

# Compatibilité Électromagnétique: CEM

Mohammed EL GHZAOUI

- 1. Introduction**
- 2. Historique**
- 3. Définitions**
- 4. Nature des perturbations**
- 5. Etudes des couplages**
- 6. protection contre les perturbations électromagnétiques**
- 7. Dispositifs de mesure des perturbations**
- 8. L'analyseur de spectre**
- 9. Normes de compatibilité électromagnétique**
- 10. Les protections électromagnétiques**
- 11. Quelques bonnes pratiques pour la conception de circuits imprimés**

# QU'EST-CE QUE CEM?

est une discipline qui assure que les appareils électroniques fonctionnent correctement dans un environnement donné et la proximité d'autres appareils.

# Objet de la CEM

- Prendre en compte les perturbations transmises par les appareils en fonctionnement pour assurer un fonctionnement correct de plusieurs appareils en même temps.

Cela implique deux choses :

- ✓ les perturbations électromagnétiques émises par l'appareil ne soient pas trop importantes
- ✓ les appareils puissent fonctionner de façon satisfaisante en présence de perturbations générées par d'autres appareils.

# **1. INTRODUCTION**

# 1. Introduction

Les deux concepts majeurs de la compatibilité électromagnétique du composant

Susceptibilité



Énergie électromagnétique  
venant de l'extérieur



Émission



Énergie électromagnétique  
émise  
(Pollution électromagnétique)

# Pourquoi CEM devient important pour les concepteurs des circuit imprimé

- Perturbations de plus en plus importantes liées à l'augmentation de la tension et de l'intensité
- Circuits à niveau d'énergie de plus en plus faible, donc de plus en plus sensibles
- Distances entre les circuits sensibles (souvent électroniques) et les circuits perturbateurs (souvent de puissance) qui se réduisent

- **Lors de la conception et de la réalisation d'un système:**
  - ◆ il faut éviter que le système développé produise trop de perturbation dans son environnement.
  - ◆ à l'intérieur de l'équipement une partie du système peut perturber d'autre plus sensible.



- **A cet effet la CEM revêt un triple aspect:**
  - ◆ Ne pas produire **d'interférence** dans un autre système
  - ◆ Ne pas subir **d'interférence** de l'environnement
  - ◆ Ne pas **interférer** avec lui-même

# 2. Historique

- Début des années 30 : début des communications radio
- Apparition des problèmes d'interférences radio (dus aux moteurs électriques etc.)
- 1933 : Création du **CISPR** (Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques) par la CEI (Commission électrotechnique internationale) qui développe des normes pour éviter les interférences.
- L'augmentation la plus significative des problèmes d'interférences est apparue avec l'invention des composants électroniques à haute densité
  - transistor bipolaire 1950,
  - le circuit intégré 1960, et
  - les puces à microprocesseur 1970

# 2. Historique

- Depuis 1996, aucun appareil ne peut théoriquement être commercialisé sans avoir subi de test de compatibilité électromagnétique (CEM).

# 3. Définitions

# 3. Définitions

## 3.1. Compatibilité Electro-Magnétique

« L'aptitude d'un dispositif, d'un appareil ou d'un système à fonctionner dans son environnement électromagnétique de façon satisfaisante et sans produire lui-même des perturbations électromagnétiques de nature à créer des troubles graves dans le fonctionnement des appareils ou des systèmes situés dans son environnement »

## 3.2. système électromagnétiquement compatible

Un système « électromagnétiquement compatible » respecte 3 critères :

- Il ne produit aucune interférence avec d'autres systèmes

- Il n'est pas susceptible aux émissions d'autres systèmes

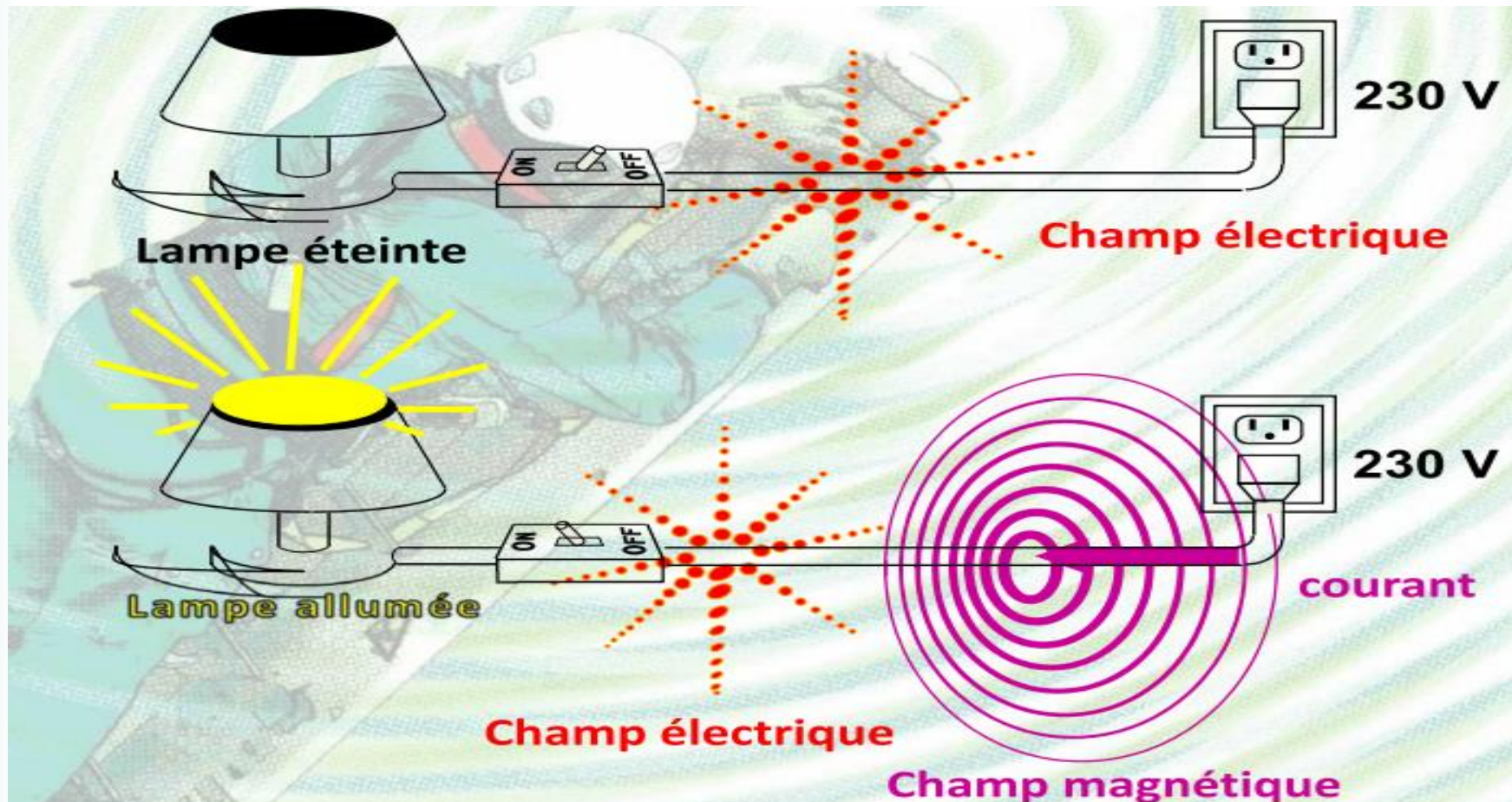
**les perturbations qu'il émet sont inférieures à une limite normalisée (limite d'émission)**

- Il ne produit aucune interférence avec lui-même.

**les perturbations qu'il supporte sont supérieures à une limite normalisée (limite d'immunité).**

### 3.3. champ électromagnétique

- **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  $v$ .
- **Le champ magnétique s'exprime en A/m.**
  - ◆ Son émission est engendré par un circuit basse impédance parcouru par un courant  $i$ .
- **L'impédance de l'onde électromagnétique :  $Z = E/H$**
- **La longueur d'onde:  $\lambda = c/f$  (en m) =  $3 \cdot 10^8 / f$  soit 1m pour  $f = 300\text{MHz}$ .**





### 3.3.1. Champs proches :

Pour **des distances à la source inférieures à  $\lambda / 2\pi$**  nous considérerons que nous sommes en **champs proches**.

