

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MUSTAPHA STAMBOULI DE MASCARA
FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Polycopié de Cours

Compatibilité Electromagnétique

Présenté par :

BOUTEFFAHA & Ahmed

Ce cours est destiné aux étudiants de Parcours/spécialité Master
Réseaux Electriques

Algérie
2017

Table des matières

Avant Propos		i
Résumé		v
Introduction		6
Chapitre 1	Introduction à la compatibilité électromagnétique CEM	7
1.1	Introduction	7
1.2	Contexte industriel de la compatibilité électromagnétique	8
1.2.1	Industrie aéronautique	8
1.2.2	Industrie spatiale	8
1.2.3	Industrie ferroviaire	8
1.2.4	L'industrie automobile	9
1.2.5	La production et la distribution d'énergie électrique	9
1.2.6	Les télécommunications	9
1.2.7	Les appareils informatiques	9
1.2.8	Les applications militaires	10
1.2.9	L'anti-compromission	10
1.2.10	Les effets biologiques	10
1.3	Nature de sources des perturbations	11
1.3.1	La capture des parasites par les récepteurs de radiodiffusion	11
1.3.2	Effets de la foudre sur les lignes à très haute tension	12
1.3.3	Couplage par diaphonie sur les circuits imprimés	14
1.3.4	La distorsion de la tension délivrée par le secteur	16
1.4	La réglementation internationale de la CEM	17
1.4.1	La directive européenne sur la compatibilité électromagnétique	17
1.4.2	Les normes mises en place par le CENELEC	18
1.4.3	Les normes génériques	18
1.4.4	Les normes fondamentales	19
1.4.5	Les normes "produits"	19
1.4.6	Les procédures de certification	20
1.4.7	La réglementation sur les communications hertziennes	20
1.4.8	Marge de compatibilité	21
1.4.9	Les techniques de protection en CEM	21
1.5	Normes	22
1.5.1	Normes en 55 02	22
1.6	Nature des sources de perturbations	23
1.6.1	Perturbations rayonnées	23
1.6.2	Perturbations conduites	24
1.7	Dispositifs de mesure des perturbations	25
1.7.1	Mesures des perturbations conduites	25
Chapitre 2	Modes de couplage des perturbations	
2.1	Introduction	27
2.2	Modes de transmission en conduction	27
2.2.1	Mode différentiel	28
2.2.2	Mode commun	28
2.3	Types de couplages	29
2.3.1	Couplage par conduction	29
2.3.2	Couplage par rayonnement	32
2.3.3	Couplage par ionisation	37
2.4	Exercice d'application	39

Chapitre 3	Sources de perturbations	41
3.1	<i>Généralités</i>	41
3.2	<i>Les principaux acteurs de perturbation</i>	41
3.3	<i>Les harmoniques</i>	42
3.4	<i>Fluctuations de tension</i>	43
3.5	<i>Creux de tension et coupure</i>	44
3.6	<i>Surtensions et chocs de foudre</i>	45
3.6.1	<i>Surtensions directes</i>	45
3.6.2	<i>Surtensions indirectes</i>	45
3.6.3	<i>Montée en potentiel de la prise de terre</i>	45
3.6.4	<i>Tension de pas</i>	46
3.7	<i>Décharges électrostatiques</i>	47
3.8	<i>Variation de fréquence</i>	48
3.9	<i>Signaux transmis sur le réseau</i>	48
3.10	<i>Composante continue sur le réseau</i>	48
3.11	<i>Déséquilibre de phases</i>	48
3.12	<i>Les moteurs électriques</i>	48
3.13	<i>L'éclairage fluorescent</i>	49
3.14	<i>Le soudage par points</i>	50
3.15	<i>Exercice d'application</i>	51
Chapitre 4	Les protections électromagnétiques	52
4.1	<i>Réseaux de masse et de terre</i>	52
4.1.1	<i>Conception d'un réseau de terre Constitution</i>	52
4.1.2	<i>Mise à la terre - Sécurité des personnes</i>	53
4.1.3	<i>Effets physiologiques du courant</i>	54
4.1.4	<i>Mise à la terre -Implantation du piquet de terre</i>	54
4.1.5	<i>Schéma type de raccordement à la terre d'installation</i>	56
4.1.6	<i>Conception d'un réseau de masses</i>	56
4.1.7	<i>La mise à la terre des masses</i>	57
4.2	<i>Règles de câblage</i>	61
4.2.1	<i>Longueur et section d'un conducteur</i>	62
4.2.2	<i>Effet d'antenne d'un conducteur</i>	63
4.3	<i>Règles de blindages</i>	63
4.3.1	<i>Efficacité du blindage</i>	64
4.3.2	<i>Influence des ouvertures dans les blindages</i>	64
4.3.3	<i>Mise à la masse du blindage d'un câble coaxial</i>	64
4.3.4	<i>Autres forme du blindage</i>	65
Chapitre 5	Les effets des conducteurs	67
5.1	<i>Résistance d'un conducteur</i>	67
5.2	<i>Effet de peau électromagnétique (Effet pelliculaire)</i>	67
5.3	<i>Résistance en fonction de l'épaisseur de peau</i>	68
5.4	<i>Résistance d'un conducteur fin et d'un plan de masse</i>	69
5.5	<i>Inductance d'un conducteur</i>	69
5.5.1	<i>Expression de l'inductance</i>	70
5.5.2	<i>Inductance – Relations associées</i>	71
5.5.3	<i>Inductance d'un conducteur fin</i>	71
5.5.4	<i>Inductance d'un plan de masse</i>	71
5.5.5	<i>Inductance d'une bobine de N spires et avec noyau</i>	72
5.5.6	<i>Inductance de quelques formes de conducteur</i>	73
5.5.7	<i>Inductance de quelques boucles de conducteur</i>	73
5.5.8	<i>Inductance mutuelle</i>	74
5.5.9	<i>Inductance mutuelle de quelques configurations</i>	74
5.5.10	<i>Inductance mutuelle entre différents conducteurs</i>	75

5.6	Capacité des conducteurs	75
5.6.1	Capacité (dépendance et ligne de champ).....	76
5.6.2	Capacité– Relations associées	76
5.6.3	Capacité de quelques configurations	77
5.6.4	Création d’ondes.....	77
5.7	Exercice d’application	78
Référence	79

Avant Propos

Ce polycopie est destinée aux étudiants de la deuxième année master 3^{ème} semestre Filière Électrotechnique spécialité Réseaux Électrique.

Le contenu de ce polycopie est conforme au programme du module UE Découverte Compatibilité Electromagnétique (CEM), recommandé et établi par le ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique (MESRS).

La compatibilité électromagnétique (CEM), qui est un fait, mais aussi une discipline. Elle est le fait, pour des équipements ou systèmes, de supporter mutuellement leurs effets électromagnétiques. Elle est maintenant une discipline, celle d'améliorer la cohabitation entre des éléments susceptibles d'émettre des perturbations électromagnétiques et/ou d'y être sensibles., donc une matière essentielle des unités du semestre 3, est le complément de la matière qualité d'énergie électrique, enseigné dans le semestre 2, qui avait comme objectif d'apporter aux étudiants les compétences nécessaires pour mener à bien un projet CEM dans tous les domaines (télécommunications, automobile, aéronautique, domaines civil et militaire, influence des rayonnements électromagnétiques sur la santé ...). Plus précisément, de la qualification et de la maintenance des systèmes industriels. et de l'introduire dans les différentes matières de cette vaste discipline.

Objectifs du cours

- 1- L'objectif du cours est d'appliquer la théorie du champ électromagnétique aux problèmes de pollution électromagnétique de l'environnement technologique. A la fin du cours, les étudiants seront capables d'avoir une approche globale d'un problème de compatibilité électromagnétique entre le perturbateur et le perturbé, de rechercher l'ensemble des causes potentielles de perturbations dans un environnement donné, et de choisir une technique de protection optimale sur la base d'études théoriques.
- 2- Étude de l'influence de la perturbation du champ électrique ou électromagnétique sur les systèmes de communication. et de maîtriser le vocabulaire les domaines couverts par la CEM et les différentes notions de la CEM tel que :
 - Notion de la CEM, modes de couplage, Sources de perturbations, règles de conception et les effets des Conducteurs Compétences visées
 - Maîtriser les étapes conduisant à la certification CEM d'un produit ou système électronique.
 - Savoir appliquer les règles de conception CEM
 - Maîtriser l'identification des couplages CEM dans un système électronique.

Connaissances préalables recommandées

Notions de base de mathématiques, d'électromagnétisme et de réseaux électriques.

J'espère que ce travail, qui est présenté avec un style très simple, sera utile et bénéfique à tous ceux qui ont à apprendre, à enseigner la compatibilité électromagnétique (CEM),.

Résumé

Tous les appareils utilisateurs de l'énergie électrique sont donc soumis à des risques d'interférences obligeant leurs concepteurs à tenir compte de ces critères de compatibilité électromagnétique. Ils y parviennent par l'adoption de méthodes d'analyse, par le recours à des techniques de protection et par le respect d'une législation indiquant les tolérances de pollutions électromagnétiques ou d'insensibilité aux parasites.

La Compatibilité Électromagnétique (CEM) est l'aptitude d'un appareil électrique à fonctionner dans un environnement électromagnétique déterminé sans être perturbé et sans perturber les autres. Il doit avoir un niveau d'immunité ou "susceptibilité" suffisamment élevé et ne doit pas émettre trop de perturbations.

L'amélioration de la CEM est obtenue par différents types d'actions, diminution des sources externes par exemple, nous pouvons réduire les perturbations dues aux décharges électrostatiques en augmentant l'humidité des locaux, en utilisant un sol antistatique etc, augmentation de la susceptibilité un système électronique peut être « durci » en choisissant les composants les moins sensibles aux perturbations (différentes familles technologiques : TTL CMOS etc.) et réduction des couplages pour une source externe déterminée, le niveau de perturbations reçues par un appareillage dépend des couplages, c'est à dire du chemin de propagation entre la source et la victime.

Ces études comportent donc l'enchaînement de plusieurs étapes visant chacune à identifier des phénomènes physiques pour ensuite apporter remède aux problèmes que nous venons d'évoquer.

Cet ouvrage d'initiation a donc pour objectif d'introduire le sujet de manière élémentaire, en réservant une place importante aux exemples et en limitant les analyses à la recherche de formules analytiques édifiées sous des concepts simplifiés. En effet, cette démarche est bien mieux adaptée à l'esprit de cet enseignement que des développements théoriques trop approfondis. Il contient l'essentiel du programme couvert dans le cadre du cours de compatibilité électromagnétique offert aux étudiants de la deuxième année master réseaux électrique 3eme semestre Filière Électrotechnique au Département d'électrotechnique de l'Université Mustapha Stambouli de Mascara

Mots-clés : Compatibilité électromagnétique, électromagnétisme, perturbation, victime, source, couplage, ondes, champ électrique

Introduction

Depuis 1996, aucun appareil ne peut théoriquement être commercialisé sans avoir subi de test de compatibilité électromagnétique (CEM). La CEM a pour objet de prendre en compte les perturbations transmises par les appareils en fonctionnement pour assurer un fonctionnement correct de plusieurs appareils en même temps. Une définition précise de l'étude de la compatibilité électromagnétique (CEM) peut être :

« Capacité d'un dispositif, équipement ou système à fonctionner de manière satisfaisante dans son environnement électromagnétique, sans introduire de perturbations électromagnétiques intolérables pour quoi que ce soit dans cet environnement ».

Cela implique deux choses: d'une part que les perturbations électromagnétiques émises par l'appareil ne soient pas trop importantes et que d'autre part que les appareils puissent fonctionner de façon satisfaisante en présence de perturbations générées par d'autres appareils.

On trouve des exemples de problèmes de CEM dans la vie quotidienne. Par exemple, un téléphone portable qui perturbe le fonctionnement du moniteur de l'ordinateur.

Ce cours d'initiation a donc pour objectif d'introduire le sujet de manière élémentaire, en réservant une place importante aux exemples et en limitant les analyses à la recherche de formules analytiques édifiées sous des concepts simplifiés. En effet, cette démarche est bien mieux adaptée à l'esprit de cet enseignement que des développements théoriques trop approfondis.

Ce polycopié comporte cinq chapitres dont nous décrivons brièvement le contenu. :

Le chapitre premier s'ouvre sur un rapide examen de la position de la CEM dans le monde industriel et sur quelques exemples montrant l'action des couplages électromagnétiques. Le chapitre se tourne ensuite vers l'étude des perturbations naturelles les plus fréquentes, notamment la foudre et les décharges électrostatiques.

Le second chapitre entièrement consacré aux couplages électromagnétiques traite tout d'abord le cas des parasites transmis par conduction. Le second et le quatrième paragraphe seront consacrés à l'analyse des couplages par diaphonie et des couplages par champ.

Le troisième chapitre constitue une étude détaillée sur les sources de perturbations et les principaux acteurs de perturbation.

Règles de conception et les effets des conducteurs, sont traitées en détails respectivement dans les chapitres quatre et cinq

1.1 Introduction

La compatibilité électromagnétique est la traduction directe de l'expression anglophone « *Electromagnetic Compatibility* » plus souvent désignée sous le sigle « *EMC* » ou CEM pour les francophones.

La CEM est apparue au début du vingtième siècle lorsque les communications par voie hertzienne ont commencé à s'intensifier. L'utilisation anarchique de la fréquence porteuse des émissions radioélectriques provoquait des interférences nuisibles à l'efficacité de ce moyen moderne de communication. Une réglementation internationale a donc été édictée afin de répartir le spectre des fréquences en fonction des utilisateurs potentiels. C'est ainsi que certaines bandes sont attribuées à la radiodiffusion par exemple 87 MHz – 108 MHz pour la diffusion de la radio en modulation de fréquence, 900 MHz pour les téléphones portables GSM etc.... Aujourd'hui, le spectre radioélectrique est tellement encombré qu'il faut préserver certaines fréquences réservées à des usages scientifiques, c'est le cas de la raie de l'atome d'hydrogène à 21 cm de longueur d'onde très utilisée par les radio astronomes pour reconnaître la présence de matière interstellaire.

Les problèmes traités dans le cours sont cependant tout à fait étrangers à la gestion du spectre radiofréquences, ils concernent principalement les inductions et le brouillage électromagnétique occasionnés par le fonctionnement des appareils électriques ou électroniques. Historiquement, ces phénomènes sont apparus dans les années vingt lors des essais entrepris par les chemins de fer helvétiques en vue d'utiliser le courant industriel de fréquence 50 Hz pour les besoins de la traction électrique. Contrairement au courant continu délivré à cette époque par des convertisseurs tournants, les courants alternatifs généraient des variations de champs magnétiques coupables d'inductions de tensions sur les circuits téléphoniques longeant les voies ferrées. De nos jours, les phénomènes perturbateurs ont été amplifiés par les convertisseurs statiques de puissance et l'usage de circuits intégrés alimentés sous de très basses tensions.

Ce chapitre composé de cinq paragraphes commence par l'examen d'activités industrielles concernées par les problèmes de CEM, telles que l'aéronautique, l'automobile, les télécommunications.....

En seconde partie nous abordons sur la base d'exemples l'analyse qualitative de certains phénomènes de couplage tels que les perturbations engendrées par la foudre sur des lignes à très haute tension ou les inductions parasites produites sur les circuits imprimés. [1] En troisième partie sont analysés deux phénomènes perturbateurs particulièrement nuisibles au fonctionnement des installations électriques. Il s'agit de la foudre et des décharges électrostatiques dont nous étudions l'origine phénoménologique et les caractéristiques physiques les plus pertinentes.

Une quatrième partie concerne la conduite d'un projet CEM et plus spécialement les principales étapes qu'il convient de suivre pour évaluer la sensibilité d'un équipement. Nous verrons à cette occasion

le rôle important joué par l'analyse topologique, notamment lorsqu'il s'agit d'identifier les liens de l'équipement avec le réseau de terre d'une installation.

Pour conclure ce chapitre nous apportons quelques indications sur la réglementation internationale en CEM illustrée par l'application de la directive européenne.

1.2 Contexte industriel de la compatibilité électromagnétique

De nombreux secteurs d'activités sont concernés par les risques électromagnétiques dont certains peuvent menacer la sécurité des utilisateurs de moyens de transports ou la disponibilité d'installations contrôlées par des équipements informatiques. [1].

1.2.1 Industrie aéronautique

Les avions modernes comportent des instruments et des gouvernes commandés par des calculateurs vulnérables aux rayonnements électromagnétiques. Les risques majeurs proviennent de la foudre, s'il s'agit de l'impact direct d'un coup de foudre sur l'aéronef des courants transitoires d'une intensité voisine de vingt milles Ampères peuvent circuler sur la surface métallique de l'avion. S'il s'agit de phénomènes indirects provenant de décharges déclenchées entre nuages, l'appareil peut être exposé à d'intenses champs électromagnétiques transitoires. Il en résulte des phénomènes d'induction d'une amplitude suffisante pour détruire des composants électroniques ou engendrer leur dysfonctionnement.

Les avions sont également soumis aux champs intenses et de très hautes fréquences émis par les faisceaux radars provenant des centres de contrôles aériens, ils sont coupables d'autres phénomènes d'induction.

Dans un tout autre ordre de grandeur, les passagers utilisateurs de téléphones portables ou d'appareils électroniques peuvent produire en cabine des champs d'amplitude suffisante pour créer des interférences avec certaines liaisons hertziennes[1].

1.2.2 Industrie spatiale

Les satellites artificiels évoluant sur orbite basse ou géostationnaire subissent les agressions électromagnétiques provenant du cosmos. Il s'agit généralement de rayonnements ionisants de très grande énergie capable d'altérer la matière active des circuits électroniques ou de déposer des particules chargées sur la surface des panneaux solaires. L'hétérogénéité du dépôt peut alors produire des différences de potentiel pouvant engendrer des processus de décharge matérialisés par des courants transitoire très intenses.

A ces phénomènes d'origine naturelle s'ajoute la cohabitation des antennes émettrices puissantes et des circuits électroniques sensibles localisés dans un volume restreint.

1.2.3 Industrie ferroviaire

Nous avons évoqué en introduction les inductions provoquées sur les câbles téléphoniques rive-rains des voies ferrées, l'usage des transmissions par fibre optique réduit ce risque mais d'autres problèmes surgissent. Notamment, le retour des courants de traction par les rails est susceptible de générer des interférences avec la télésignalisation transmise sur les voies.

Le rayonnement propre de la ligne électrifiée parcourue par des courants intenses couvrant un large spectre de fréquences peut être également la cause d'autres sources d'interférences. La cohabitation des convertisseurs de puissance et des circuits de commande informatisés installés à bord des trains pose aussi de sérieux problèmes de couplages électromagnétiques qu'il faut s'efforcer de réduire.

1.2.4 *L'industrie automobile*

L'adoption des circuits électroniques et plus généralement les commandes électriques à bord des automobiles expose ces installations aux sources d'interférences externes ou internes aux véhicules. Notamment, les champs produits par les téléphones portables peuvent nuire à la sécurité. Les freins antibloquants (ABS), les lèves glaces, la combustion, les serrures, les directions et les freins à commandes électriques doivent être efficacement protégés par des solutions technologies appropriées à cette industrie.

Les calculateurs de bord d'un véhicule peuvent aussi produire des interférences sur la réception locale de la radio !

1.2.5 *La production et la distribution d'énergie électrique*

Les grands réseaux électriques à très haute tension constituent les cibles privilégiées des impacts foudre. Les lignes doivent donc être équipées de parafoudres et accompagnées de protocoles de commutations les rendant insensibles à ces agressions violentes[1].

Les incidents d'exploitation des réseaux électriques avec les court circuits provoqués sur les lignes aériennes lors des tempêtes ou les défauts d'isolement engendrés dans les câbles souterrains sont également l'origine de parasites d'une amplitude suffisante pour perturber les circuits de contrôle de ces installations.

D'autre part, la multiplication de charges à fonctionnement non linéaire engendre sur le réseau électrique des courants très éloignés du modèle sinusoïdal. Ces courants à spectre étendu provoquent des chutes de tensions amenant une distorsion de la tension délivrée par le secteur. Un compromis doit donc être recherché entre les tolérances de pollution et de sensibilité requises par le fonctionnement nominal d'un appareil branché sur le réseau.

1.2.6 *Les télécommunications*

Les réseaux filaires de téléphonie sont soumis aux inductions dues à la foudre ainsi qu'à la proximité de puissants émetteurs de radiodiffusion. Des protections adéquates doivent être adoptées pour la sécurité des usagers et pour réduire les risques d'interférences.

Bien que le codage des informations numériques traitées dans les téléphones portables soit très efficace pour les protéger des parasites extérieurs, ils restent tout de même sensibles à des interférences de très grande amplitude. D'autre part les stations de base génèrent des champs haute fréquence dont l'amplitude peut dépasser plusieurs Volts par mètre. Cette pollution inévitable de l'environnement proche de ces émetteurs nécessite le recours à des protections adéquates, ainsi que le respect de la réglementation en matière d'exposition de personnes aux champs électromagnétiques.

Les téléphones portables sont aussi générateurs de pollution électromagnétique, notamment lorsqu'ils sont actionnés à proximité de circuits électroniques. Il peut en résulter l'induction de tensions d'amplitude suffisante pour modifier des données binaires.

1.2.7 *Les appareils informatiques*

Les faibles tensions rencontrées sur les circuits logiques des équipements informatisés les exposent aux effets indésirables de perturbations d'origines diverses. Les inductions produites par la foudre, les décharges électrostatiques, la pollution engendrée par les convertisseurs d'énergie, la proximité de téléphones portables constituent les risques les plus fréquents de dérangement.

Les circuits logiques très rapides adoptés dans les calculateurs introduisent des sources de rayonnement électromagnétique couvrant des spectres atteignant ou dépassant parfois le GHz. L'intensité du champ rencontré à quelques mètres de ces équipements est alors suffisante pour interférer avec des transmissions hertziennes.

1.2.8 Les applications militaires

Des sources électromagnétiques puissantes émettant des signaux transitoires ou entretenus peuvent réaliser des armes tactiques ou stratégiques très efficaces. C'est le cas de l'impulsion électromagnétique nucléaire (IEMN) produite par une arme nucléaire déclenchée à très haute altitude. L'explosion engendre une impulsion électromagnétique d'amplitude suffisante pour induire des effets destructeurs sur les équipements électroniques illuminés par ce phénomène. L'altitude de l'arme située à une centaine de kilomètres atténue fortement ses effets mécaniques mais disperse le champ transitoire sur un vaste territoire.

De plus, des faisceaux très directifs d'ondes entretenues et pulsées semblables aux émissions des radars émettant quelques tétraWatts sont aujourd'hui réalisables. Ces émissions dirigées vers des installations électroniques fixes ou aéroportées peuvent sérieusement perturber certaines fonctions et mettre en défaut le fonctionnement d'une arme ou celle d'un dispositif de surveillance.

1.2.9 L'anti-compromission

Bien que n'appartenant pas tout à fait à la compatibilité électromagnétique, cette activité concerne les fuites de données confidentielles venant des rayonnements parasites ou de couplages par conduction engendrés par les appareils de traitement de l'information. Le fonctionnement d'un terminal d'ordinateur peut ainsi être capté à des distances de plusieurs mètres par le simple rayonnement parasite provoqué par la circulation des signaux logiques sur les circuits imprimés.

Les fuites de signaux peuvent aussi se produire sur les réseaux de terre en dérivant une très faible fraction de l'information échangée entre des appareils de communication. Les codages sophistiqués, les cages de Faraday, les câbles blindés ou les filtres performants ont donc pour but d'éliminer ou de fortement atténuer la fuite des signaux pour les situer très au-dessous du bruit électromagnétique ambiant.

1.2.10 Les effets biologiques

Les champs électromagnétiques irradiant les matières biologiques sont coupables d'engendrer certains effets indésirables, ce problème fait aujourd'hui l'objet d'études attentives. Il faut toutefois distinguer les effets provoqués par les rayonnements ionisants et ceux venant des émissions radiofréquences. Les premiers sont dus aux impacts de particules très énergétiques ou aux photons gamma, ils provoquent la destruction des cellules sous des doses identifiables par l'expérience.

En revanche les rayonnements électromagnétiques allant des très basses fréquences (50 ou 60 Hz) jusqu'aux ondes millimétriques produisent des effets différents dont l'analyse dosimétrique est assez difficile. Le phénomène bio induit le plus connu concerne le chauffage hautes fréquences des tissus, il a pour cause la forte polarisation électrique des molécules d'eau soumises aux vibrations forcées des champs électriques. Cette propriété est mise en application pour la cuisson des aliments dans les fours micro ondes, bien entendu ces effets peuvent aussi se retrouver dans la masse céphalique des utilisateurs de téléphones portables. Des études approfondies cherchent à établir une corrélation entre l'échauffement et l'émergence de pathologies. Contrairement aux rayonnements ionisants, il est pratiquement impossible de reconnaître un seuil énergétique définissant le danger d'exposition. Pour cette raison les normes qui

établissent les limites d'exposition donnent des densités de puissances assorties de coefficients de sécurité conséquents.

Des recherches sont aussi entreprises pour évaluer d'éventuels phénomènes autres que les inductions thermiques, il s'agit d'effets spécifiques qui ne sont probablement pas reliés à la polarisation électrique des molécules hydratées.

1.3 Quelques exemples de phénomènes perturbateurs rencontrés en CEM

Les perturbations électromagnétiques sont extrêmement diversifiées tant dans leur nature que dans les échelles d'amplitudes physiques et géométriques. Leur étude exhaustive est pour cette raison pratiquement impossible à réaliser, généralement les spécialistes de CEM préfèrent reconnaître certaines classes d'effets qu'ils s'efforcent d'abord d'interpréter par des approches qualitatives avant d'entreprendre leur formulation physique en vue de la mise en place d'outils prédictifs. Nous allons donc respecter cet ordre logique en regardant quelques phénomènes typiques dont nous rechercherons les modes de couplage, les détails mathématiques exposés dans le second et le troisième chapitre du cours viennent compléter ces analyses préliminaires.

1.3.1 La capture des parasites par les récepteurs de radiodiffusion

Nous avons tous perçu lors de l'écoute des programmes radio les craquements désagréables provoqués par des parasites dont ignorons bien souvent l'origine et encore plus les modes de transmission ! Pour faciliter notre démarche nous nous attarderons sur les craquements enregistrés lors des épisodes orageux.

Les impacts de foudre constituent une source particulièrement intense de parasites électromagnétiques, pour simplifier, imaginons le scénario illustré sur la Figure (1-1). Le récepteur comporte une antenne qui peut être sensible au champ électrique ou au champ magnétique, il est alimenté par la ligne secteur 220V 50 Hz.

Les détails apportés dans le prochain paragraphe indiquent qu'un épisode orageux se manifeste par des impacts aux sols matérialisés par d'intenses décharges électriques s'écoulant de la base des nuages vers la surface du sol.

