

Qualité d'Énergie

(Compatibilité Electromagnétique CEM)

Abdallah DARKAWI
POLYTECH NANTES École d'ingénieurs de l'université de Nantes
Département Génie Électrique

UE : Qualité d'énergie - Module : Sciences et Techniques fondamentales
Pour la Formation d'ingénieur par alternance – CNAM
2^e année cycle Ingénieur Systèmes Electriques

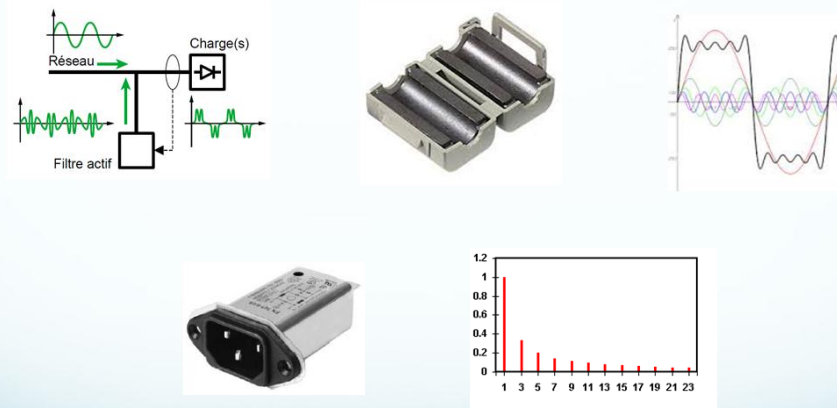
Objectif pédagogique

- Offrir un haut niveau de culture dans le domaine de la Compatibilité Electro Magnétique (CEM) dans le domaine de l'électronique de puissance.
- Intégrer les notions de sécurité et de sûreté de fonctionnement face aux perturbations électromagnétiques.
- Prendre conscience de l'enjeu éco-électrique que peut représenter une étude bien conduite en électronique de puissance en intégrant dès le départ une démarche CEM.

Capacités visées

- Etre capable de rendre compatibles CEM des équipements d'électronique de puissance dans une démarche de conception éco-électrique : Réduction des perturbations engendrées par les composants d'électronique de puissance, réduction de la consommation et réduction des coûts.
- Etre capable d'exposer les solutions retenues à un public dont les membres ne sont pas tous des spécialistes du domaine.

Brainstorming



Cours d'initiation à la Compatibilité Electromagnétique : Qualité d'énergie

3

Mots clés

Puissance déformante

problèmes CEM : Conduit et rayonné filtrage actif

Analyse spectrale d'un courant

Mode différentiel (MD) Perturbations conduites par mode différentiel et mode commun
 mode commun (MC)

filtres d'entrée Perturbations conduites par différentes structures de redresseurs

Normes Modes de couplage

Absorption sinusoïdale de courant filtres de mode différentiel

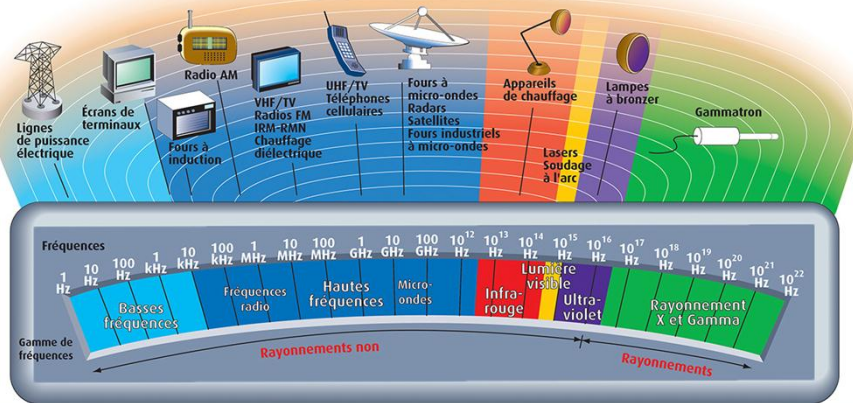
Réseau Stabilisateur d'Impédance de Ligne (RSIL) Qualité de l'énergie sur les réseaux

Facteur de puissance THD

Cours d'initiation à la Compatibilité Electromagnétique : Qualité d'énergie

4

Brainstorming



Source : www.inrs.fr

Cours d'initiation à la Compatibilité Electromagnétique : Qualité d'énergie

5

Plan de cours

- **Partie I : la CEM, définition, normes, terminologie**
 - Introduction – rappels
 - Généralités sur la CEM, notion de source, couplage et victime
 - Directives et Normes de la communauté européenne
 - Origine des bruits et des perturbations EM
 - Quelques méthodes de résolution des problèmes CEM
- **Partie II : la CEM et l'électronique de puissance**
 - Introduction – rappels
 - Conception des Convertisseurs
 - Perturbation dans les convertisseurs statiques
 - Les modes de perturbation (mode conduit BF & RF, mode rayonné)
 - Génération des perturbations
 - Propagation des perturbations
 - Effets des perturbation
 - Mesure et réduction des perturbation
 - Immunité

Cours d'initiation à la Compatibilité Electromagnétique : Qualité d'énergie

6

Partie 1 : 7h00

- **Partie I : la CEM, définition, normes, terminologie**
 - Introduction – rappels
 - Généralités sur la CEM, notion de source, couplage et victime
 - Directives et Normes de la communauté européenne
 - Origine des bruits et des perturbations EM
 - Quelques méthodes de résolution des problèmes CEM

Partie 2 : 5h

- **Partie II : la CEM et l'électronique de puissance**
 - Introduction – rappels
 - Conception des Convertisseurs
 - Perturbation dans les convertisseurs statiques
 - Les modes de perturbation (mode conduit BF & RF, mode rayonné)
 - Génération, propagation, effets des perturbations
 - Mesure et réduction des perturbations

Planning

- Total **14 h**
- Répartition :
 - 3 séances de cours de **2h00**
 - Evaluation **2h00**
- A chaque séance :
 - > rappel sur le cours précédent 15
 - > cours interactif avec participation des élèves
 - > synthèse et auto évaluation 15 à 30 min à la fin du cours

Plan de cours

- **Partie I : la CEM, définition, normes, terminologie**
 - **Introduction – rappels**
 - Généralités sur la CEM, notion de source, couplage et victime
 - Directives et Normes de la communauté européenne
 - Origine des bruits et des perturbations EM
 - Quelques méthodes de résolution des problèmes CEM

1. Introduction et Définitions

Introduction

Tous les systèmes électriques et électroniques sont soumis à des perturbations qui proviennent de l'énergie parasite qui franchit d'une manière non intentionnelle leurs frontières. Cette énergie parasite est appelée **perturbation électromagnétique** (voir suite du cours).

En s'intéressant à l'environnement électromagnétique d'un dispositif électronique, nous allons voir qu'il existe différentes sources de perturbations d'origines différentes. Les perturbations d'origines naturelles et les sources de perturbations dues à l'activité humaine.

1. Introduction et Définitions

Introduction (suite)

La **Compatibilité électromagnétique** est une discipline qui a pour objectif d'étudier les problèmes de **cohabitation** électromagnétique. Elle a pour vocation de :

- Etudier les transferts **d'énergie** non intentionnels entre systèmes électriques et/ou électroniques,
- Mettre au point des procédés permettant de **limiter** les **perturbations électromagnétiques** émises et de ce fait satisfaire à la réglementation en vigueur,
- Mettre au point des procédés permettant d'accroître **l'immunité** des systèmes aux **parasites**.

1. Introduction et Définitions

1.1. Définition de la CEM :

Selon le vocabulaire électrotechnique international VIEI 161-01-07, la CEM est la capacité d'un **dispositif électronique**, d'un **équipement** ou d'un **système** à fonctionner de façon satisfaisante dans son **environnement (électromagnétique)** sans introduire de **perturbations électromagnétiques intolérables** pour quoi que ce soit dans cet **environnement**.

Il faut noter que :

- il existe toujours un niveau de **perturbation** électromagnétique émis par l'appareil ou l'environnement, il devra alors être inférieur à un **seuil prédéfini**.
- l'appareil ou le système devra présenter un certain seuil **d'immunité** intrinsèque, c'est à dire **tolérer** sans dysfonctionnement un niveau minimum de **perturbations**.

Cours d'initiation à la Compatibilité Electromagnétique : Qualité d'énergie

13

1. Introduction et Définitions

1.2. Champ d'action de la CEM :

Le **champ d'action** de la CEM est très vaste, on distingue :

- Les phénomènes physiques (foudre, décharges électrostatiques, rayonnements, courants conduits),
- Les domaines d'application tels que les télécommunications, les équipements spatiaux et militaires, le contrôle commande, l'instrumentation et **l'électronique de puissance**... etc
- La gamme de fréquence (quelques Hz à quelques dizaines de GHz)

Cours d'initiation à la Compatibilité Electromagnétique : Qualité d'énergie

14

1. Introduction et Définitions

1.2. Champ d'action de la CEM (suite) :

On peut donc délimiter trois principaux centres d'étude :

- Les **sources** de **perturbation**
- Leur mode de **couplage** et de **propagation**
- Les effets des perturbation sur les **victimes**, qui correspondent au concept de **susceptibilité électromagnétique**.

Qui est concerné par la CEM ?

Tous les dispositifs électroniques, équipement ou système : exemple dans un PC, cela signifie que chaque composant devra être **compatible** au niveau CEM, que le PC en soit devra être compatible, et que, dans un réseau constitué de plusieurs PC et plusieurs **équipements électroniques**, l'ensemble devra satisfaire aux **normes** de CEM.



La CEM concerne alors tous les secteurs de l'électronique et de l'électricité. Elle est concernée par toutes les fréquences, du continu au GHz.

Etre compatible c'est quoi ?

Etre compatible signifie :

- Ne pas **perturber** : ne pas envoyer vers l'extérieur trop de perturbations.
- Etre **capable** de fonctionner **correctement** même quand « un » ou « plusieurs » dispositifs génère (nt) des perturbations à proximité.

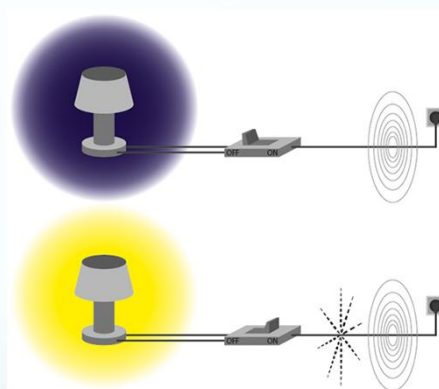
Comment vérifier ?

Pou vérifier la CEM d'un dispositif, on procède en vérifiant par des **mesures**, que le dispositif fonctionne correctement en présence de perturbations. On vérifie également que l'appareil n'envoie pas trop de perturbations vers l'extérieur en mesurant les **champs électriques et magnétiques** à une certaine distance (perturbations rayonnées).

1.3. Champ électrique, champ magnétique et champ électromagnétique

Tout **fil conducteur** sous tension produit un **champ électrique** dans son voisinage. Son intensité se mesure en volts par mètre (V/m).

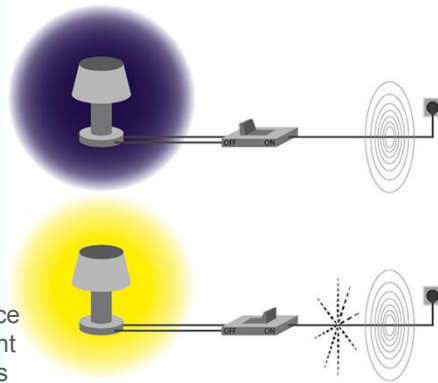
Contrairement aux champs électriques, les **champs magnétiques** n'apparaissent que lors du passage d'un **courant électrique** dans un conducteur. Leur intensité se mesure en ampères par mètre (A/m) ou en microteslas (μT).