- Dipôle électrique : E varie en  $1/r^3$  , H varie en  $1/r^2$  , Z varie alors en  $1/r$ .
- Dipôle magnétique : E varie en  $1/r^2$  , H en  $1/r^3$  , Z varie en  $r$ .

### ***3.3.2. Champs lointains :***

Pour **des distances à la source supérieures à  $\lambda / 2\pi$**  nous considérerons que nous sommes en **champs lointains**.

E et H décroissent en  $1/r$  ,  $Z=Cte=377\Omega$  (impédance du vide) Le champ électromagnétique a les caractéristiques d'une onde plane.

## **4. Nature des perturbations**

## 4. Nature des perturbations

Les variations rapides de courant électrique génère:

un champ magnétique

un champ électrique

onde radioélectrique qui se propage dans l'environnement soit par l'air, soit par les câbles reliés au circuit.

**Le circuit devient donc une source de rayonnement radioélectrique**

Les **perturbations électromagnétiques** se situent dans deux plages de fréquences bien distinctes:

- ◆ les perturbations basses fréquences BF dues aux harmoniques qui se propagent par les signaux électriques;
- ◆ les perturbations hautes fréquences HF dues aux rayonnements qui se propagent par les ondes radioélectriques

## 4.1. Acteurs de la CEM

Les acteurs qui mettent en évidence la CEM sont : Source, Couplage et Victime. Le schéma de la figure suivante donne la position de ces acteurs dans un processus d'étude de la CEM.



Acteurs de la CEM

## 4.1.1. sources de perturbation

Généralement, les interrupteurs de puissance sont les principaux acteurs de la génération de courants et de tensions parasites.

D'autres sources peuvent être considérer comme: les sources naturelle; les sources électrostatique, les sources technologiques .....

### 4.1.1.1. Les sources naturelles

- phénomènes atmosphériques dont la foudre au sens habituel du terme,
- l'effet des rayons ionisants,
- les impulsions électromagnétiques dues aux désintégrations nucléaires.



## **4.1.1.2. Les sources électrostatiques**

Elles se constituent en particulier lors de la friction de matériaux en mouvement ou du corps humain sur des matériaux textiles

## 4.1.2. Les canaux de couplage

Les **chemins ou canaux de couplage** sont multiples et de natures totalement différentes comme, par exemple, le vide ou simplement l'air, les isolants, la connectique constituée de circuits imprimés ou de câbles

Ceci introduit la notion des **mode de transmission** d'une perturbation électromagnétique de la source à un circuit victime.

Il existe deux modes de transmission des perturbations:

- ◆ **Perturbations conduites**
- ◆ **Perturbation rayonnées**

## 4.1.2.2. Les perturbations conduites

- **Les perturbations conduites** se développent dans les câbles ou conducteurs de liaisons aux réseaux, sources d'énergie ou charges.
- Elle provoque des différences de potentiels entre points distants.
- Les phénomènes perturbateurs sont dans ce cas les variations rapides de courant ou de tension (  $di/dt$ ;  $dv/dt$  ).

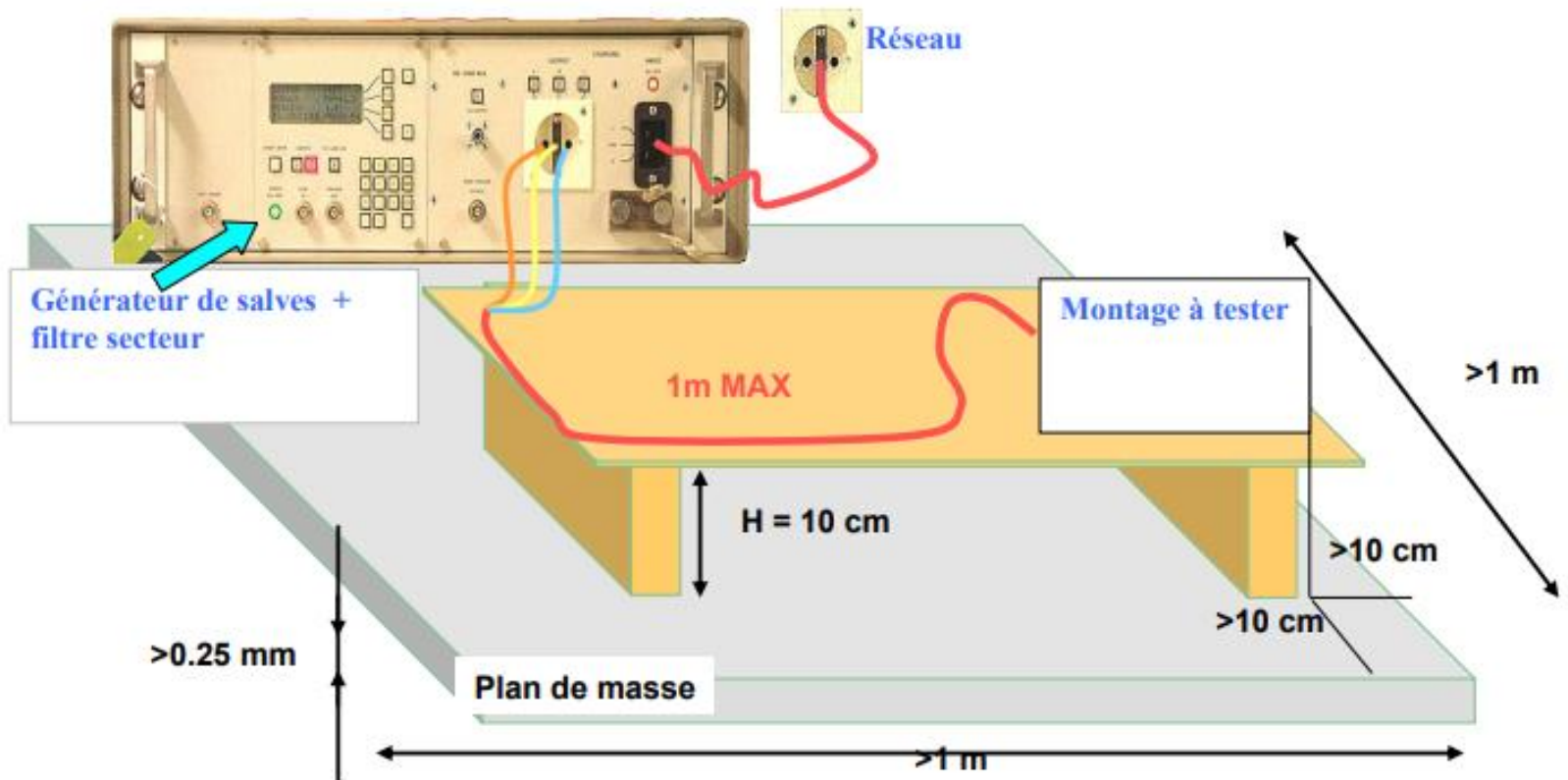
## Mesures des perturbations conduites

- 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.



Photo d'un RSIL

- Banc de mesure :



La Figure suivante compare la mesure des différentes harmoniques du courant mesuré avec un gabarit correspondant à une norme donnée.

- Dans le cas de la Figure à gauche, la norme de CEM est respectée
- Dans le cas de la figure à droite, la norme de CEM n'est pas respectée puisque certaines harmoniques dépassent le gabarit.