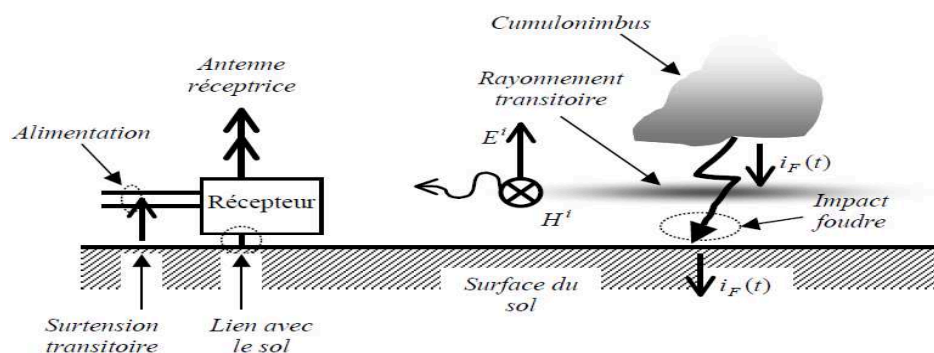


Figure 1.1 Les impacts de foudre

La décharge au sol donne naissance à un courant transitoire $i_F(t)$ dont l'amplitude crête peut atteindre 20 kA, pour le caractériser nous représenterons la signature temporelle ainsi que le spectre $I_F(f)$ établi par la transformée de Fourier directe de la fonction $i_F(t)$ soit :

$$I_F(t) = TF [i_F(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} i_F(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (1-1)$$

Les graphes de la Figure (1-2) montrent les signatures typiques des phénomènes électriques de la foudre étudiés plus attentivement au prochain paragraphe.

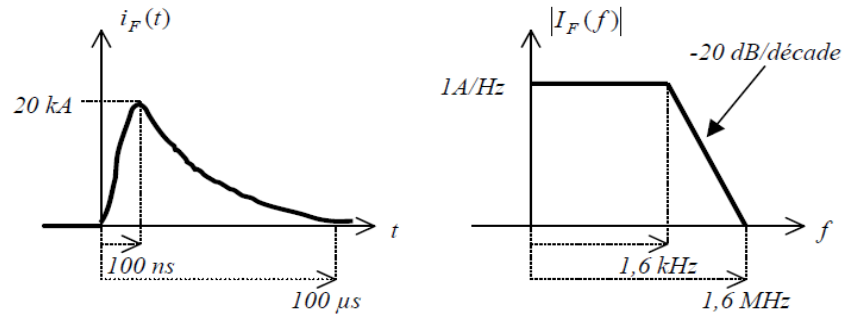


Figure 1.2 Les phénomènes électriques de la foudre

Nous associons au courant foudre un temps de montée voisin de 100 ns et une durée estimée à 100 µs, en conséquence le lobe principal du spectre atteindra 1,6 kHz alors que son encombrement se situe à une fréquence voisine de 1,6 MHz. Nous verrons puis – 40 dB/décade du gabarit spectral.

Lors de l'impact sur la surface du sol deux phénomènes perturbateurs se manifestent simultanément. L'arc formé par l'éclair se comporte comme une antenne émettrice verticale donnant naissance à un champ électromagnétique transitoire assimilable à une onde cylindrique. En conséquence, l'antenne du récepteur perçoit un champ transitoire comprenant une composante électrique iE et une composante magnétique iH respectivement perpendiculaire et parallèle à la surface du sol. L'antenne sera donc le siège de tensions transitoires induites par le champ incident, ces phénomènes seront analysés au cours des chapitres deux et cinq du cours. Ce parasite est donc amplifié puis détecté par le récepteur, il est accompagné d'une brève impulsion sonore. Les bandes de radiodiffusion les plus sensibles à l'induction foudre sont localisées vers les grandes ondes (GO) et petites ondes (PO) respectivement situées entre 150 kHz-250 kHz et 550 kHz-1,8 MHz. Le spectre du courant évoluant dans ces régions de manière inversement proportionnelle à la fréquence, nous en déduisons que le récepteur sera moins sensible dans la gamme petites ondes. A fortiori pour la bande FM située entre 87 MHz-108 MHz pour laquelle les parasites sont presque imperceptibles.

Aux phénomènes induits par le rayonnement s'ajoutent d'autres perturbations venant des lignes d'alimentations du récepteur. L'origine de ces surtension est assez difficile à identifier, nous pouvons leur attribuer deux causes primaires : une induction directe produite par le champ transitoire parvenant sur la ligne, une induction indirecte engendrée par l'écoulement du courant foudre dans le sol. L'effet de ces tensions induites sur les circuits internes du récepteur va donc principalement dépendre des fuites occasionnées par les capacités parasites et du lien physique entre le récepteur et le sol. L'analyse physique de ces modes de couplage électromagnétique sera détaillée au second chapitre.

1.3.2 Effets de la foudre sur les lignes à très haute tension

Par leurs dimensions importantes, les lignes transportant l'énergie électrique sous des tensions de 220 kV ou 380 kV sont fréquemment soumises aux impacts de la foudre, deux phénomènes nuisibles sont généralement enregistrés, le premier concerne la génération de surtensions transitoires et le second l'écoulement par le sol de courants intenses provenant de la source d'alimentation connectée aux lignes.

Le contexte pratique du premier phénomène est illustré sur la Figure (1-3), pour simplifier nous avons limité la représentation à un seul conducteur de phase. La ligne est connectée au transformateur de puissance protégé par un parafoudre et un disjoncteur. Lorsque l'impact foudre tombe sur la ligne, une surtension transitoire de plusieurs millions de Volts prend naissance entre le conducteur de phase et la terre, nous verrons au second chapitre que ce phénomène s'apparente à un couplage par le mode commun. Sans l'usage d'un parafoudre, l'isolement des bobinages du transformateur serait sérieusement endommagé. Le parafoudre (limiteur d'amplitude) entre en conduction afin d'absorber l'excès d'énergie engendrée par le choc électrique. Cependant, cette conduction n'intervient que lorsque la surtension dépasse un seuil d'amplitude voisin du double de la tension nominale phase-terre.

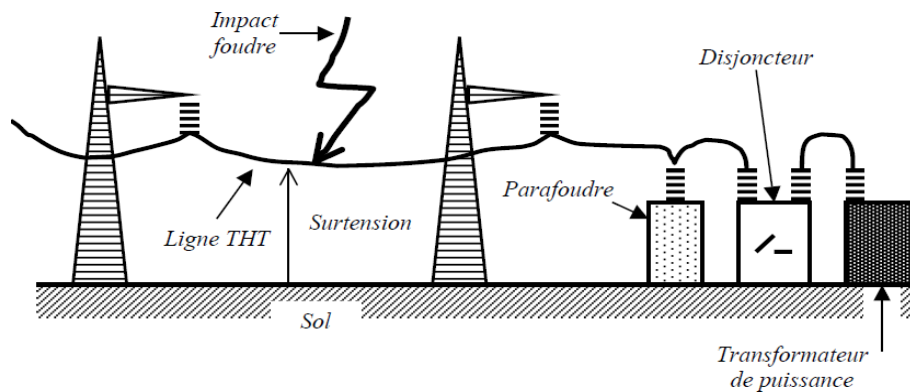


Figure 1.3 Effets de la foudre sur les lignes à très haute tension

Pour une ligne de 380 kV entre phases, la tension homopolaire rapportée à la surface du sol est donc de 220 kV, cela signifie qu'un transitoire d'une amplitude proche de 440 kV parviendra à l'entrée du transformateur. Ce choc d'amplitude réduite est insuffisant pour endommager les bobinages, toutefois cette surtension résiduelle est transportée vers les circuits situés en aval, elle cause d'autres surtensions de plus faible amplitude sur les arborescences du réseau électrique.

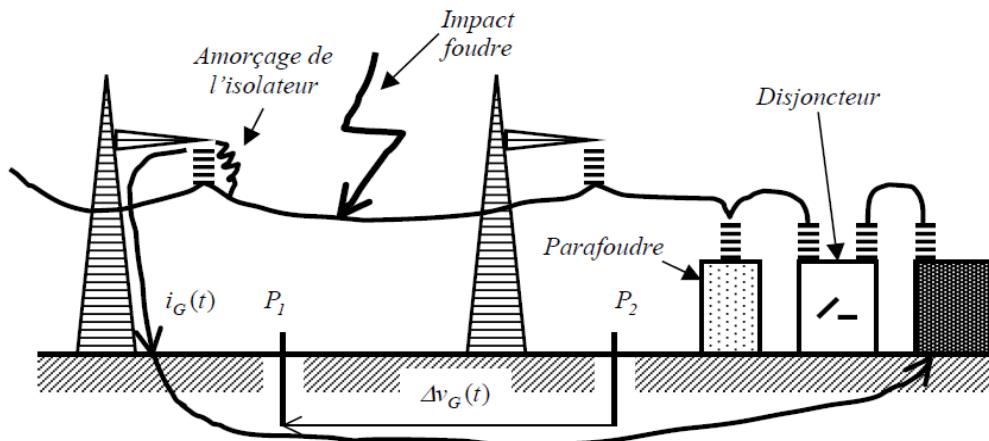


Figure 1.4 Phénomènes accompagnant l'impact foudre sur la ligne

D'autres phénomènes peuvent accompagner l'impact foudre sur la ligne, c'est le cas du scénario illustré sur la Figure (1-4). Ici, la surtension provoque l'amorçage d'un arc électrique sur l'isolateur, il en résulte un court circuit entre le conducteur de phase et la terre à travers la masse métallique du pylône. L'excès d'énergie provoqué par l'impact est donc dérivé sur le pylône, contrairement au fonctionnement

du parafoudre l'arc subsiste après disparition de la surtension. En effet, l'intense ionisation locale de l'air est entretenue par la tension nominale de la ligne, le transformateur va donc débiter un courant très important dont le retour s'effectue par le sol. L'amplitude du courant n'est limitée que par la très faible résistance de l'arc et par la conductivité électrique du sol, le courant peut dépasser 50 kA ! Bien entendu le disjoncteur connecté à la sortie du transformateur détecte cette surintensité et coupe le circuit, mais l'inertie mécanique engendre un retard à l'ouverture pouvant atteindre une centaine de millisecondes. La signature temporelle du courant transitoire $i_G(t)$ dérivé par le sol s'apparente alors à l'illustration donnée Figure (1-5).

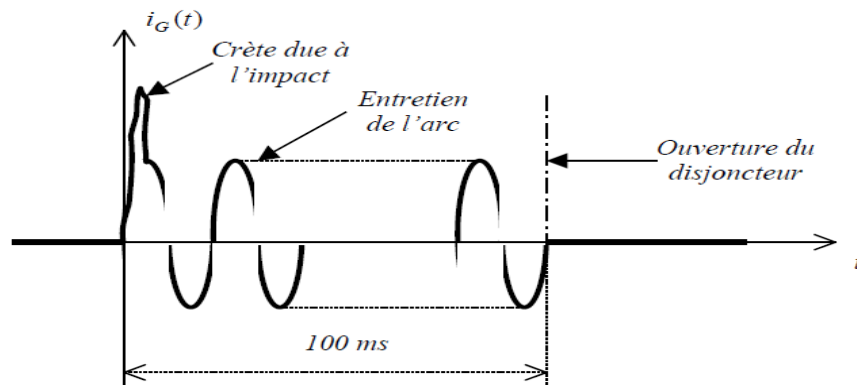


Figure 1.5 Courant transitoire $i_G(t)$ en fonction du temps

Considérons maintenant l'effet du courant sur deux installations riveraines de la ligne possédant les prises de terre P_1 et P_2 , la résistance R_G du sol provoque entre P_1 et P_2 une différence de potentiel transitoire $\Delta v_G(t)$ reliée au courant $i_G(t)$ par la loi d'Ohm :

$$\Delta v_G(t) = R_G i_G(t) \quad (1-2)$$

La résistance R_G est fonction de la conductivité électrique du sol, de la distance séparant les prises de terre et de leur position transversale, le pire cas correspond bien sur à une installation située juste au-dessous du conducteur de phase.

Ce phénomène s'apparente au couplage par impédance commune examiné plus en détail aux second et quatrième chapitres. La tension $\Delta v_G(t)$ peut alors atteindre plusieurs milliers de Volts provoquant de sérieux risques pour les usagers et les équipements électriques.

1.3.3 Couplage par diaphonie sur les circuits imprimés

Considérons deux pistes parallèles disposées sur le substrat d'un circuit imprimé, le plan de masse adossé au substrat constitue la référence de potentiel du circuit. Une source connectée à l'extrémité de la ligne notée 1 sur la Figure (1-6) transporte des impulsions de forme trapézoïdale. La piste notée 2 est connectée à chacune de ses extrémités sur une impédance qui peut être constituée par l'entrée et la sortie d'un circuit logique. Le courant $i_1(t)$ et la tension $v_1(t)$ appliquée sur la ligne 1 produisent par influence sur la ligne 2 un champ magnétique et un champ électrique introduisant un flux magnétique et des charges électriques.

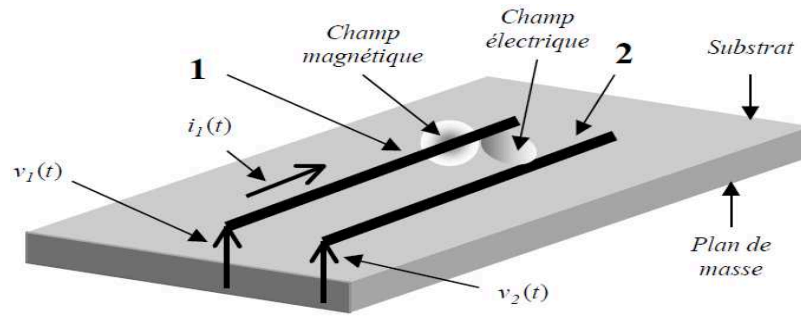


Figure 1.6 Couplage par diaphonie sur les circuits imprimés

Le flux a donc pour conséquence d'induire entre la piste 2 et le plan de masse une fem proportionnelle à la dérivée du courant $i_1(t)$ alors que les charges produisent entre cette seconde piste et la masse un courant proportionnel à la dérivée de la tension $v_1(t)$ soit les conditions rassemblées dans les relations suivantes :

$$\begin{cases} fem\ induite & \Rightarrow \frac{di_1}{dt} \\ Courant\ induit & \Rightarrow \frac{dv_1}{dt} \end{cases} \quad (1-3)$$

Dans le cas général la tension $v_2(t)$ sur l'extrémité de la ligne 2 sera proportionnelle aux expressions précédentes, soit :

$$V_2(t) \Rightarrow \text{Proportionnelle} \left[\frac{di_1}{dt}, \frac{dv_1}{dt} \right] \quad (1-4)$$

En guise d'illustration la Figure (1-7) montre les signatures des signaux générateurs de la perturbation et des signaux induits par diaphonie. Si nous attachons à $i_1(t)$ et $v_1(t)$ le temps de montée τ_r , nous obtenons une tension induite dont l'amplitude crête est inversement proportionnelle à τ_r . En conséquence l'accroissement de la rapidité des circuits logiques va réduire fortement leur temps de commutation ce qui engendre des tensions de diaphonie d'amplitude suffisante pour déranger les circuits riverains.

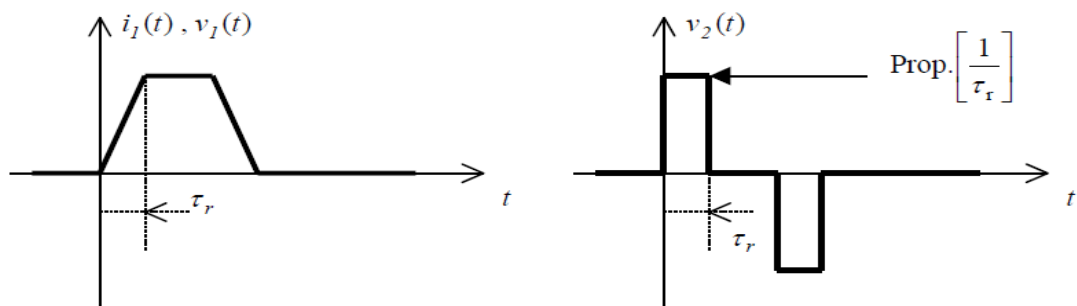


Figure 1.7 les signaux générateurs de la perturbation et des signaux induits par diaphonie.

Ces phénomènes d'induction communément appelés couplages par diaphonie se rencontrent à des échelles plus grandes que les circuits imprimés, c'est notamment le cas des perturbations provenant des courants et tensions véhiculés sur la caténaire des voies ferrées électrifiées.

L'étude détaillée de la diaphonie entreprise au second chapitre va montrer que la forme des signaux induits n'est pas systématiquement l'homothétique de la dérivée des signaux perturbateurs.

1.3.4 La distorsion de la tension délivrée par le secteur

Considérons l'installation électrique illustrée Figure (1-8), elle comporte un convertisseur statique connecté au secteur 220 V 50 Hz. La tension $U_0(t)$ figurant à l'entrée de la ligne est délivrée par la source d'énergie (secteur), elle correspond à une sinusoïde pure que nous exprimons :

$$U_0(t) = U_m \sin(2\pi f_0 t) \quad (1-5)$$

L'amplitude maximale a donc pour valeur $U_m = 311 \text{ V}$, la fréquence est celle du courant industriel soit : $f_0 = 50 \text{ Hz}$. Le courant $\tilde{i}_c(t)$ demandé par le convertisseur au réseau est un signal périodique de période rigoureusement identique à la sinusoïde initiale mais de forme très différente. Nous cherchons à déterminer la distorsion subie par la tension, c'est à dire la tension secteur $\tilde{U}_C(t)$ présente à l'entrée du convertisseur.

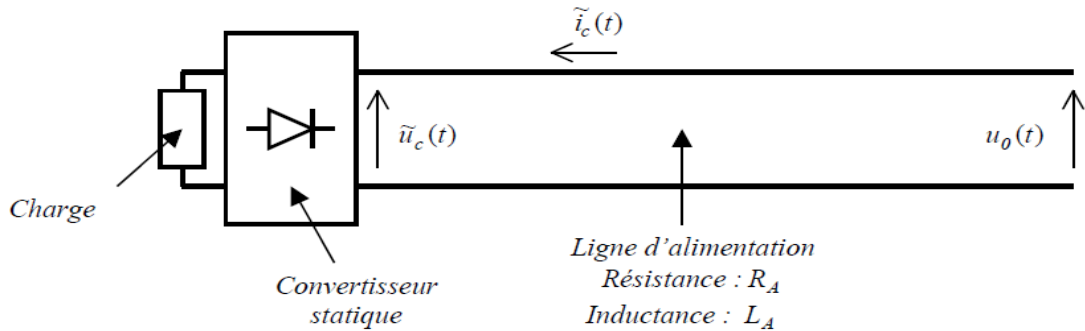


Figure 1.8 Convertisseur statique connecté au secteur.

Son amplitude et surtout sa forme vont dépendre de la signature du courant et de l'impédance de la ligne exprimée par la résistance R_A et l'inductance L_A , la tension résultante peut alors s'écrire :

$$\tilde{U}_C(f) = U_0(f) - (R_A + jL_A\omega)\tilde{I}_C(f) \quad (1-6)$$

La pulsation ω est reliée à la fréquence par l'expression usuelle :

$$\omega = 2\pi f \quad (1-7)$$

Dans la relation (1-6) figure le spectre $\tilde{I}_C(f)$ du courant, en conséquence, la recherche de la transformée de Fourier inverse de cette expression fournit la signature de la tension résultante $\tilde{u}_C(t)$, soit :

$$\tilde{U}_C(t) = U_m \sin(2\pi f_0 t) - \left[R_A \tilde{i}_c(t) + L_A \frac{d\tilde{i}_c}{dt} \right] \quad (1-8)$$

Application numérique :

L'onde sinusoïdale délivrée par le réseau est représentée Figure (1-9), elle a pour amplitude efficace : $U_0=220 \text{ V}$ et pour fréquence : $f_0=50 \text{ Hz}$. Le courant absorbé par le convertisseur se compose d'impulsions récurrentes de polarités alternées et symétriques présentées Figure (1-9b), la période est

rigoureusement égale à celle de la tension secteur, soit: $T= 20$ ms, Nous attribuons à la ligne d'alimentation la résistance et l'inductance suivantes : $RA= 100$ m Ω , $LA= 100\mu$ H

La Figure (1-9c) montre la tension distordue $\tilde{U}_C(t)$ déduite de la simulation numérique. Un appareil électronique directement connecté sur l'entrée du convertisseur peut dans ce cas subir des interférences. Nous verrons au début du second chapitre que ce type de parasite appartient aux perturbations transmises par conduction du mode différentiel. Cette raison justifie certaines normes qui imposent une limite maximale à la pollution produite par les convertisseurs mais également des critères évitant aux appareils une trop grande sensibilité à ces phénomènes.

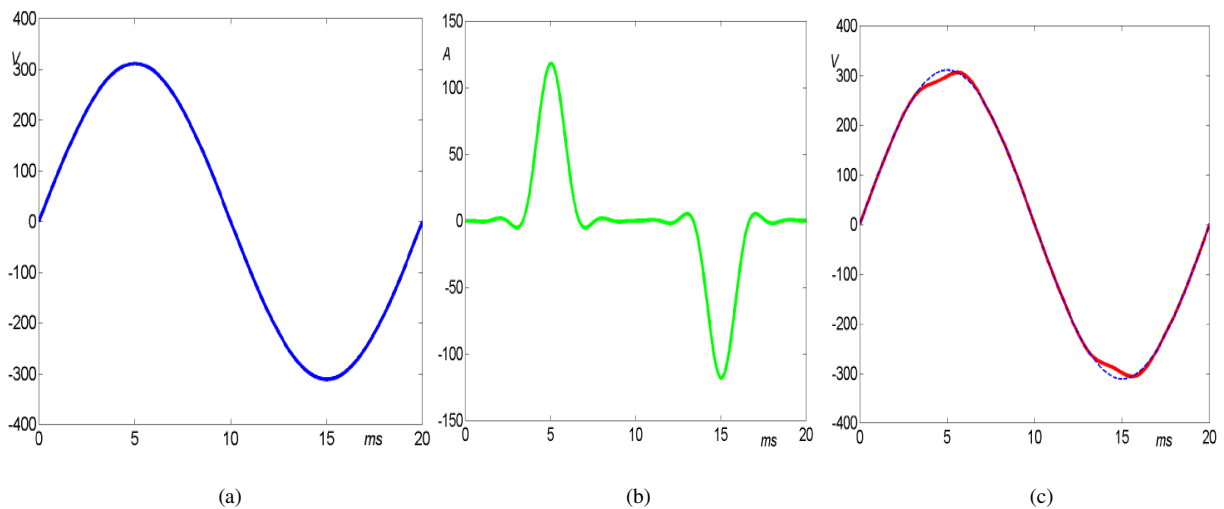


Figure 1.9 la tension distordue $\tilde{U}_C(t)$ déduite de la simulation numérique.

1.4 La réglementation internationale de la CEM

L'objectif de ce paragraphe principalement consacré aux normes sur la compatibilité électromagnétique consiste seulement à introduire cette problématique, nous rappelons le contexte d'application de la réglementation européenne. Nous examinerons successivement, les perturbations engendrées lors du fonctionnement nominal d'un appareil électrique, puis, les démarches conseillées en vue de la mise en oeuvre de communications hertziennes.

1.4.1 La directive européenne sur la compatibilité électromagnétique

L'application de la directive européenne sur la CEM portant la référence *CEE-89-336* doit être respectée par tout appareil mis sur le marché européen et susceptible de produire des perturbations ou de se révéler sensible à certains environnements électromagnétiques. La directive concerne également des installations comportant des réseaux de câbles reliant les appareils entre eux.

La directive indique que toute personne ou entreprise (appelées par la suite émetteur) mettant en circulation un appareil électrique doit s'assurer qu'il ne pollue pas exagérément ses riverains et qu'il n'est pas lui-même exagérément sensible à des pollutions de cette nature.

Pour réaliser la conformité vis à vis de ces critères, les directives font référence à des normes qui indiquent les tolérances d'émission maximale ou de sensibilité minimale. D'autres normes indiquent le

type de mesure ou d'essais à effectuer pour évaluer ces critères, à cela s'ajoute la liste des appareils (produits) concernés par l'application des directives.

Il faut mentionner que certains équipements doivent respecter des normes spécifiques, c'est le cas des appareils médicaux, des véhicules de transport routier ou ferroviaire, des aéronefs, des équipements militaires. Nous limiterons l'exposé au cadre général d'application des normes éditées par le CENELEC.

1.4.2 Les normes mises en place par le CENELEC

Le CENELEC (*Comité Européen de Normalisation en Electronique et Electrotechnique*) est un organisme européen qui a été mandaté pour mettre en place des normes en s'inspirant le plus souvent de textes existants, notamment ceux provenant du CEI (*Comité Electrotechnique International*) ou du CISPR (*Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques*).

Ces textes sont disponibles dans tous les organismes nationaux habilités à diffuser les normes tels que l'AFNOR ou l'UTE pour la France. Les textes sont rédigés en français en anglais et en allemand, de plus, l'utilisateur d'une norme doit prouver qu'il est titulaire du document original. La preuve de la conformité CEM sera établie sur la base d'essais d'immunité et d'émission, nous rappelons brièvement leurs définitions.

L'immunité est l'aptitude d'un appareil à ne pas être perturbé durant son fonctionnement nominal lorsqu'il est soumis à des conditions d'environnement génériques prescrites par les normes.

L'émission concerne les perturbations à large spectre de fréquence ou à bande étroite provoquée par l'appareil lors de son fonctionnement nominal.

La conformité sera établie sur le respect de normes génériques, de normes fondamentales et de normes « produits », nous rappelons très succinctement leurs contenus.

1.4.3 Les normes génériques

Ce sont des normes d'environnement résidentiel ou industriel qui définissent l'intensité des champs ou des parasites conduits qu'il faut appliquer pour soumettre un appareil à un essai d'immunité. Inversement, elles donnent les seuils de tolérance des parasites ou de l'émission radioélectrique qu'un appareil peut produire durant son fonctionnement nominal dans son environnement.

En ce qui concerne l'émission, les mesures sont pratiquées différemment suivant que le spectre pollueur est situé entre 10 kHz et 30 MHz ou dans la bande $30\text{ MHz}-1\text{ GHz}$. Dans le premier cas, on mesure les tensions de mode commun transmises par l'appareil sur les lignes d'alimentation ou sur ses voies de communication avec l'environnement extérieur. Dans le second cas, c'est le champ électromagnétique à large bande qu'il faut mesurer. Par exemple, la norme générique recommande une tolérance maximale d'émission située au-dessous d'un champ électrique de $90\text{ }\mu\text{V/m}$ à une distance de 10 mètres de l'objet à l'intérieure de la bande de fréquences $80\text{ MHz} - 230\text{ MHz}$, bien entendu, comme cela est rappelé un peu plus loin, le gabarit peut évoluer en fonction de la fréquence et des conditions d'usage de l'appareil.

