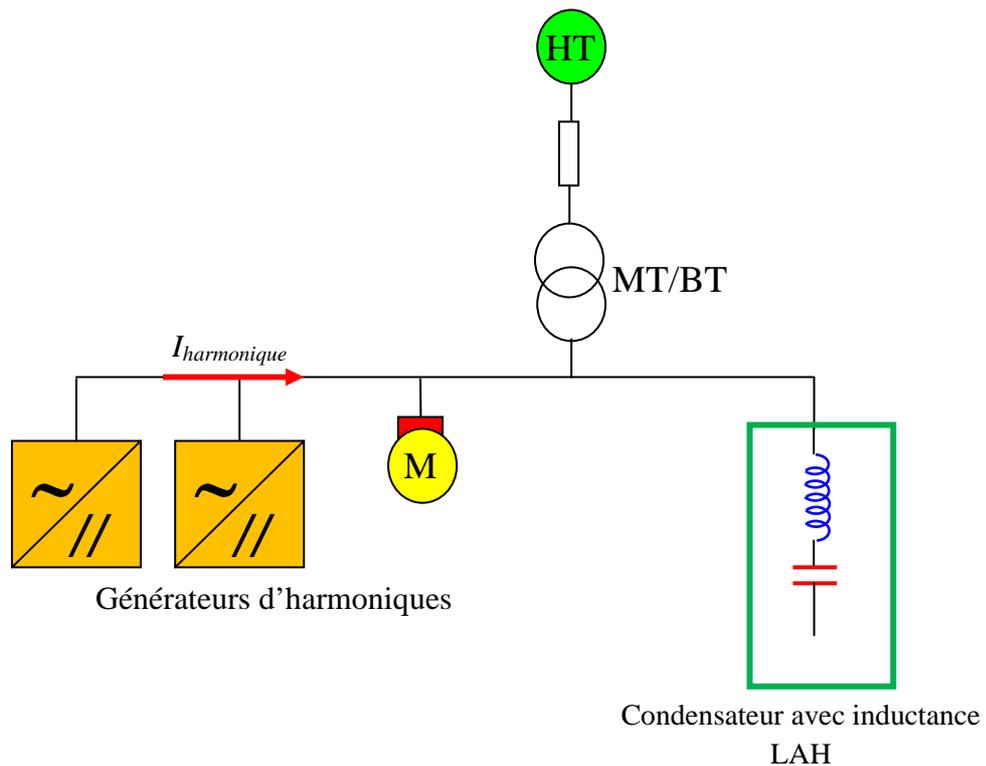


Figure 6.12 Schématisation d'un réseau triphasé équipé par une inductance anti-harmonique (LAH) [16]

VI.3.2 Solutions nouvelles à base de filtrage actif

Un filtre actif est un convertisseur statique qui permet d'injecter dans le réseau des harmoniques (figure 6.13) en opposition de phase et d'amplitude afin que l'onde résultante soit sinusoïdale. Ces filtres actifs peuvent être insérés en :

- ✓ Tableau terminal au niveau de l'élément ;
- ✓ Tableau divisionnaire au niveau des branches ;
- ✓ Tableau général basse tension au niveau de la ligne.

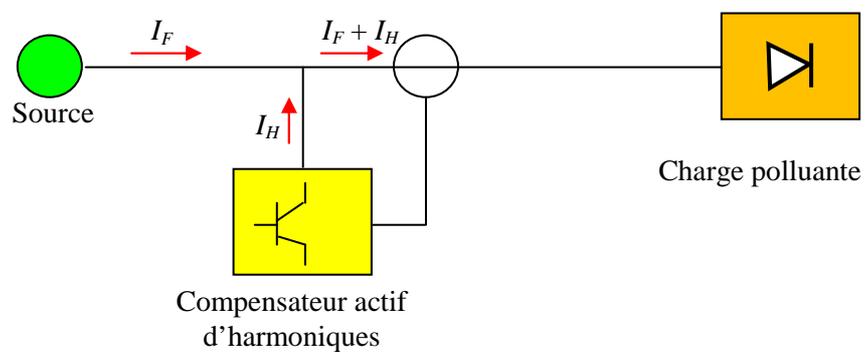


Figure 6.13 Principe du compensateur actif d'harmoniques [16,23,31]

Il existe quatre types de montages pour les filtres actifs (ou compensateurs actifs d'harmoniques) à savoir :

- ❑ Le filtre actif parallèle (figure 6.14) ;
- ❑ Le filtre actif série (figure 6.15) ;
- ❑ Le filtre hybride (figure 6.16) : association des solutions passives et actives ;
- ❑ Le conditionneur actif de puissance (figure 6.17) : combinaison entre un filtre actif en parallèle et un autre filtre actif en série.