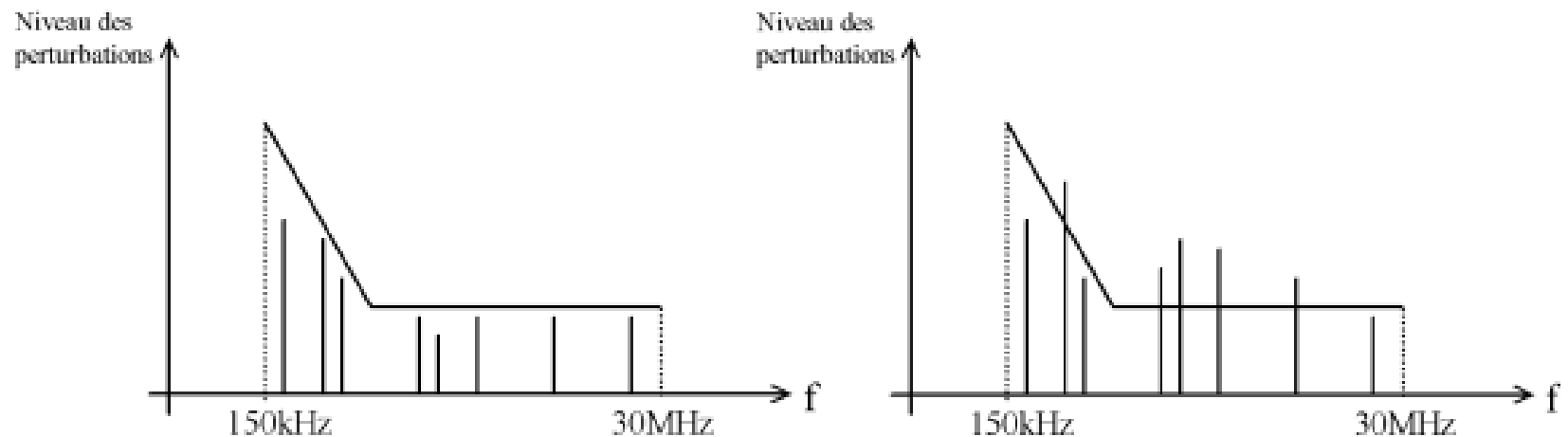


Figure 5 : gabarit de mesures des perturbations conduites

## 4.1.2.2. Les 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**.

## Mesures des perturbations rayonnées ; Antennes

Les antennes sont employées pour les mesures en champs proches (c'est à dire pour une distance  $d < \lambda/2\pi$  ou lointain  $d > \lambda/2\pi$  ( $\lambda$  est la longueur d'onde du signal perturbateur).

Dans le cas de mesures en champs proches , on considère que les ondes sont planes, puisque l'impédance d'onde définie par le rapport  $E/H$  est constante et vaut  $377\Omega$ .

**Il suffit donc de mesurer une des deux composantes du champ électromagnétique.**



## caractéristiques des antennes pour mesurer les perturbations rayonnées

Les antennes pour les mesures en champ lointain sont caractérisées par :

- le diagramme de rayonnement : c'est la mesure de l'intensité du champ E émis en fonction de deux angles définissant les coordonnées sphériques de l'espace.
- $G$  = densité de puissance maximale rayonnée dans une direction spécifique/densité de puissance maximale rayonnées de façon uniforme dans toutes les directions de l'espace
- le facteur d'antenne  $F_a$ . exprimé en dB :  $F_a = 20 \cdot \text{Log}E/U$  .

## Conditions nécessaire pour mesurer pour les perturbations rayonnées

Le **fonctionnement de l'appareil** doit être satisfaisant lorsque:

- ◆ il est soumis à un champs électromagnétique perturbateur
- ◆ ses émissions de champs électromagnétiques vers l'extérieur ne doivent pas être trop importantes.

Les mesures de perturbations rayonnées nécessitent un **gros appareillage** tel que:

- ◆ Une Chambre anéchoïde (chambre de mesures des perturbations radioélectriques),
- ◆ des antennes de différentes formes pour couvrir un spectre en fréquences suffisamment large
- ◆ des amplificateurs pouvant couvrir la bande de fréquences de 30 MHz à 10 GHz.

## exemple d'antennes pour mesurer les perturbations rayonnées

Pour mesurer les émissions des appareils en test, on utilise des antennes placées à 3 ou 10 mètres de l'appareil à tester. Le signal sortant de l'antenne est analysé avec un analyseur de spectre.

Bande A (10kHz-150kHz),

L'antenne est de type boucle dans un cadre blindé électriquement



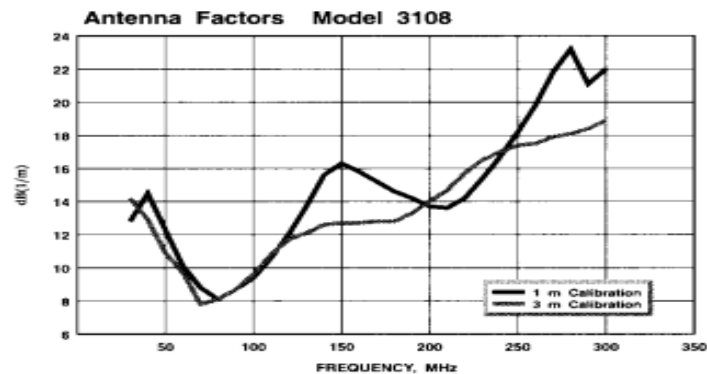
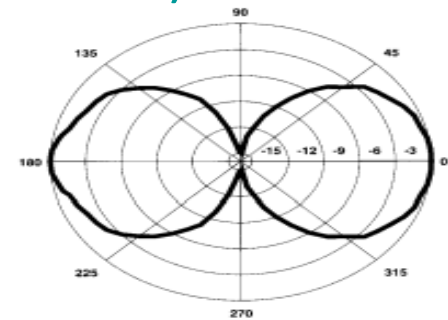
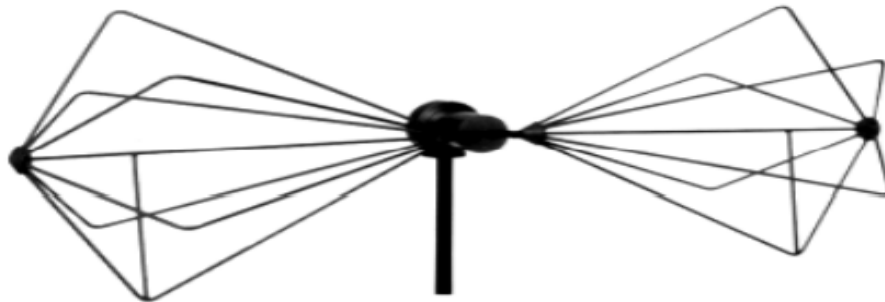
Bande B (150kHz-30MHz),

champ H : on utilise le même dispositif qu'en bande A

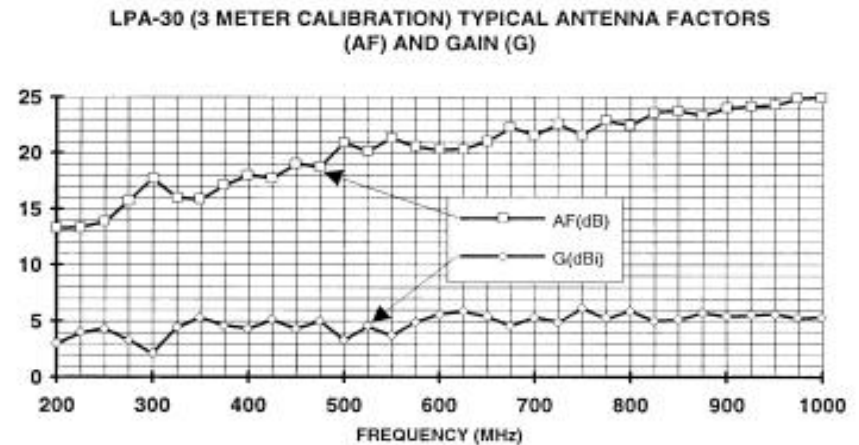
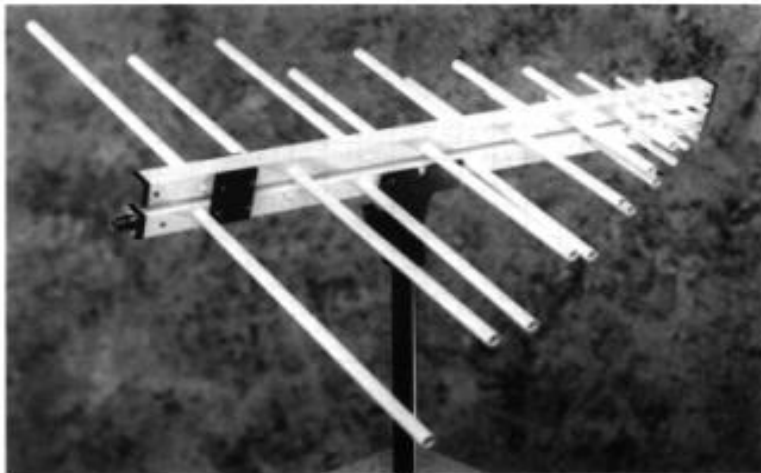
Champ E : on utilise une antenne fouet verticale de 1m pour une distance de mesure  $d < 10\text{m}$