Les essais d'immunité sont également effectués sous deux protocoles différents suivant que la fréquence est localisée dans l'intervalle $150\text{ kHz} - 30\text{ MHz}$ ou qu'elle est supérieure à 30 MHz . Dans le premier cas, on injecte des parasites sur les voies de communication de l'appareil au moyen de pinces de couplage favorisant soit un couplage par champ électrique ou par champ magnétique. Dans le second cas,

l'appareil est soumis à un champ électromagnétique généré par une antenne large bande disposée dans son proche environnement. L'antenne est connectée à une source puissante de signaux sinusoïdaux pouvant ou non être modulés en amplitude. Ce type d'essai doit être impérativement pratiqué dans une chambre blindée pour éviter la pollution hertzienne, de plus, cette chambre doit être revêtue intérieurement de matériaux absorbant les ondes électromagnétiques pour s'approcher des conditions de propagation rencontrées en espace libre.

Nous avons signalé lors des essais d'émission qu'il doit être tenu compte des conditions d'usage de l'appareil, il en va de même pour les tests d'immunité. Suivant que l'appareil est installé dans un environnement résidentiel (habitation) ou en ambiance industrielle (usine), les critères seront différents. Par exemple, la contrainte en champ électrique sera réduite à 3V/m en résidentiel mais portée à 10V/m en industrie. Par contre, pour l'émission, la norme est moins tolérante en milieu résidentiel qu'en milieu industriel. La norme générique présente les conditions maximales de sévérité, nous verrons que la norme produit permet d'adapter ces chiffres en fonction de la nature de l'appareil. Par exemple, la tolérance en immunité est peu exigeante pour les jouets et plus sévère pour les équipements de bureautique.

1.4.4 Les normes fondamentales

Ces documents décrivent avec force de détails les essais à pratiquer afin de vérifier la conformité de l'appareil. Les textes indiquent la disposition des appareils soumis au test ainsi que les conditions de réglage des sources de rayonnement indispensables aux essais d'immunité, le réglage des récepteurs sélectifs utilisés mesure d'émission. large bande sont également spécifiés dans cette norme. Certains équipements de mesures font l'objet d'une description détaillée, notamment, les réseaux stabilisateurs d'impédance de ligne (R.S.I.L.) installés sur les appareils en vue de la mesure des spectres de tension transmis par conduction par le réseau d'alimentation en énergie. Le RSIL est constitué d'un filtre passe bas comprenant des capacités et des inductances respectant des valeurs et des critères d'implantation décrit dans la norme fondamentale. N'oublions pas qu'un essai normalisé doit procurer de bonnes conditions de reproductibilité, afin que des mesures réalisées par des laboratoires différents puissent le mieux possible concorder. Les antennes à large bande de fréquence recommandées pour l'émission en test d'immunité ou la réception des champs rayonnés doivent également respecter les critères décrits dans les normes fondamentales. Ajoutons qu'on trouve sur le marché des instruments de mesures propres aux essais CEM. Les analyseurs de spectre modernes mémorisent des réglage répondant aux prescriptions des normes, nous pensons l'asservissement de la bande de résolution du filtre et à l'affichage du gabarit définissant le seuil de tolérance.

1.4.5 Les normes "produits"

Les normes "produits" sont constituées de listes définissant des familles d'appareil aux quels s'applique la procédure d'auto certification décrite dans le prochain sous paragraphe Les rubriques rencontrées dans les normes produits sont adressées aux différents équipements électroniques mis sur le marché tels que les appareils de traitement de l'information, les appareils pour l'électroménager, les jouets, les appareils d'éclairage etc.....). A chaque classe d'appareil correspondent des conditions d'environnement d'essai spécifiques, à ces critères s'ajoutent les références aux normes fondamentales adoptées pour ce produit. Chaque norme est désignée par une référence, le préfixe EN indique qu'il s'agit d'un texte émis par le CENELEC, par exemple, la norme EN 55022 se rapporte au test d'émission par conduction. La conversion de ces textes en normes nationales est précédée d'un préfixe identifiant le pays concerné, NF pour la France.

1.4.6 *Les procédures de certification*

La procédure la plus largement utilisée concerne les appareils répertoriés dans la norme "produit", dans ce cas, le fabricant de l'appareil ou l'entreprise de commerce mettant l'objet sur le marché peut pratiquer elle-même les essais. Les résultats sont rassemblés dans un rapport détenus par l'émetteur du produit, si les tolérances normatives sont respectées, le marquage de conformité CE peut être porté sur l'appareil. Dans l'hypothèse de contrôles opérés par les autorités compétentes ou lors de plaintes, l'émetteur doit fournir la justification de la démarche effectuée pour la mise en conformité, le rapport de mesures en apportera la preuve. Bien sur, l'émetteur peut confier les essais à un laboratoire extérieur non accrédité, même par sous-traitance des essais, la pose du marquage relève encore de la responsabilité de l'émetteur.

S'il s'agit d'installations de dimensions ou de volumes importants, les essais prescrits dans les normes fondamentales ne peuvent pas être appliqués. La conformité est alors réalisée sur la base d'un dossier technique décrivant la topologie de l'équipement ou contenant quelques mesures spécifiques montrant que l'installation ne perturbe pas son environnement et qu'elle n'est pas exagérément sensible. Par exemple, des indications sur l'emploi de blindages et sur l'usage de protections électromagnétiques convenablement installées suffisent. Il est recommandé de confier cette expertise à un laboratoire compétent.

Il faut signaler que les câbles et les composants électroniques actifs (circuits intégrés) ou passifs (résistances, capacités, inductances) échappent aux directives CEM. Autrement dit, ces directives ne concernent que les fonctions électroniques ou les câbles en état de véhiculer des signaux.

L'apposition du marquage CE sur l'appareil englobe la conformité CEM mais également les autres directives que l'appareil est censé respecter (agressions mécaniques et chimiques etc..). Nous précisons qu'il existe une directive différente de la CEM propre à la basse tension, elle concerne la qualité d'isolement électrique des appareils.

1.4.7 *La réglementation sur les communications hertziennes*

L'usage de signaux transportés par les ondes électromagnétiques propagées en espace libre est soumis à une sévère réglementation. Nous avons évoqué dans l'introduction de ce chapitre que le spectre de fréquence est partagé en différentes zones d'utilisation. Par exemple, une télécommande transportant des signaux radioélectriques ne pourra se faire que sur des fréquences spécifiques. Les textes qui régissent cette réglementation sont disponibles auprès des agences nationales telles que l'ANFR (Agence Nationale des Fréquences) pour la France. Une autorisation d'émission doit donc être formulée auprès de ces organismes en précisant la fréquence porteuse, le mode de modulation et l'encombrement spectral du signal ainsi que la puissance de la source. Pour de très faibles puissances d'émission situées au-dessous d'un seuil défini par les normes, cette démarche administrative n'est pas indispensable.

Les sources d'émission doivent aussi respecter des normes relatives à la compatibilité électromagnétique, il faut justifier par des mesures que le spectre réellement occupé par la transmission correspond bien aux caractéristiques nominales de l'émetteur. Ces mesures doivent également évaluer les pollutions produites par les harmoniques de l'onde porteuse pour les situer par rapport au seuil de tolérance.

Les sources puissantes doivent en plus respecter certains critères d'environnement reliés aux effets biologiques qu'elles peuvent engendrer, notamment face à une exposition fortuite ou prolongée du corps humain. La proximité des radars lors des phases d'essai ou durant leur exploitation exige la description d'un périmètre de sécurité protégeant l'accès des personnels non habilités, le seuil du champ électrique définissant le périmètre est établi sur la base de normes exprimant les doses de densité de puissance maximales admises par la législation.

Les sources micro ondes émettant au-dessus d'une dizaine de GHz sont également assujetties à cette réglementation. Il faut préciser que l'exposition ne vient pas uniquement de la proximité des antennes d'émission, les fuites de champ rencontrées au voisinage des étages de puissance d'un émetteur englobent également ce risque.

1.4.8 Marge de compatibilité

Où agir pour améliorer la compatibilité ?

- réduction des émissions à la source,
- augmentation de la susceptibilité de l'équipement sensible,
- réduction des couplages

Deux aspects définissant la CEM : L'aptitude d'un appareil à fonctionner dans un environnement plus ou moins perturbé et Sans perturber l'environnement d'une manière excessif.

La notion de compatibilité naît de la confrontation entre ses deux aspects autour d'une ligne de partage « niveau de compatibilité» [6]

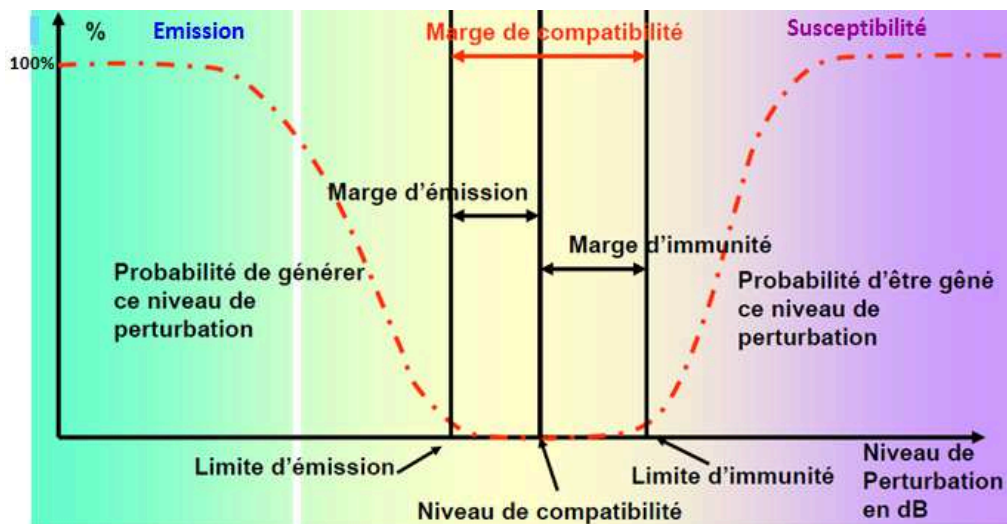


Figure 1.10 Notions de niveaux critiques de la CEM dans le système

1.4.9 Les techniques de protection en CEM

L'amélioration de la compatibilité électromagnétique agit du côté des sources en tenant de réduire les perturbations qu'elles émettent, et du côté des victimes en les protégeant des influences extérieures. Bien qu'il s'agisse à première vue de deux approches distinctes, on met en œuvre, dans la pratique, des techniques apparentées. Nous avons vu qu'une source de perturbations atteignait sa victime par le biais d'un couplage. C'est à ce niveau qu'il faut agir. On a recours pour cela à des dispositifs de découplage, terme qui existait bien avant que la compatibilité électromagnétique ne figure au vocabulaire.

1.5 Normes

Principales normes Européennes en matière de CEM

Standards Européens	Titre	Equivalent international
EN 55011	Exigences sur l'émission des équipements Industriels, Scientifiques et médicaux	CISPR 11
EN 55013	Exigences sur les récepteurs de radiodiffusion	CISPR 13
EN55014	Exigences sur l'émission des équipements électroménagers et des outils portatifs	CISPR 14
EN55015	Exigences sur l'émission des lampes fluorescentes et les luminaires	CISPR 15
EN55022	Exigences sur l'émission des équipements de traitement de l'information	CISPR 22
EN60555-1	Définitions des harmoniques, sous-harmoniques et du scintillement	IEC 555-1
EN60555-2	Perturbations harmoniques provoquées par les équipements électroménagers et similaires.	IEC 555-2
EN60555-3	Variations de tension provoquées par les équipements électroménagers et similaires.	IEC 555-3

Table 1.1 Principales normes Européennes en matière de CEM

1.5.1 Normes en 55 022

La norme 55022 concerne les appareils de traitement de l'information. Cette norme distingue deux classes d'appareils : Les appareils de classe A qui sont destinés à être utilisés en milieu industriel, commercial ou d'affaires [3]

Les limites de champ perturbateur rayonné dans la gamme de fréquence 30MHz à 1000MHz sont données à une distance de 30m pour les appareils de classe A.

Gamme de Fréquences (MHz)	Limites quasi-crête dB μ V/m
30 à 230	30
230 à 1000	37

Table 1.2 Limites de champ perturbateur rayonné pour les appareils de classe A

Les appareils de classe B qui sont destinés à être utilisés dans des locaux d'habitation. Ces limites sont données à une distance de 10m pour les appareils de classe B.

Les unités exprimées en $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ signifient que le champ électrique a été spécifié en décibel en prenant comme valeur de référence un champ de $1 \mu\text{V}/\text{m}$, soit $20 \cdot \log(E \text{ exprimé en } \mu\text{V})$.

1.6 Nature des sources de perturbations

Comme nous avons pu le constater à la lecture de la norme donnée en exemple, les perturbations électromagnétiques peuvent prendre deux formes distinctes : les perturbations dites conduites et celles dites rayonnées. Les gammes de fréquences correspondant à chacune d'elles sont différentes et complémentaires (150kHz-30MHz et 30MHz-1GHz dans notre exemple) [3].

Les signaux parasites émis par la source (par exemple dans un convertisseur statique, la ou les cellules de commutations) sont propagés vers la source d'énergie (ou vers la charge) qui est désignée par le terme de "victime", de plusieurs façons, liées à leur environnement respectif. Deux cas peuvent alors se présenter :

- Si la source et la victime sont voisins avec ou sans liaison galvanique, le couplage est dit proche et il peut être de nature capacitive, inductive ou résistive. Les outils d'analyse font appel à des modèles de types réseau électrique où les couplages sont représentés par des capacités, des mutuelles ou des résistances (dans le cas de liaisons galvaniques directes). Les phénomènes perturbateurs sont dans ce cas les variations rapides de courant ou de tension (di/dt , dv/dt ,). Ce type de perturbations est appelé perturbations conduites et elles se développent dans les câbles ou conducteurs de liaisons aux réseaux, sources d'énergie ou charges [3].
- Si source et victime sont éloignées et sans liaison galvanique, la perturbation est transmise par une onde électromagnétique, on parle de perturbations rayonnées ou propagées. Les phénomènes sont décrits avec les outils théoriques et expérimentaux propres à ce domaine (équation de Maxwell et utilisation d'antennes de mesure).

1.6.1 Perturbations rayonnées

Les circuits électriques, lorsqu'ils sont soumis à des différences de potentiel et ou parcourus par des courants, produisent des champs électromagnétiques dans l'espace. Leurs intensités dépendent de la nature, la fréquence et la distance par rapport à la source [3].

- Le champ électrique s'exprime en V/m . Son émission est produite par un circuit électrique à haute impédance soumis à une différence de potentiel élevée v (Figure 1.5a).
- Le champ magnétique s'exprime en A/m . Son émission est engendré par un circuit basse impédance parcouru par un courant i (Figure 1.11b).

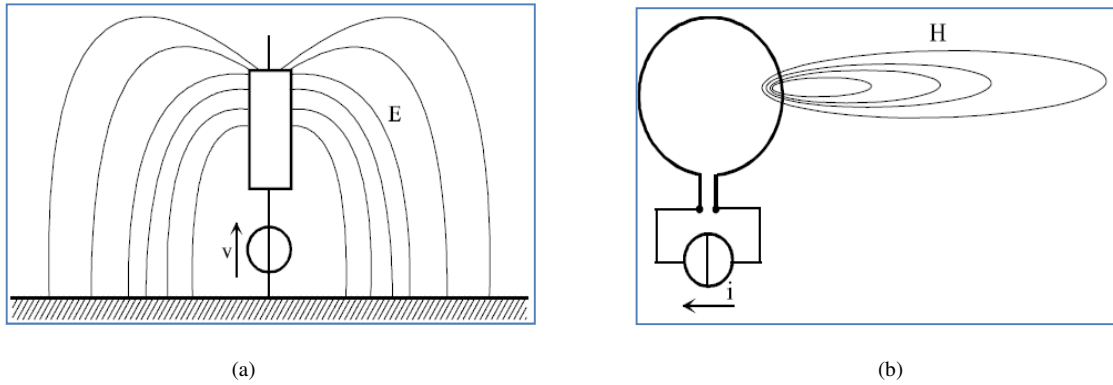


Figure 1.11 Emission en champ, (a) -champ électrique, (b) - champ magnétique

1.6.2 Perturbations conduites

Les perturbations électromagnétiques peuvent également être transmises en utilisant comme vecteur les connexions électriques entre différents équipements. Ces perturbations sont alors nommées perturbations conduites. Bien évidemment ces courants et tensions parasites circulant dans les câbles ou fils inter-connectant des équipements entre eux vont eux-mêmes rayonner. De même des perturbations rayonnées vont pouvoir induire des courants et tensions parasites dans les différentes interconnexions. Les perturbations conduites et rayonnées sont donc intimement couplées. On différencie deux modes de circulation des courants [3]:

- Le mode différentiel ou symétrique ·
- Le mode commun ou asymétrique

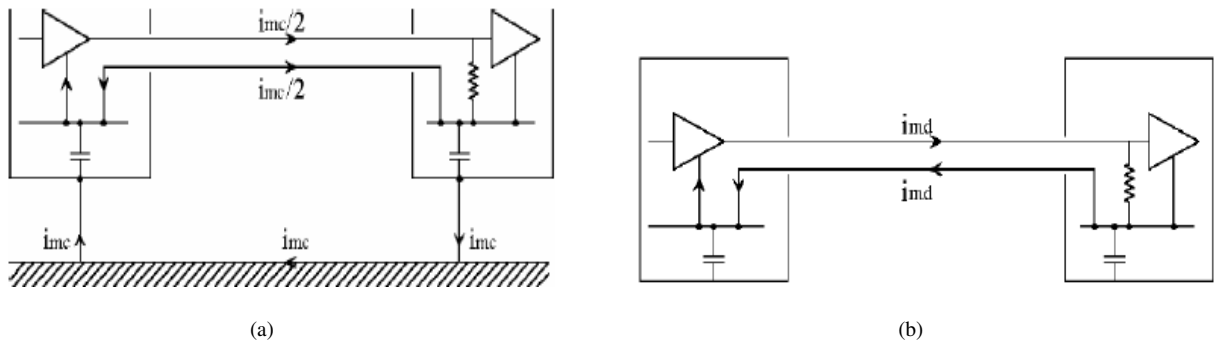


Figure 1.12 Les modes de circulation de courant en perturbation conduite, (a) -Mode commun, (b) - Mode différentiel

La circulation en mode différentiel ne fait intervenir que la liaison bifilaire entre les deux équipements. Dans ce cas, le courant dans le conducteur "aller" est égal au courant dans le conducteur "retour". La circulation du courant de mode commun fait intervenir la liaison bifilaire et la liaison équipotentielle. Par définition, nous appelons courant de mode commun, le courant qui circule dans la connexion équipotentielle.

1.7 Dispositifs de mesure des perturbations

On distingue deux catégories de dispositifs de mesure utilisés en CEM. La première concerne la mesure des perturbations conduites à haute fréquence, elle comprend le Réseau Stabilisé d'Impédance de Ligne (RSIL) et les capteurs de courant passif basés sur le principe du transformateur de courant. Dans la seconde catégorie, on trouve divers types d'antennes destinées aux mesures en champ proche ou lointain. Dans tous les cas, le signal issu du capteur est analysé dans le domaine temporel (oscilloscope) et plus généralement dans le domaine fréquentiel grâce à l'analyseur de spectre hétérodyne [3].

1.7.1 Mesures des perturbations conduites

Les mesures doivent être effectuées en connectant l'appareil sous test à un RSIL (Réseau de Stabilisation d'Impédance de Ligne) pour les fréquences s'étendant de 150kHz à 30MHz ou en utilisant une pince absorbante pour les fréquences de 30MHz à 300MHz (pour certaines normes).

1.7.1.1 Le RSIL (Réseau de Stabilisation d'Impédance de Ligne)

Le RSIL s'apparente à un filtre qui est inséré entre le dispositif sous test et le réseau fournissant l'énergie. Son rôle est double :

- Il doit isoler le réseau, sur lequel peuvent exister des perturbations de mode commun et de mode différentiel, de l'équipement sous test. Cependant, il doit présenter à la fréquence du réseau une chute de tension sortie/entrée inférieure à 5% de la tension nominale lorsqu'il est parcouru par le courant nominal.
- Enfin, il doit présenter une impédance de fermeture constante vis-à-vis des perturbations à haute fréquence émises par le dispositif sous test, tant en mode commun que différentiel, et ceci indépendamment de l'impédance présentée par le réseau d'énergie [3].



Figure 1.13 Photo de l'appareil RSIL (Réseau de Stabilisation d'Impédance de Ligne)

1.7.1.2 La pince absorbante Les capteurs de courant

Il est généralement admis qu'au-dessus de 30MHz l'énergie perturbatrice se propage par rayonnement vers l'installation réceptrice perturbée. L'expérience a montré que l'énergie perturbatrice était surtout rayonnée par la portion de la ligne voisine de l'appareil considéré. On a donc convenu d'appeler pouvoir perturbateur d'un tel appareil la puissance qu'il pourrait fournir à son cordon d'alimentation.

Cette puissance est sensiblement égale à celle qui est fournie par l'appareil à un dispositif absorbant placé autour de ce cordon à l'endroit où cette puissance est à son maximum [3].

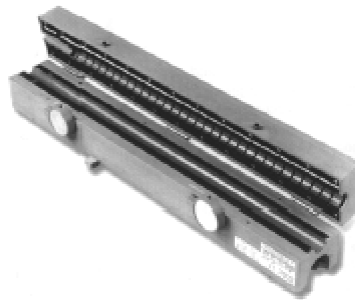


Figure 1.14 *Photo de la pince absorbante*

1.7.1.3 Les capteurs de courant

Les capteurs de courant doivent posséder une bande passante très large, du continu à la centaine de MHz, être capable de mesurer des courants élevés (jusqu'à quelques kA) et être insensibles aux agressions électromagnétiques délivrées par le convertisseur testé. Ils sont également utilisés pour la mesure CEM du courant conduit. Les capteurs passifs, basés sur le principe du transformateur de courant, sont les mieux adaptés à ces contraintes métrologiques [3].

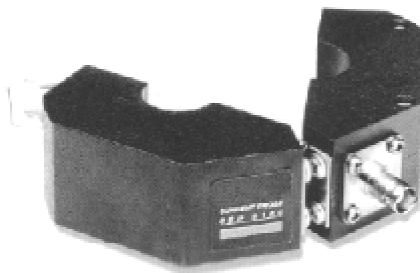


Figure 1.15 *Photo capteurs de courant*

Chapitre 2

Modes de couplage des perturbations

2.1 Introduction

La CEM concerne la génération, la transmission et la réception de l'énergie électromagnétique. Une source produit une émission et un canal de transfert ou de couplage communique l'énergie au récepteur. Quand ce processus est désirable, il s'agit d'un fonctionnement normal mais quand il au contraire indésirable, il s'agit du problème de CEM. L'amélioration de la CEM est obtenue par différents types d'actions [2] :

- Tenter de supprimer la production d'énergie perturbatrice à la source,
- Rendre le canal de transmission aussi inefficace que possible,
- Rendre le récepteur le moins sensible possible aux perturbations.

On ne peut parler de la CEM que si les trois acteurs (Source, couplage et victime) existent

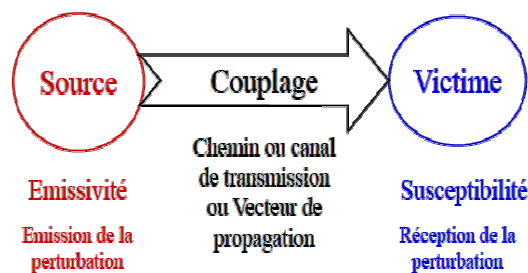


Figure 2.1 Schéma représentant les trois acteurs (Source, couplage et victime)

2.2 Modes de transmission en conduction

Sur une liaison bifilaire (deux conducteurs), le signal perturbateur peut se déplacer de deux façons (modes): Mode Commun (MC) et mode Différentiel (MD) dans un circuit la circulation des courants s'établit toujours par l'intermédiaire de courants de mode commun et de mode différentiel. Le mode commun utilise le réseau de masse ou de terre comme potentiel de référence commun. Le courant de mode différentiel se transmet par une liaison bifilaire en aller et retour. Le réseau de distribution de l'énergie SONALGAZ (phase et neutre) est du type différentiel. Dans les deux appareils est la somme des courants issus des deux modes

Les couplages sont les modes d'action des perturbations «CEM» sur les victimes [3].

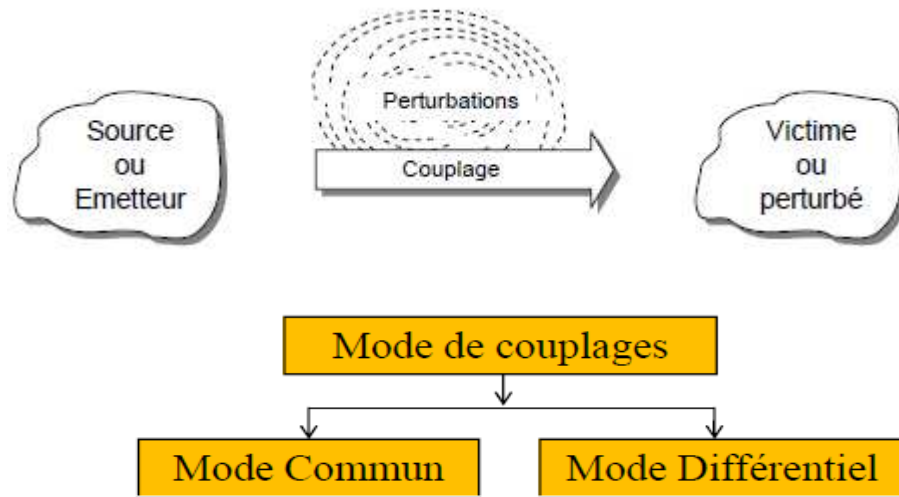


Figure 2.2 Les modes de couplages

2.2.1 Mode différentiel

C'est le mode de fonctionnement de tous les signaux électroniques et des alimentations. La propagation s'effectue en mode différentiel lorsque la perturbation est transmise à un seul des conducteurs actifs. Le courant de mode différentiel se propage sur l'un des conducteurs, passe à travers l'équipement et revient par un autre conducteur.

Les signaux utiles sont généralement transmis en mode différentiel, appelé aussi mode « série », mode « normal » ou mode « symétrique ». Le courant de mode différentiel se boucle sur les 2 fils de liaison. Il circule en sens opposé sur chacun des fils [4].

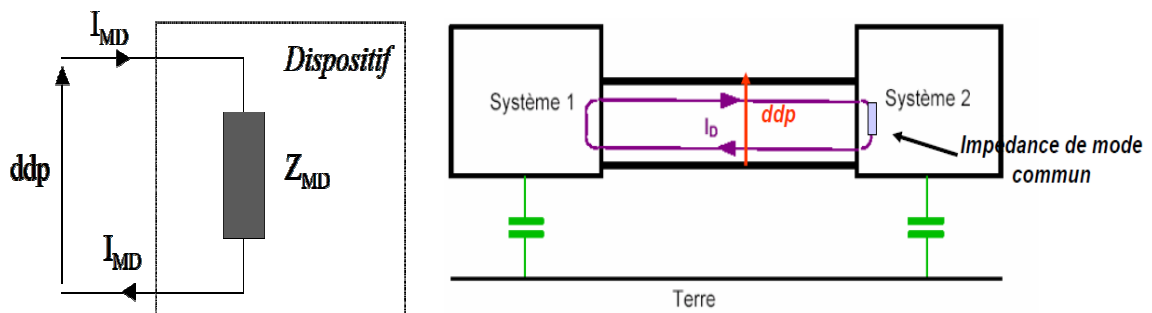


Figure 2.3 Schéma de principe du mode différentiel

Z_{MD} : impédance en mode différentiel du dispositif considéré

La somme des courants aller et retour est nulle à tout moment

C'est le mode de propagation le moins redouté, il est le plus souvent faible, aisément repérable et négligeable si les conducteurs aller retour sont proches (les champs électromagnétiques s'annulent mutuellement) et si les câbles perturbateurs sont éloignés et c'est le mode de propagation prépondérant à l'intérieur des systèmes.