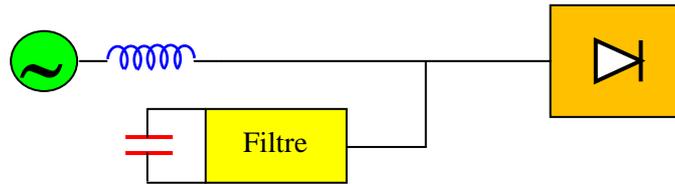


Figure 6.14 Filtre actif monté en parallèle [16,23]

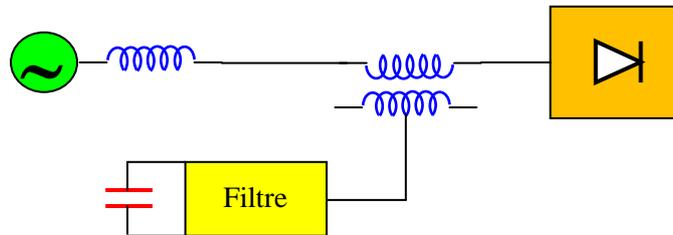


Figure 6.15 Filtre actif monté en série [16,23]

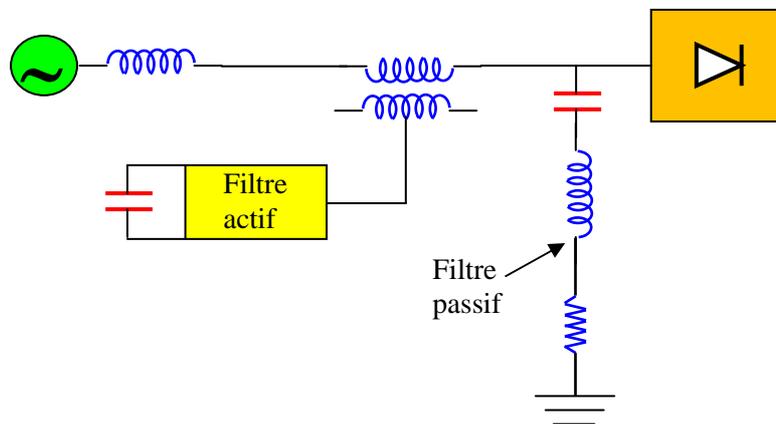
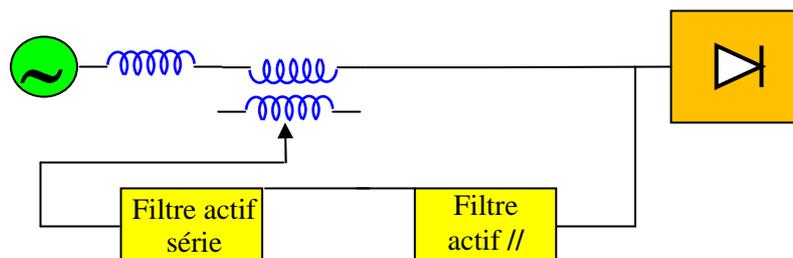


Figure 6.16 Filtre hybride [16,23,31]



6.17 Conditionneur actif de puissance [16,23,31]

VI.3.3 Solutions non conventionnelles [23]

Ces solutions de protection sont basées sur l'utilisation des dispositifs suivants :

- ❑ Système redresseur active intégré et compensateur de qualité de puissance shunt : **IPQC**
(« Integrate active rectifier and shunt power quality compensator ») ;
- ❑ Système conditionneur universel symétrique de la puissance active de la ligne : **USAPLC**
(« Universal symmetrical active power line conditioner »);
- ❑ Filtrage actif à l'aide d'une machine synchrone à double alimentation.

VI.4 Protection contre les effets liés aux coups de foudre

Les coups de foudre sont des décharges électriques ayant une grande énergie perturbatrice soit lorsqu'ils tombent directement sur les différentes structures ou bien lorsqu'ils surviennent au voisinage de ces structures. On distingue donc deux types d'effets liés à la foudre :

- ✓ **Un effet direct** : qui se traduit par des surtensions qui apparaissent lors foudroiement direct d'un bâtiment ou d'une ligne aérienne (ligne électrique, ligne ferroviaire, ligne téléphonique...).
- ✓ **Un effet indirect** : lorsqu'un coup de foudre nuage-sol a lieu, le courant d'arc en retour qui se propage le long du canal ionisé de la foudre génère un champ électromagnétique qui à son tour se propage dans l'air. Le couplage de ce champ avec les différents systèmes provoque des surtensions induites sur ces systèmes menaçant ainsi le bon fonctionnement des différents appareils.