Un **champ électromagnétique** apparaît dès lors que des charges électriques sont en mouvement. Ce champ résulte de la combinaison de 2 ondes (l'une électrique, l'autre magnétique) qui se propagent à la vitesse de la lumière.

1.3. Champ électrique, champ magnétique et champ électromagnétique (suite)

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 fermé

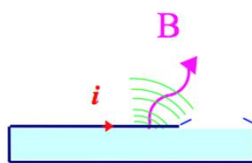


La perturbation est proportionnelle à la surface de la boucle et la variation dH/dt . Elle devient importante pour des phénomènes transitoires rapides et lorsque la surface de la boucle est importante.

1.4. Génération d'un champ électromagnétique

Génération d'un champ...

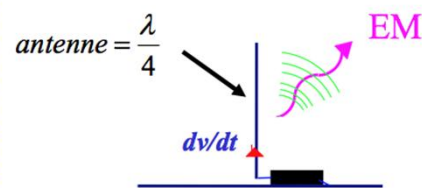
Loi de Biot et Savart



$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i \, d\vec{s} \times \vec{r}}{r^3}$$

➔ On génère Champ Magnétique

« Phénomène d'antenne »



$$\lambda = \frac{c}{f}$$

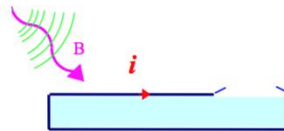
$c = 300000 \text{ km/s}$,
 $f = \text{fréquence en Hertz}$,
 $\lambda = \text{longueur d'onde en m}$

➔ On génère une Onde Electromagnétique

Les paramètres mis en jeu sont d'ordre géométrique et dépendent des fréquences et des énergies

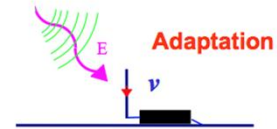
1.4. Génération d'un champ électromagnétique

Couplage MAGNETIQUE



➡ On génère un courant

Couplage ELECTRIQUE



➡ On génère une tension

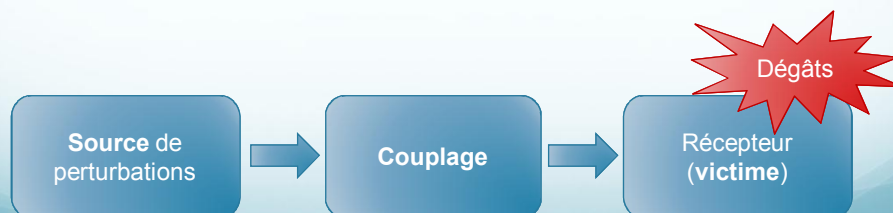
Les paramètres mis en jeu sont d'ordre géométrique et dépendent des **fréquences** et des **énergies**
=> Attention particulière **aux variations de courants**

CEM en résumé

Un système **électromagnétiquement** compatible respecte 3 critères :

- il **ne produit aucune interférence** (perturbation) avec d'autres systèmes,
- Il **n'est pas susceptible** aux émissions des autres systèmes.
- Il **ne produit aucune interférence** (perturbation) avec lui-même.

Synoptique d'un problème CEM



1.5. Les perturbations

On appelle « **perturbation électromagnétique** » tout phénomène électromagnétique susceptible de dégrader les performances d'un dispositif, d'un équipement ou d'un système. Ces perturbations peuvent être un bruit électromagnétique, un signal non désiré ou une modification du milieu de propagation.

1.6. Immunité

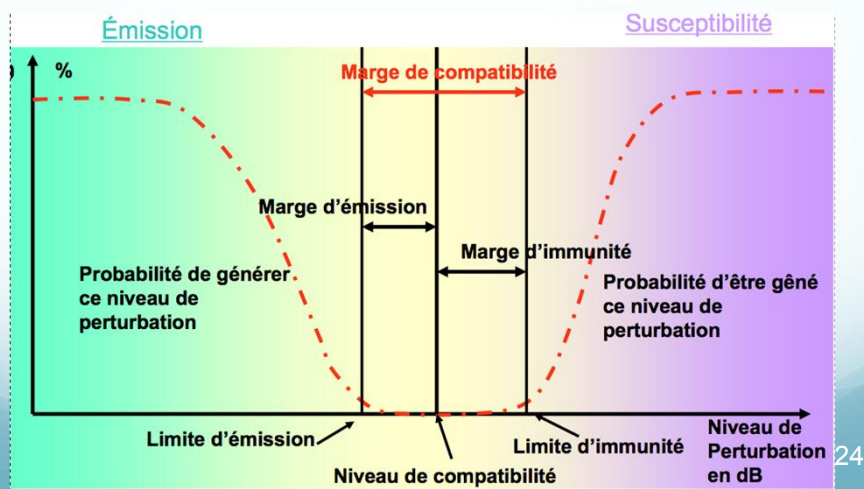
Aptitude d'un appareil ou dispositif électronique à ne pas être perturbé par l'extérieur (son environnement).

1.7. Susceptibilité

C'est la capacité d'un dispositif d'être perturbé par l'extérieur.

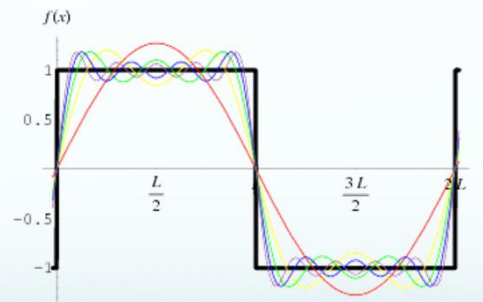
1.8. Emissivité (émission)

C'est l'aptitude d'un appareil ou dispositif électronique à transmettre des signaux de perturbation.



2. Rappels Mathématiques

Rappel sur les séries de Fourier avec Exemples



suite (au tableau)

1. Définition d'une série

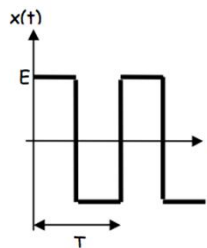
En mathématiques, la série constitue une généralisation de la notion de somme, pour une succession infinie de termes. L'étude des séries consiste à effectuer la somme d'un nombre fini n de termes successifs, puis à observer le comportement lorsque n devient indéfiniment grand, par un calcul de limite. Un certain nombre de méthodes permettent de déterminer la nature (convergence ou non) des séries sans réaliser explicitement ces deux calculs.

Exemple : $\sum_{n=0}^{\infty} a_n = a_0 + a_1 + a_2 + \dots + a_i + \dots$: série de terme général a_n .

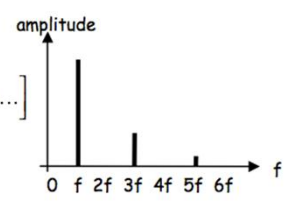
Une **série trigonométrique** est une série dont le terme général est une fonction trigonométrique dont la fréquence varie selon l'indice n .

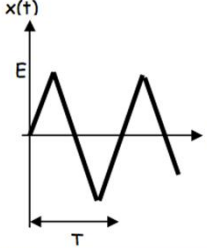
Exemple : $\sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) = a_0 + a_1 \cos(\omega t) + a_2 \cos(2\omega t) + \dots + a_i \cos(i\omega t) + \dots$

Exemples de signaux en électronique de puissance

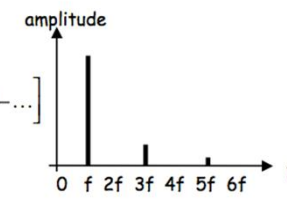


$x(t) = \frac{4E}{\pi} \left[\sin(\omega t) + \frac{\sin(3\omega t)}{3} + \frac{\sin(5\omega t)}{5} + \dots \right]$



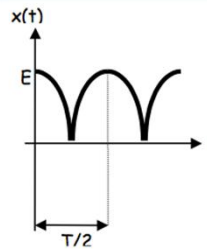


$x(t) = \frac{8E}{\pi^2} \left[\sin(\omega t) - \frac{\sin(3\omega t)}{3^2} + \frac{\sin(5\omega t)}{5^2} - \dots \right]$

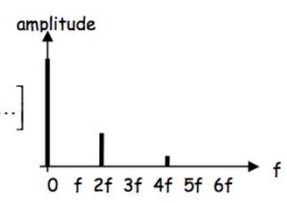


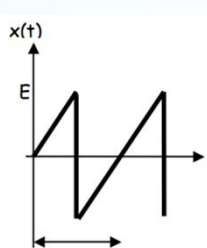
Cours d'initiation à la Compatibilité Electromagnétique : Qualité d'énergie 27

Exemples de signaux en électronique de puissance

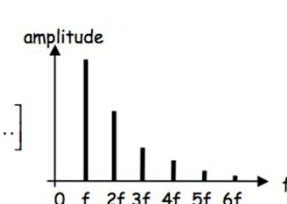


$x(t) = \frac{2E}{\pi} \left[1 + \frac{2 \cos(2\omega t)}{3} - \frac{2 \cos(4\omega t)}{15} + \dots \right]$



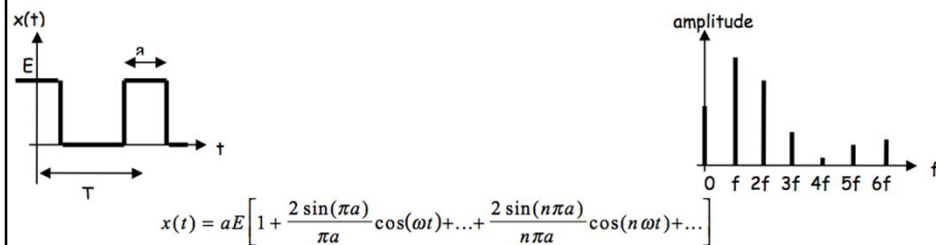


$x(t) = \frac{2E}{\pi} \left[\sin(\omega t) - \frac{\sin(2\omega t)}{2} + \frac{\sin(3\omega t)}{3} + \dots \right]$



Cours d'initiation à la Compatibilité Electromagnétique : Qualité d'énergie 28

Exemples de signaux en électronique de puissance



Plan de cours

- **Partie I : la CEM, définition, normes, terminologie**
 - Introduction – rappels
 - **Généralités sur la CEM, notion de source, couplage et victime**
 - Directives et Normes de la communauté européenne
 - Origine des bruits et des perturbations EM
 - Quelques méthodes de résolution des problèmes CEM

2. Généralités

2.1. La Source

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

Quelles sont les principales **sources** de **perturbation** ?

Sources permanentes (fréquence fixe)

- Emetteurs radio
- Radars
- Bruits des moteurs électriques
- Communications fixes et mobiles
- Ordinateurs, écrans, imprimantes
- Redresseurs
- Etc.

Sources transitoires (large de bande de fréquence)

- La foudre
- Impulsion nucléaire d'origine orageuse (NEMP : Nuclear Electromagnetic Pulse)
- Défauts dans les lignes d'énergie
- Interruption de courant (disjoncteurs)
- Décharge électrostatique
- Etc.