La tension de mode différentielle est mesurée entre les 2 fils, elle peut être mesurée avec une sonde différentielle [4].

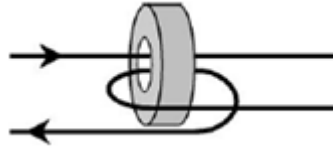


Figure 2.4 Sonde différentielle

2.2.2 Mode commun

Le mode commun est très peu utilisé pour les signaux utiles, il correspond souvent à un mode parasite. Il est aussi appelé mode « parallèle », mode « longitudinal », ou mode « asymétrique ». La tension de mode commun est définie comme étant égale à la valeur moyenne de la d.d.p. entre les différents fils et la masse [4].

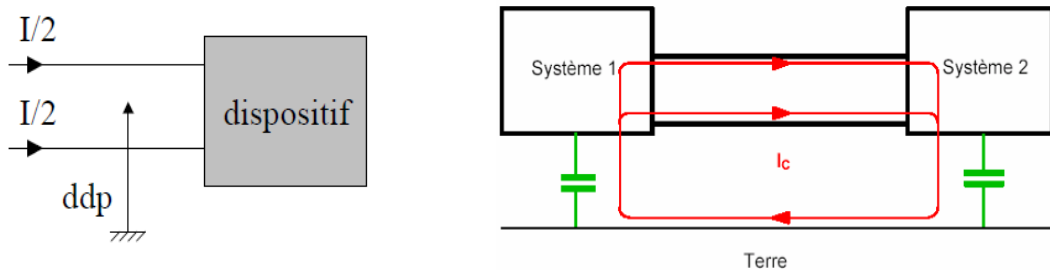


Figure 2.5 Schéma de principe du mode commun

Le courant de mode commun est égal au courant qui s'écoule à la masse. Ce courant se partage entre les différents fils de liaison, dans le même sens sur chacun des fils, c'est le cas le plus fréquent de transmission des perturbations, car le fil de signal et le fil de retour sont proches et reçoivent la même perturbation [3,4]

Il peut être mesuré par une sonde de courant parcourue par les 2 fils dans le même sens.

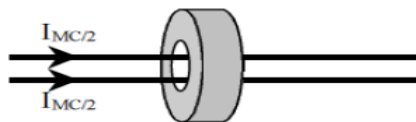


Figure 2.6 Sonde de courant

Les perturbations de mode commun représentent le principal problème de la «CEM», car leur chemin de propagation est difficile à identifier.

2.3 Types de couplages

Il existe trois types de couplages :

- Couplage par Conduction qui se traduit par la circulation d'un courant perturbateur,
- Couplage par Rayonnement qui se transmet par le champ électrique E, ou magnétique B ou électromagnétique (E, B)
- Couplage par Ionisation qui se transmet à travers une décharge électrique dont le courant est constant.
Si des courants se propagent, c'est qu'ils se sont préalablement couplés avec le système victime.

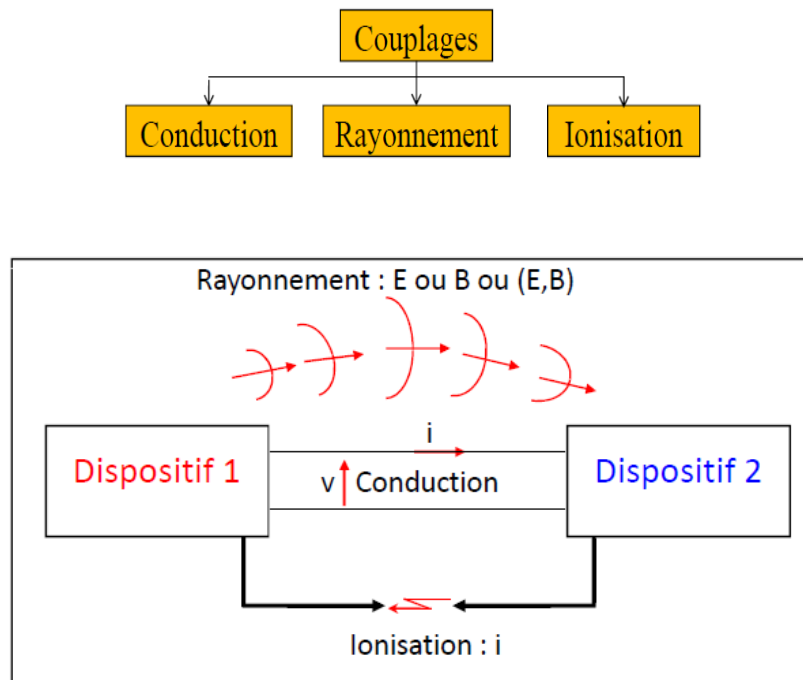


Figure 2.7 Schéma de principe d'un couplage par conduction

a) Couplage par Conduction électrique (ou par impédance commune) :

- Liaison directe,
- A travers les câbles et les composants reliant la sources à la victime,

b) Couplage par Rayonnement électromagnétique :

- Rayonnement dans la zone de champ proche
- Rayonnement dans la zone de champ lointain

c) Couplage par Ionisation :

- Ionisation d'un milieu diélectrique (souvent de l'air) dû à la chaleur,
- Ionisation de l'air dû à l'humidité (foudre)

2.3.1 Couplage par conduction

Deux possibilités de couplage par conduction [1,2,3]:

- Couplage par liaison directe (contact) ou perturbations directement conduites,

- Couplage par impédance commune; à travers les câbles et les composants.

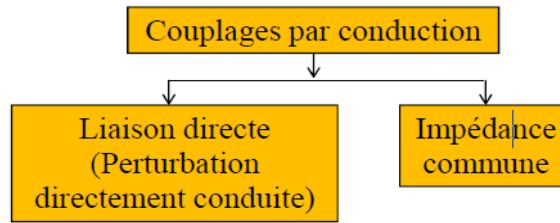


Figure 2.8 Possibilités de couplage par conduction

Les perturbations conduites sont transmises par un câble (lignes d'alimentation, bus de transmission de données, câbles de masses, terre, capacités parasites, ...).

Perturbation par conduction = circulation du courant perturbateur

2.3.1.1 Couplage par liaison directe (contact) ou perturbations directement conduites

La perturbation provoquée est transmise directement (telle quelle) à la victime sans qu'elle soit modifiée lors du parcours.



Variation rapide de tension : elle est causée principalement par des défauts où la tension peut augmenter ou diminuer de quelques % dont la durée est de quelques ms [3,4].

- Variation lente de tension : causée principalement par la variation de la charge sur le réseau de distribution dont la durée peut atteindre plusieurs secondes.
- Creux ou microcoupures de tension : causées par des défauts sur les lignes d'alimentation, orage, vent (contact bref entre les lignes) pendant une durée comprise entre 1ms et 1s.
- Surtension : produite soit localement par une variation rapide du courant traversant un circuit bobiné ou par résonance du circuit LC, délestage du réseau, ...)

2.3.1.2 Couplage par impédance commune; à travers les câbles et les composants.

Le couplage par impédance commune est mis en évidence lorsqu'un courant circule entre deux sous systèmes d'un système électrique à travers des impédances communes constituées par des liaisons entre les deux sous systèmes [2,3,4]

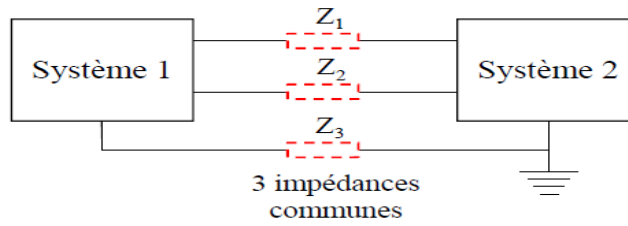


Figure 2.9 Couplage par impédance commune

La perturbation est produite par la chute de tension ΔV dans l'impédance commune qui perturbe un ou les deux sous systèmes. Dans un circuit, le couplage par impédance commune est mis en évidence lorsque deux mailles ont en commun un tronçon de conducteur dont l'impédance ne peut pas être négligeable.

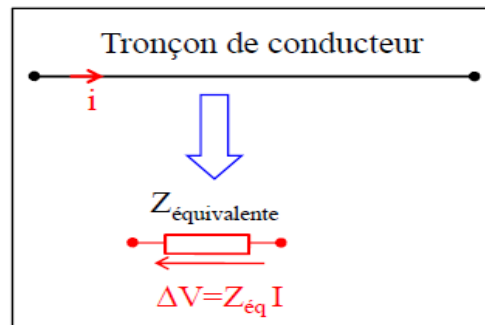


Figure 2.10 Impédance commune d'un tronçon de conducteur

2.3.2 Couplage par rayonnement

Plusieurs possibilités de couplage par rayonnement :

- Couplage par diaphonie inductive
- Couplage par diaphonie capacitif
- Effet d'antenne

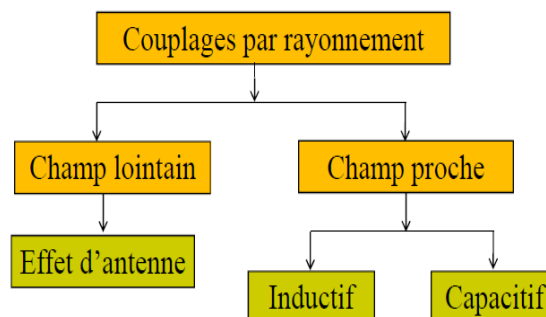


Figure 2.11 Possibilités de couplage par rayonnement

2.3.2.1 Champ réactif, proche et lointain

On distingue trois zones autour d'une source d'émission ou de rayonnement [3,4] :

- La zone de champ réactif (très proche : entourant immédiatement la source) appelée zone d'évanescence ou de Rayleigh. L'onde électromagnétique n'est pas encore formée. Les deux champs électrique et magnétique sont indépendants.
- La zone suivante est celle de champ proche ou région de Fresnel. Dans cet espace, situé un peu plus loin de la source, le phénomène de propagation commence à apparaître mais on dit que l'onde n'est pas encore formée. Les champs électriques et magnétiques sont toujours indépendants.
- La zone de champ lointain, ou région de Fraunhofer, où les propriétés du champ électromagnétique sont bien établies. Il apparaît le phénomène classique de propagation des ondes électromagnétiques. Cette région se situe généralement à plusieurs longueurs d'onde du périmètre de la source avec un champ électromagnétique dont l'amplitude diminue lorsque la distance à l'antenne augmente et s'annule à l'infini.

2.3.2.2 Champ proche et lointain – Distance limite –

Les distances à considérer sont fondées sur la longueur d'onde du signal : $\lambda = 3 \cdot 10^8 / f$

Champ proche $< \lambda/2\pi <$ champ lointain [1]

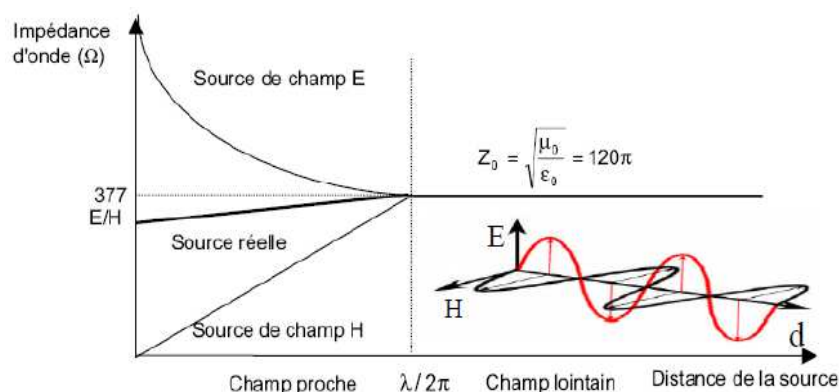


Figure 2.12 Caractéristique impédance d'onde en fonction de la distance de la source

Dans la zone proche de l'émetteur où les champs électrique E et magnétique H sont indépendants, on mesure le rapport E/H appelé impédance d'onde. Dans la zone lointaine de l'émetteur ($> \lambda/6$), les champs E et B sont perpendiculaires à la fois entre eux et à la direction de propagation. Dans le vide (ou l'air), ils sont liés par la relation d'impédance d'onde Z_0 .

À travers une boucle dont la dimension est inférieure à la longueur d'onde, le champ électrique perçu à distance « d » de la source est donnée par

$$E = 1.32 \cdot 10^{-14} \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda}{2\pi d}\right)^2} \frac{f^2 S}{d} I \quad (2-1)$$

En champ proche où $d \gg \frac{\lambda}{2\pi} \Rightarrow \frac{\lambda}{2\pi d} \ll 1$ $E = 1.32 \cdot 10^{-14} \frac{\lambda}{2\pi d^2} f^2 S I \quad \text{V/m}$

Le seul cas de proximité en zone de champ très proche pour les personnes est le téléphone portable. Les personnes travaillant à l'installation ou à la réparation des antennes relais ont pour consigne de ne pas rester face à l'antenne plus de quelques dizaines de secondes d'affilée si l'antenne est branchée. Il est dangereux de se tenir à 1 cm ou à 10 cm de l'antenne relais... mais pas à 10 m. La puissance des ondes que l'on reçoit en provenance des antennes décroît en raison du carré de la distance. En passant de 10 cm à 10 m, on diminue cette puissance d'un facteur 10000 (100^2) [1,2].

En champ lointain où $d \ll \frac{\lambda}{2\pi} \Rightarrow \frac{\lambda}{2\pi d} \gg 1$ $E = 2 \cdot 10^{-14} \frac{f^2 S}{d} I \quad \text{V/m}$

Dans la zone éloignée le champ est inversement proportionnel à la distance. Le champ électrique émis par une antenne à grande distance de celle-ci est :

$$E(\text{V/m}) = \frac{\sqrt{60PG}}{d} \quad (2-2)$$

- E est l'intensité du champ électrique (en V/m),
- P est la puissance transmise à l'antenne,
- d est la distance séparant l'observateur de l'antenne,
- G est. le gain directif de l'antenne (1 pour une antenne isotrope 1/8 d'onde, 1.3 pour une antenne fouet, 4 à 10 pour une antenne log périodique, 300 à 2000 pour une antenne parabolique)

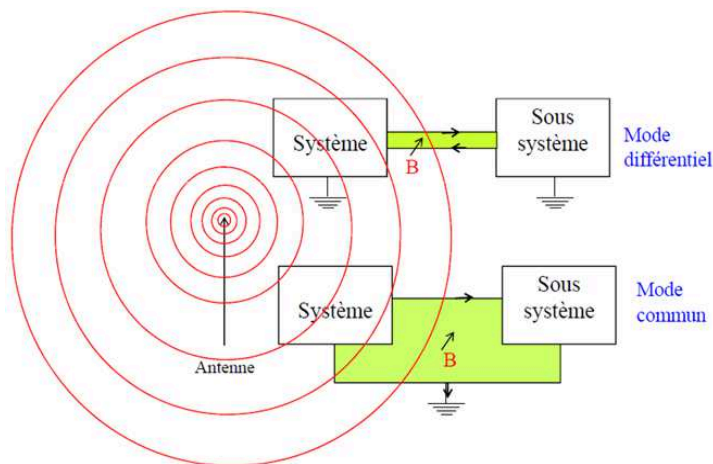


Figure 2.13 Champ lointain – Mode de couplage

2.3.2.3 Champ proche – Régime quasi-stationnaire –

a) Couplage inductif

Le champ magnétique variable créé par un conducteur parcouru par un courant, est intercepté par un conducteur voisin se comportant comme une boucle. Il y a donc apparition d'une force contre-électromotrice. Il est pratique de modéliser le couplage entre les 2 boucles par une mutuelle entre les deux circuits [1,2,3].

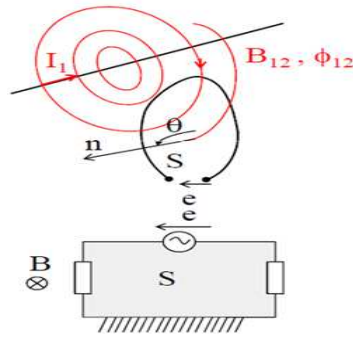


Figure 2.14 Schéma de principe d'un couplage inductif

$$\Phi_1 = \iint B_1 dS = L_1 I_1 \quad (2-3)$$

$$\Phi_{12} = \iint B_{12} dS = B_{12} S \cos\theta = M_{12} I_1 \quad (2-4)$$

$$\Phi_{12} = \iint B_{12} dS = B_{12} S \cos\theta = M_{12} I_1 \quad (2-5)$$

$$e = -j\omega B_{12} S \cos\theta = -j\omega M_{12} I_1 \quad (2-6)$$

$$e = -\frac{d\Phi_{12}}{dt} \quad (2-7)$$

. Création d'une source de tension variable « e ». La tension e pourra apparaître sous forme différentielle ou sous forme de mode commun

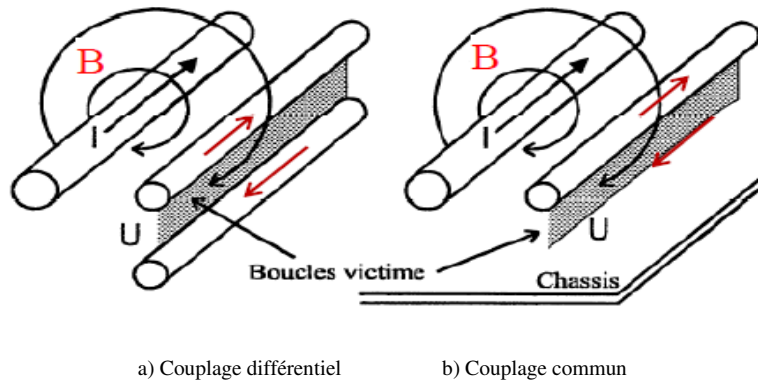


Figure 2.15 Champ lointain – Mode de couplage

b) Couplage capacitif

Un champ électrique E variable appliqué sur un circuit conducteur ouvert fait apparaître une tension V . Le couplage par champ électrique est équivalent au couplage par l'intermédiaire d'une capacité. Une différence de tension variable entre ces deux circuits va générer un courant électrique de l'un vers l'autre à travers la capacité parasite.

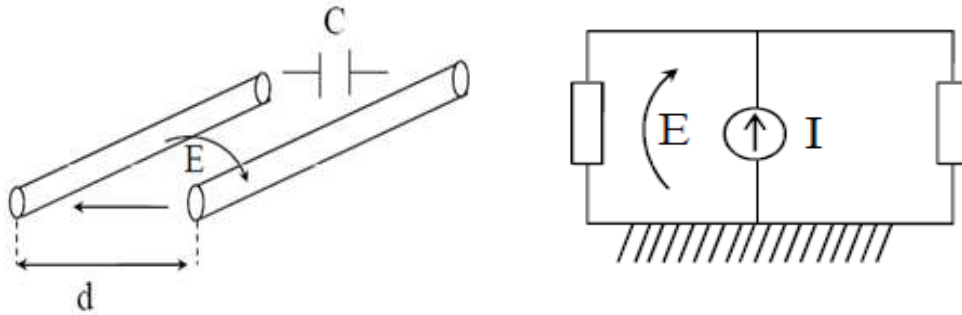


Figure 2.16 Couplage par champ électrique

Création d'une source de courant variable « I »

$$V = \int E \, dl = Ed \quad (2-8)$$

$$I = C \frac{dV}{dt} = Cj\omega V = j2\pi fCV \quad (2-9)$$

Ce courant est d'autant plus élevé que la fréquence et la capacité sont élevées.

– Couplage champ à fil

Couplage entre un champ électrique variable et un fil conducteur

- Réduction du couplage :
 - action sur la victime (plaquer le fil victime contre un conducteur de masse)
 - action sur la source (diminuer l'effet de E par un écran électrique : blindage)
 - action sur le couplage (blinder et/ou filtrer les câbles sensibles)

– Couplage par diaphonie capacitive

Couplage par diaphonie capacitive effet d'une tension variable entre un conducteur et son voisin quand deux conducteurs sont parallèles sur une longueur importante [1, 2,3].

- Réduction du couplage
 - action sur la victime (choisir les diélectriques d'enrobage des fils pour diminuer ϵ et donc C)
 - action sur la source (réduire dV/dt dans la paire coupable)
 - action sur le couplage (séparer les fils coupables et victimes, croiser les fils et blinder les câbles sensibles)

– **Couplage carte à châssis**

Effet d'une tension variable entre un conducteur et la masse la plus proche

$$C_V = C_T \cdot \rho \quad (2-10)$$

- ρ : pourcentage de perturbation reçue par la piste victime considérée
- C_T : capacité totale de la carte /masse

$$C_T = C_I + C_P \quad C_I = 35 D \quad (2-11)$$

- C_I : capacité intrinsèque en pF
- D : diamètre du disque ou diagonale de la carte en m

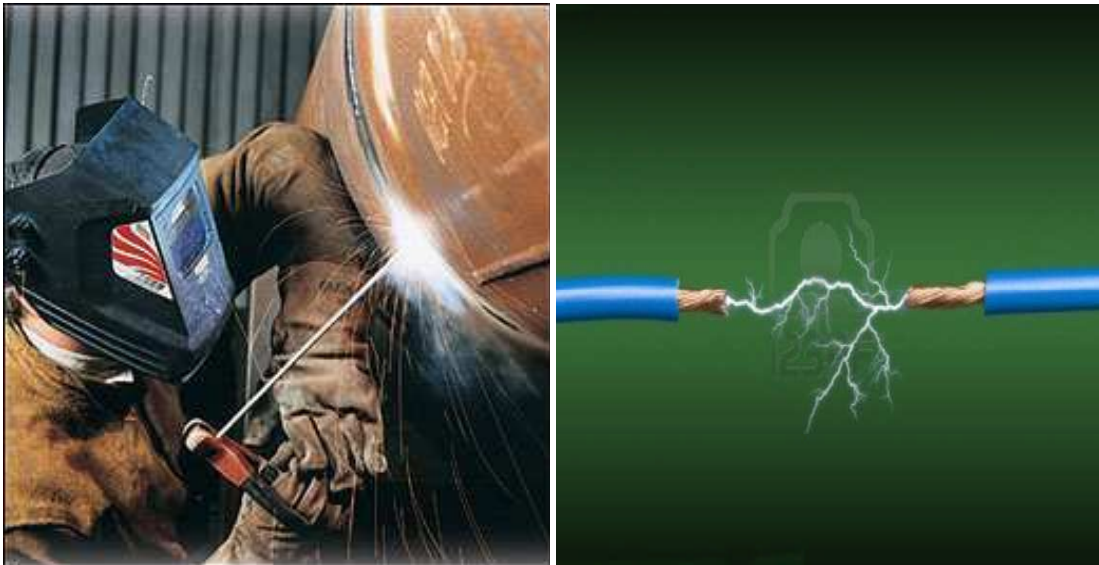
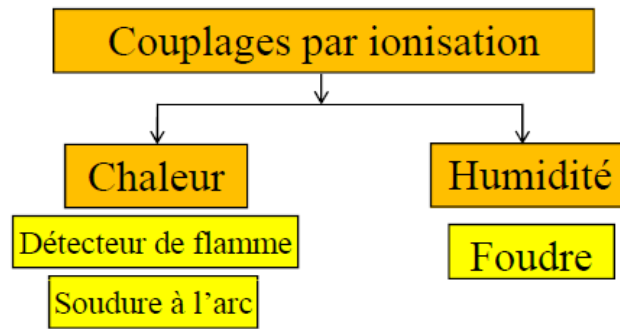
$$C_P = 9 S/H \quad (2-12)$$

- C_P : capacité plane en pF
- S : surface des électrodes ou de la carte en m²
- H : hauteur de la carte /plan conducteur en m

2.3.3 *Couplage par ionisation*

IL y a production d'un champ rayonné qui peut à son tour induire des courants dans les installations (ou structures métalliques) environnantes [1,2]..

- On assimile le canal de foudre à un conducteur vertical qui engendre à une distance d un champ $H = I/(2\pi d)$ A/m et un champ électrique $E = Z_0 H$ ($Z_0 = 377$).
- Sur les réseaux de distribution électriques, un coup de foudre engendre une onde de choc (surtension) qui se propage sur la ligne.
- Le courant de foudre circulant dans la prise de terre, provoque une élévation du potentiel du conducteur de protection.
- Si le courant de foudre circule dans des structures métalliques, il provoque une élévation du potentiel des masses métalliques.



(a) Chaleur



(b) Humidité Foudre - Champ rayonné

Figure 2.17 Exemples de couplage par ionisation

Ceci entraîne des circulations de courant dans les câbles, des dysfonctionnements, voir des défauts d'isolement.

2.4 Exercice d'application

Exercice 1 : On désigne par I_1 et I_2 les courants qui véhiculent les perturbations et par U_1 et U_2 les tensions des câbles par rapport à la terre

A. En mode commun de propagation des perturbations :

En reprenant le schéma de la figure 2, placer les courants et les tensions là où il le faut avec leurs sens, Donner les relations de comparaison entre I_1 et I_2 d'une part et entre U_1 et U_2 d'une autre part, Placer les capacités de couplage parasites là où c'est nécessaire.

B. Même questions (1, 2 et 3) pour le mode différentiel.

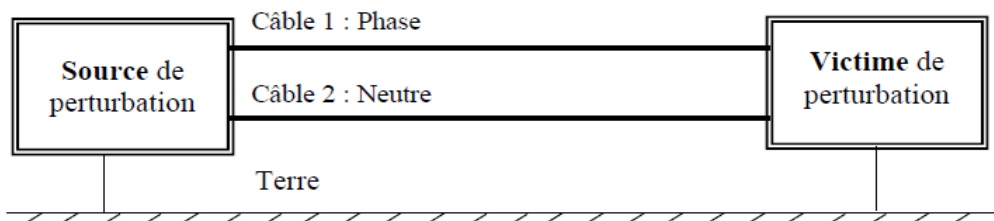


Figure 2

Exercice 2 : Couplage par impédance commune (voir figure3) , La d.d.p. parasite qui apparaît est créée en mode commun.