## Bande C (30-300MHz),

champ E : on utilise un doublet équilibré de longueur  $\lambda/2$  pour  $F=80\text{MHz}$  ( $\lambda$  correspondant à  $F=80\text{MHz}$  soit  $3.75\text{m}$ ).



Bande D (300MHz-1000MHz) : l'antenne doit être polarisée dans un plan. On utilise des antennes plus complexes que le doublet. Par exemple l'antenne log-périodique, constituée d'éléments couplés dont les fréquences d'accord sont en progression géométrique, ce qui lui confère une bande passante large.



### 4.1.3. La victime :

Elle est caractérisée par son degré de susceptibilité. La confrontation à des perturbations (les décharges électrostatiques, la foudre...etc.) d'un système peut engendrer des conséquences telles que :

- La destruction d'un composant (en fabrication, en utilisation ou en maintenance),
- Des dysfonctionnements (« plantages », pertes de données),

## 4.3. L'instauration d'une réglementation

- . Les normes peuvent se considérer suivant deux groupes :
  - ◆ le premier définit le niveau d'émission conduite et rayonnée
  - ◆ le second traite des niveaux de susceptibilité des équipements.



## 9.2.1. Au niveau international

Le CISPR (Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques) est chargé de définir les normes internationales liées à la CEM.

Le CISPR fait partie de la CEI (Commission Electrotechnique Internationale), qui s'occupe :

- ◆ des normes liées à l'électricité et à l'électronique.

## 9.2.2. Au niveau européen

Le CENELEC (Comité Européen de Normalisation Electrotechnique) qui définit les directives et normes.

Une des principales directives du CENELEC est la directive 89/336/CEE qui spécifie que tout équipement électrique doit obligatoirement être conforme en matière de CEM pour être commercialisé dans les pays de la CEE.

Les produits conformes portent le label CE. Cette directive a été appliquée obligatoirement par les états membres à partir de 1996

## 9.3. Catégories des normes

Dans la quantité des normes existantes, il convient de distinguer deux catégories :

- ◆ Les normes de base ou générique qui donnent les limites et les méthodes de base applicable de manière générale à tous les équipements
- ◆ Les normes spécifiques à une catégorie de produit

## 9.3.1. Les normes générique

Il y'a quatre normes génériques

- Normes relative à l'immunité
    - ◆ **EN 61000-6-1** immunité pour les zones résidentielles, commerciales et d'industrie légère.
    - ◆ **EN 6100-6-2** immunité pour les zones industrielles
  
  - ◆ Normes relative à l'immunité
    - ☞ **EN 61000-6-3** émission pour les zones résidentielle, commerciales et d'industrie légère
    - ☞ **EN 6100-6-4** émission pour les zones industrielle
- EN : Normalisation Electromagnétique

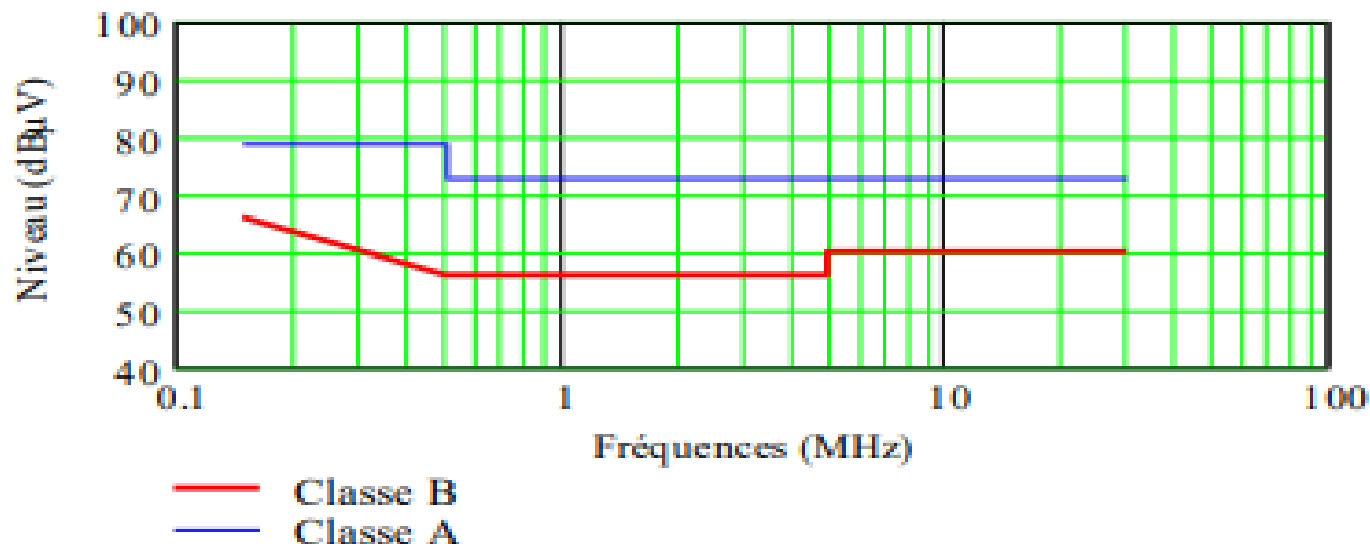
## 9.3.2. Les normes spécifiques à une catégorie de produit

Principales normes d'émissions qui peuvent concerner les convertisseurs statiques sont données dans le tableau suivant:

	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

La **Classe A**, définit le niveau d'émission pour des appareils destinés au secteur industriel

La **Classe B**, est réservée au secteur domestique et hospitalier.



Exemple de gabarits normatifs issu des spécifications de la norme CISPR 16

Fréquences (MHz)	Classe A (dBµV)	Classe B (dBµV)
0,15 - 0,5	79	66 - 56
0,5 - 5	73	56
5 - 30	73	60