Sources permanentes à large bande de fréquence

- Systèmes électroniques
- Microprocesseurs

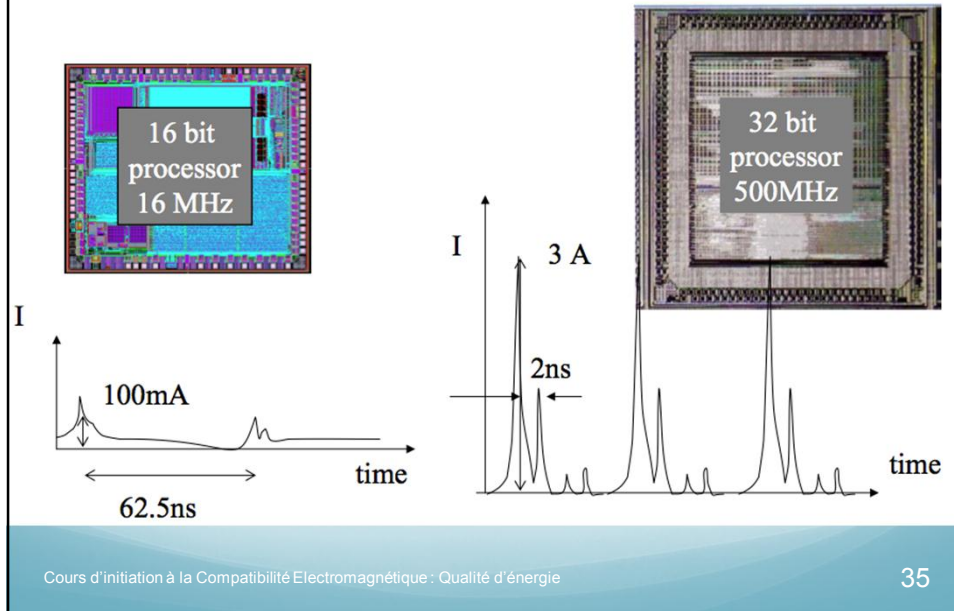
Type de source	Commentaires
Réseau électrique	Transitoires de type double-exponentielle, temps de montée de l'ordre de 1 ms, durée de quelques dizaines de ms, amplitude d'environ 10 kV. Formes d'onde oscillatoires 100 kHz. Creux de tension (jusqu'à une durée de 100ms) Harmoniques jusqu'à environ 2 kHz
Appareils de coupure du courant	Transitoires rapides (temps de montée quelques ns, amplitude de quelques kV)
Décharge électrostatique	Temps de montée de 1 à 10 ns Une dizaine de kV
Moteurs à collecteur (bruit de commutation)	Fréquences jusqu'à environ 300 MHz

Cours d'initiation à la Compatibilité Electromagnétique : Qualité d'énergie 33

Type de source	Commentaires
Alimentation à découpage	Spectre de bruit continu de 1 kHz à 100 MHz
Radio-téléphonie	Autour de 1-2GHz suivant les normes de communication Quelques V
Circuits logiques (de bases)	Autour de qq MHz Faible qq 100mV
Circuits logiques (hautes performances)	Sur une très large bande de Fréquence qq MHz à qq Ghz Tres faible qq 10mV, mais importante évolution du di/dt

Cours d'initiation à la Compatibilité Electromagnétique : Qualité d'énergie 34

Evolution des pics de courants avec l'intégration, des di/dt élevés!!



2. Généralités

2.2. Le couplage

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

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

Définir ce coefficient est important dans la connaissance de la CEM, car plus il est faible (plus sa valeur absolue en décibel est importante), plus la perturbation effectivement reçue par la victime potentielle est faible, et meilleure est la CEM.

Rappel

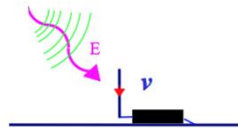
Couplage MAGNETIQUE



➔ On génère un courant parasite caractérisé par :

- amplitude
- fréquence

Couplage ELECTRIQUE



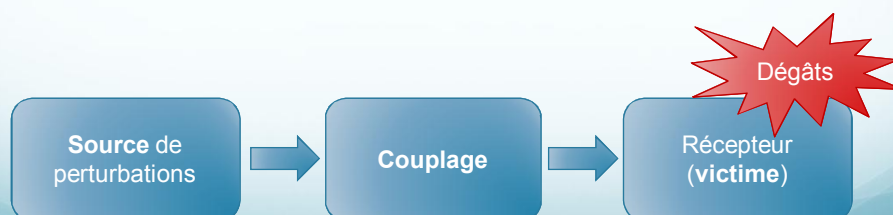
➔ On génère une tension parasite caractérisé par :

- amplitude
- fréquence

2. Généralités

2.3. Notion de victime

C'est La victime, dans la trilogie source/couplage/ victime, représente tout matériel susceptible d'être perturbé. Il s'agit généralement d'un équipement comprenant une partie électronique, qui présente un dysfonctionnement dû à la présence de perturbations électromagnétiques généralement d'origine extérieure à l'équipement.



2. Généralités

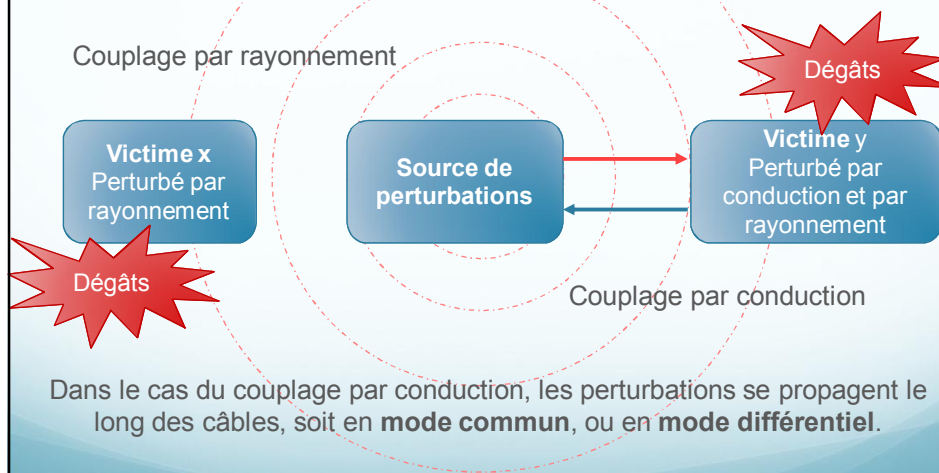
2.3. Notion de victime (suite)

Les défauts peuvent être de natures différentes :

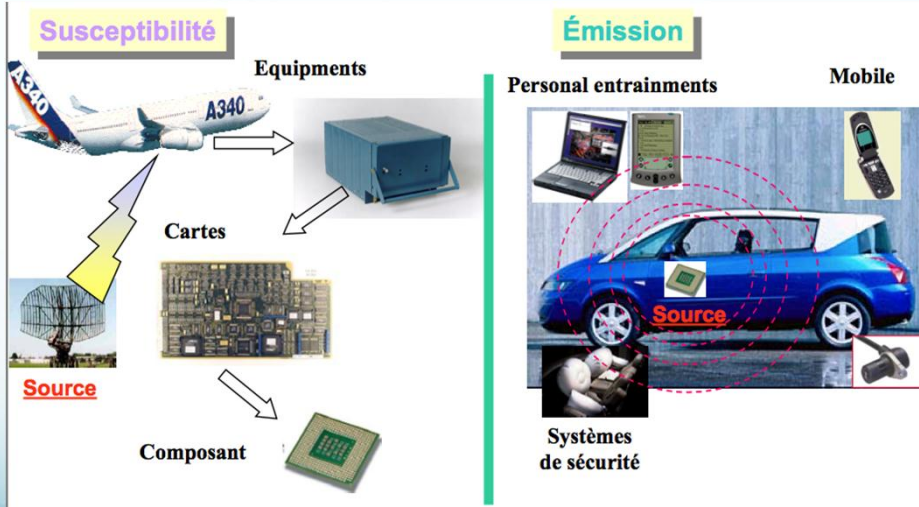
- permanents et mesurables,
- aléatoires non répétitifs survenant lors de l'apparition des perturbations,
- aléatoires non répétitifs persistant après l'apparition des perturbations,
- défauts permanents subis par l'équipement (destruction de composant(s)).

2. Généralités

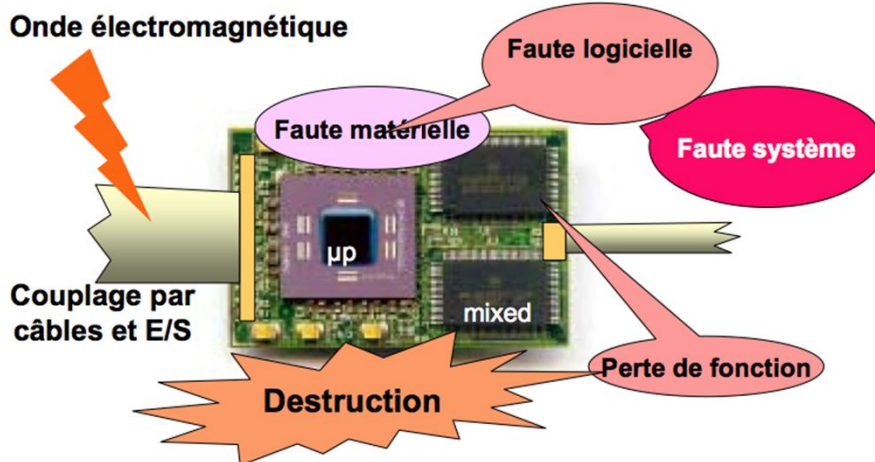
2.4. Mode de transmission des perturbations



Exemples de perturbations électromagnétiques



Susceptibilité des systèmes électroniques aux agressions électromagnétiques



Evolution et complexité de la CEM

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

- Des perturbations de plus en plus importantes liées à l'augmentation de la tension et de l'intensité,
- Des circuits à niveau d'énergie faible (microprocesseurs, petites électroniques) => plus sensibles aux perturbations
- Des distances courtes entre les circuits sensibles (commande) et circuits de puissances (intégration de puissance)
- Explosion du nombre de matériels de Telecom

Plan de cours

- **Partie I : la CEM, définition, normes, terminologie**
 - Introduction – rappels
 - Généralités sur la CEM, notion de source, couplage et victime
 - **Directives et Normes de la communauté européenne**
 - Origine des bruits et des perturbations EM
 - Quelques méthodes de résolution des problèmes CEM

3. Directives et Normes de la CE

3.1. Présentation générale

Au niveau de la Communauté Economique Européenne (CEE), la réglementation est élaborée par les différents Comités Techniques (TC) du Comité Européen de Normalisation en Electrotechnique (CENELEC).

La Directive européenne n°89/336/CEE stipule que dans tous les états membres de la CEE, les appareils susceptibles de générer des perturbations électromagnétiques ou dont le fonctionnement peut être affecté par ces perturbations ne peuvent être commercialisés dans les pays de la CEE que s'ils sont conformes aux spécifications en matière de CEM.

3. Directives et Normes de la CE

3.1. Présentation générale (suite)

Cette directive est rentrée en application le 28 octobre 1992. Toutefois, une période de transition de quatre ans a été prévue pour permettre aux fabricants de s'adapter et au CENELEC d'élaborer tous les documents. Nous donnons ci-dessous un échantillon des normes Européennes.

Au plan international, la Commission Electrotechnique Internationale (CEI) a créé un comité spécial, le Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques (CISPR) en vue de formuler les normes CEM.

Les publications du CISPR sont généralement utilisées par les différents pays comme document de base pour l'établissement de leurs propres normes.

3. Directives et Normes de la CE

3.1. Présentation générale (suite)

	Standards Européens	Titre	Equivalent international
Emission	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

Tableau 1 : principales normes Européennes en matière de CEM

Cours d'initiation à la Compatibilité Electromagnétique : Qualité d'énergie

47

3.2. Exemple de norme

Considérons la norme 55022 qui concerne une catégorie importante d'appareils électriques, les appareils de traitement de l'information. Cette norme est directement dérivée de la publication n°22 du CISPR et distingue deux classes d'appareils :

- Les appareils de classe A qui sont destinés à être utilisés en milieu industriel, commercial ou d'affaires ;
- Les appareils de classe B qui sont destinés à être utilisés dans des locaux d'habitation.