– Amélioration de la CEM:

1. Diminuer l'impédance de masse.
2. Limiter les courants qui circulent entre les masses des différents appareils.

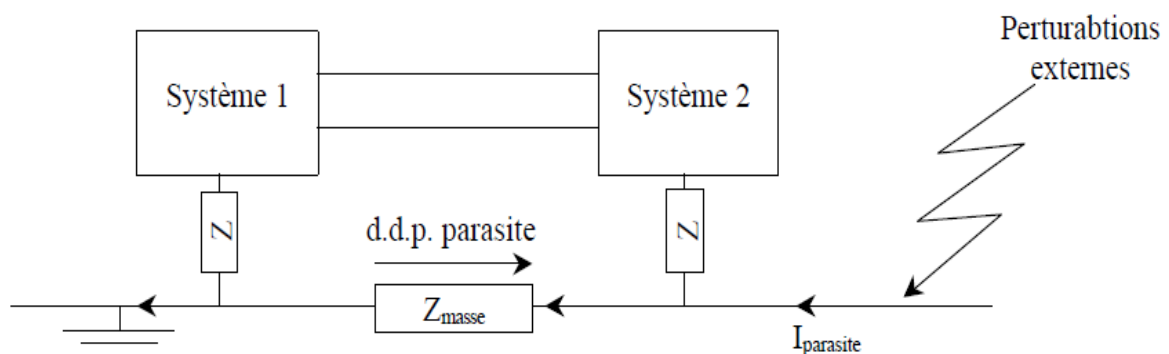


Figure 3 .Couplage par impédance commune.

Exercice 3 : Couplage conducteur/plan de masse (voir figure4) .Les courants parasites apparaissent en mode commun.

– Amélioration de la CEM:

1. Minimiser les tensions sources de perturbation.
2. Réduire les capacités parasites entre les conducteurs et le plan de masse.

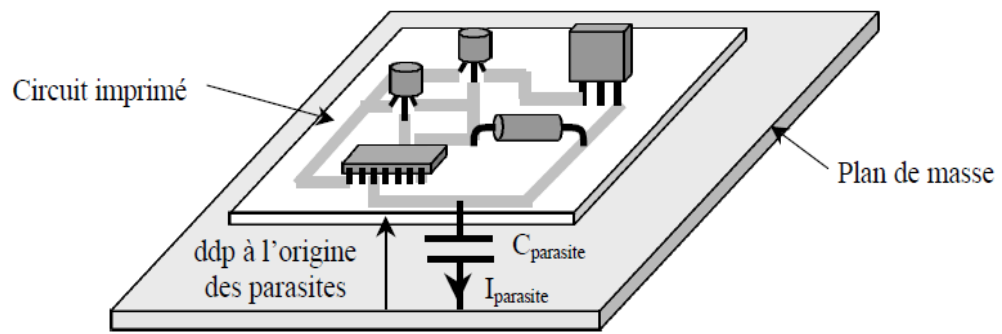


Figure 4 .Couplage conducteur/plan de masse

Chapitre 3

Sources de perturbations

3.1 Generalités

Les sources des émissions électromagnétiques peuvent être d'origine naturelle (atmosphériques, galactiques, solaires, bruit thermique terrestre ...) ou artificielle Parmi ces sources, certaines sont :

- Intentionnelles : émetteurs radioélectriques, téléphone portable, fours micro-ondes, fours à induction, four à arc, soudure à arc, lampes à décharge [1,2].
- Non intentionnelles : systèmes d'allumage des moteurs à explosion, tous les systèmes d'enclenchement et de coupure d'un signal électrique, lampes à décharge, Electronique de contrôle-commande et électronique de puissance, électronique de protection, appareillage de puissance, Moteur puissant à collecteur, démarrage de tout type de moteur électrique puissant, ...

3.2 Les principaux acteurs de perturbation

Les principaux acteurs de perturbation sont [1,2]. :

- Champs magnétiques et Electriques,
- Harmoniques,
- Fluctuations de tension,
- Creux de tension,
- Coupure brèves,
- Surtensions,
- Chocs de foudre et décharges électrostatiques,
- Signaux transmis sur le réseau,
- Variation de fréquence,
- Composante continue sur le réseau, déséquilibre de phases,...
- Une perturbation électromagnétique se traduit par l'apparition d'un signal électrique indésirable venant s'ajouter au signal utile.

Elles engendrent des phénomènes indésirables tel que :

- le brouillage des ondes radio,
- les interférences des émissions radioélectriques dans les systèmes de contrôle- commande,
- fausser les résultats de l'imagerie des hôpitaux,
- gêner la montée et la descente des avions
- provoque des maladies chez les êtres vivants,

Un système électromagnétique compatible satisfait ces trois critères :

- il ne gêne pas le fonctionnement d'autres systèmes,
- il n'est pas gêné par les perturbations émises par les autres systèmes en fonctionnement,
- il ne cause pas d'interférences avec lui même.

Quelques sources de perturbations et leurs victimes

Sources	Victimes
Émetteurs radio-fréquence et Wifi, Bluetooth, « France Inter », FM, ...	Électronique analogique bas niveau Récepteur radiofréquence
Lampes à arc	Électronique analogique et numérique
Soudage HF	Électronique analogique et numérique

Table 3.1 Sources de perturbations et leurs victimes

3.3 Les harmoniques

Un signal périodique de forme quelconque est décomposable mathématiquement en une somme de signaux sinusoïdaux ayant différentes amplitudes et phases et dont la fréquence est un multiple entier du fondamental [1,2]..

Fondamental : fréquence la plus basse et utile du signal.

C'est la décomposition d'un signal en série de FOURIER.

Les harmoniques étant une source de perturbation qui peut être

- permanente.
- Onduleur,
- Coupure de courant, fluctuation de tension
- Démarrage du moteur, Les champs magnétiques et électromagnétiques

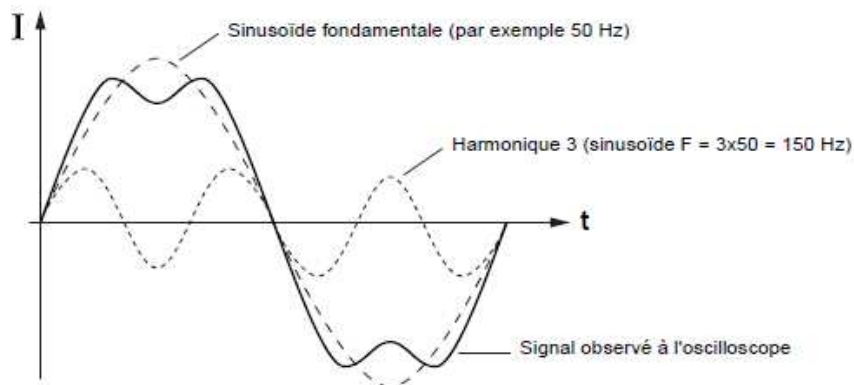


Figure 3.1 Représentation temporelle d'un signal périodique.

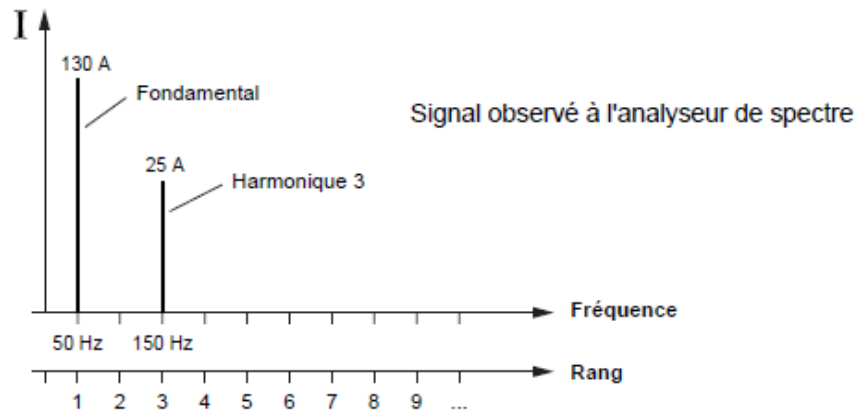


Figure 3.1 Représentation spectrale d'un signal périodique.

Tout conducteur traversé par un courant électrique rayonne un champ magnétique H . Si un conducteur électrique formant une boucle S est traversé par le champ magnétique H , toute variation de H va induire une f.e.m. dans la boucle entraînant la circulation d'un courant de perturbation dans le circuit si cette boucle est fermée [4].

La perturbation est proportionnelle à la surface de la boucle et à sa variation. Elle devient importante pour des phénomènes transitoires rapides ainsi que lorsque la surface de boucle est importante. Il s'agit de variations qui restent dans la limite de $\pm 10\%$. Les perturbations harmoniques sont des perturbations de type basse fréquence «BF» et sont donc principalement «conduites».

3.4 Fluctuations de tension

Elles sont provoquées essentiellement par toutes les machines à fort courant. • Les conséquences de ces variations restent faibles. La tension ne variant que dans la limite des $\pm 10\%$. Cependant sur certains récepteurs, comme l'éclairage, cela peut provoquer du flicker (scintillement ou clignotement).

Des variations rapides de tension, répétitives ou aléatoires (figure I.2), sont provoquées par des variations rapides de puissance absorbée ou produite par des installations telles que les soudeuses, fours à arc, éoliennes, etc [2] [5].

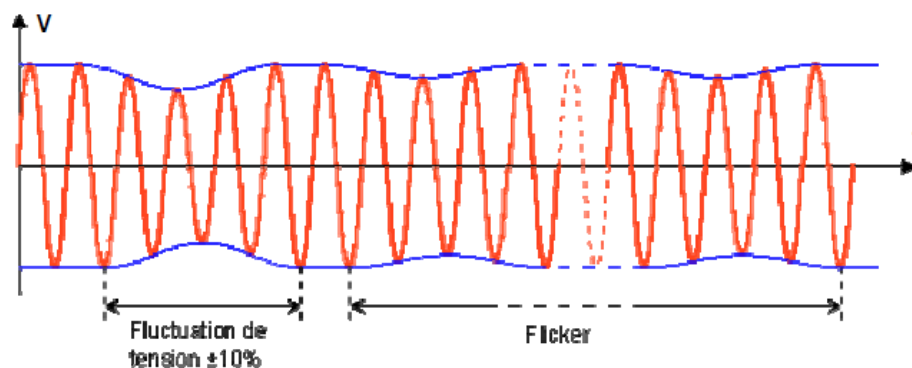


Figure 3.3 Exemple de variations rapide de la tension [2].

Ces fluctuations de tension peuvent provoquer un papillotement de l'éclairage (flicker), gênant pour la clientèle, même si les variations individuelles ne dépassent pas quelques dixièmes de pour-cent. Les autres applications de l'électricité ne sont normalement pas affectées par ces phénomènes, tant que l'amplitude des variations reste inférieure à quelque 10 %. Les conséquences de ces variations restent faibles, la tension ne variant que dans la limite des $\pm 10\%$.

Exemple : Sur certains récepteurs, comme l'éclairage, cela peut provoquer du flicker (papillotement).

3.5 Creux de tension et coupure brèves

Les creux de tension sont produits par des courts-circuits survenant dans le réseau général ou dans les installations de la clientèle (figure I.3). Seules les chutes de tension supérieures à 10 % sont considérées ici (les amplitudes inférieures rentrent dans la catégorie des «fluctuations de tension»). Leur durée peut aller de 10 ms à plusieurs secondes, en fonction de la localisation du court-circuit et du fonctionnement des organes de protection (les défauts sont normalement éliminés en 0.1-0.2 s en HT, 0.2 s à quelques secondes en MT). [5]

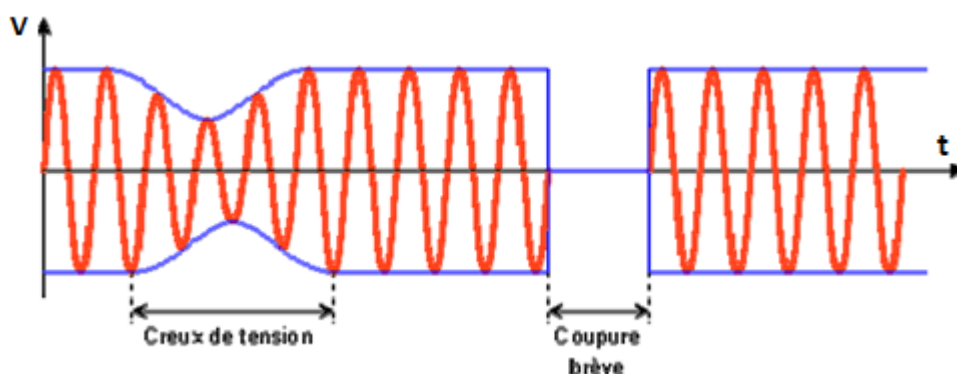


Figure 3.4 Creux de tension [2].

Ils sont caractérisés par leurs: amplitude et durée et peuvent être monophasés ou triphasés selon le nombre de phases concerné.

Les creux de tension peuvent provoquer le déclenchement d'équipements, lorsque leur profondeur et leur durée excèdent certaines limites (dépendant de la sensibilité particulière des charges). Les conséquences peuvent être extrêmement coûteuses (temps de redémarrage se chiffrant en heures, voire en jours ; pertes de données informatiques ; dégâts aux produits, voire aux équipements de production...).

Il s'agit d'une diminution de la tension comprise entre 10% et 100%, pendant une durée allant de 10 ms (une demi-période) à 1mn.

- Elles sont provoquées par la mise sous tension de gros récepteurs (20 In), de condensateurs, par la proximité d'un court circuit sur un circuit voisin, par la coupure associée au réenclenchement automatique d'un dispositif de protection.
- Les conséquences vont du décrochage des moteurs asynchrones, à l'initialisation des systèmes automatiques voir la perte de l'alimentation.

3.6 Surtensions et chocs de Exemple d'application numérique foudre

Ce sont des perturbations impulsionnelles de forte amplitude. Leur origine peut être naturelle dans le cas du choc de foudre, ou industrielle lors de la coupure de circuits inductifs ou de la manoeuvre d'appareillage de connexion en HT. Dans le cas des surtensions de manoeuvre, les conséquences sont peu nombreuses pour le matériel électrotechnique, mais elles peuvent entraîner la destruction du matériel électronique si celui-ci n'est pas protégé. Les chocs de foudre sont des perturbations brusques et très importantes [4,5].

3.6.1 Surtensions directes

L'impact direct sur une ligne électrique ou téléphonique, génère une onde de tension qui se propage. Cette onde, qui est amortie par l'effet couronne et la longueur de la ligne, est coupée soit par l'isolateur à cornes soit par les moyens de protection au poste.

Comme le courant de la foudre est rarement inférieur à 10kA, et que l'impédance caractéristique d'une ligne aérienne est environ 300R, l'onde de tension atteindra 1500 kV.

3.6.2 Surtensions indirectes

Surtensions induites (indirectes). Si la foudre tombe à proximité de la ligne, le courant provoque une variation extrêmement rapide du champ électromagnétique. A cause des ondes électromagnétiques générées par la foudre, des surtensions sont induites dans des conducteurs situés loin du point d'impact. Ses effets se font sentir à plusieurs centaines de mètres, voire plusieurs kilomètres [4,6].

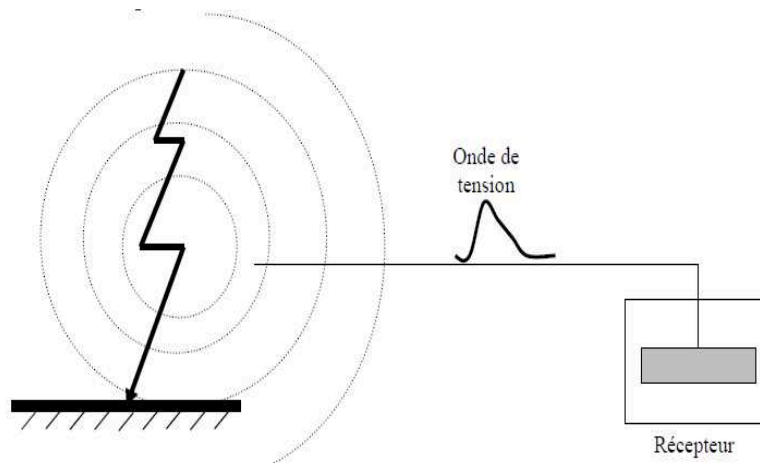


Figure 3.5 Effet d'une surtension indirecte

3.6.3 Montée en potentiel de la prise de terre

Une elevation du potentiel de terre a lieu lorsque le courant de foudre est ecoule par le sol. Cette variation du potentiel de terre touche les installations lorsque l'impact de la foudre au sol est a proximite de leurs prises de terre. Le courant circulant dans la terre peut provoquer la montee en potentiel des equipments par les prises de terre [4,6].

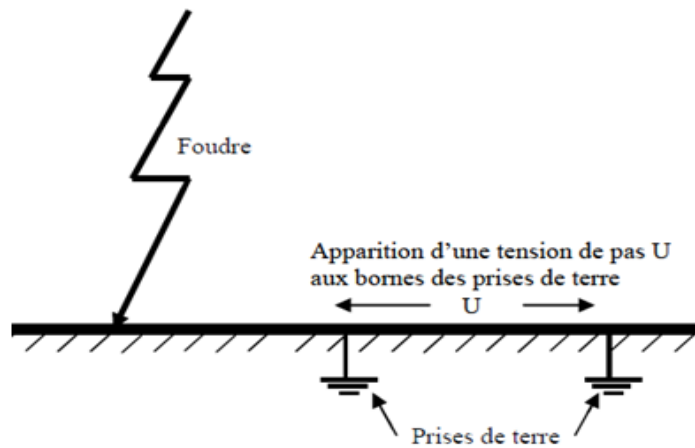


Figure 3.6 Tension de pas aux bornes des prises de terre

3.6.4 Tension de pas

La distribution des courants de foudre dans un sol dépend de la nature du chemin parcouru. Dans le cas d'un sol hétérogène, des différences de potentiel dangereuses peuvent s'établir entre deux points voisins. Cette différence est appelée tension de pas. Les charpentes métalliques des bâtiments et les prises de terre doivent être toutes reliées entre elles afin d'éviter des tensions dangereuses pour l'homme, ainsi que pour les risques d'incendie et d'explosions dus aux amorçages d'arc [6]...

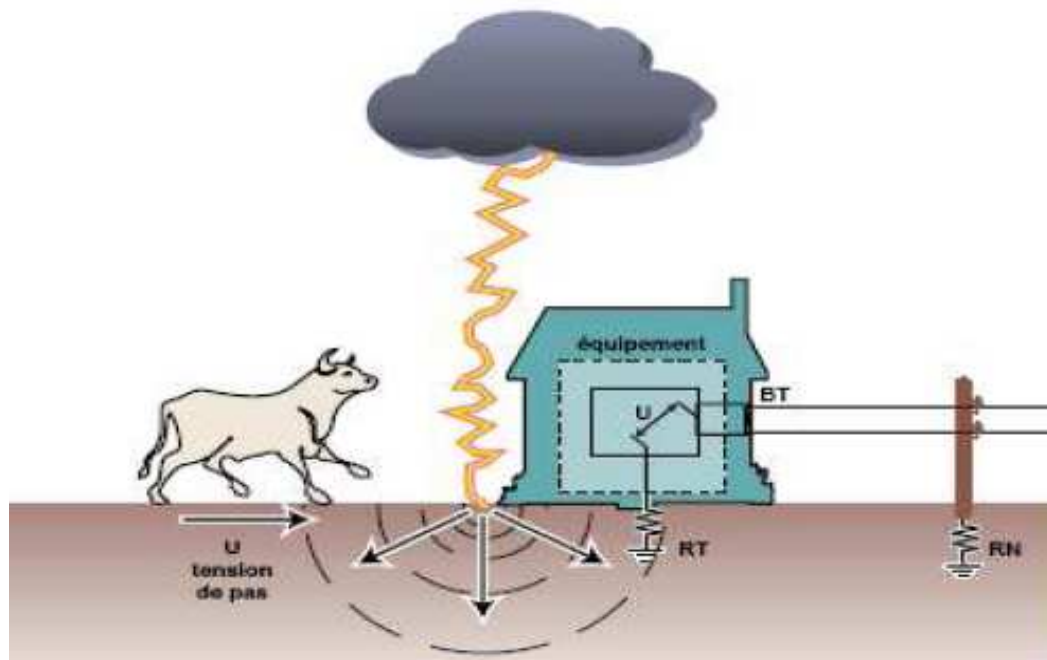


Figure 3.7 La distribution des courants de foudre

C'est ce phénomène qui explique souvent le foudroiement indirect des animaux : même à 100 m du point d'impact, un cheval dans un pré peut subir entre ses pattes arrière et ses pattes avant, une différence de potentiel de 500 V (Figure 3.7).

Il y a production d'un champ rayonné qui peut à son tour induire des courants dans les installations (ou structures métalliques) environnantes. – On assimile le canal de foudre à un conducteur vertical qui engendre à une distance d un champ $H = I/(2\pi d)$ A/m et un champ électrique $E = Z_0 H$ ($Z = 377$). Sur les réseaux de distribution électriques, un coup de foudre engendre une onde de choc (surtension) qui se propage sur la ligne.

– Le courant de foudre circulant dans la prise de terre, provoque une élévation du potentiel du conducteur de protection.

– Si le courant de foudre circule dans des structures métalliques, il provoque une élévation du potentiel des masses métalliques.

• Ceci entraîne des circulations de courant dans les câbles, des disfonctionnements, voir des défauts d'isolement.

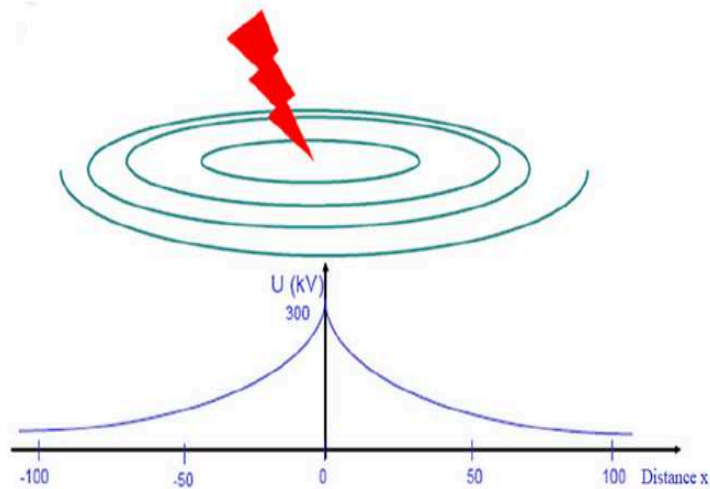


Figure 3.8 La distribution du potentiel en fonction de la distance

3.7 Décharges électrostatiques

Elles sont caractérisées par un très faible temps de montée de l'impulsion (1ns) mais avec une décharge de 60ns, une tension très élevée (2 à 15kV) et un très large spectre (jusqu'à 1GHz) [5,6].

Elles surviennent lorsqu'un élément a emmagasiné une charge électrostatique et se décharge brusquement en entrant en contact avec un autre élément relié à la masse ou présentant une différence de potentiel.

Les conséquences des décharges électrostatiques sont le plus souvent liées au claquage diélectrique de composants. Ce type de perturbation est une préoccupation importante des fabricants de matériel car le problème du claquage d'un composant ne se révèle que lors de la mise en service du matériel.

3.8 Variation de fréquence

Ce type de perturbation est extrêmement rare. Il peut s'observer lorsque la puissance de court circuit est faible.

3.9 Signaux transmis sur le réseau

C'est essentiellement la transmission de courants porteurs utilisés par :

- Les distributeurs d'énergie pour véhiculer les ordres tarifaires,
- Les composants de commande à distance (CAD),
- Les systèmes de communication interne de type inter - phone sur le réseau,
- Tous ces signaux peuvent perturber certains composants très sensibles notamment aux harmoniques.

3.10 Composante continue sur le réseau

La présence de redresseurs peut engendrer une composante continue sur le réseau de distribution.

3.11 Déséquilibre de phases

Si la puissance des charges monophasées est mal répartie, il y a un risque de déséquilibre de tension entre les phases. Ce déséquilibre engendrent des composantes inverses de courant qui provoquent des couples de freinage et des échauffements dans les moteurs à courant alternatif.

3.12 Les moteurs électriques

Les machines tournantes (moteurs électriques) constituent une source importante de perturbations conduites et/ou rayonnées [4,6].

Exemple : moteur à courant continu à collecteur

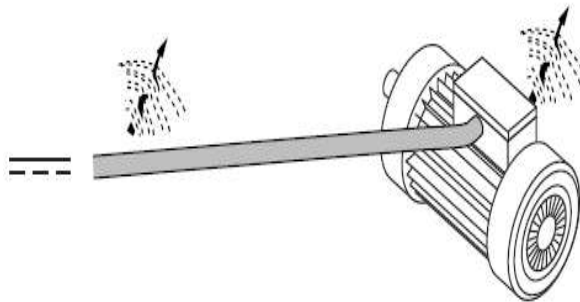


Figure 3.5 Phénomènes observés.

En fonctionnement normal (marche continue) les perturbations vont dépendre du type de moteur utilisé.

- les moteurs à induction (asynchrone ...) sont peu perturbants.
- les moteurs à balais et collecteurs vont générer des perturbations de type «transitoires» à fronts raides (dv/dt élevés) issues de la phase de commutation des balais.

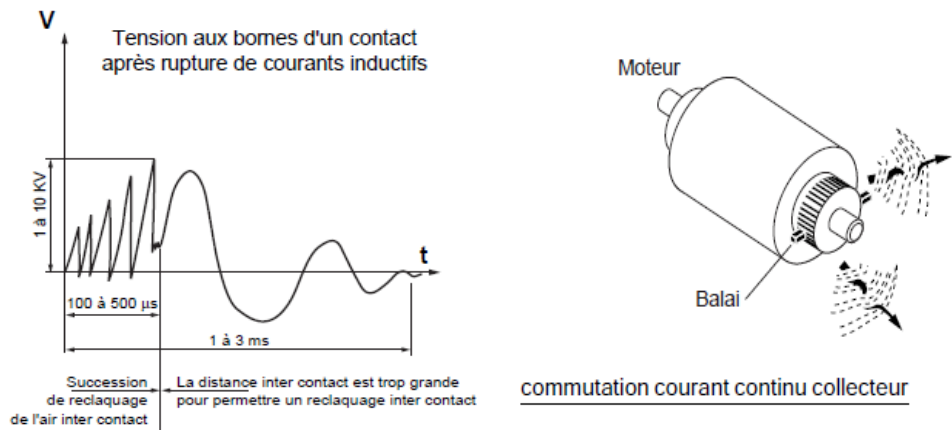


Figure 3.6 *Phénomènes observés.*

Cependant, des perturbations peuvent être générées par les moteurs asynchrones :

- la saturation magnétique des moteurs. La charge devient alors non linéaire et entraîne la création d'harmoniques.
- l'enclenchement ou mise sous tension du moteur (démarrage). Le fort appel de courant qui en résulte (6 à 10 I nominal) peut produire un creux de tension sur le réseau d'alimentation.

Signaux émis :

- harmoniques Basse Fréquence
- perturbation du réseau d'alimentation (creux de tension ...)
- - perturbations transitoires Basse et haute fréquence «HF» pouvant dépasser les 100 MHz
- - décharges électrostatiques provoquées par l'accumulation d'énergie électrostatique résultant du frottement de matériaux de natures différentes.