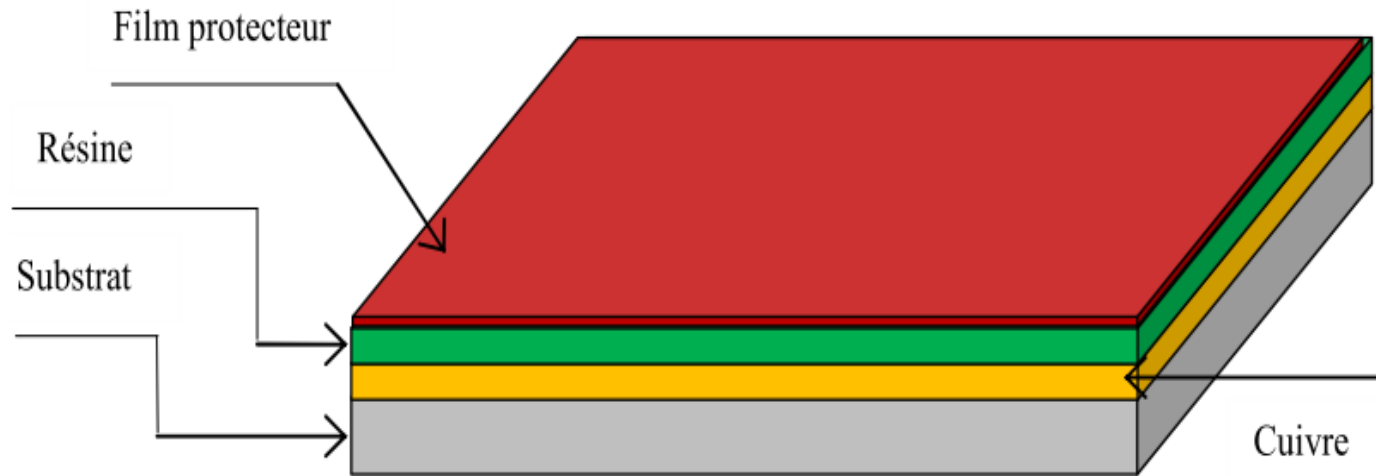
Valeurs limites des gabarits pour les classes A et B (CISPR 16)

# Les différentes technologies de PCB

- Les cartes peuvent disposer ou non d'un plan de masse. Elles peuvent aussi présenter plusieurs plans métalliques, elles sont alors désignées comme étant des cartes multicouches. Les diélectriques employés pour supporter les pistes ont une constante diélectrique généralement comprise entre 2,2 et 9,7. Le matériau le plus couramment utilisé est le FR-4.

# Composition et technologies des Circuits imprimés

- Le circuit imprimé, est composé d'un support isolant sur lequel des conducteurs en cuivre qu'on appelle « pistes » assurent la quasi-totalité des connexions entre les composants.





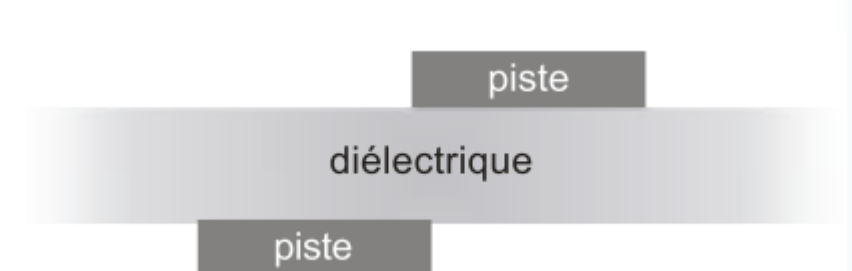
## ■ Cartes sans plan de masse

- ◆ Ces cartes sont intéressantes d'un point de vue économique. Par contre, leur utilisation aux hautes fréquences reste délicate.
- ◆ ces cartes sont difficiles à modéliser car le conducteur de masse est constitué par une autre piste et éventuellement par les aplats de cuivre. Ces derniers servent à réduire le couplage.

*Carte simple couche, simple face*



*Carte simple couche, double face*



## ■ Carte avec plan de masse

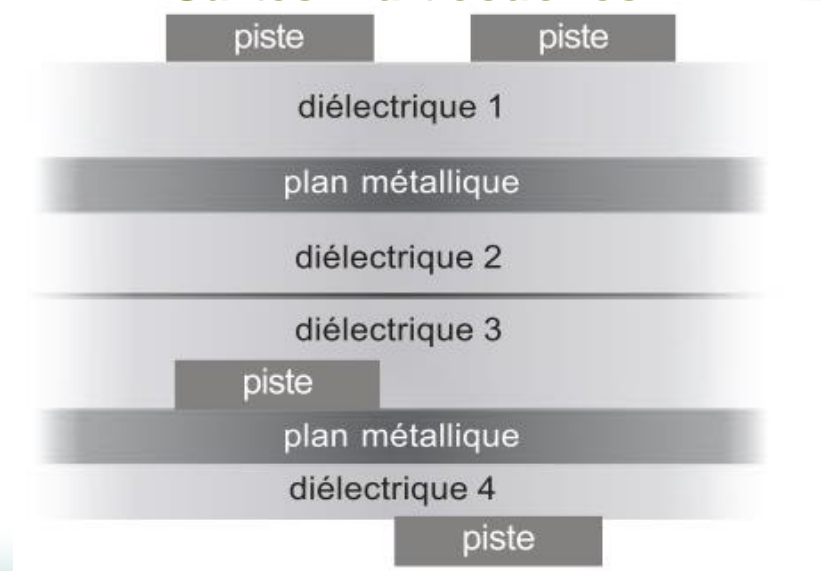
Ce type de carte est mieux adapté à une utilisation aux hautes fréquences que les cartes sans plan de masse.

Ces cartes sont beaucoup plus faciles à modéliser tant qu'elles ne présentent qu'une seule couche,

### *Carte simple couche*



### *Cartes multicouches*



## Du schéma au montage réel

- La première chose dont il faut avoir conscience, c'est que le schéma ne nous donne qu'une vue idéalisée et incomplète du circuit réel :
  - ◆ parce que les lignes tracées entre les éléments représentent des conducteurs supposés parfaits, donc d'impédance nulle, sont assimilées à des équipotentielles ;
  - ◆ parce que seuls les éléments représentés sur le schéma par leur symbole sont sensés être le siège d'un phénomène électrique ;
  - ◆ parce que le schéma électrique ne concerne souvent qu'une partie d'un équipement, et ignore par conséquent la présence des éléments électriquement actifs dans l'environnement du montage.

# Règles de conception

- la prise en compte de la CEM dans l'industrie pose un problème de productivité. C'est pourquoi les scientifiques ont dégagés quelques règles élémentaires. Voici quelques-unes:
  - ◆ L'augmentation de l'espacement entre les pistes **diminue le couplage**.
  - ◆ La diminution de la hauteur des pistes par rapport au plan de masse **diminue le couplage**.
  - ◆ L'augmentation de l'impédance de la victime entraîne une **augmentation du couplage**.
  - ◆ La diminution de l'impédance de la source entraîne une **augmentation du couplage**.
  - ◆ Les blindages et les pistes écrans reliés à la masse permettent de **diminuer le couplage**.
  - ◆ Le partage entre circuits de conducteurs communs (principalement les masses) **augmente le couplage**.

# Les paramètres à prendre en compte

## *Câbles*

Les câbles de transmission sont de natures différentes suivant leur utilisation et les environnements naturels et électromagnétiques dans lesquels ils évoluent. Du point de vue de la CEM, les câbles sont répertoriés suivant deux catégories:

- ◆ **Les câbles blindés, multifilaires ou coaxiaux**
- ◆ **Les câbles non blindés**

### 10.3.1.1. Les câbles blindés, multifilaires ou coaxiaux

- ces câbles ne sont pas blindés de la même manière. Ainsi, suivant l'application à laquelle ils sont destinés, leurs blindages peuvent être les suivants :
  - ◆ Blindage semi-rigide: d'impédance 50 Ohm, ce câble coaxial d'excellente qualité sert notamment pour des applications de métrologie hautes fréquences. Ce assure une immunité élevée aux perturbations électromagnétiques.
  - ◆ Blindage simple tresse : le blindage est ici constitué par un ensemble de fils métalliques entrelacés pour former une tresse autour du câble. Cette tresse permet de recouvrir le câble de 80 à 95%. Ce type de blindage présente des aptitudes correctes pour une utilisation aux hautes fréquences.

## 10.3.1.2. Les câbles non blindés

- ces câbles servent essentiellement au transport des données basses fréquences.
- Ils sont aussi utilisés pour des applications domestiques, pour le transport de l'énergie électrique basse et moyenne tension, ainsi que pour la téléphonie fixe.
- Certains de ces câbles sont multifilaires et servent, par exemple, à la communication des réseaux locaux à 100 Mbps.
- Son principal avantage est de présenter un coût très faible.