Cours d'initiation à la Compatibilité Electromagnétique : Qualité d'énergie

48

3.2. Exemple de norme

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

Tableau 2 : Limites de champ perturbateur rayonné 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

Tableau 3 : Limites de champ perturbateur rayonné pour les appareils de classe B

Gamme de Fréquences (MHz)	Limites Quasi-crête dB μ V	Limites Valeur moyenne dB μ V
0.15 à 0.50	79	66
0.50 à 30	73	60

Tableau 4 : Limites de la tension perturbatrice aux bornes du RSIL pour les appareils de classe A

Gamme de Fréquences (MHz)	Limites Quasi-crête dB μ V	Limites Valeur moyenne dB μ V
0.15 à 0.50	66 à 56	56 à 46
0.50 à 5	56	46
5 à 30	60	50

Tableau 5 : Limites de la tension perturbatrice aux bornes du RSIL pour les appareils de classe B

Plan de cours

- **Partie I : la CEM, définition, normes, terminologie**
 - Introduction – rappels
 - Généralités sur la CEM, notion de source, couplage et victime
 - Directives et Normes de la communauté européenne
 - **Origine des bruits et des perturbations EM**
 - Quelques méthodes de résolution des problèmes CEM

4. Origine des perturbations

4.1. Différentes sources de perturbations

Sources permanentes (fréquence fixe)

- Emetteurs radio
- Radars
- Bruits des moteurs électriques
- Communications fixes et mobiles
- Ordinateurs, écrans, imprimantes

**Alimentation à découpage
(électronique de puissance)**

Sources transitoires (large de bande de fréquence)

- La foudre
- Impulsion nucléaire d'origine orageuse (NEMP : Nuclear Electromagnetic Pulse)
- Défauts dans les lignes d'énergie
- Interruption de courant (disjoncteurs)
- Décharge électrostatique
- Etc.

Nous avons vu que 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).

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.

4.2. Perturbations rayonnées

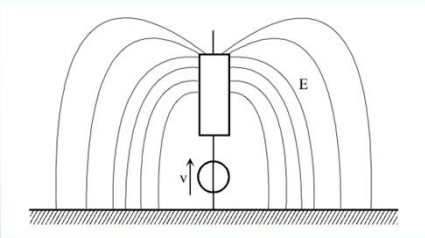
Si source et victime sont éloignées et sans liaison galvanique, la perturbation est transmise par une **onde électromagnétique**, on parle de **perturbations rayonnées** ou **propagées**. Les phénomènes sont décrits avec les outils théoriques et expérimentaux propres à ce domaine (équation de Maxwell et utilisation d'antennes de mesure).

Rappel :

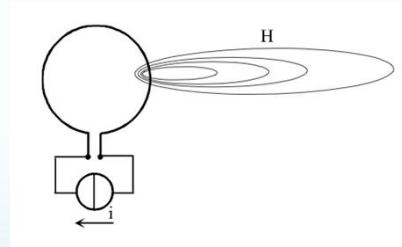
Es circuits électriques, lorsqu'ils sont **soumis à des différences de potentiel** ou et ou **parcourus** par des **courants**, produites des champs électromagnétiques dans l'espace. L'intensité dépend de la nature, la fréquence et la distance par rapport à la source.

L'émission du **champ électrique** E (V/m) est **produite** par un circuit électrique **haute impédance** soumis à une différence de potentiel élevée v.

L'émission du **champ magnétique** H (A/m) est **engendrée** par un circuit **basse impédance** parcouru par un courant i.



Emission en champ électrique



Emission en champ magnétique

4.2.1. Rappels

L'**impédance** de l'onde électromagnétique représente le rapport de l'intensité du champ électrique sur l'intensité du champ magnétique :

$$Z = \frac{E}{H}$$

La **longueur d'onde** peut être calculée en effectuant le rapport de la **vitesse de la propagation** de l'onde (soit la vitesse de la lumière pour le vide et en première approximation pour l'air) sur la **fréquence** des signaux constituant cette onde électromagnétiques :

$$\lambda = c / f = 3 \cdot 10^8 / f \text{ (en m)}$$

suite (au tableau)

4.3. Perturbations conduites

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 ou 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.

4.3.1 Mode commun, mode différentiel

Nous allons définir la terminologie employée pour caractériser les perturbations.

On peut définir un modèle électrique de liaison entre deux "boîtes". Ces deux boîtes symbolisent deux équipements électriques reliés par deux fils permettant le transfert d'information ou d'énergie. Ce modèle comporte également une liaison équipotentielle (plan de masse, châssis de l'appareil, terre, etc.).

Dans ce modèle dit des "deux boîtes" on différencie deux modes de circulation des courants :

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

The diagram shows two circuit models for a two-port network. On the left, labeled "Mode commun", two identical ports are shown. Each port contains a dependent current source and a resistor. The current entering the left port is i_{mc} , and the current leaving the right port is i_{mc} . The current entering the right port is $i_{mc}/2$, and the current leaving the left port is $i_{mc}/2$. On the right, labeled "Mode différentiel", the two ports are shown with opposite currents. The current entering the left port is i_{md} , and the current leaving the right port is i_{md} . The current entering the right port is i_{md} , and the current leaving the left port is i_{md} .

Mode commun

Mode différentiel

suite (au tableau)

Cours d'initiation à la Compatibilité Electromagnétique : Qualité d'énergie

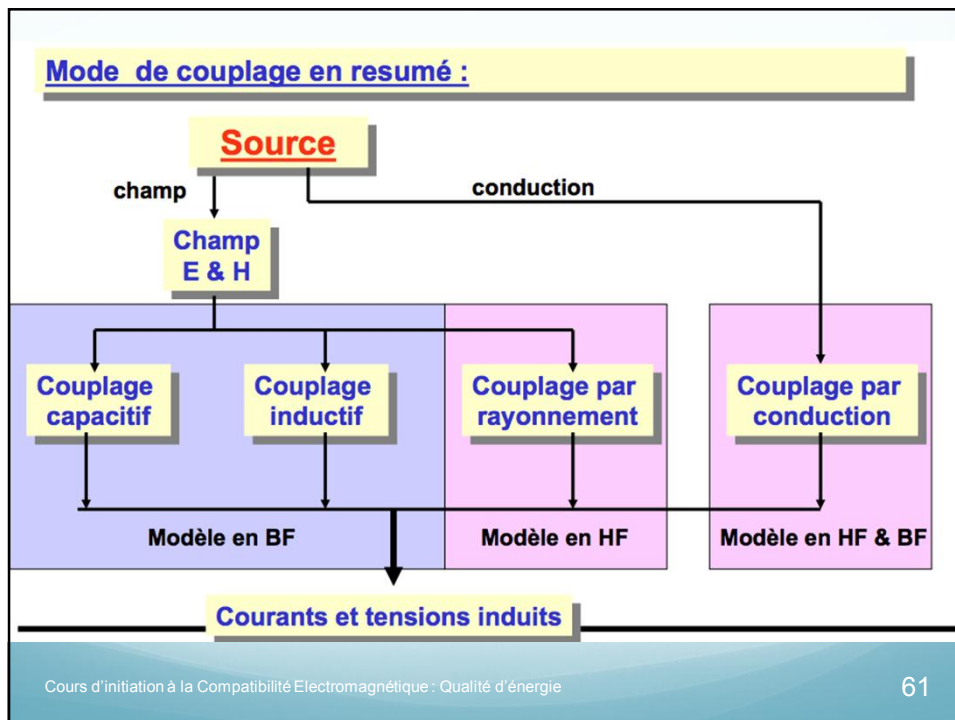
59

The diagram shows a two-port network where the currents are the result of superposition. The current entering the left port is i_{mc} , and the current leaving the right port is i_{mc} . The current entering the right port is $i_{md} + i_{mc}/2$, and the current leaving the left port is $i_{md} - i_{mc}/2$.

Superposition du mode commun et du mode différentiel

Cours d'initiation à la Compatibilité Electromagnétique : Qualité d'énergie

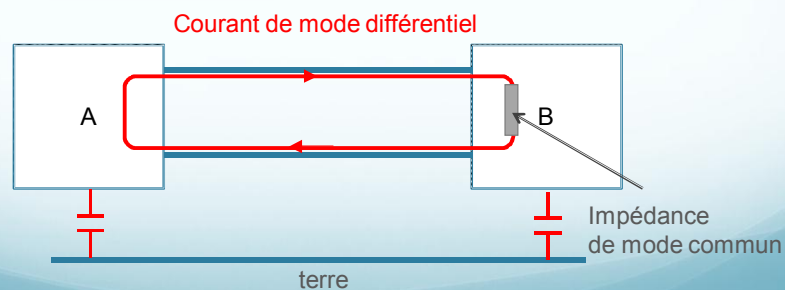
60



Mode différentiel (mode symétrique) :

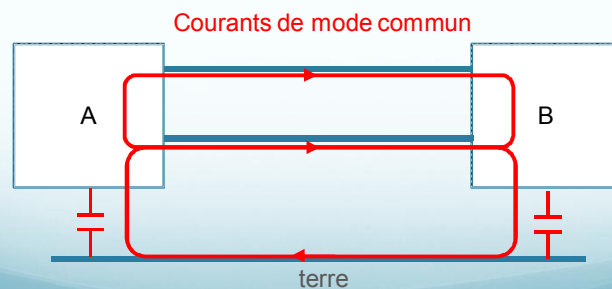
C'est le mode de fonctionnement de tous les signaux électroniques et des alimentations.

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.



Mode commun (ou asymétrie) :

La propagation s'effectue en mode commun lorsque la perturbation est transmise à l'ensemble des conducteurs actifs. Le courant de mode commun se propage sur tous les conducteurs dans le même sens et revient par la masse à travers les capacités parasites. Es courants peuvent être induits par un champ externe dans la boucle formée par le câble, le plan de terre et les impédances de connexion des équipements et la terre.



Cours d'initiation à la Compatibilité Electromagnétique : Qualité d'énergie

63

4.4. Couplage par rayonnement (diaphonie ou crosstalk)

La description du champ électromagnétique généré par un système est souvent difficile car chaque système contient en général **plusieurs sources** qui contribuent au **rayonnement**.

- Il peut y avoir un certain nombre de petits **boucles de courant** dont chacun peut être assimilé à un **dipôle magnétique**.
- Il peut y avoir une contribution importante des **courants en mode commun** circulant dans les câbles de connexion. Ces derniers peuvent être assimilés à des **dipôles électriques**.
- Les perturbations sont véhiculées par le milieu ambiant (en général dans l'air). La diaphonie peut être :

- **inductive**
- **capacitive**

Cours d'initiation à la Compatibilité Electromagnétique : Qualité d'énergie

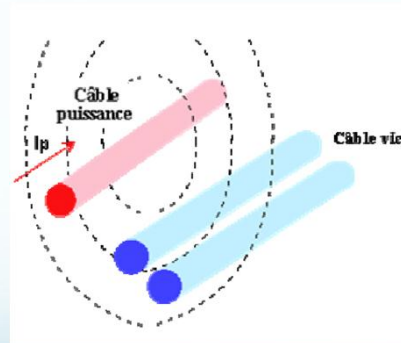
64

Couplage inductif

Une variation de courant dans un conducteur crée un champ magnétique qui rayonne autour de ce conducteur. Un circuit voisin peut alors voir apparaître une tension induite perturbatrice si la variation de courant est importante.

$$e = \mu_0 \cdot S \cdot dH/dt$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$$



Couplage capacitif

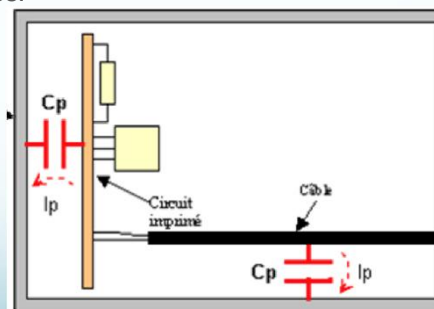
Il existe toujours une capacité non nulle entre deux éléments conducteurs. Toute différence de potentiel entre ces deux éléments va générer la circulation d'un courant électrique au travers de cette capacité parasite.