3.13 L'éclairage fluorescent

Nous désignons par là toutes les sources d'éclairage fonctionnant sur le principe d'un arc électrique qui s'allume et s'éteint alternativement [4,6].

Origine : Même en montage duo et compensé, le courant absorbé par les tubes fluorescents n'est pas sinusoïdal.

Perturbations générées : Ce courant est donc particulièrement chargé en harmoniques, notamment celui de rang 3 (3 x 50 Hz ou 3 x 60 Hz ...)

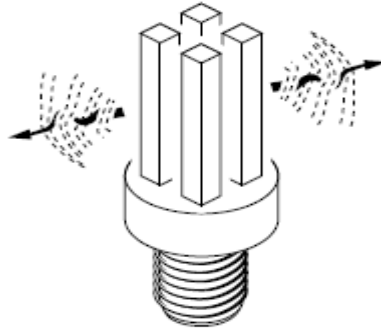


Figure 3.7 *Phénomènes observés.*

Des perturbations seront générées sur une large plage de fréquence (0 à 100 KHz voire 5 MHz). Ces perturbations de type principalement basse fréquence «BF» se retrouvent dans l'installation sous forme conduite.

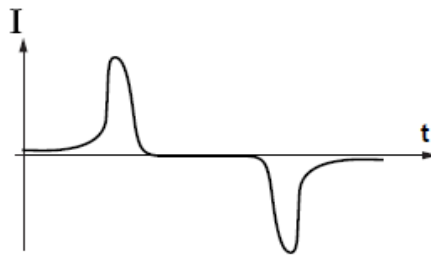


Figure 3.8 *Forme du courant absorbé.*

3.14 Le soudage par points

Il s'agit de toutes les machines ou pinces à souder électriques. La soudure s'effectue par point en faisant passer localement un courant élevé (≈ 30000 A) à travers les deux pièces à souder. L'échauffement y est tel qu'il y a soudure par fusion [4,6].

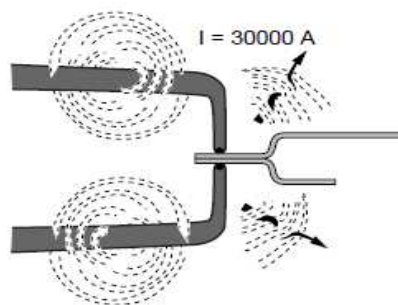


Figure 3.9 *Soudage par points.*

Perturbations générées : tensions harmoniques 200 ... 20 KHz et rayonnement d'un fort champ magnétique pouvant engendrer le dysfonctionnement de détecteurs de proximité inductifs.

3.15 Exercice d'application

Soit un coup de foudre dont la tension maximale au point d'impact est de 300kV. On considère le point d'impact comme origine des abscisses. La tension décroît exponentiellement en fonction de la distance x par la fonction : $V(x) = 300 e^{-0.022x}$ kV

1. Etablir l'expression du champ électrique.
2. Une personne se promène à 160m du point d'impact de ce coup de foudre en faisant des enjambées de 80cm. Calculer la différence de potentiel auquel est soumis le promeneur. Sa vie est-elle en danger ?
3. Si cette personne se promène à la même distance du point d'impact ($x=160m$) mais en faisant des enjambées de 20cm. Calculer à nouveau la différence de potentiel auquel est soumis le promeneur.
4. Que remarquer-vous et que préconisez-vous (conseil à donner) à toute personne se trouvant dans cette situation

Chapitre 4

Les protections électromagnétiques

Les protections électromagnétiques ont pour but d'atténuer les parasites produits par des phénomènes perturbateurs provenant principalement des couplages étudiés au second chapitre. L'adoption des protections adéquates nécessite une analyse fonctionnelle de l'installation protégée ainsi qu'une étude attentive des couplages générateurs de parasites

4.1 Réseaux de masse et de terre

4.1.1 Conception d'un réseau de terre

Pour les besoins du document, nous appellerons «terre» toutes les parties ou structures conductrices non accessibles ou enterrées. Bien que non officielle, cette définition nous permettra de mieux identifier dans une installation la terre et les masses [4].

La terre est sol de notre planète pris pour certaines applications électriques comme référence conventionnelle de potentiel «0 V» et dont la conductivité électrique (très variable) véhicule naturellement - ou est utilisée par l'homme pour véhiculer - certains courants électriques.

Terre : Connexion liée à la terre (sol de notre planète)

- Dans certaines applications électriques, c'est une référence de potentiel nul (0V)
- Sa conductivité électrique très variable véhicule des courants électriques.
- La connexion de terre n'est pas nécessaire au fonctionnement (exemple : avion)
- Le symbole de la référence terre est celui du schéma ci-contre.



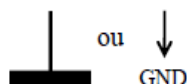
Masse : Carcasse métallique conductrice du système

- Toute partie conductrice accessible au toucher d'un appareil ou d'une installation.
- Elle n'est pas sous tension en fonctionnement normal.
- mais peut le devenir en cas de défaut (défaut d'isolation).
- Le symbole de la référence masse est celui du schéma ci-contre.



Commun - Référence 0 Volt d'un circuit (ex. amplificateur)

- Différent de la masse dans les circuits flottants (sans liaison avec la terre).
- Souvent désigné à tort par la masse lorsqu'il est relié à la terre.
- sur le plan de la CEM, le commun et la masse d'un circuit doivent être réalisés séparément, même s'ils sont reliés en un point.



Les dispositifs concernant ces liaisons dans le cadre des systèmes de distribution électrique des bâtiments nous concernant sont relatifs aux applications ci-dessus (protection des personnes et des biens) et sont rappelés dans les normes CEI 364 et CEI 1024.

Bonne parce que les lignes de descente des paratonnerres doivent pouvoir occasionnellement écouler des courants de l'ordre de 20 à 30 K.A. dans un sol de résistivité très variable (5 à 10 000 W.m) sans trop provoquer de dégradations à l'interface prise-sol.

Unique parce que la résistance très variable du sol entraînerait dans ces conditions extrêmes des différences de potentiel extrêmement élevées et destructrices entre les différentes prises de terre et que l'installation elle-même en marche normale (courants de fuite, de défauts, etc ...) entraînerait des perturbations inacceptables.

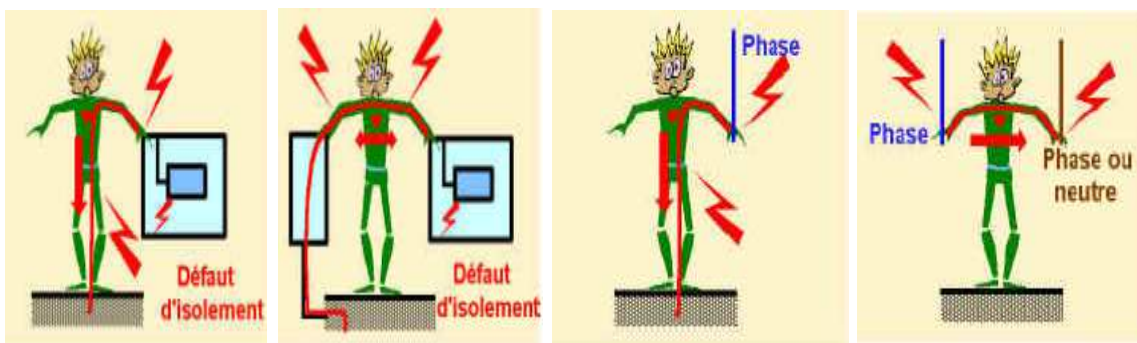


Figure 4.1 Comportement d'une installation dans le cas d'un défaut d'isolement où la masse est mise accidentellement à un potentiel dangereux.

4.1.2 Mise à la terre - Sécurité des personnes

Les masses des appareils et installations sont raccordées à la terre pour assurer la protection des personnes contre les risques électriques en cas de défaut d'isolement. Cela provient du fait que la terre est utilisée comme potentiel de référence pour la distribution de l'énergie électrique [4]...

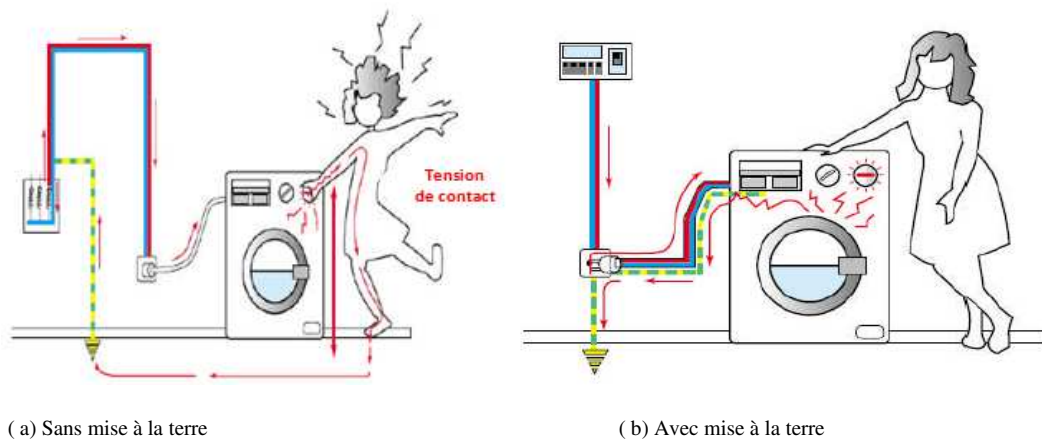


Figure 4.2 Mise à la terre - Sécurité des personnes

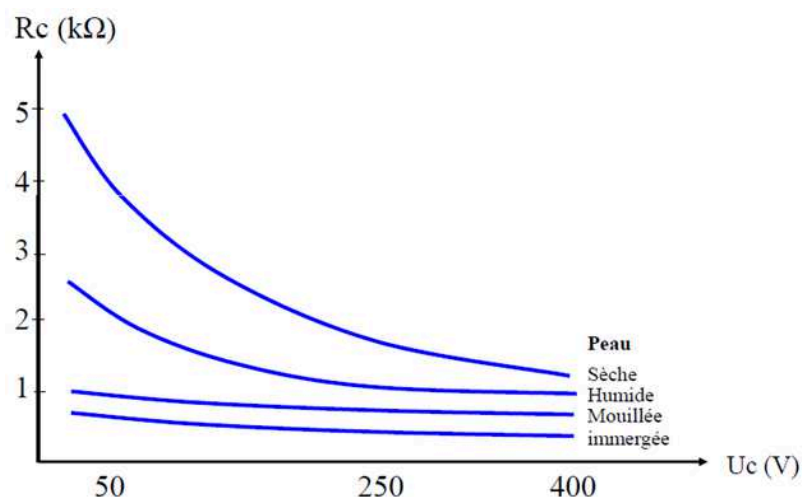


Figure 4.3 Résistance corporelle en fonction de la tension de contact et du degré d'humidité de la peau.

4.1.3 Effets physiologiques du courant

Les chiffres significatifs du risque électrique en courant alternatif	
5mA	Seuil de sensibilité
10mA	Seuil de réaction réflexe Seuil de non lâcher
30mA	Seuil de téτανisation du diaphragme : arrêt respiratoire
50mA pendant une seconde	Seuil de fibrillation ventriculaire : arrêt circulatoire

Table 4.1 Les chiffres significatifs du risque électrique en courant alternatif

4.1.4 Mise à la terre -Implantation du piquet de terre

Connexion à la terre doit être faite :

- Par une tige en cuivre d'environ 1m de long et de diamètre supérieure au centimètre
- Implantée dans un endroit bon conducteur (humide) pour pouvoir écouler des courants de défaut ou de foudre de l'ordre de 20kA.

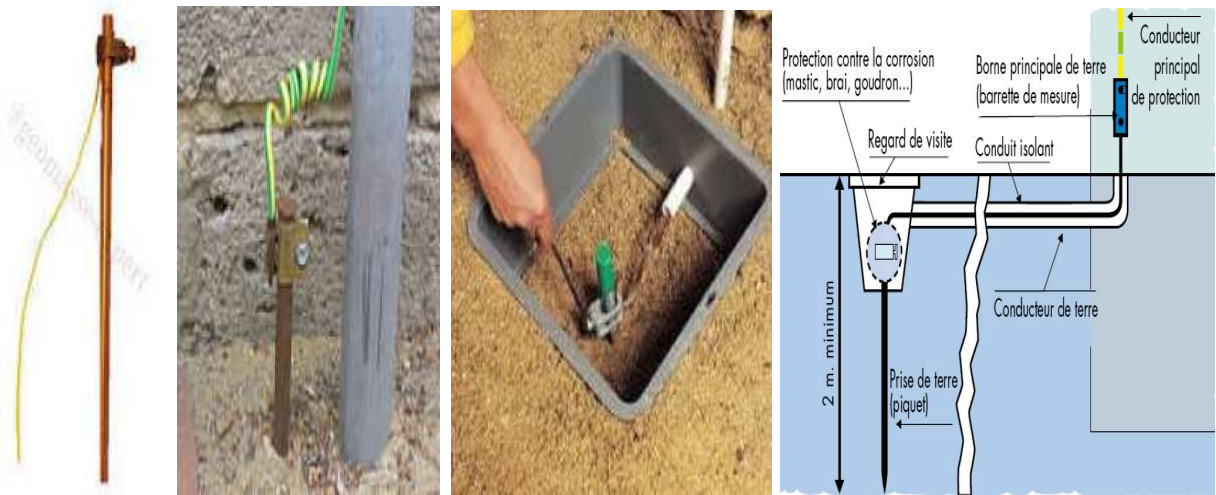


Figure 4.4 Photo d'implantation du piquet de terre

Les plus utilisés sont des barres de cuivres ou en acier recouvert de cuivre ou galvanisés d'au moins 15mm de diamètre. L'utilisation des canalisations d'eau comme prise de terre est interdite.

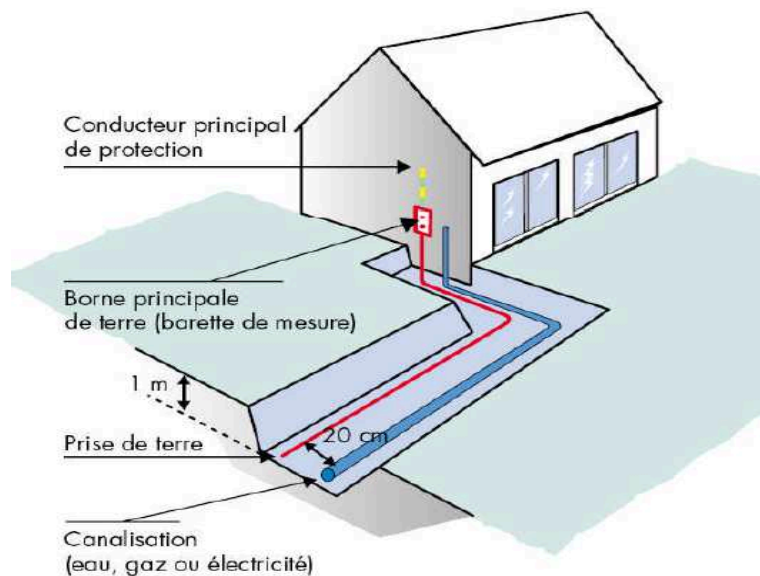


Figure 4.5 Photo d'implantation du piquet de terre

Une seule et unique mise à la terre sinon

- La résistance très variable du sol entraînerait en cas de coup de foudre des différences de potentiel extrêmement élevées et destructrices entre les différentes prises de terre.
- Dans une installation en fonctionnement normale (courants de fuite, de défauts, etc ...) entraînerait des perturbations inacceptables (couplage par conduction)

4.1.5 Schéma type de raccordement à la terre d'installation

- (A) : Descentes de paratonnerres.
- (B) Réseau de terre maillé et enterré avec renforcement particulier au pied des descentes de paratonnerres.
- (C) : Liaison de terre de l'installation raccordée à la barre de raccordement d'origine des PE (ou PEN) de l'installation.
- (D) : Maillage des masses d'une partie de l'installation raccordée aux structures métalliques ou éléments complémentaires de maillage (E).
- (E) : Shunts réalisés entre descentes de paratonnerres et maillage de masse, structure métallique proche pour éviter les éventuels amorçages (risques d'incendie).

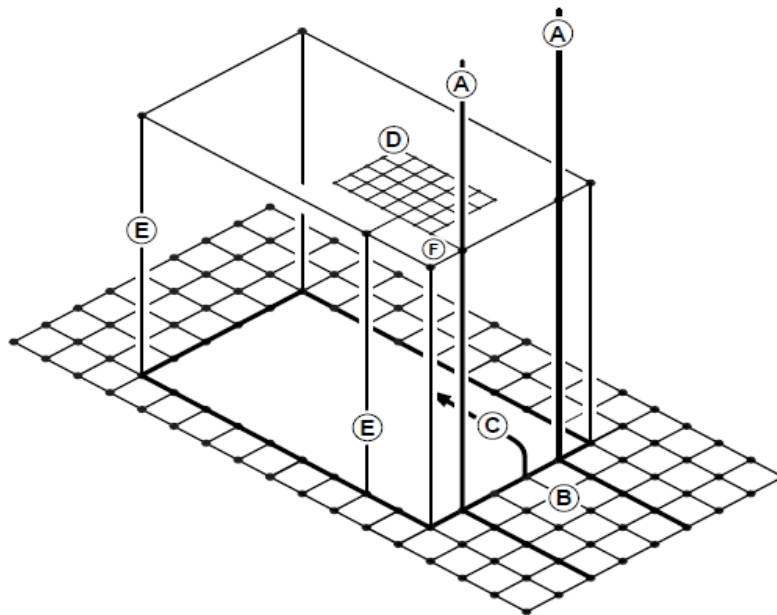


Figure 4.6 Terre et compatibilité électromagnétique

Ainsi que nous venons de le voir, la terre joue un rôle bien spécifique (mais partiel car des résidus conduits par les lignes d'alimentation réseau du site restent encore à éliminer) vis à vis des décharges de foudre. Pour la plupart des autres phénomènes «CEM» à traiter (transitoires, courants ou champs rayonnés haute fréquence «HF»), les conducteurs de terre dont la longueur et la topologie de distribution (arborescence en étoile en parallèle avec les conducteurs actifs) présentant des impédances très élevées en haute fréquence «HF» ne pourront être d'aucune utilité sans le secours d'un réseau de maillage des masses [3,5].

4.1.6 Conception d'un réseau de masses

Une masse est toute partie conductrice accessible au toucher d'un appareil, équipement ou installation qui n'est pas sous tension en service normal, mais peut le devenir en cas de défaut. Exemples de masses :

- structure métallique du bâtiment (charpente, tuyauterie ...)
- bâtis de machines,
- armoires métalliques, plaques de fond d'armoire non peintes,

- goulottes métalliques,
- carcasse de transformateur, panier d'automate ...,
- les fils vert - jaune (PE - PEN) de liaison à la terre,

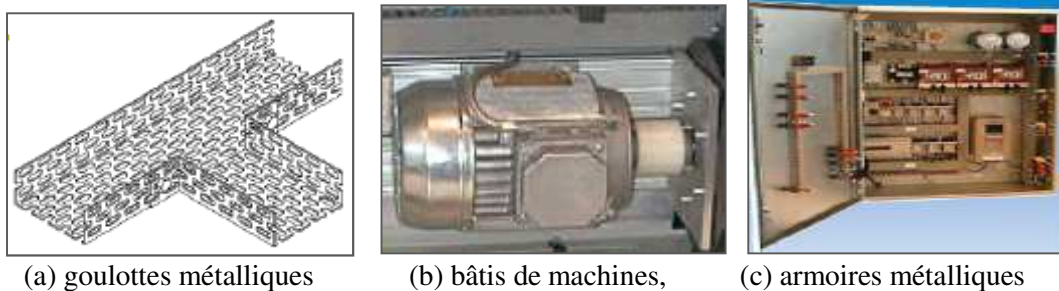


Figure 4.7 Exemples de masses

4.1.7 La mise à la terre des masses

Les masses doivent être reliées à la terre par des conducteurs de couleur vert-jaune dits «PE» ou «terres de protection».

- Les courants de défaut élevés soient éliminés (sécurité des biens) La mise à la terre des masses
- Aucune tension dangereuse ne puisse apparaître entre deux masses, masse et sol ou structure métallique (sécurité des personnes).
- Pour tout défaut ou apparition d'une tension dangereuse, un disjoncteur différentiel est prévu pour déconnecter l'appareil ou l'installation du réseau électrique [2,3]..

4.1.7.1 Masse en étoile

- Pas de couplage par conduction, puisqu'il n'y a aucune impédance commune.
- Totalement suffisant pour la protection des personnes et des biens, dans le domaine des basses fréquences (<100Hz).
- Mais inutile sur le plan de la CEM
- les conducteurs peuvent être long (impédance très grande en HF et les courants qui y circulent peuvent produire du rayonnement) .
- Il devient physiquement impossible de réaliser une étoile quant il y'a plusieurs appareils à mettre à la masse.

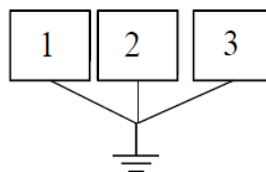


Figure 4.8 Masse en étoile

4.1.7.2 Masse en grille (plan de masse)

- Une alternative consiste à réaliser un maximum d'interconnexions complémentaires en plus des câbles PE (vert-jaune)
- On constitue ainsi un réseau équipotentiel de masse de mailles fines répondant aux exigences de «CEM» [1,2].

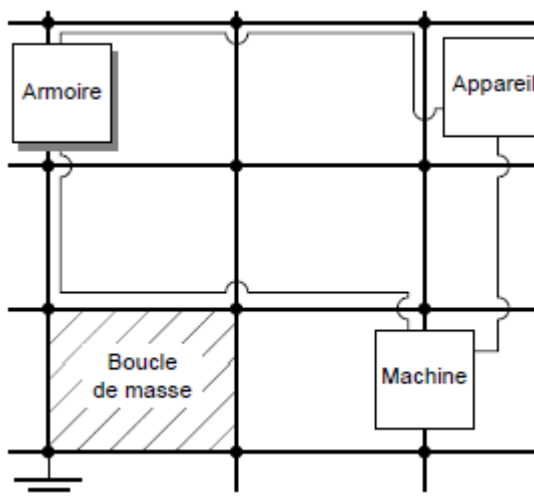


Figure 4.9 Boucles entre masses

4.1.7.3 Plan de masse équipotentiel

- Réaliser un plan de masse et une ceinture de masse à chaque étage en utilisant les treillis de fer à béton coulés dans les dalles
- Interconnecter toutes les structures métalliques ; charpentes, tuyaux et conduites,...
- Dans les zones destinées à recevoir du matériel sensible (mesure, informatique, ...) un plan de masse avec des mailles plus serrées peut être nécessaire

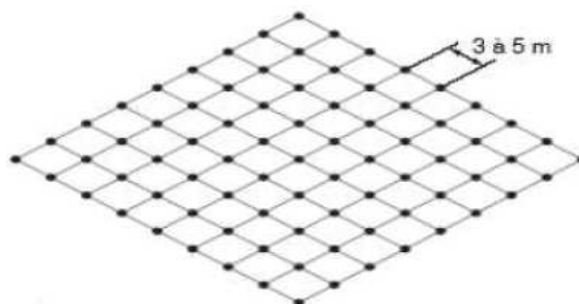


Figure 4.10 Plan de masse équipotentielle

4.1.7.4 Masse du site équipotentiel

- Interconnecter toutes les structures métalliques des machines, armoires, goulottes, canalisations,...
- les conducteurs non utilisés d'un câble doivent être mis à masse aux 2 extrémités,
- Raccorder ce réseau de masse local au réseau de masse du site

4.1.7.5 Calcul simplifié de la résistance d'une prise de terre

Nous ferons le calcul d'une prise de terre composée d'une tige cylindrique de dimension hr , de diamètre D terminée en partie inférieure par une calotte hémisphérique. La Figure (4-11) illustre en partie gauche la position de ces paramètres géométriques et en partie droite le repère utilisé pour mener le calcul. Nous limitons le raisonnement au cas du courant continu, ce qui équivaut à négliger les phénomènes de propagation établis sur la tige métallique et dans le sol. Une seconde approximation suppose que la densité de courant dispersée dans le sol est invariante sur des surfaces de rayon r homothétiques de l'enveloppe latérale de la tige. En conséquence, une couche de terrain d'épaisseur infinitésimale dr répartie sur cette surface possède la résistance élémentaire déduite de la loi d'Ohm:

$$dR_T = \rho \frac{dr}{S_T} \quad (4-1)$$

Dans cette expression ρ représente la résistivité électrique du sol, la surface d'égalité de densité de courant définie plus haut, nous l'exprimons :

$$S_T = 2\pi r h_r + 2\pi r^2 \quad (4-2)$$

Ainsi, la résistance totale de la prise de terre se réduit à une intégrale dont la primitive est tout à fait trivial

$$R_T = \frac{\rho}{2\pi} \int_{D/2}^{+\infty} \frac{dr}{h_r r + r^2} = \frac{\rho}{2\pi h_r} \text{Log} \left(\frac{2h_r + D}{D} \right) \quad (4-3)$$

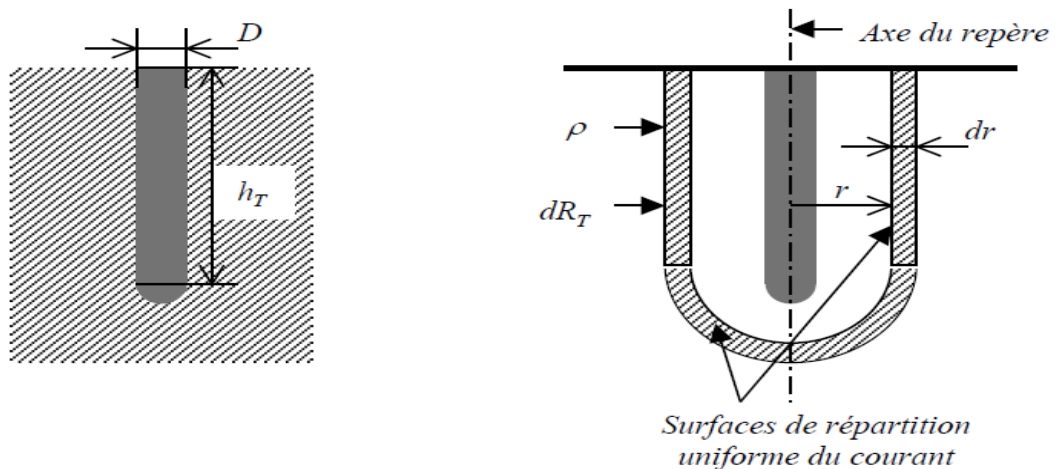


Figure 4.11 Paramètres géométriques de la résistance d'une prise de terre

Application numérique

Dimension du conducteur: $hr = 2 \text{ m}$

Diamètre du conducteur : $D = 1 \text{ cm}$

Résistivité électrique du sol (terrain sédimentaire) : $\rho = 100 \Omega \text{ m}$

Dans ce cas la résistance de la prise de terre prend pour valeur : $R_T = 50 \Omega$

Ce calcul montre que pour abaisser ce chiffre à une valeur proche de 5Ω , le conducteur de prise de terre devra atteindre vingt mètres avec un diamètre proche de cinq centimètres! Des développements plus complexes tenant compte des phénomènes de propagation indiquent qu'aux fréquences élevées s'ajoute une réactance d'autant plus grande que la prise de terre occupe un volume important. Cette propriété explique en partie l'usage de prises de terre distinctes pour la foudre et pour la sécurité d'isolement. La première constituée d'une tige doit présenter une faible inductance, la seconde réalisée par de longs conducteurs formant un grillage enfoui dans le sol réalise un excellent contact avec le terrain environnant.