# **5. Etudes des couplages**

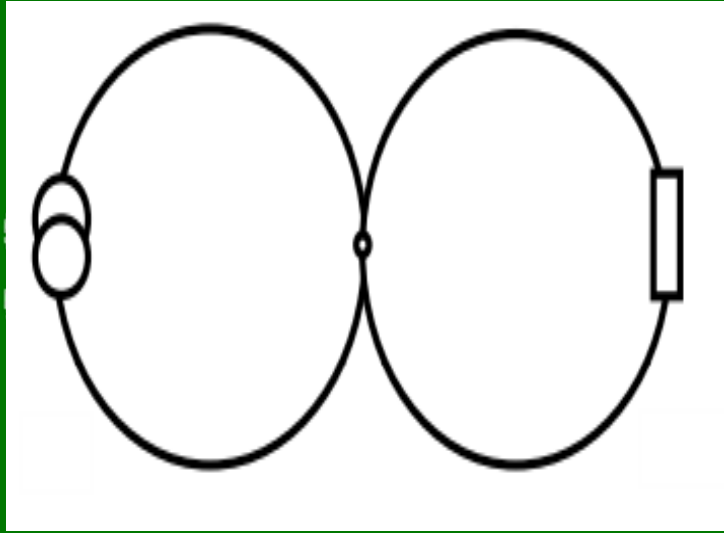


## 5.1. Types de couplages

Il existe 3 types de couplages principaux susceptibles de transmettre des perturbations :

- le couplage par **impédance commune** dans le cas d'une **perturbation conduite**
- le couplage capacitif du au champ électrique dans le cas de capacité parasite (**perturbation rayonnée**)
- le couplage inductif ou magnétique du au champ magnétique résultant d'une variation de courant (**perturbation rayonnée**)

## COUPLAGE PAR IMPEDANCE COMMUNE



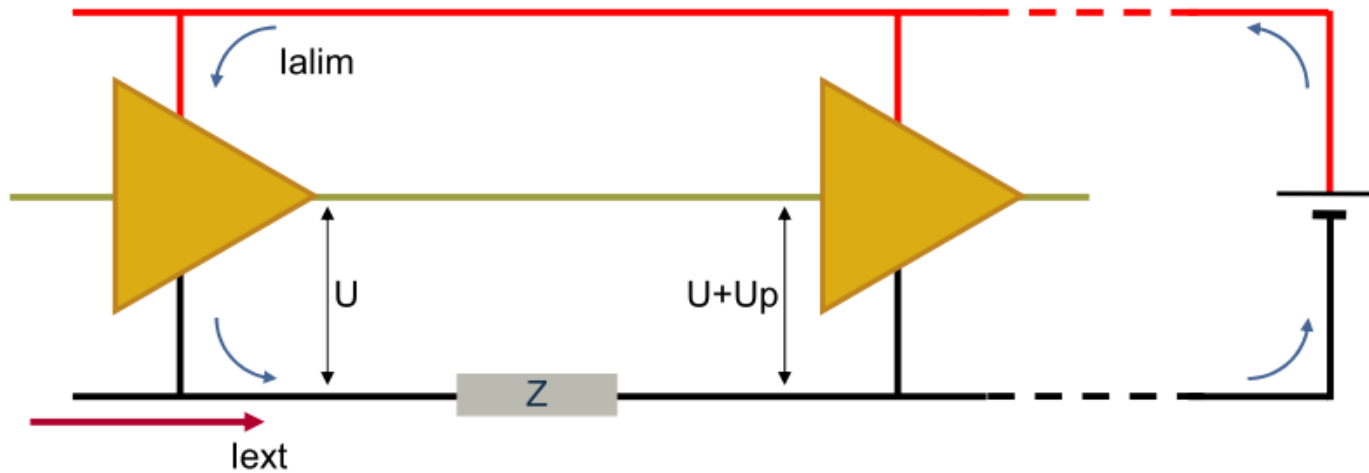
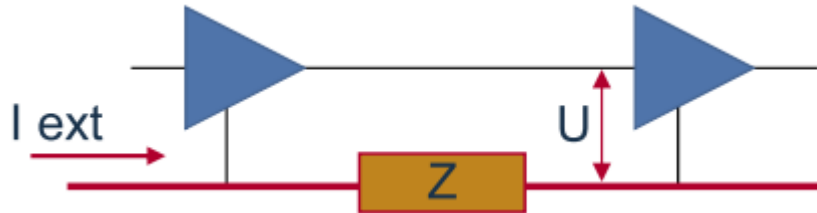
Un couplage par impédance commune se produit lorsque deux mailles ont en commun un tronçon dont l'impédance ne peut être considérée comme négligeable

➔ Le courant circulant dans la maille M1 provoque une différence de potentiel dans la maille M2

### Remèdes

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

## COUPLAGE PAR IMPEDANCE COMMUNE



$$U_p = Z \cdot (I_{ext} + I_{lim})$$

## COUPLAGE PAR IMPEDANCE COMMUNE

### Rappel

La résistance électrique d'un conducteur cylindrique de longueur  $l$  et de section  $S$ ,  $R = 17 \times l / S$ , la résistance d'un d'une piste est  $R = 0.5 \times l / D$

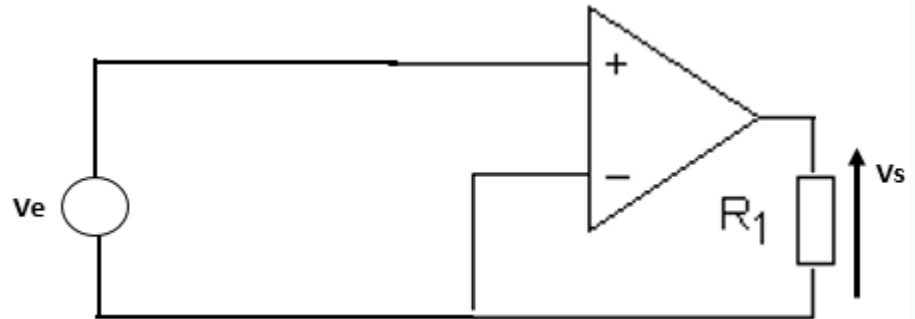
L'inductance  $L$  d'un conducteur est donnée par:  **$L=1 \text{ uH/m}$**

La tension à la sortie d'un PA est donné par:  $V_s=Av.V_e$

## COUPLAGE PAR IMPEDANCE COMMUNE

### Exemple

Considérant un circuit représenté par la figure suivante. Données :  $V_e=2\text{mV}$ ,  
Le facteur de l'AP est  $A_v=50$ ,  $R_1=40\text{ M}\Omega$ .



- 1- Calculer la tension  $V_s$  (sans prendre en compte l'effet de la perturbation)
- 2- Déterminer l'expression de  $V_s$  prenant compte l'effet de la CEM
  - 2.1. Calculer la résistance puis l'inductance d'un conducteur cylindrique de rayon  $0.5\text{cm}$ , et de longueur  $10\text{cm}$
  - 2.2. Retrouver la tension à la sortie de l'AP, sachant que la fréquence d'opération est de  $1\text{ MHz}$ , puis  $100\text{MHz}$ ,  $200\text{MHz}$ .
  - 2.3. Conclure



## COUPLAGE PAR IMPEDANCE COMMUNE

### Exemple de perturbation d'un capteur en basse fréquence

Considérant le schéma du circuit suivant. Le capteur délivre  $1\text{V}/(1000\text{tr}/\text{min})$ .

La tension du sortie de l'AP est  $10\text{V}$  à  $2000\text{tr}/\text{min}$

1-calculer la valeur du rapport  $R2/R1$ .

La source de tension est de  $120\text{V}$ , le moteur impose un courant de  $8\text{A}$  et que le capteur délivre  $800\text{tr}/\text{min}$ .