Ce courant parasite sera d'autant plus élevé que la tension et la fréquence de ce courant sont élevées.

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{h}$$

La valeur de la capacité est:

- proportionnelle à la surface S
- inversement proportionnelle à la distance h qui sépare les 2 conducteurs.

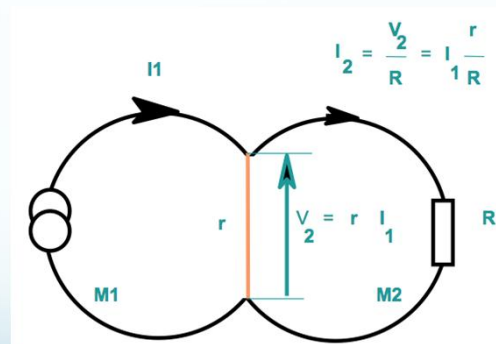


Plan de cours

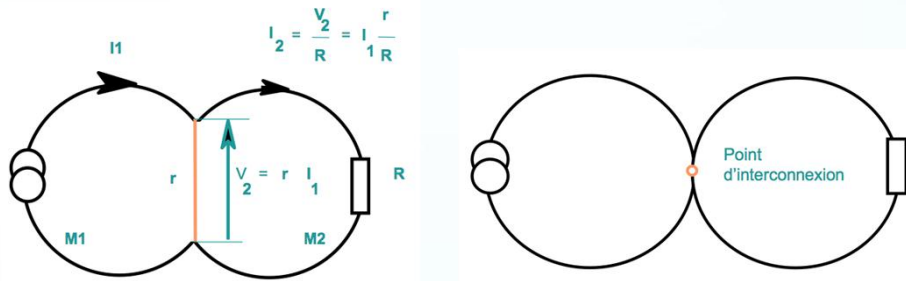
- **Partie I : la CEM, définition, normes, terminologie**
 - Introduction – rappels
 - Généralités sur la CEM, notion de source, couplage et victime
 - Directives et Normes de la communauté européenne
 - Origine des bruits et des perturbations EM
 - **Quelques méthodes de résolution des problèmes CEM**

Couplage par impédance commune

Un couplage par impédance commune se produit lorsque deux mailles ont en commun un tronçon dont l'impédance ne peut être considérée comme négligeable. Le courant **circulant dans la maille M1 provoque une différence de potentiel dans la maille M2**.



Couplage par impédance commune (remède)



Remèdes :

- Éviter les tronçons communs
- Relier alors les masses en un seul point
- Diminuer les impédances, par exemple en élargissant les pistes

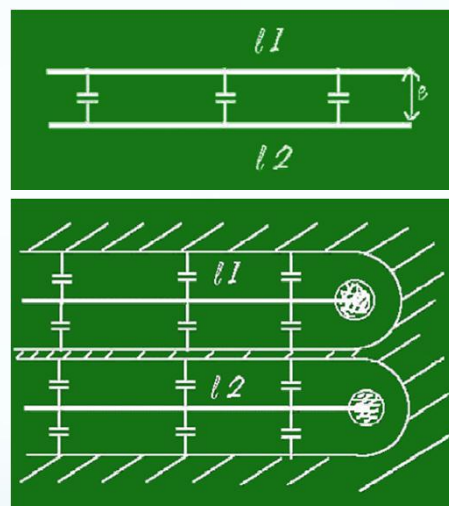
Couplage capacitif

Il existe toujours une capacité parasite entre deux éléments conducteurs proches portés à des potentiels variables, exemple deux lignes d'un circuit imprimé,

Circulation de courant parasite entre les deux lignes

Remèdes :

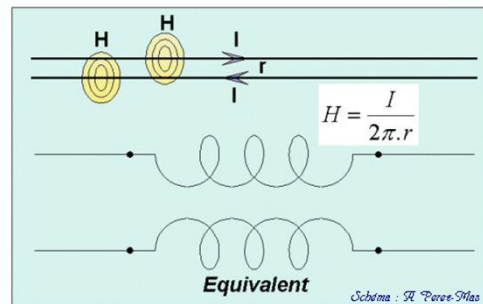
- Isoler les conducteurs entre eux
-> faire un blindage (par un plan de masse par exemple)



Couplage inductif

Les deux lois fondamentales de l'électromagnétisme montrent que **deux éléments conducteurs peuvent s'influencer mutuellement** aux conditions suivantes :

- **proches** l'un de l'autre
- parcourus l'un ou l'autre, ou les deux par des signaux d'**intensités variables**.
- l'intensité inductrice doit être **suffisamment élevée**
- l'intensité inductrice doit **varier rapidement** : ($e = M di/dt$).

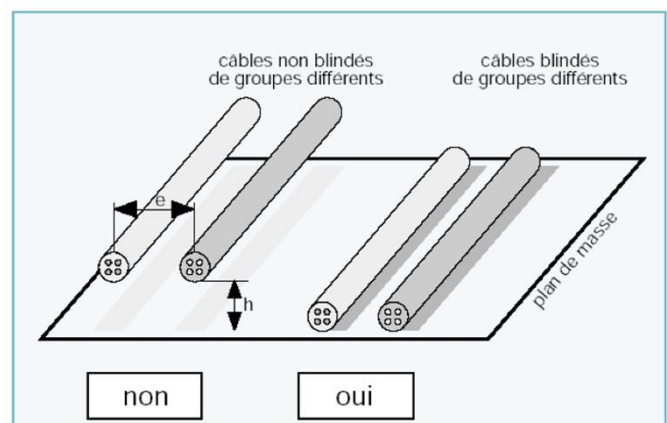


Remèdes :

Blindage des circuits conduisant des **courants importants** ou de **haute fréquence** (radioélectricité) -> métal à forte perméabilité magnétique (cage de Faraday)

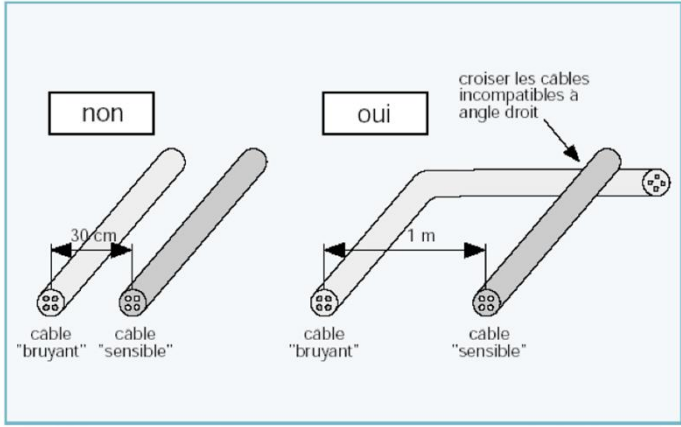
Autres Astuces

Risques de diaphonie en mode commun si $e < 3h$



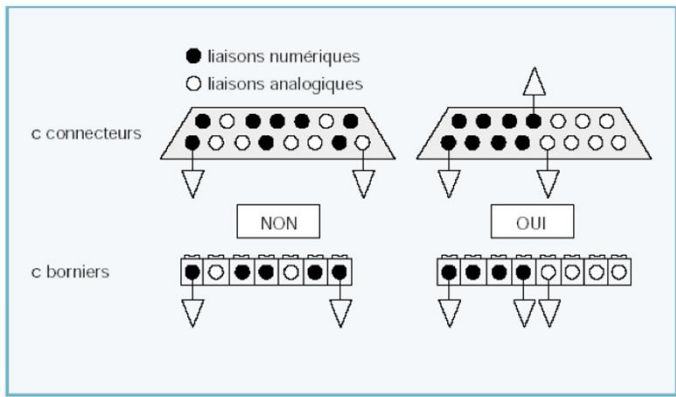
Autres Astuces

Eloigner les câbles incompatibles



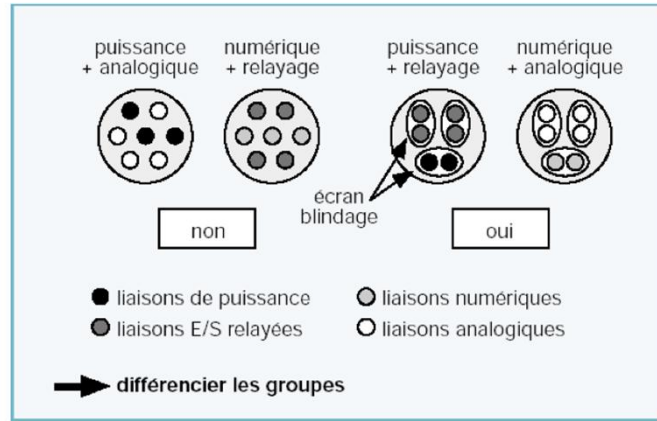
Autres Astuces

La "ségrégation" s'applique aussi aux raccords



Autres Astuces

Signaux incompatibles : câbles et torons différents

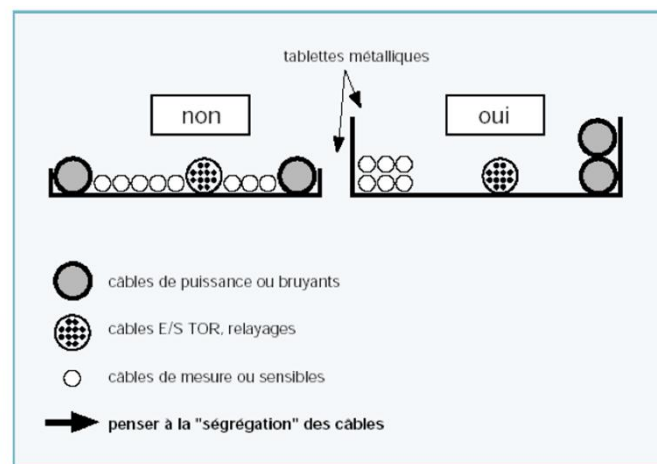


Cours d'initiation à la Compatibilité Electromagnétique : Qualité d'énergie

75

Autres Astuces

Répartition des câbles dans une tablette



Cours d'initiation à la Compatibilité Electromagnétique : Qualité d'énergie

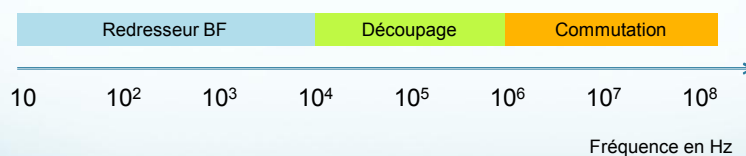
76

Partie 2

- **Partie II : la CEM et l'électronique de puissance**
 - **Introduction – rappels**
 - Perturbation dans les convertisseurs statiques
 - Les modes de perturbation (mode conduit BF & RF, mode rayonné)
 - Génération, propagation, effets des perturbations
 - Mesure et réduction des perturbations

Introduction

les **perturbations électromagnétiques émises par un convertisseur statique** sur une échelle de fréquence, s'échelonnent sur 7 décades. En effet, chaque étage de conversion contribue à perturber sur une plage fréquentielle dépendant de sa fréquence de commutation, le redresseur d'entrée jusqu'à quelques 10 kHz, l'étage à commutation HF jusqu'à quelques mégahertz et les phénomènes liés aux transitions de commutation (résonances, excitation des modes propres) jusqu'à quelques dizaines de MHz,