4.1.7.6 Calcul de la différence de potentiel à la surface du sol

Le schéma de la Figure (4-12) représente les conditions d'un impact foudre déterminé par l'injection sur une prise de terre d'un courant i dont l'amplitude crête avoisine. Deux équipements riverains situés dans des locaux distants de sont respectivement connectés aux prises de terre alignées sur le point d'impact.

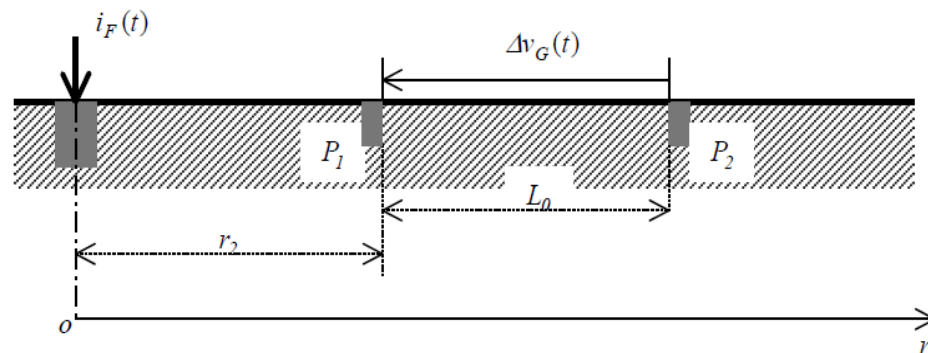


Figure 4.12 schéma représentant les conditions d'un impact foudre déterminé par l'injection sur une prise de terre d'un courant i_F

Sachant que la prise de terre la plus proche de l'impact est située à la distance r_1 , le calcul mené avec les hypothèses du régime statique montre que la différence de potentiel $\Delta v_G(t)$ apparaissant entre P_1 et P_2 est déterminée par l'intégrale :

$$\Delta v_G(t) = \left[\frac{\rho}{2\pi} \int_{r_1}^{r_1+L_0} \frac{dr}{rh_T+r^2} \right] \quad (4-4)$$

Cette intégrale conduit à une forme analytique exprimant la ddp $\Delta v_G(t)$:

$$\Delta v_G(t) = \left[\frac{\rho}{2\pi h_r} \text{Log} \left[\left(\frac{r_1+L_0}{r_1} \right) \left(\frac{r_1+h_r}{r_1+h_r+L_0} \right) \right] \right] i_F(t) \quad (4-5)$$

Application numérique

Position du point de contact le plus proche de l'impact : $r_l = 10$ m

Espacement des points de contact : $LO = 1$ km

Amplitude crête du courant : $I_p = 20$ kA

Dimension de la prise de terre recevant l'impact : $hr = 20$ m

Résistivité électrique du sol (terrain sédimentaire) : $\rho = 100\Omega$ m

La tension prend pour amplitude crête : $V_p \cong 17$ kV

Une prise de terre d'une dimension de deux mètres donnerait une tension crête voisine de trente kiloVolts.

4.2 Règles de câblage

Le niveau de compatibilité électromagnétique (CEM) dans un équipement est lié aux couplages entre les circuits, ces couplages étant eux-mêmes directement fonction des impédances entre ces circuits. Les conducteurs utilisés et leur mise en œuvre sont donc prépondérants dans le comportement électromagnétique de l'installation [1,2,3]..

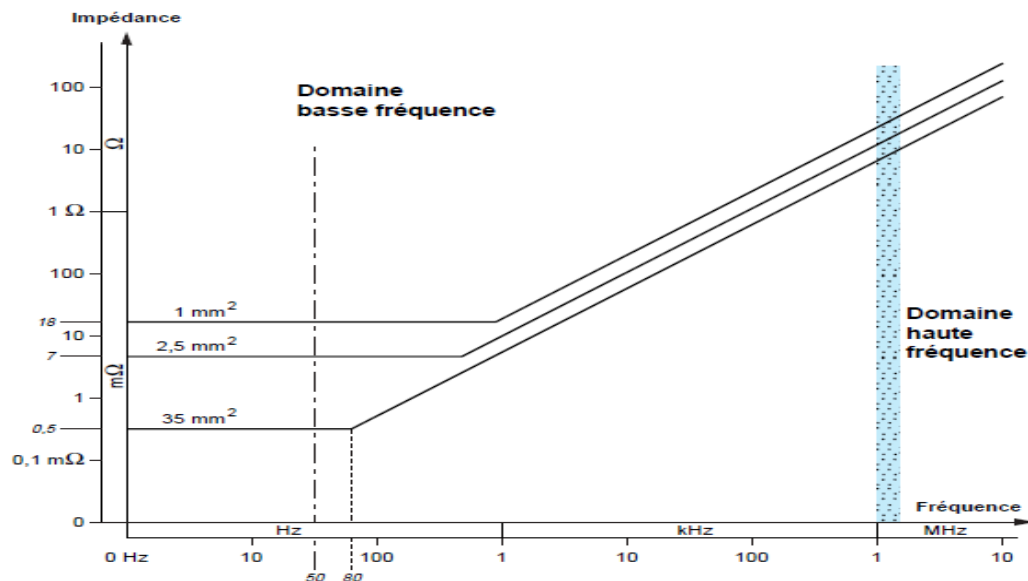


Figure 4.21 Valeurs caractéristiques de l'impédance d'un conducteur électrique de longueur $L = 1$ m :

- Comportement en basse fréquence «BF»

En basse fréquence «BF», le courant circule au sein du conducteur alors qu'en haute fréquence «HF» l'effet de peau est prépondérant. La circulation du courant s'effectue à la surface du conducteur. En basse fréquence «BF» (50 Hz - 60 Hz) la section du fil est prépondérante

- Comportement en haute fréquence «HF»

En haute fréquence «HF» ($F > 1... 5 \text{ MHz } \dots$)- le périmètre de la section du conducteur est prépondérant (effet de peau) et la section du conducteur est peu significative tandis que - la longueur du câble est déterminante

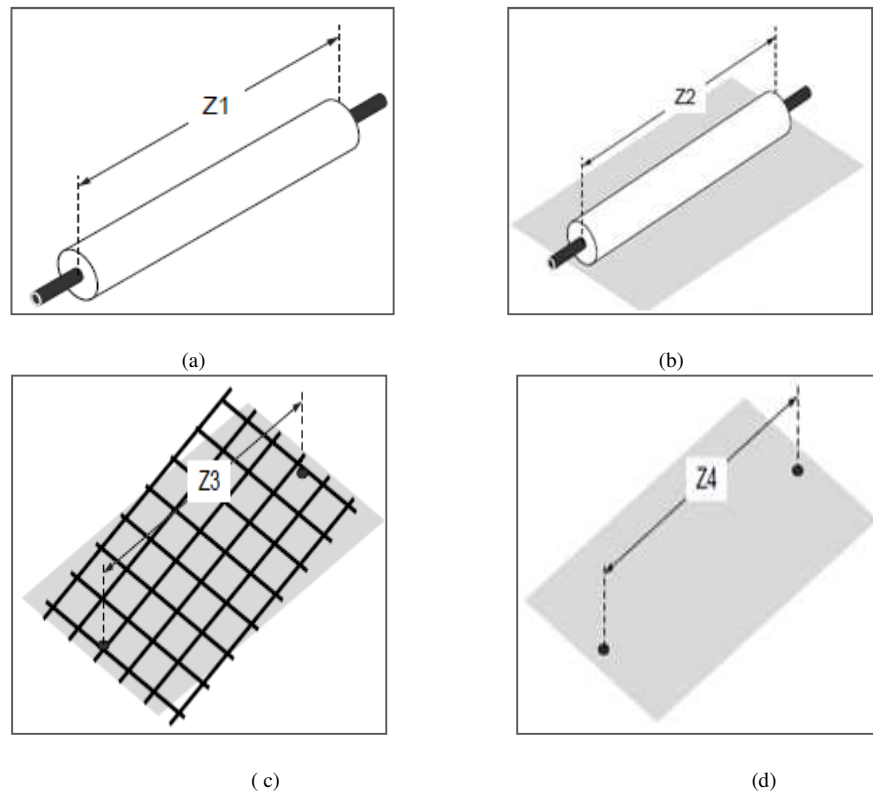


Figure 4.32 *l'impédance linéiques d'un câble*

Suivant les différents cas :

a : Z_1 , câble dans l'air (inductance linéique : 1 mH/m).

b : Z_2 , câble plaqué sur une surface métallique.

c : Z_3 , treillis métallique avec contact à chaque croisement (par exemple fer à béton soudé).

d : Z_4 , plan métallique.

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

4.2.1 *Longueur et section d'un conducteur*

L'impédance d'un conducteur est principalement fonction de son inductance linéique, proportionnelle à la longueur du câble. Cette inductance devient prépondérante au delà de 1 kHz pour un câble standard. Cela veut dire que, pour un conducteur de quelques mètres seulement, l'impédance de ce câble vaut :

- en continu ou à 50/60 Hz quelques «milliohms»
- vers 1 MHz quelques ohms
- en haute fréquence «HF» (100 MHz ...) plusieurs centaines d'ohms

Si la longueur d'un conducteur est supérieure à 1/30 de la longueur d'onde du signal véhiculé, l'impédance du câble devient «infinie». L'installation se comporte alors comme s'il n'y avait pas de conducteur.

$$L_{(m)} > \frac{\lambda}{30} \quad \text{et} \quad \lambda > \frac{300}{F_{(MHZ)}} \quad \Rightarrow \quad L > \frac{10}{F_{(MHZ)}}$$

λ : Longueur d'onde du signal véhiculé
 F : fréquence du signal véhiculé en MHz
 L : longueur du conducteur en mètre

Un conducteur ne sert à rien si $L > \frac{10}{F_{(MHZ)}}$. Exemple : queue de cochon

4.2.2 Effet d'antenne d'un conducteur

Les conducteurs sont des antennes sur lesquelles le champ rayonné peut venir se coupler. Ces mêmes conducteurs peuvent également émettre lorsqu'ils sont parcourus par un courant haute fréquence «HF» [1,2,3].

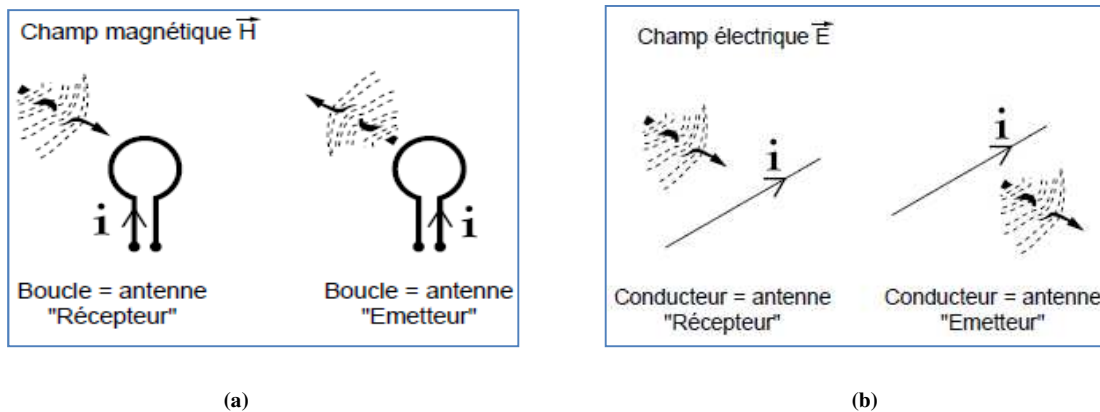


Figure 4.43 Effet d'antenne d'un conducteur (a) – Champ magnétique ; (b) – Champ électrique

4.3 Règles de blindages

Topologie avec 2 niveaux de blindages

- Les circuits sensibles sont regroupés à l'intérieur d'une enveloppe blindée,
- Les circuits perturbateurs également, à l'abri d'une autre enveloppe blindée,
- Les circuits non critiques sont regroupés mais sans enveloppe,
- Tous ces groupes sont placés à l'intérieur d'une enveloppe blindée extérieure,

Un blindage est une enveloppe qui :

- Maintient en dehors les perturbations externes,

- Maintient à l'intérieur les signaux internes,
- Procure aux perturbations un chemin de diversion à basse impédance [1,2,3].

4.3.1 Efficacité du blindage

L'efficacité d'un blindage : $E = \frac{\text{Intensité du champ côté perturbateur}}{\text{Intensité du champ côté victime}}$

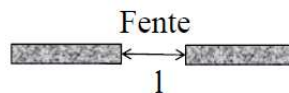
L'efficacité se mesure en décibel : $E_{db} = 20 \text{ Log } \frac{E_{\text{Perturb}}}{E_{\text{Victime}}}$ ou $B_{db} = 20 \text{ Log } \frac{B_{\text{Perturb}}}{B_{\text{Victime}}}$

Le blindage dépend fortement de la fréquence, en basse fréquence, même une feuille d'acier de 0,5 mm n'atténue presque rien. Il faut augmenter l'épaisseur ou choisir des matériaux à haute perméabilité μ . mais en haute fréquence, un blindage en cuivre même très mince est largement suffisant.

4.3.2 Influence des ouvertures dans les blindages

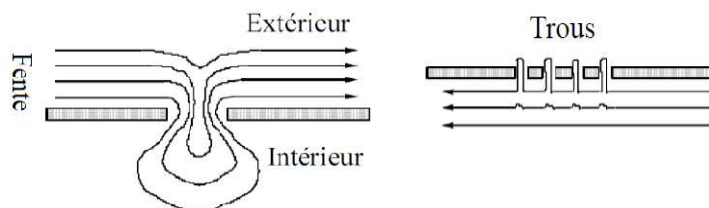
L'efficacité d'un blindage est fortement dégradée par les ouvertures, particulièrement les ouvertures en forme de fente, dépend de la longueur de la fente pratiquée (L'influence d'une fente n'existe qu'en haute fréquence) et de la longueur d'onde considérée [1,2,3]. Il est décrit par la relation ci-contre:

$$E_{db} = 20 \text{ Log } \left(\frac{2l}{\lambda} \right)$$



Conseils :

- Plusieurs trous ronds plutôt qu'une fente
- Même la petite fente entre 2 tôles est critique
- Le plus économique : épaulements sur le bord des tôles (pas de contact visuel direct)
- le plus cher : joint en gomme conductrice ou ressort conductrices



4.3.3 Mise à la masse du blindage d'un câble coaxial :

La mise à terre des blindages n'est pas nécessaire si les circuits à protéger n'ont aucune liaison électrique avec l'extérieur, le blindage n'a pas besoin d'être mis à terre pour être efficace. □ Mais un blindage « flottant » induirait des perturbations dans le circuit à potentiel fixe [1,2,3].

Une bonne mise à terre du blindage entraînera que les courants perturbateurs intérieurs ne peuvent pas sortir à l'extérieur et que les courants perturbateurs provenant de l'extérieur doivent être « forcés » de passer par la face externe du blindage pour aller à la terre. Cette mise à terre assure également une protection en cas de défaut d'isolation

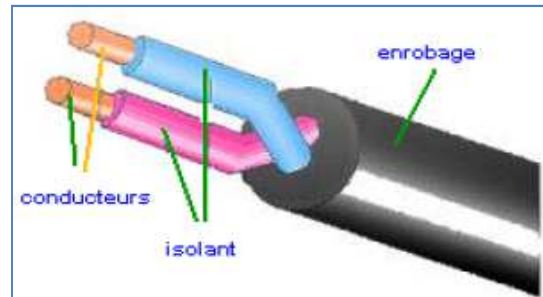
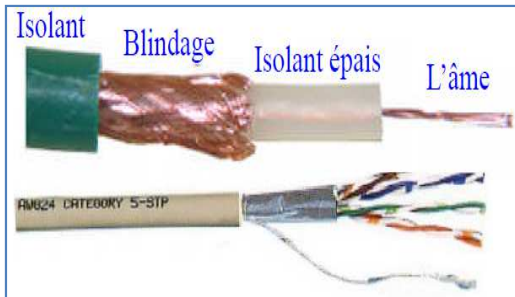
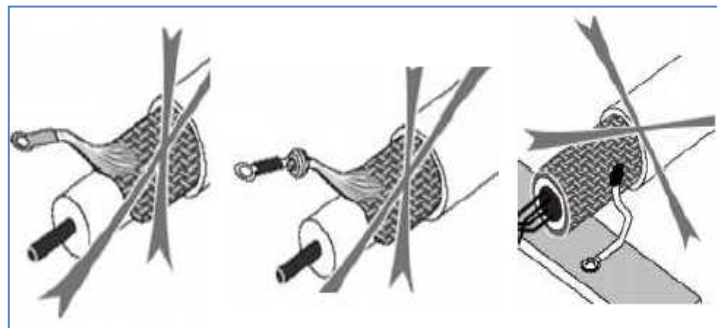


Figure 4.54 Photos des câbles blindés

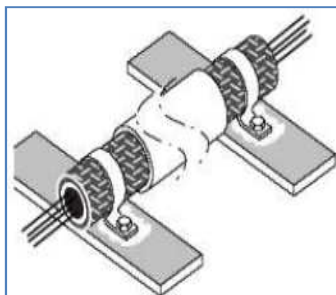
Un blindage relié à une seule extrémité présente un danger mortel car une forte tension peut apparaître à l'extrémité non reliée à la masse. Donc le blindage doit être protégé contre les contacts directs. Le blindage peut faire antenne et entrer en résonance perturbation supplémentaire nécessaire.



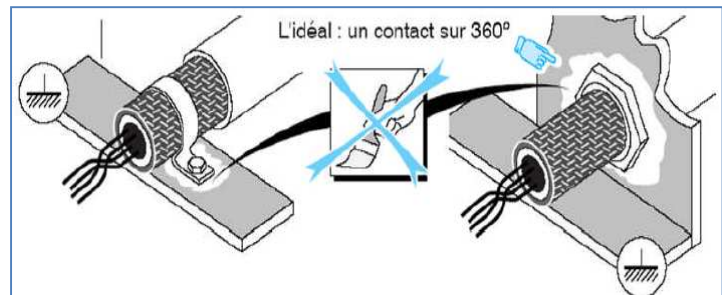
(a) Danger de surtension à l'autre extrémité



(b) les « queues » ne servent à rien sur le plan de la CEM



(c) La meilleure façon de raccorder le blindage



(d) L'idéal : un contact sur 360

Figure 4.65 Mise à la masse du blindage d'un câble coaxial

4.3.4 Autres forme du blindage

Fenêtres blindée transparentes

- les affichages ou verres (écrans de PC, portière micro-onde, ...) exigent de grandes ouvertures transparentes
- Réseau de fils très fins (4 à 60 conducteurs par cm) disposés en 2 couches croisées
- Réseau de couches de carbone
- Couche fine d'or

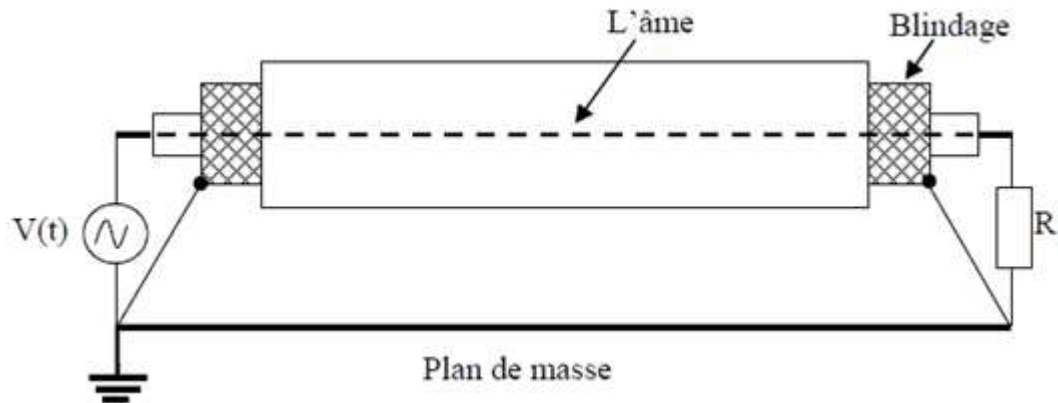
Boîtiers plastic

- Recouvrir la face interne d'une couche conductrice (très mince)
- Mouler le plastic autour d'une feuille ou d'une structure conductrice
- Utiliser un adjuvant rendant la masse du plastic conducteur. Ces protections suffisent contre les décharges électrostatiques, mais pas assez contre les rayonnements électromagnétiques

4.4 Exercice d'application

Soit un câble blindé coaxial alimentant une résistance R à partir d'une source de tension sinusoïdale $v(t)$. Le conducteur intérieur (l'âme) du câble et son blindage se comportent comme des impédances composées respectivement de (R_1, L_1, M) et (R_2, L_2, M) . Les deux extrémités du blindage sont reliées à un plan de masse de résistance R_3 .

1. Faire le schéma électrique équivalent.
2. Exprimer la tension induite dans le blindage.
3. Exprimer le rapport du courant du blindage sur celui de l'âme.
4. Déduire l'expression de ce rapport dans les domaines de basses fréquences et des hautes fréquences. Conclure.



Chapitre 5 Les effets des Conducteurs

5.1 Résistance d'un conducteur

Considérons une portion d'un conducteur de longueur « l », de section « S » (Figure 5.1) et parcouru par un courant « I », tel que :

$$J = \frac{dl}{ds} \Rightarrow I = \iint_S \vec{J} \cdot \vec{ds} \quad \text{Avec} \quad \vec{J} = \sigma \vec{E} \Rightarrow I = \sigma \iint_S \vec{E} \cdot \vec{ds}$$

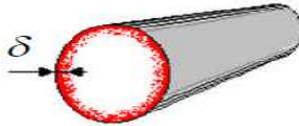


Figure 5.1 Portion d'un conducteur

S'il existe un courant, cela signifie qu'il y a une chute de potentiel V, telle que : $V = \int_l \vec{E} \cdot \vec{dl}$

$$\text{La résistance est alors :} \quad R = \frac{V}{I} = \frac{\int_l \vec{E} \cdot \vec{dl}}{\sigma \iint_S \vec{E} \cdot \vec{ds}} \quad (5-1)$$

Dans le cas simple d'un conducteur filiforme où le champ électrostatique est uniforme, la résistance est :

$$R = \frac{l}{\sigma S} \quad (5-2)$$

Où σ est la conductivité électrique du matériau : Cuivre : $\sigma = 5,7107 [\Omega/m]^{-1}$; Aluminium : $\sigma = 3,5 \cdot 10^7 [\Omega/m]^{-1}$; Fer : $\sigma = 0,8 \cdot 10^7 [\Omega/m]^{-1}$

5.2 Effet de peau électromagnétique (Effet pelliculaire)

L'épaisseur où circule le courant est donnée par [1,2,3].. :

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}} = \frac{1}{\sqrt{\mu\sigma\pi f}} \quad (5-3)$$

Pour le cuivre ($\sigma = 5,7 \cdot 10^7 [\Omega/m]^{-1}$, $\mu_0 = 410^{-7} [H/m]$) : $\delta = \frac{66}{\sqrt{f}}$

Un courant continu circule de manière homogène dans le conducteur, □ Un courant alternatif se concentre en périphérie (sur la surface) du conducteur. L'épaisseur de peau diminue avec la racine carrée de la fréquence, avec la conductivité et avec la perméabilité [1,2,3].

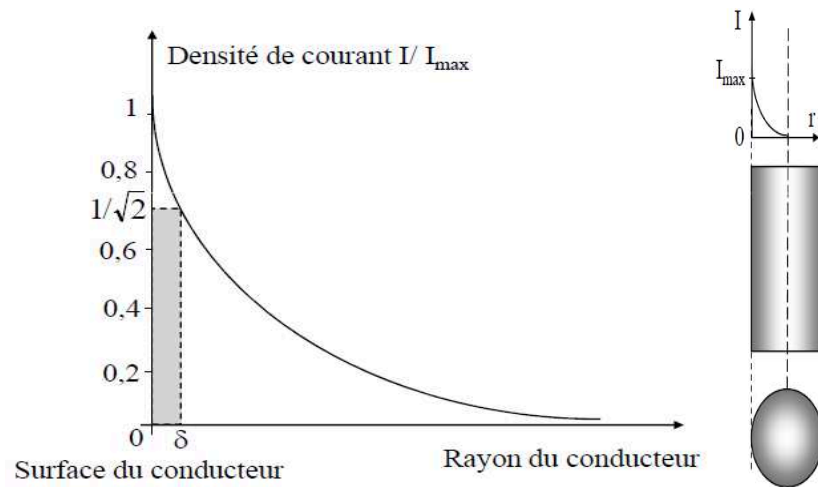


Figure 5.2 Distribution du courant sur la surface du conducteur en fonction du rayon du conducteur

5.3 Résistance en fonction de l'épaisseur de peau

La section totale du conducteur est :

$$S = \pi r^2 \quad \text{et} \quad R = R_{DC} = \frac{l}{\sigma \pi r^2} \quad \text{on sait que} \quad S_\sigma = \pi [r^2 - (r - \delta)^2] = \pi \delta (2r - \delta)$$

$$\text{D'où : } R_\delta = \frac{l}{\sigma \pi \delta (2r - \delta)} = \frac{l}{\sigma \pi \delta (d - \delta)} \quad \text{avec} \quad \delta = \sqrt{\frac{2}{\mu \sigma \omega}} = \frac{1}{\sqrt{\mu \sigma \pi f}}$$

$$\text{Pour } \delta > d \quad R_\delta = R_{DC}$$

$$\text{Pour } \delta \ll d \quad R_\delta = 1 / \sigma \pi \delta d$$

Pour $f \rightarrow \infty \Rightarrow \delta \rightarrow 0 \Rightarrow R \rightarrow \infty$: En théorie, il n'y a pas de courant qui circule dans les conducteurs pour les fréquences entrainement élevées.

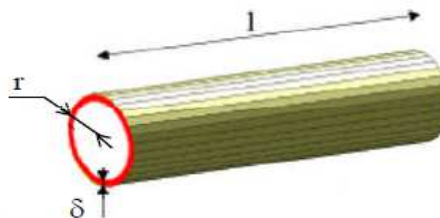


Figure 5.3 Portion d'un conducteur

Pour les fréquences élevées, il faut donc choisir des câbles dont la section est proche de $S\delta$. Cependant quand il s'agit d'un courant fort à des fréquences élevées, il est nécessaire d'utiliser des gros câbles (Figure 5.4a). Dans cette situation, on choisira des câbles en tubes ou à brins multiples rond ou

plats (tresse) (Figure 5.4b) .Dans le cas général, il faut maximiser le rapport périmètre/surface de la section du câble [1,2,3].