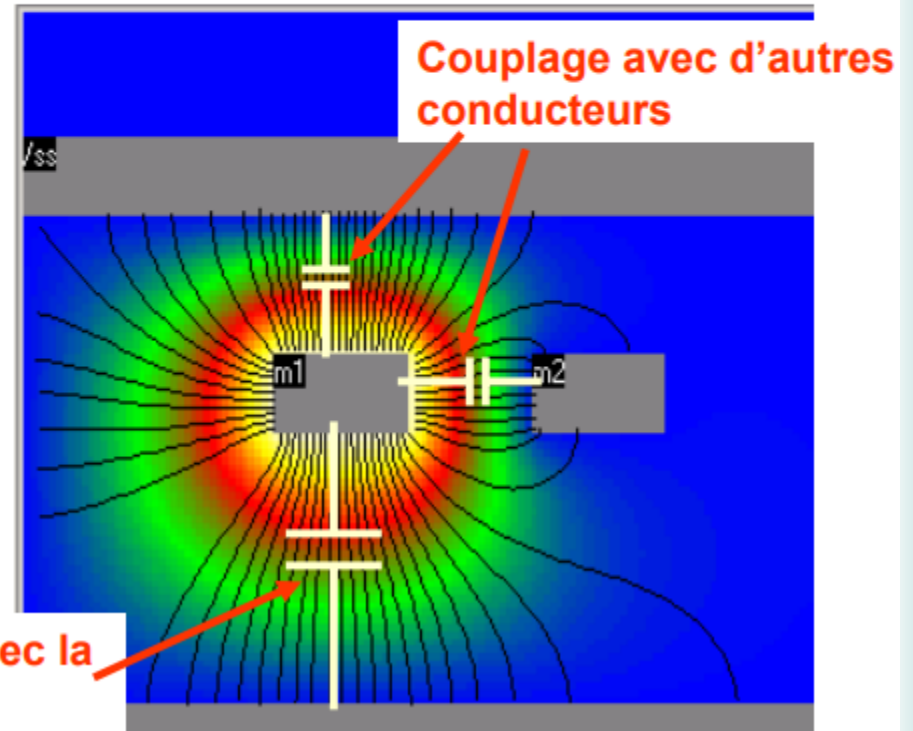
2.Quelle est la tension  $V+$  délivrée par le capteur? En déduire  $V_s$ ?

3. Si on prend en compte l'est de CEM (le fil de masse se comporte comme une résistance de  $0.05\text{ohm}$ ), retrouver la tension  $V+$ , en déduire  $V_s$ ?

## Couplage capacitif

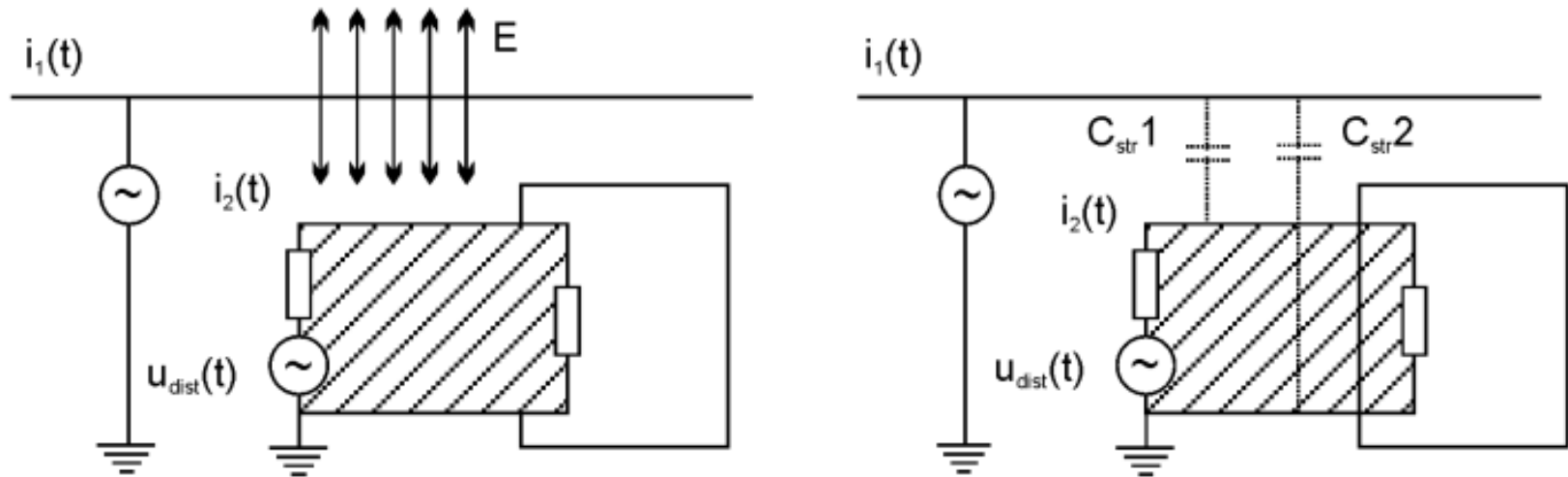
Il existe toujours une capacité non nulle entre deux éléments conducteurs. Toute différence de potentiel entre ces deux éléments va générer la circulation d'un courant électrique au travers de cette capacité parasite. Ce courant parasite sera d'autant plus élevé que la tension et la fréquence de ce courant sont élevées.

Couplage avec la masse





## Couplage capacitif



Le couplage capacitif devient important si :

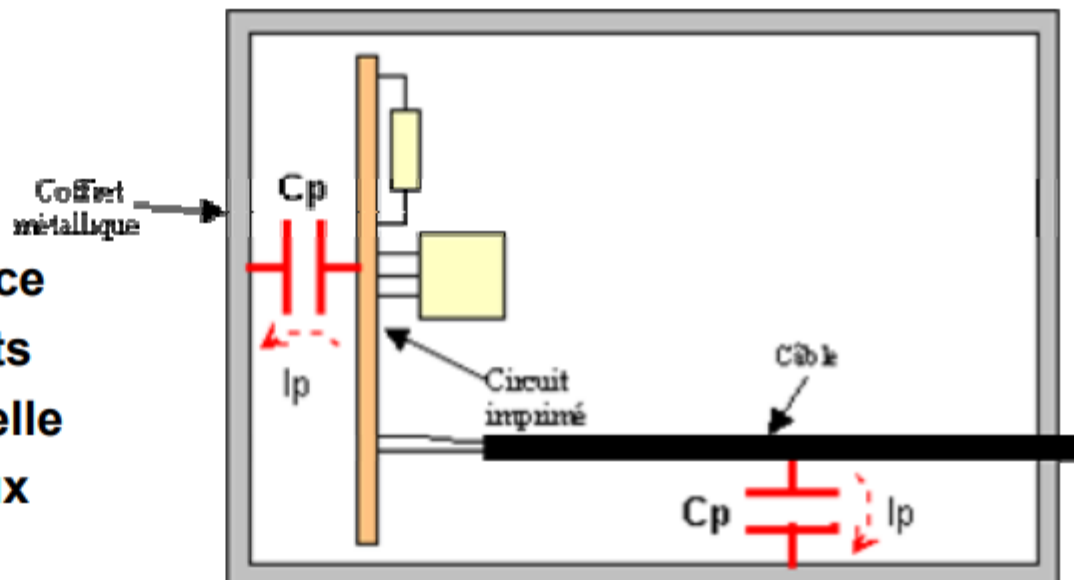
- les deux circuits sont proches l'un de l'autre
- la différence de tension des deux circuits est grande
- les signaux dans le circuit externe varient rapidement dans le temps et possèdent donc une grande contenu fréquentiel.

## Couplage capacitif

La valeur de la capacité parasite  $C_p$  sera :

proportionnelle à la surface  $S$  en regard des deux circuits  
inversement proportionnelle à la distance  $h$  entre les deux circuits.