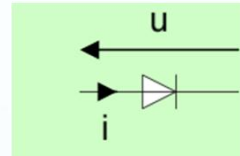


Equipements d'Electronique de puissance => sources de perturbation EM

1. Rappels - Electronique de Puissance

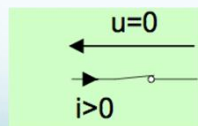
1.1. Redressement non commandé

On utilise des diodes de redressement

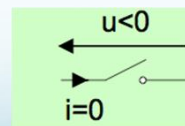


La diode est supposée parfaite (tension de seuil nulle) :

- dans l'état passant \Leftrightarrow interrupteur fermé ($i > 0$)
- dans l'état bloqué \Leftrightarrow interrupteur ouvert ($i = 0$)



État passant



État bloqué

1. Rappels - Electronique de Puissance

1.1. Redressement non commandé

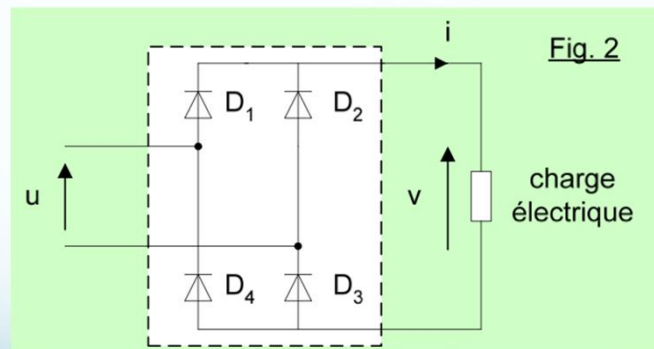
En résumé, la diode est un interrupteur électronique :

- unidirectionnel en courant (un seul sens de conduction)
- non commandable (la conduction et le blocage sont imposés par le reste du circuit)



1.2. Exemple de redressement non commandé

Ce pont nécessite quatre diodes.
La tension d'alimentation $u(t)$ est alternative sinusoïdale.



Cours d'initiation à la Compatibilité Electromagnétique : Qualité d'énergie

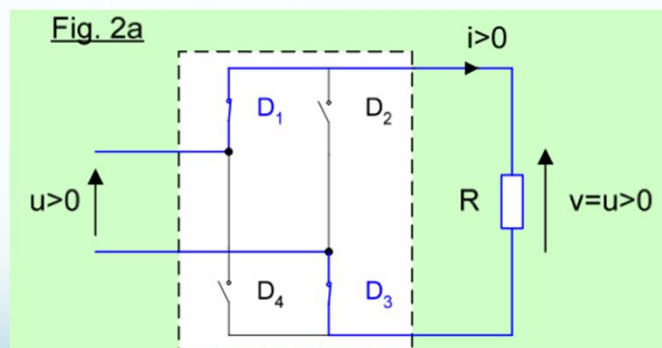
81

1.2. Exemple de redressement non commandé

Analyse du fonctionnement

On suppose que la charge est une résistance R .

a- tension d'entrée positive D_1 et D_3 conduisent : $v = u$

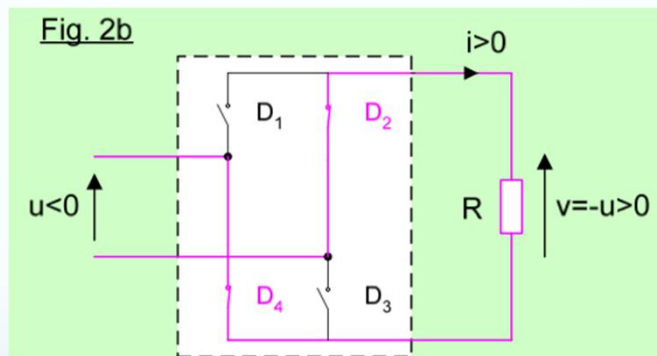


Cours d'initiation à la Compatibilité Electromagnétique : Qualité d'énergie

82

1.2. Exemple de redressement non commandé (suite)

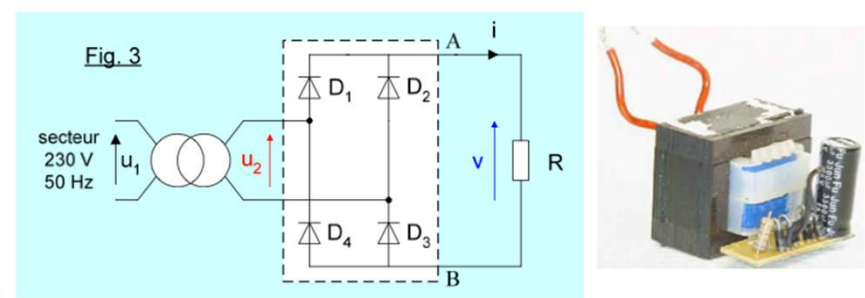
b- tension d'entrée négative D2 et D4 conduisent : $v = -u$



Le pont de Graëtz permet de "redresser" une tension : $v = |u|$
La tension de sortie est "continue" : elle ne change pas de signe.

1.3. Application

Le circuit se compose d'un transformateur monophasé suivi d'un pont de Graëtz



On suppose le transformateur parfait :
 $u_2(t) = mV u_1(t)$
 avec mV le rapport de transformation à vide.

• Pour une charge résistive on a :

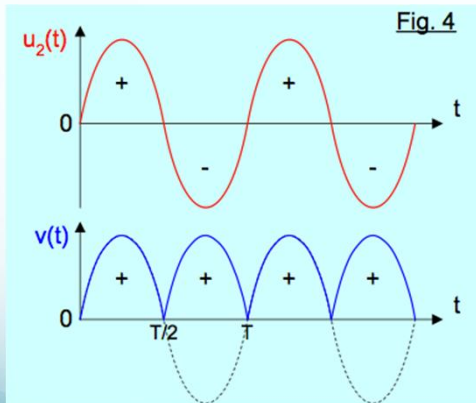


Fig. 4

• Valeur moyenne de la tension de sortie

$$\langle v \rangle = \frac{2\hat{v}}{\pi}$$

A.N. transformateur 230 V / 6 V

$$\hat{v} = \hat{u}_2 = \sqrt{2}U_2 = 8,5 \text{ V}$$

$$\langle v \rangle = \frac{2\hat{v}}{\pi} = 5,4 \text{ V}$$

1. Rappels - Electronique de Puissance

1.4. Redressement commandé

On utilise des thyristors. Un thyristor possède trois bornes : l'anode (A), la cathode (C) et la gâchette (G).

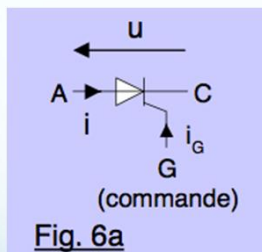


Fig. 6a



On utilise des thyristors. Un thyristor possède trois bornes l'anode (A), la cathode (C) et la gâchette (G).

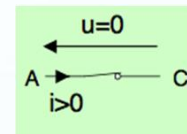
• **Caractéristiques électriques**

- état passant \Leftrightarrow interrupteur fermé
- état bloqué \Leftrightarrow interrupteur ouvert

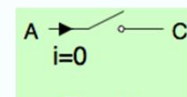
Mise en conduction du thyristor (initialement bloqué)

2 conditions :

- a) $u > 0$
- b) courant de gâchette suffisant (amorçage)



État passant



État bloqué

Une fois le thyristor amorcé, on peut supprimer le courant de gâchette.

Blocage du thyristor (initialement conducteur)

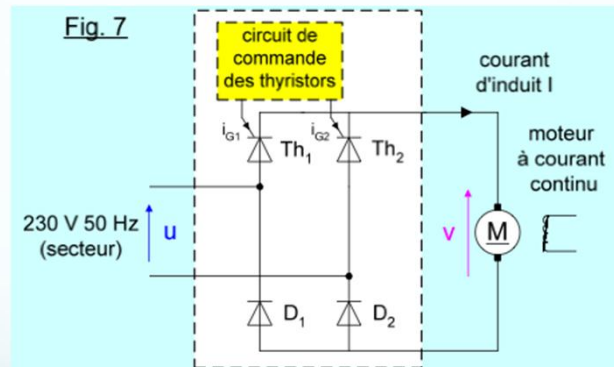
Blocage dès que le courant i s'annule (comme pour une diode).

En résumé, le thyristor est un interrupteur électronique :

- unidirectionnel en courant
- commandable à la fermeture en injectant un courant de gâchette

Le thyristor n'est pas commandable à l'ouverture.

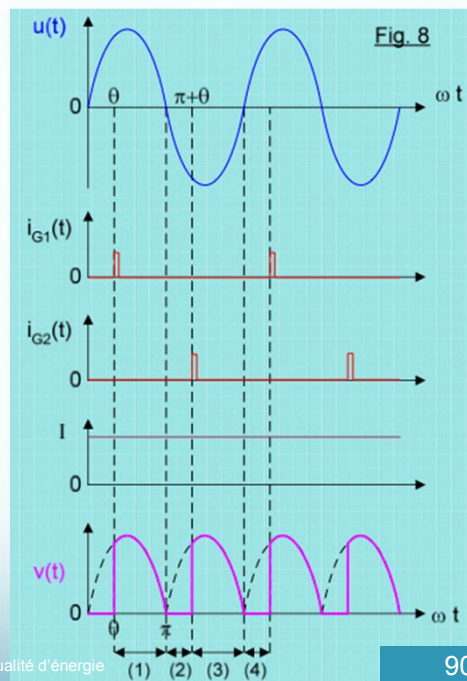
1.5. Exemple : pont mixte symétrique triphasé



Cours d'initiation à la Compatibilité Electromagnétique : Qualité d'énergie

89

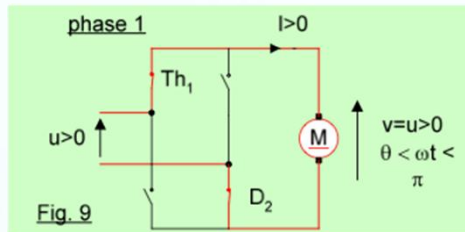
Formes d'ondes



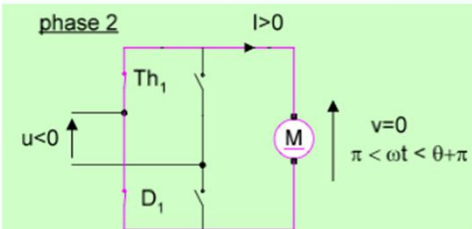
Cours d'initiation à la Compatibilité Electromagnétique : Qualité d'énergie

90

Analyse de fonctionnement



Phase 1 :
à l'instant $\omega t = \theta$, on amorce Th_1



Phase 2 :
à l'instant $\omega t = \pi$, u devient négative.
 D_2 se bloque et D_1 devient conductrice

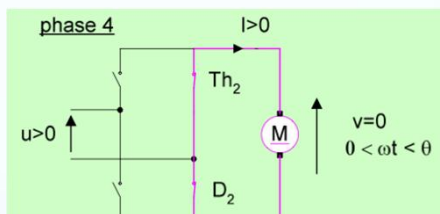
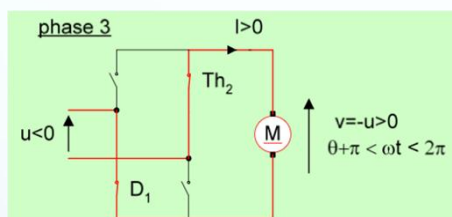
C'est une phase de « roue libre » (la bobine du moteur se décharge).