(a) câbles en tubes ou à brins multiples rond



(b) câbles plats (tresse).

Figure 5.4 Photos des deferrentes cables

5.4 Résistance d'un conducteur fin et d'un plan de masse

Dans le cas d'un conducteur fin (section très faible), la résistance est très grande.

$$S \rightarrow 0 \Rightarrow R \rightarrow \infty$$

Dans le cas d'un conducteur de section très grande, la résistance est très faible ; c'est le cas d'un plan de masse où la section est la plus grande qu'on peut avoir parmi les conducteurs dans une installation.

$$S \rightarrow \infty \Rightarrow R \rightarrow 0$$

La résistance d'un plan de masse est la résistance la plus faible que l'on peut avoir.

5.5 Inductance d'un conducteur

Le champ magnétique créé par un conducteur réagit sur lui même en s'opposant à la cause qui lui a donné naissance (loi de Lents). C'est le phénomène d'auto-induction qui se caractérise par un coefficient d'auto-induction appelé « Inductance": L

Le flux magnétique créé par une bobine est proportionnel au courant qui l'a traverse et le coefficient de proportionnalité est l'inductance « L » de cette bobine (Figure 5.5) [1,2,3].

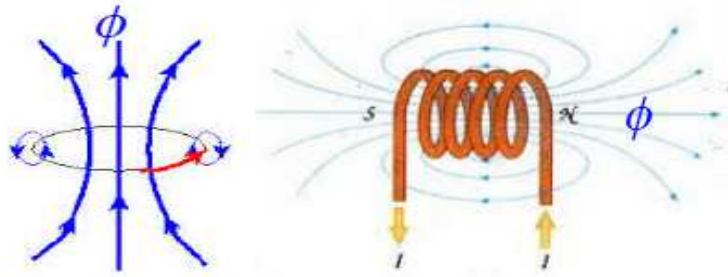


Figure 5.5 Le flux magnétique cree par une bobine

$$\Phi = L \cdot I$$

$$\Phi = \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (5-4)$$

5.5.1 Expression de l'inductance

L'inductance d'une spire parcouru par un courant I et traversée par le flux magnétique Φ est donnée par :

$$L_{sp} = \frac{\Phi_{sp}}{I} \quad (5-5)$$

Avec $\Phi_{sp} = \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s}$ et $I = \frac{1}{\mu} \oint_l \vec{B} \cdot d\vec{l} \Rightarrow L = \mu \frac{\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s}}{\oint_l \vec{B} \cdot d\vec{l}}$

L'inductance d'une bobine composée de N spires est :

$$L = \frac{\Phi_{sp}}{I} = N L_{sp} \quad (5-6)$$

$$\Phi_T = N \Phi_{sp} = N \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad \text{et} \quad I = \frac{1}{\mu} \oint_l \vec{B} \cdot d\vec{l} \Rightarrow L = N^2 \mu \frac{S}{l}$$

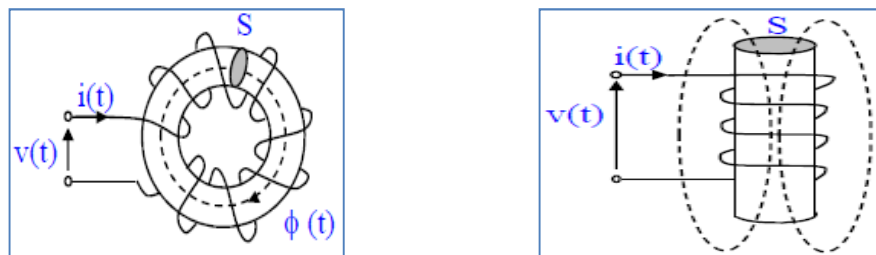


Figure 5.6 Schema de principe du flux magnétique cree par une bobine de N spires

$\mu = \mu_0 \mu_r$ est la perméabilité magnétique du vide

- μ_0 : perméabilité relative du matériau ($4\pi \cdot 10^{-7}$)
- μ_r vaut 1 pour l'air et la plupart des matériaux bons conducteurs et isolants. μ_r vaut 10 à 100000 pour les matériaux ferromagnétiques (fer, cobalt, nickel,...)

5.5.2 Inductance – Relations associées

En régime variable quelconque : $V(t) = L \frac{di(t)}{dt}$

En harmonique en notation complexe: $V(j\omega) = jL\omega I \Rightarrow I(j\omega) = \frac{V}{jL\omega} = -j \frac{V}{L\omega}$

À haute fréquence ($f \rightarrow \infty$): $I(j\omega \rightarrow \infty) = 0$

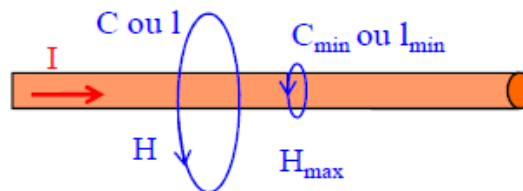
À basse fréquence ($f \rightarrow 0$) ou en continue ($i = cte$) : $V(j\omega \rightarrow 0) = 0$

Energie emmagasinée : $W_L(t) = \frac{1}{2} L i^2(t)$

5.5.3 Inductance d'un conducteur fin

Pour un seul conducteur ($n=1$) : $L = \mu \frac{S}{l}$

L'inductance augmente lorsque le contour (l) du conducteur diminue



L'inductance diminue lorsque le contour du conducteur augmente et vice versa.

$$L_{max} = \mu \frac{S}{l_{min}} \quad (5-7)$$

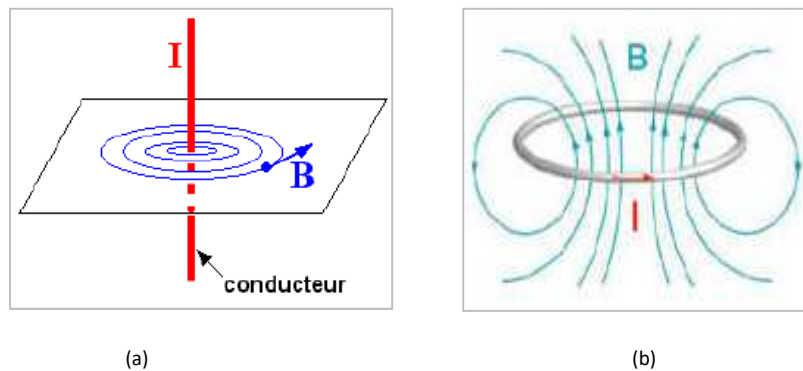


Figure 5.7 Distribution du champ magnétique crée par un conducteur (a) et par une spire (b)

On conçoit alors que plus le rayon (section) du conducteur est faible ($l_{min} \ll$), plus l'inductance est grande ($L_{max} \gg$).

5.5.4 Inductance d'un plan de masse

Pour un plan de masse le rayon (ou section) est très grand, donc le contour l est très grand.

$$L_{max} = \mu \frac{S}{l_{min}} \quad (5-8)$$

Contour (L_{min}) \gg \Rightarrow Inductance (L_{masse}) ≈ 0



Figure 5.8 *Un plan de masse*

D'où l'inductance d'un plan de masse est très faible ou inexistante car son contour minimal est très grand. Donc un plan de masse n'est pas inductif.

$$Z = R + jL\omega : L \rightarrow 0 \Rightarrow Z \rightarrow R \text{ or } R \rightarrow 0 \text{ donc } Z \rightarrow 0$$

L'impédance d'un plan de masse est l'impédance la plus faible que l'on peut avoir.

5.5.5 Inductance d'une Bobine de N spires et avec noyau

L'inductance est proportionnelle :

- Au carré du nombre de spires

$$L = N^2 \mu \frac{S}{l} = \mu_0 \mu_r N^2 \frac{S}{l} \quad (5-9)$$

- À la perméabilité magnétique

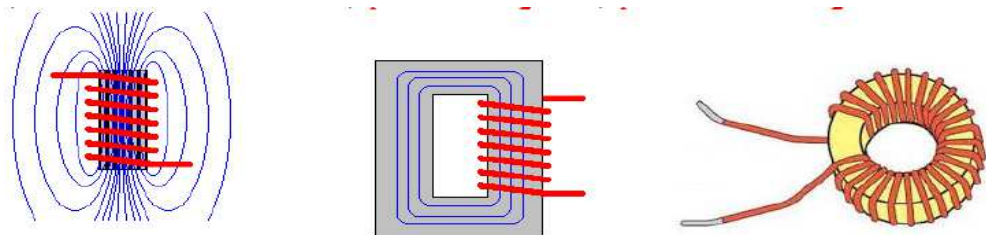


Figure 5.9 *bobines avec noyau*

L'importance de la perméabilité relative est très importante pour la miniaturisation des appareils électrique ou électronique.

5.5.6 Inductance de quelques formes de conducteur

L'Inductance de quelques formes de conducteur

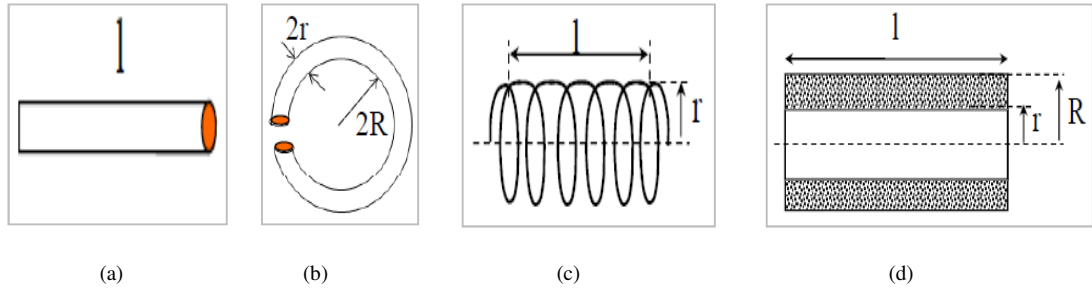


Figure 5.10 bobines avec noyau (a)- fil rectiligne isolé ; (b)- spire circulaire isolée ; (c)- solénoïde à une couche ;(d)- solénoïde multi couches

$$\text{Inductance d'un fil rectiligne isolé : } L = 0.2 \left[\text{Ln} \left(\frac{4l}{d} \right) - 1 \right]$$

$$\text{Inductance d'une spire circulaire isolée : } L = \mu_0 R \left[\text{Ln} \left(\frac{8R}{r} \right) - 2 \right]$$

$$\text{Inductance d'un solénoïde à une couche : } L = \frac{\pi \mu_0 N^2 r^2}{l}$$

$$\text{Inductance d'un solénoïde multi couches : } L = \frac{\pi \mu_0 N^2}{3l} \cdot \frac{R^3 - r^3}{R - r}$$

5.5.7 Inductance de quelques boucles de conducteur

- Boucle longue réalisée avec 2 fils parallèles (Figure 5.4a) :

$$L = 0.4 \text{Ln} \left[\frac{2D}{d} \right] [\mu\text{H}/\text{m}] \quad (5-10)$$

Exemples :

- $d = 1,1 \text{ mm}$, $D = 1,6 \text{ mm}$ (2 fils serrés) : $L = 0.4 \text{Ln} \left[\frac{2 \cdot 1,6}{1,1} \right] = 0,43 [\mu\text{H}/\text{m}]$
- $d = 1,1 \text{ mm}$, $D = 10 \text{ cm}$ (2 fils éloignés) : $L = 0.4 \text{Ln} \left[\frac{2 \cdot 100}{1,1} \right] = 2,10 [\mu\text{H}/\text{m}]$

- Boucle longue réalisée avec 2 fils concentriques (câble coaxial, intervalle rempli d'un isolant) (Figure 5.4b) :

$$L = 0.2 \text{Ln} \left[\frac{D}{d} \right] [\mu\text{H}/\text{m}] \quad (5-11)$$

$$\text{Exemple : } d = 1,1 \text{ mm}, D = 2,2 \text{ mm} : L = 0.2 \text{Ln} \left[\frac{2,2}{1,1} \right] = 0,14 [\mu\text{H}/\text{m}]$$

- Boucle longue réalisée avec 1 fil et un plan (Figure 5.4c) :

$$L = 0.2 \text{Ln} \left[\frac{4h}{d} \right] [\mu\text{H}/\text{m}] \quad (5-12)$$

Exemple : $d = 1,1\text{mm}$, $h = 10\text{cm}$: $L = 0,2 \text{Ln} \left[\frac{4 \cdot 100}{1,1} \right] = 1,2 [\mu\text{H}/\text{m}]$

D'où l'approximation $L = \sim 1\mu\text{H}/\text{m}$ d'un conducteur standard.

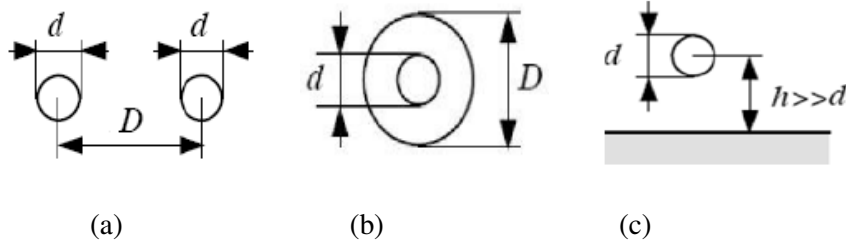


Figure 5.11 Schéma de principe de quelques boucles de conducteurs (a)- Boucle longue réalisée avec 2 fils parallèles ; (b)- Boucle longue réalisée avec 2 fils concentriques ; (c)- Boucle longue réalisée avec 1 fil et un plan :

5.5.8 Inductance mutuelle

Dans le cas d'un câble coaxial où le flux créé par le conducteur intérieur (l'âme) est perçu en totalité par le conducteur extérieur (blindage), on a $\Phi_{\text{fuite}} = 0$, donc $\Phi_1 = \Phi_2$ alors $M = L$.

$$\Phi_1 = \Phi_{12} + \Phi_{\text{fuite}} \quad ; \quad \Phi_1 = L_1 I_1 \quad ; \quad \Phi_{12} = M_{12} I_1$$

L'inductance mutuelle est
$$M_{12} = \frac{\mu_0 n_1 n_2 \cdot S_2}{l}$$

Si $1 \rightarrow 2$ ($n_1 = n_2 = n$ et $S_1 = S_2 = S$) $\Rightarrow M_{12} = M_{21} = L$

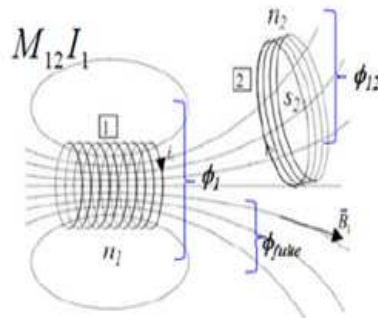


Figure 5.12 Inductance mutuelle :

5.5.9 Inductance mutuelle de quelques configurations

Mutuelle inductance entre deux fils parallèles (Figure 5.4a) : $M = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\text{Ln} \left(\frac{2l}{d} \right) - 1 \right] [\text{H}/\text{m}]$

Mutuelle inductance entre deux spires identiques et parallèles (Figure 5.4b) :

$$M = \mu_0 r \left[\text{Ln} \left(\frac{4\pi r}{d} \right) - 2,45 \right] [\text{H}] \tag{5-13}$$

Mutuelle inductance entre deux spires concentriques (Figure 5.4c) : $M = \mu_0 \pi \frac{r_2^2}{2r_1}$ [H]

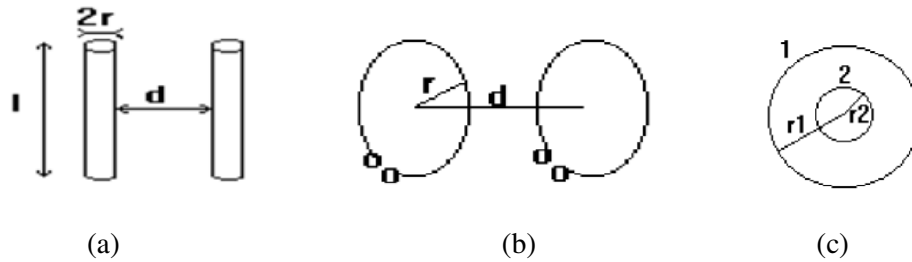


Figure 5.13 Schéma de quelques configurations:

5.5.10 Inductance mutuelle entre différents conducteurs

Mutuelle inductance entre un fil long et une spire dont la normale à la surface de la spire est perpendiculaire au fil : $M = \mu_0 [d - \sqrt{d^2 - r^2}]$ [H]

Mutuelle inductance entre deux lignes bifilaires parallèles : $M = \frac{\mu_0}{2\pi} Ln \left[\frac{(d+h_1)(d+h_2)}{d(d+h_1+h_2)} \right]$ [H/m]

Si le couplage est dû principalement au conducteur de la ligne 1 le plus proche de la ligne 2, la formule se simplifie : $M = \frac{\mu_0}{2\pi} Ln \left[1 + \frac{h_2}{d} \right]$ [H/m]

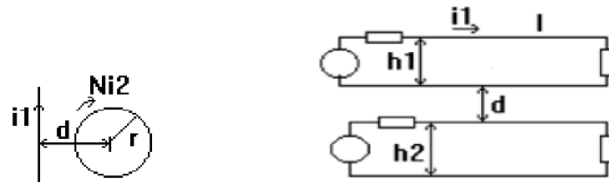


Figure 5.14 Schéma équivalent d'un conducteur de la ligne

En réalité l'inductance vaut entre 0,8 $\mu\text{H}/\text{m}$ (piste de cuivre) et 1,5 $\mu\text{H}/\text{m}$ (conducteur de section circulaire). On fait alors l'approximation $L \approx 1 \mu\text{H}/\text{m}$ d'un conducteur en général. Tout câble, parcouru par un courant, présente une inductance due au champ magnétique qui se referme dans l'air (μ_0) et qui vaut: $L \approx 1 \mu\text{H}/\text{m}$,

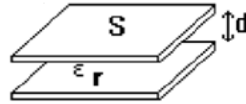
En CEM on considère toujours un conducteur comme inductif et un plan de masse non inductif

5.6 Capacité des conducteurs

La capacité des éléments chargés de charges électrique q et soumis à une tension V est donnée par l'expression ci-dessous:

$$q = C.V \quad C = \frac{q}{V} \quad \text{avec} \quad q = \epsilon \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad \text{et} \quad V = \oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} \Rightarrow C = \epsilon \frac{\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S}}{\oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l}}$$

Pour un condensateur composé de deux plaques conductrices de surface S et distante de « d », la capacité est donnée par: $C = \frac{\epsilon S}{d}$ [Farad] $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$



$\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} = 8,84 \cdot 10^{-12}$ [F/m] ϵ : permittivité électrique, ϵ_0 : permittivité du vide, ϵ_r : permittivité relative

5.6.1 Capacité (dépendance et ligne de champ)

La capacité est proportionnelle au "nombre" de lignes de champ. L'effet de bord augmente la valeur de la capacité et il faut appliquer un facteur correctif de l'ordre de 10 à 15% pour compenser l'effet de bord.

$$I = C_{12} \frac{d(V_1 - V_2)}{dt} \quad C = \frac{\epsilon S}{d} \quad [F] \quad (5-14)$$

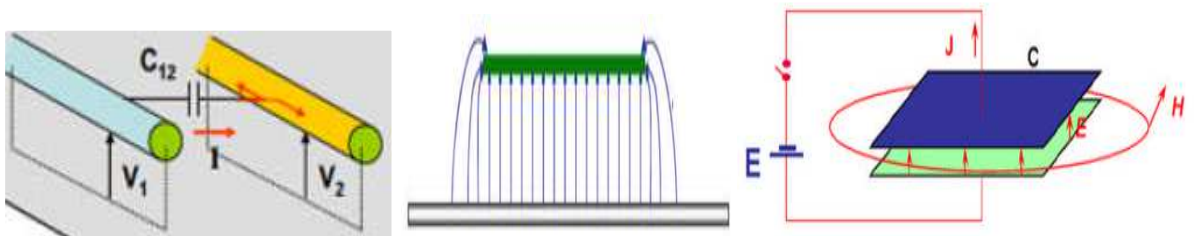


Figure 5.15 Capacité (dépendance et ligne de champ)

5.6.2 Capacité– Relations associées

En régime variable quelconque : $i(t) = c \frac{dv(t)}{dt}$

En harmonique en notation complexe: $I(j\omega V) \Rightarrow V(j\omega) = \frac{I}{jC\omega} = -j \frac{I}{C\omega}$

À haute fréquence ($f \rightarrow \infty$) : $V(\omega \rightarrow \infty) = 0$

À basse fréquence ($f \rightarrow 0$) ou en continue ($v=cste$) : $I(\omega \rightarrow 0) = 0$

Energie emmagasinée : $W_C(t) = \frac{1}{2} C V^2(t)$ [J]

5.6.3 Capacité de quelques configurations

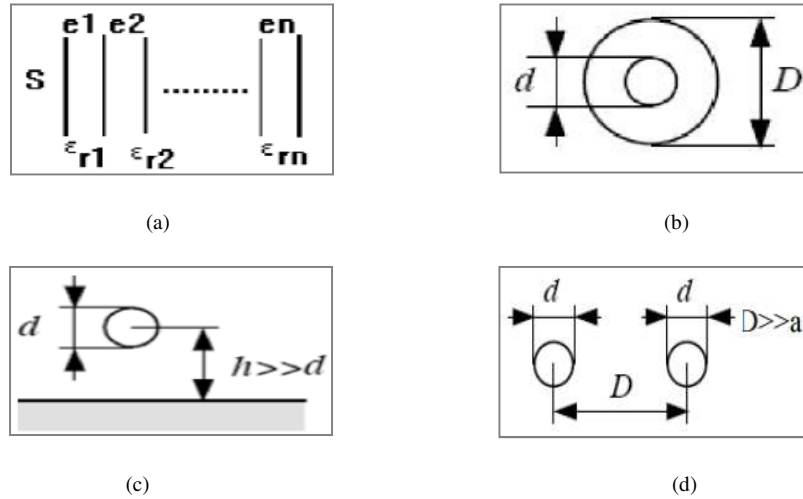


Figure 5.16 Capacité de quelques configurations

5.6.4 Création d'ondes

Champ proche : $D < \lambda/2\pi$

- Soit $E/H > 377 \Omega$: Champ dit « à haute impédance » (cas d'une antenne filaire)
- Soit $E/H < 377 \Omega$: Champ dit « à basse impédance » (cas d'une antenne boucle)

Champ lointain : $D > \lambda/2\pi$

- $E/H = 377 \Omega$: Les deux champs sont dits « couplés » (il n'est plus possible de déterminer le type d'émission).

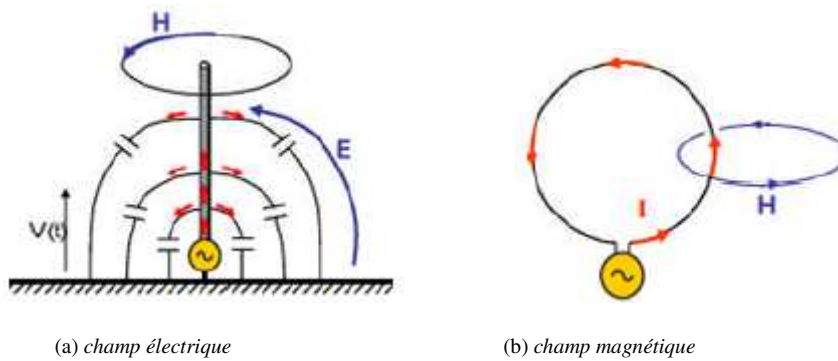


Figure 5.17 Onde créée à partir d'un champ

Fil à queue de cochon pour la mise à la masse du blindage d'un câble voir Figure 5.18 .



Figure 5.18 *Fil à queue de cochon pour la mise à la masse du blindage d'un câble.*

5.7 Exercice d'application

Exercice 1 :

1. A travers la loi d'Ohm généralisée, établir l'expression de la résistance d'un conducteur filiforme de longueur l et de section S .
2. Dans le domaine des hautes fréquences, établir à nouveau l'expression de la résistance en fonction de l'épaisseur de peau électromagnétique.

Exercice 2:

1. A travers la loi de Gauss, établir l'expression de la capacité d'un condensateur ci-contre.
2. Donner les relations entre courant et tension du condensateur pour : un régime quelconque (transitoire), un régime sinusoïdal (harmonique), déduire l'ordre de grandeurs du courant et/ou de la tension en continu et en sinusoïdal à haute fréquence.
3. Donner les expressions de la puissance et de l'énergie stockée.

Exercice 3 :

1. A travers la loi d'Ampère, établir l'expression de l'inductance d'une bobine.
2. Donner les relations entre tension et courant de la bobine pour :
 - un régime quelconque (transitoire),
 - un régime sinusoïdal (harmonique),
 - déduire l'ordre de grandeurs du courant et/ou de la tension en continu et en sinusoïdal à haute fréquence.
3. Donner les expressions de la puissance et de l'énergie stockée.

Exercice 4 :

1. Comparer les différents composants R , L et C et donner le rôle de chacun d'eux.
2. Expliciter les dualités entre L et C .

References

- [1] ALAIN CHAROY « COMPATIBILITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE » 2ÈME ÉDITION; DUNOD ISBN 2-10-049520-8.
- [2] J. UNGER « INTRODUCTION À LA COMPATIBILITÉ ELECTROMAGNÉTIQUE », HAUTE ECOLE D'INGÉNIERIE ET DE GESTION DU CANTON DE VAUD (HEIG-VD), SUISSE.
- [3] JACQUES CUVILLIER « COURS DE CEM », UNIVERSITÉ DE NANTES.
- [4] EMMANUEL CLAVIER « COMPATIBILITÉ ELECTROMAGNÉTIQUE », ECOLE CENTRALE MARSEILLE, FRANCE..
- [5] P. POULICHET, «INTRODUCTION À LA COMPATIBILITÉ ELECTROMAGNÉTIQUE»,ECOLE DE L'INNOVATION TECHNOLOGIQUE ESIEE), PARIS FRANCE
- [6] P. DEGAUQUE , J. HAMELIN, "COMPATIBILITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE" ÉDITION DUNOD 1990.
- [7] RECOMMANDATIONS DU COMITÉ INTERNATIONAL SPÉCIAL DES PERTURBATIONS RADIO-ÉLECTRIQUES CISPR 16.
- [8] LABOURÉ, F. COSTA, F. FOREST, "CURRENT MEASUREMENT IN STATIC CONVERTERS AND REALIZATION OF A HIGH FREQUENCY PASSIVE CURRENT PROBE (50A-300MHZ)", ACTES DU CONGRÈS EPE93, BRIGHTON SEPTEMBRE 1993, PP.4/478-4/483.
- [9] ARTICLES E 6140, E6142, E3280 DU TRAITÉ D'ÉLECTRONIQUE DES TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR.
- [10] R. BADOUAL, LES MICRO-ONDES, ÉDITION MASSON, 1984.