VI.4.1 Protection contre la foudre directe [11,24]

L'étude de la protection demande l'intervention du *modèle électro-géométrique* qui a pour objet la détermination des points d'impact de la foudre afin de pouvoir apprécier l'ampleur des défauts éventuels et de pouvoir faire une protection adaptée. Ce modèle est basé sur la formule empirique suivante :

$$r = 10 I^{2/3} \quad (\text{VI.1})$$

Avec :

- r : distance d'amorçage ou de protection (m)
- I : valeur crête du courant de foudre (kA)

❑ **Protection d'un bâtiment** : Elle se décompose en quatre parties qui sont :

- La structure de collecte par dispositifs de capture (paratonnerre) ;
- Les conducteurs de descente, pour écouler le courant de foudre au sol (simple descente, ceinture, cage maillée de Faraday) ;

- Le réseau de terre, pour dissiper le courant de foudre dans la terre ;
- La protection des conducteurs externes (câbles et canalisations).

□ **Protection des réseaux électriques :** pour atteindre ce but on utilise :

- Les câbles de garde pour les lignes de transport HT et THT, le nombre des câbles de garde (un câble ou deux câbles) dépend des distances entre les conducteurs des trois phases ;
- Les éclateurs (éclateur à tige et éclateur à cornes)
- Les parafoudres (parafoudre à expulsion, parafoudre à résistance variable).

VI.4.2 Protection contre la foudre indirecte [11,25]

Vue que le couplage du champ électromagnétique rayonné par la foudre induit une surtension sur les différents systèmes, tous les dispositifs de protection contre les surtensions sont valables dans ce cas. Cependant, le risque de ces surtensions induites est plus grand pour les systèmes électroniques constitués d'éléments sensibles. En effet, ces systèmes nécessitent d'autres procédures de protection.

Par ailleurs, nous avons donné dans la section (VI.2.5) de ce chapitre des solutions qui peuvent être utilisées dans le cas du couplage champ à fil en BF et en HF. On peut aussi utiliser les méthodes suivantes pour réduire les effets des surtensions sur les électroniques sensibles :

- ✓ Réduction de la surface des boucles de masse ;
- ✓ Réduction globale du champ perturbateur (de foudre) en multipliant les boucles entre les masse ;
- ✓ Ajout d'effets réducteurs (chemins de câbles ou câbles blindés) ;
- ✓ Ajout d'appareils limiteurs de surtensions.

VI.5 Conclusion

La protection de victimes potentielles (systèmes, dispositifs ou appareils) par rapport aux perturbations EM conduites et rayonnées est très importante sur le plan technique et économique. La maîtrise des différentes techniques de protection permet donc d'assurer le bon fonctionnement de ces victimes qui parfois peuvent avoir des fonctions capitales impliquant des enjeux humains et économiques très grands. C'est la raison pour laquelle nous avons terminé notre polycopié par la présentation des différentes techniques de protection appliquées en CEM.

Conclusion générale

Le domaine d'application de la compatibilité électromagnétique CEM est très vaste, car cette discipline englobe tous les systèmes électriques et électroniques que l'on retrouve dans le domaine civil ou militaire. Aussi, tous les industriels sont tenus de respecter les règles de CEM (dictés par les normes CEM) dans la conception et la gestion de leurs produits. Un tel respect leur garantit une sécurité de fonctionnement de leurs produits et un gain considérable sur le plan économique (coûts de production et d'utilisation raisonnables).

Ce polycopié de cours, fruit de nombreuses années d'enseignement et de recherche au sein de l'équipe CEM du laboratoire de développement des entraînements électriques (LDEE), a pour objectif d'apporter aux étudiants de notre université une vue générale sur la CEM passant des fondements et notions de base aux aspects réglementaires, mesures et protection qui se rattachent à cette discipline.

Nous espérons avoir atteint cet objectif et nous proposons au lecteur une bibliographie assez variée lui permettant de compléter ces connaissances dans ce domaine.