Cours d'initiation à la Compatibilité Electromagnétique : Qualité d'énergie

91

Analyse de fonctionnement

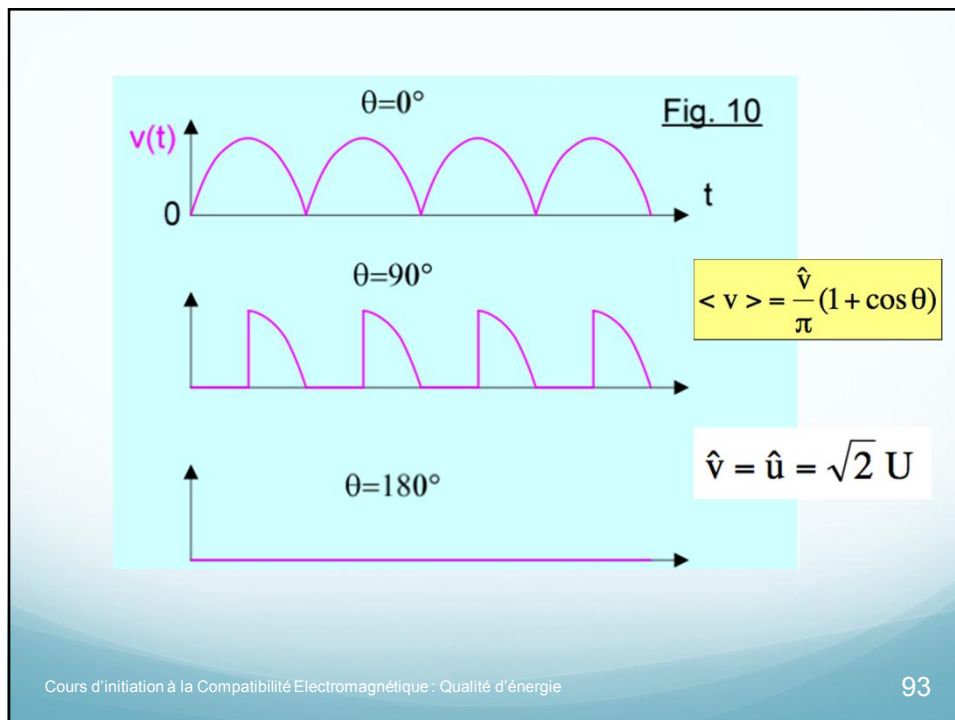
Phase 3 :
à l'instant $\omega t = \theta + \pi$, on amorce Th_2



Phase 4 :
à l'instant $\omega t = 2\pi$, phase de roue libre

Cours d'initiation à la Compatibilité Electromagnétique : Qualité d'énergie

92



Partie 2

- **Partie II : la CEM et l'électronique de puissance**
 - Introduction – rappels
 - **Perturbation dans les convertisseurs statiques**
 - Les modes de perturbation (mode conduit BF & RF, mode rayonné)
 - Génération, propagation, effets des perturbations
 - Mesure et réduction des perturbations

Principe

L'électronique de puissance utilise les semi-conducteurs de puissance en mode interrupteur. Ce fonctionnement confère au convertisseur un rendement très élevé ; par contre, il donne lieu à de nombreuses perturbations électromagnétiques dues essentiellement aux commutations rapides des semi-conducteurs. Les perturbations se propagent vers la source d'alimentation du convertisseur et vers la charge qu'il alimente, une partie plus infime de cette énergie est rayonnée

Conséquences

Les signaux parasites émis par la **source** (dans un convertisseur statique, la ou les cellules de commutations) sont propagés vers la source d'énergie (ou vers la charge) de plusieurs façons, liées à leur environnement respectif.

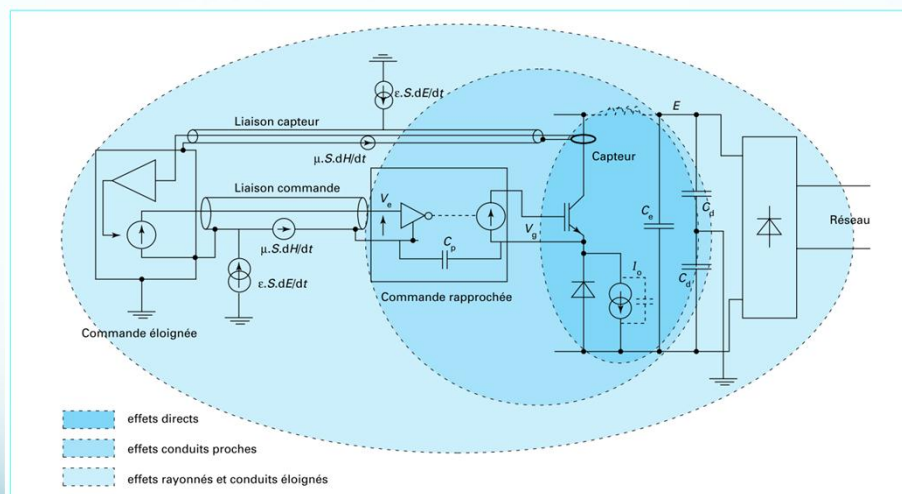
Mode conduite

Mode rayonné

Cours d'initiation à la Compatibilité Electromagnétique : Qualité d'énergie

95

Différents niveaux de la CEM en EdP

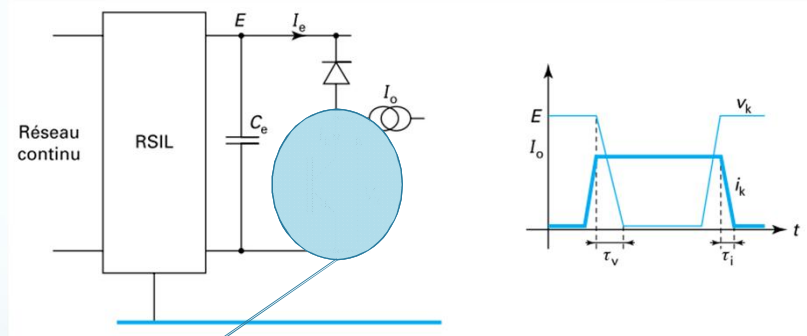


Source : François Costa, Gérard ROJAT, CEM en électronique de puissance - Sources de perturbations, couplages, SEM Techniques de l'ingénieur

Cours d'initiation à la Compatibilité Electromagnétique : Qualité d'énergie

96

Notion de cellule de commutation

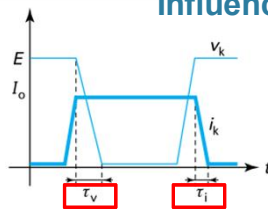


Interrupteur de puissance

Amorçage -> passage d'un courant I_k

Blocage -> supporte une tension V_k

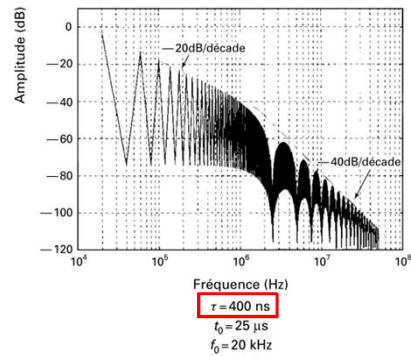
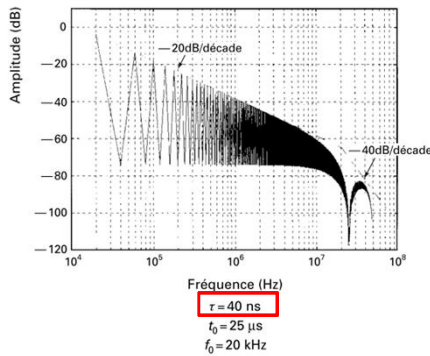
Influence du temps de commutation

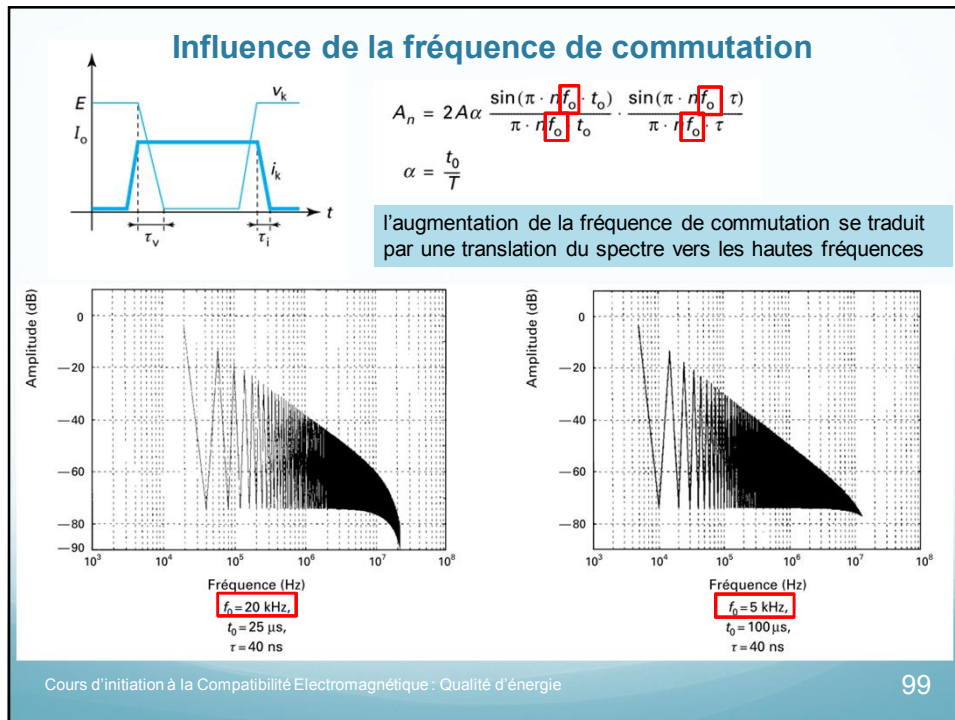


$$A_n = 2A\alpha \frac{\sin(\pi \cdot n f_0 \cdot t_0)}{\pi \cdot n f_0 \cdot t_0} \cdot \frac{\sin(\pi \cdot n f_0 \cdot \tau)}{\pi \cdot n f_0 \cdot \tau}$$

$$\alpha = \frac{t_0}{T}$$

le spectre est d'autant plus étendu et à faible décroissance que τ est faible,





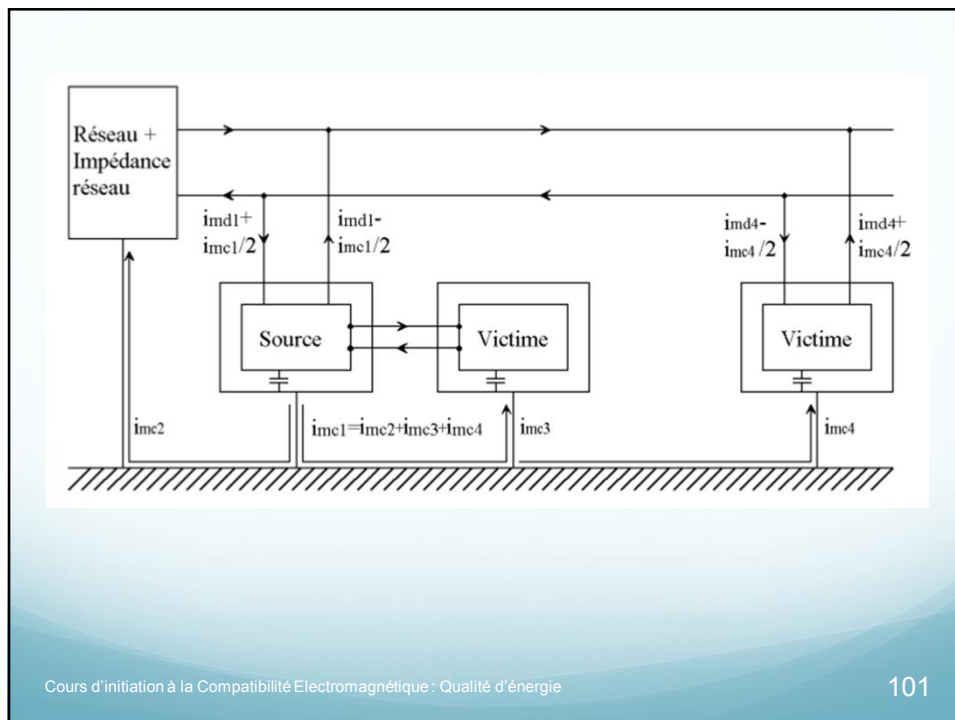
2. Perturbation dans les convertisseurs statiques

2.1. Perturbation en mode conduite BF

Les perturbations conduites utilisent comme canal de transmission les liaisons entre les éléments. On distingue alors les perturbation de **mode commun** et de **mode différentiel**. Dans un montage donné, on peut distinguer les différents mode de couplages.