Bibliographie

- [01] Z. Azzouz « Cours de post graduation sur la compatibilité électromagnétique », USTO-MB, Oran, Algérie 2006.
- [02] M. Ianovici et J. J. Morf « Compatibilité électromagnétique » 2^{ème} Edition, Presses polytechniques romandes, Lausanne, Suisse 1985.
- [03] P. Degauque, J. Hamelin « Compatibilité électromagnétique » Edition Dunod 1990.
- [04] C. R. Paul « Introduction to CEM » 2^{ème} Edition, Edition WILEY 2006.
- [05] F. Rachidi « Introduction à la CEM » Notes de cours de la CEM, EPFL de Lausanne, Suisse 2004.
- [06] D. Poljak « Advanced modeling in computational electromagnetic compatibility » Edition Wily 2007.
- [07] K. Arzag “ Couplage des perturbations électromagnétiques rayonnées par un coup de foudre avec des lignes électrique” Thèse de Magister, USTO-MB, Oran, Algérie 2008.
- [08] P. Degauque et A. Zeddou « Compatibilité électromagnétiques 2 » Hermes Sciences, Lavoisier, France 2007.
- [09] F. Vaillant et J. Delaballe « La CEM : La compatibility électromagnétique » Chier technique N° 149, Group Schneider 1998.
- [10] F. Rachidi « Mode de couplage et méthode d’analyse » Notes de cours de la CEM, EPFL de Lausanne, Suisse 2004.
- [11] A. Charoy « Compatibilité électromagnétique » 2^{ème} Edition, Edition Dunod 2005.
- [12] « CEM : Couplage des perturbations » Ecole supérieure de Plasturgie 2001.
- [13] Les référentiels DUNOD « Maitrise de la CEM, Partie 2 : Fondamentaux techniques et physiques de la CEM », Edition Dunod 2000.
- [14] P. Ferracci « La qualité de l’énergie électrique » Cahier technique N° 199 Group Schneider 2001.
- [15] C. Collombet, J. M. Lupin, J. Schonek « Perturbations harmoniques dans les réseaux pollutes, et leurs traitement » Cahier technique N° 152 Group Schneider 1999.
- [16] M. G. Gay et M. Y. Pellicier « Les perturbations électromagnétiques basse et haute fréquence » Institut Schneider 1999.
- [17] « Electromagnétique compatibility CEM » manuel didactique, Group Schneider.
- [18] A. Rousseau, “Parafoudres basse tension - Description. Installation”, Techniques de l’Ingénieur, D4841 V 1, Nov. 2003.
- [19] J. P. Taillebois « Postes à haute et très haute tensions - Postes sous enveloppe métallique (PSEM) », Technique de l’ingénieur, D4590 Vol.2 , 10 févr. 2001.

- [20] K. Arzag « Calcul du champ électromagnétique rayonné par un coup de foudre à l'aide de la méthode FDTD en trois dimensions » Thèse de Doctorat, USTO-MB, Oran, Algérie.
- [21] M. I. Montrose et E. M. Nakauchi « Testing for EMC compliance » IEEE Press 2004
- [22] <http://www.distrame.fr>
- [23] B. Mazari « Cours sur la pollution harmonique » USTO-MB, Oran, Algérie.
- [24] A. Ametani, N. Nagaoka, Y. Baba, T. Ohno « Power system transients – Theory and applications » CRC Press 2014.
- [25] Y. Baba et V. A. Rakov « electromagnetic computation methods for lightning surge protection studies » IEEE Press, Edition Wiley 2016.
- [26] C. Giménès « Notions de compatibilité électromagnétique (CEM) », <http://claude-gimenes.fr/electronique/bruit-electronique/-iv-notions-de-compatibilite-electromagnetique-cem>
- [27] J. Delaballe « La CEM : la compatibilité électromagnétique » Cahier technique N° 149 Group Schneider : [publications/fr/shared/electrotechnique/savoir-electrotechnique/connaissances-generales/ct149.pdf](http://publications.fr/shared/electrotechnique/savoir-electrotechnique/connaissances-generales/ct149.pdf)
- [28] O. Maurice « Cours : Introduction à la Compatibilité ElectroMagnétique des systèmes embarqués et des télécommunications », http://olivier.maurice.pagesperso-orange.fr/cours/cours_3_3f.pdf
- [29] P. Poulichet « Chapitre 1 : introduction à la compatibilité électromagnétique », <https://perso.esiee.fr/~poulichp/CEM/IntroductionCEM/chapitre1.pdf.pdf>
- [30] A. Darkawi « La Compatibilité Electromagnétique (CEM) », https://hal.archives-ouvertes.fr/cel01358003/file/cours_initiation_CEM_DARKAWI.pdf
- [31] B. Demoulin « Initiation à la Compatibilité Electromagnétique », Cours pour les électriciens auditeurs du Master ou Elèves Ingénieurs, Université des Sciences et Technologie de Lille : (http://telice.univlille1.fr/fileadmin/general/publi/Demoulin_initiationCEM.pdf)
- [32] E. Labouré, F. Costa, L. Péchon « Compatibilité Electromagnétique », https://perso.crans.org/gherault/Cours/CEM/Cours_DEA_Complet.pdf
- [33] E. Labouré et F. Costa « La compatibilité Electromagnétique : C.E.M », <https://fr.scribd.com/presentation/347801126/CEM-Presentation>
- [34] O. Heyer « CEM : réglementation et essais pour le marquage CE », http://www.eea.univ-ontp2.fr/IMG/pdf/Presentation_CEM_11_2009_O._Heyer.pdf
- [35] E. Labouré « TP Filtre antiparasites » Académie de Paris, Créteil, Versailles.
- [36] Z. Chelli « Amélioration de la qualité de l'énergie électrique par un filtre actif d'harmonique », thèse de Doctorat, université Badji Mokhtar, Annaba.