Dans la figure suivante, nous distinguons trois types d'éléments, l'équipement perturbateur (source), les équipements susceptibles d'être perturbés (victimes) et le réseau. Nous distinguons également les transmissions des perturbations par conduction :

- le couplage par liaison directe
- les couplages par impédance commune.



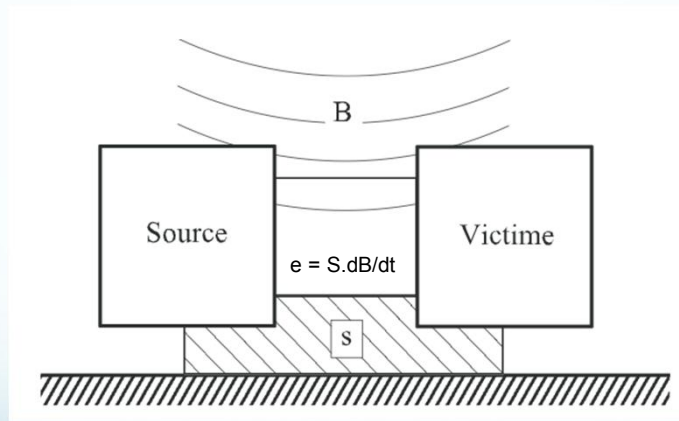
Les couplages par liaison directe permettent la propagation de la **source** à la **victime** par l'intermédiaire d'un canal de transmission d'information ou d'énergie. Les perturbations passent de la source à la victime en **mode commun** ou en **mode différentiel**.

Dans le couplage par impédance commune, le mode de transmission des perturbations est difficile à identifier que celui présenté précédemment, c'est à dire qu'ils n'échangent théoriquement pas d'information ou d'énergie. La connexion qui les lie est une liaison indirecte.

On retrouve ce couplage dans les deux modes, en mode commun et en mode différentiel. Les courants perturbateurs absorbés par la **source** (c'est à dire des courants dont la fréquence est telle que l'**impédance du réseau** est non négligeable vis à vis de l'**impédance d'entrée** de la **victime**) vont se propager entre le réseau et la victime dans des proportions dépendant de leurs impédances respectives. Ces courants **provoquent** des **chutes de tension sur le réseau**.

2.2. Transmission par rayonnement

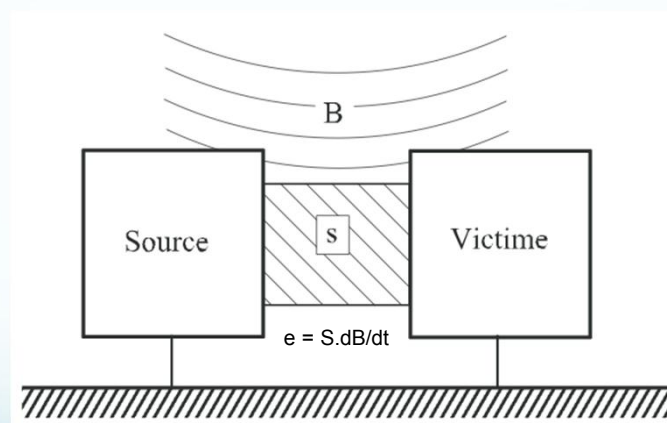
2.2.1. Couplage en champ lointain



Couplage champ à câble en mode commun

2.2. Transmission par rayonnement

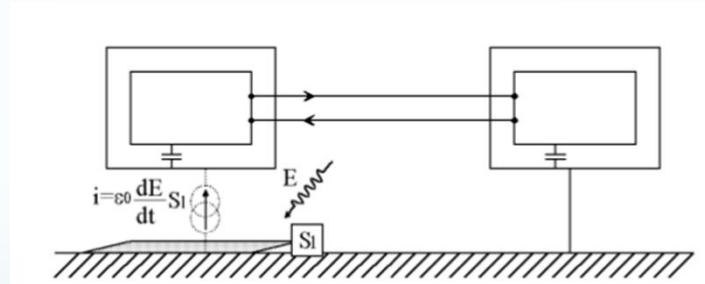
2.2.1. Couplage en champ lointain



Couplage champ à câble en mode différentiel

2.2. Transmission par rayonnement

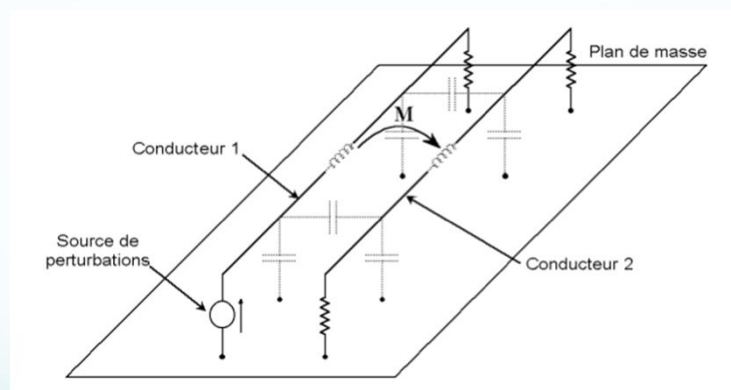
2.2.1. Couplage en champ lointain



Couplage champ électrique à câble en mode commun

2.2. Transmission par rayonnement

2.2.2. Couplage en champ proche



Couplage en champ proche

3. Dispositif 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. Mesure des Perturbations conduites

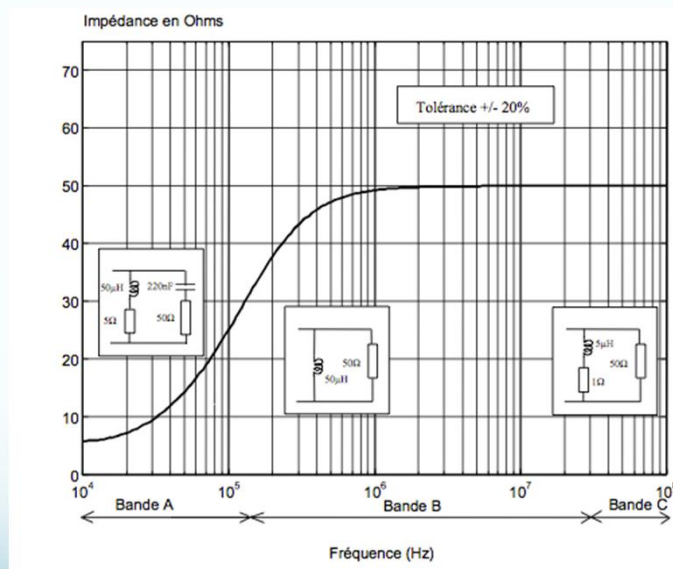
Les mesures doivent être effectuées en connectant l'appareil sous test à un RSIL (Réseau de Stabilisation d'Impédance de Ligne) pour les fréquences s'étendant de 150kHz à 30MHz ou en utilisant une pince absorbante pour les fréquences de 30MHz à 300MHz (pour certaines normes).



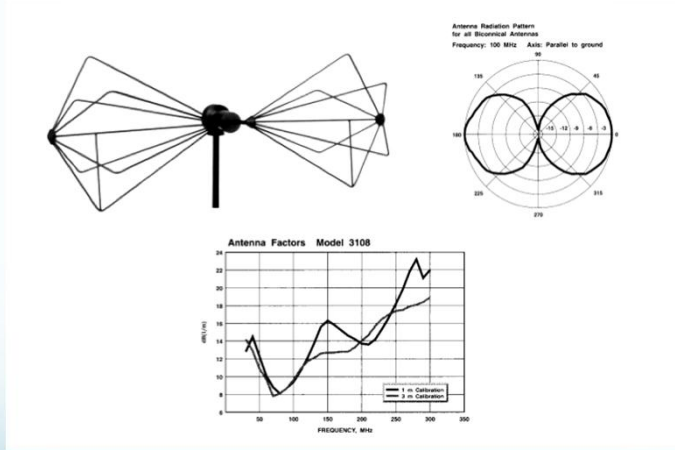
Le RSIL

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.

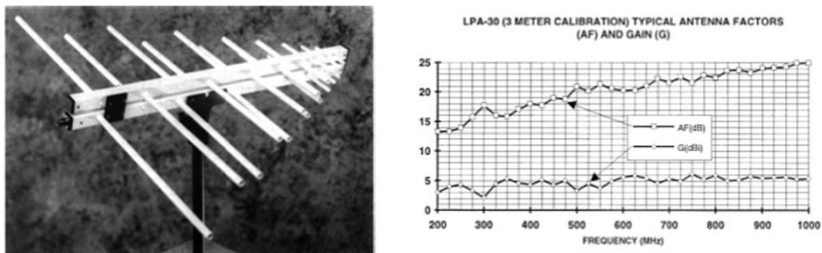


3.2. Mesure des Perturbations rayonnées : antennes



Antenne bi-conique et la courbe de facteur d'antenne

3.2. Mesure des Perturbations rayonnées : antennes



Antenne log-périodique

Partie 3 : bonus 2h

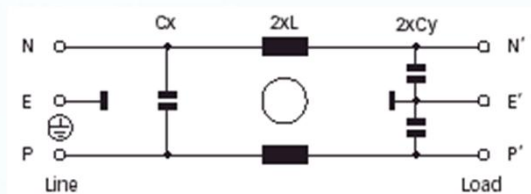
- **Notion de Filtrage**
 - Filtre passe bas
 - Origines caractéristiques des perturbations électriques
 - Notion de filtrage actif

Partie 3 : Bonus 2h

- **Notion de Filtrage**
 - **Filtre CEM : Filtre passe bas**
 - Origines caractéristiques des perturbations électriques
 - Notion de filtrage actif

Le secteur d'alimentation alternatif transporte additionally des tensions perturbatrices ayant des fréquences généralement élevées.

- Elles peuvent être efficacement éliminées par un filtre passe-bas interposé entre la prise secteur (N E P sur la fig. ci-dessous) et l'appareil à protéger (N' E' P' sur la fig. ci-dessous).



N,N'
E,E'
P,P'
Cx,Cy
L

Neutre
Masse
Phase
Condensateurs (Cx 47nF, Cy 3,3 nF)
Inductances (de 0,5mH à 3 mH) suivant le débit

Cours d'initiation à la Compatibilité Electromagnétique : Qualité d'énergie

115

Fonctionnement du filtre

Les inductances offrent au passage des courants alternatifs des impédances d'autant plus élevées que les fréquences de ces courants sont élevées. C'est l'inverse pour les condensateurs. Dès lors les composantes de fréquences élevées appliquées en entrée (N,P) sont court-circuitées par Cx. Elles sont considérablement freinées par les inductances L. Enfin court-circuitées à la masse par CyCy avant la sortie N' P.'

Aspect d'un filtre commercialisé en vue de protéger, à la construction, les équipements électriques.



Cours d'initiation à la Compatibilité Electromagnétique : Qualité d'énergie

116