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



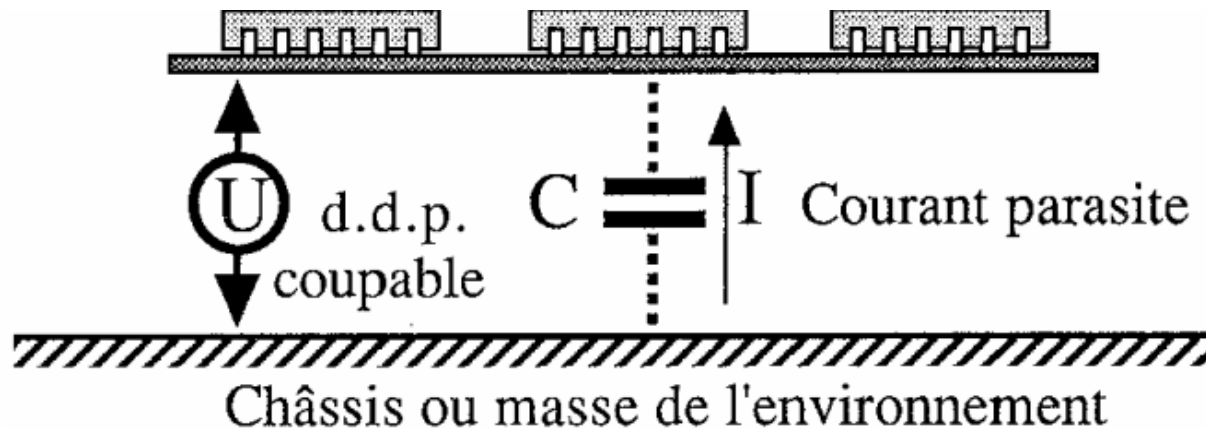
Si ces capacités parasites sont négligeables en 50 Hz, elles ont une importance considérable en HF où elles sont à l'origine de dysfonctionnements

## Couplage capacitif

### Exemple de couplage capacitif

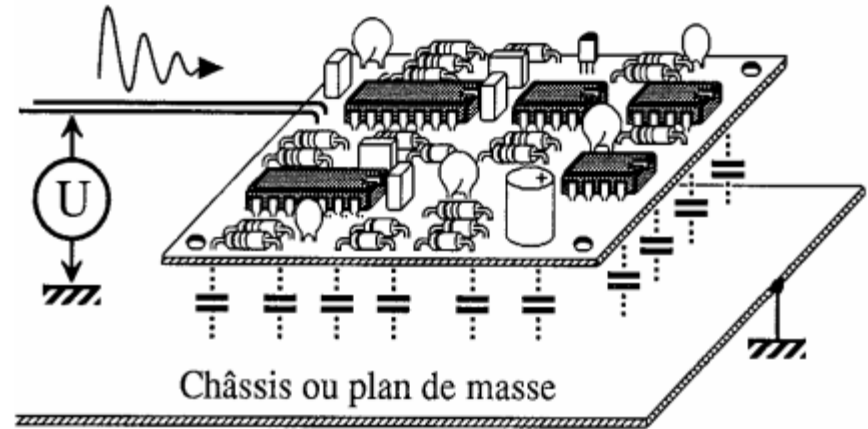
#### couplage par "carte à châssis"

il existe toujours un condensateur entre deux ensembles :  
Si  $\exists$  une variation de potentiel, il y a injection de courant de l'un sur l'autre.



## Couplage capacitif

- une perturbation arrive,
  - elle se boucle par les chemins de basse impédance,
    - la carte,
    - d'autres câbles,
  - le 0V ne va pas être stable,
  - les composants sensibles même au cœur de la carte risque d'être perturbés
  - la capacité intrinsèque de la carte
    - $C_i(\text{pF}) = 35D$  ( $D$ =diagonale de la carte(m)), carte loin des masses,
  - la capacité plane de la carte
    - $C_p(\text{pF}) = 9S/h$  ( $S$ , surface de la carte ( $\text{m}^2$ ),  $h$ , hauteur de la carte (m)), carte proche d'une masse.



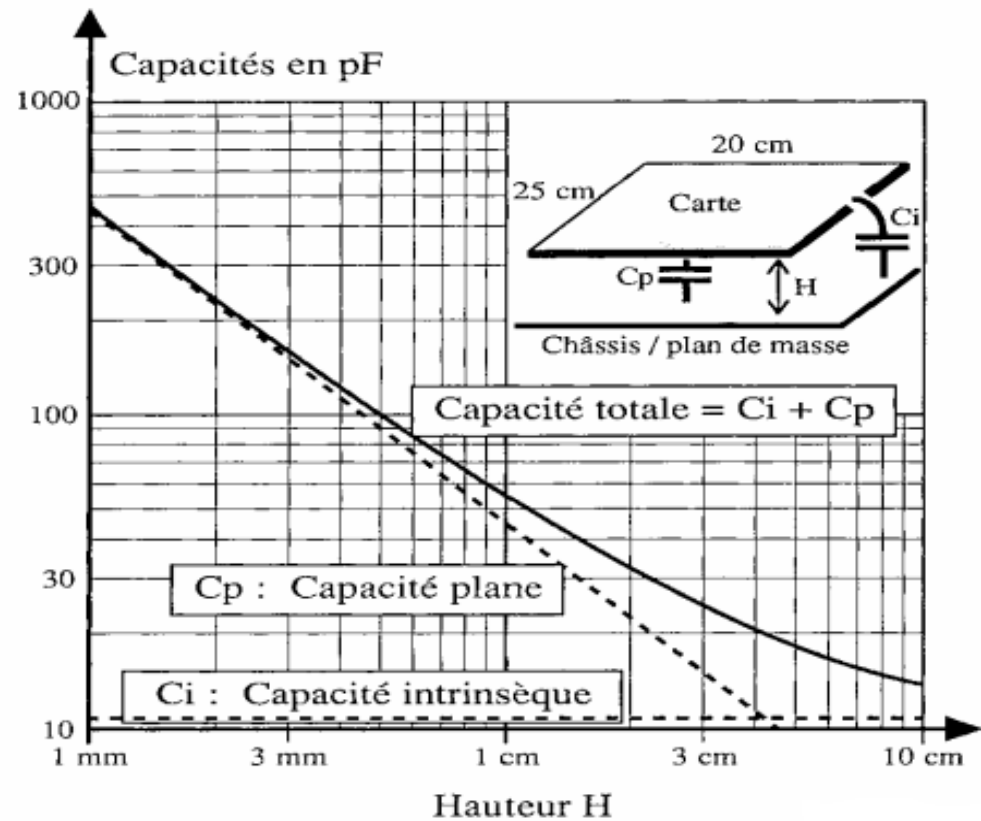
Origine: A. Charoy AEMC

$$C_t = C_i + C_p$$

Le courant se calcule avec les formules habituelles

## Couplage capacitif

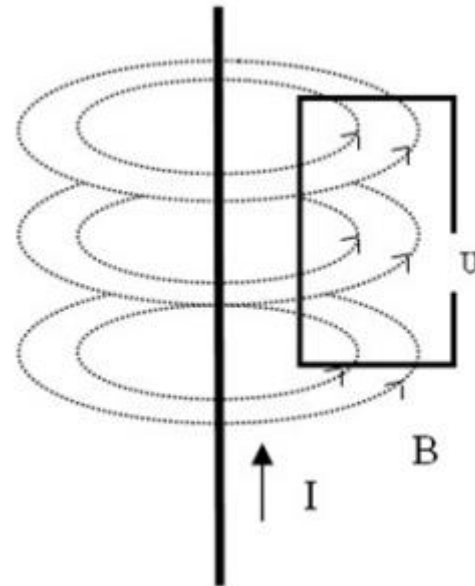
- Exemple :
  - $C_i$  et  $C_p$
  - pour une carte de 25X20
  - Si  $h \nearrow$ ,  $C_t$  tend vers  $C_i$
- on voit que l'on a intérêt à éloigner la carte de la masse, ou, si possible relier le 0V au châssis



$$C_{\text{totale}} \approx C_{\text{plane}} + C_{\text{intrinsèque}}$$
$$C_{\text{plane}} \text{ (pF)} \approx 9 \cdot S / H$$
$$C_{\text{intrinsèque}} \text{ (pF)} \approx 35 \cdot D$$

## 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.

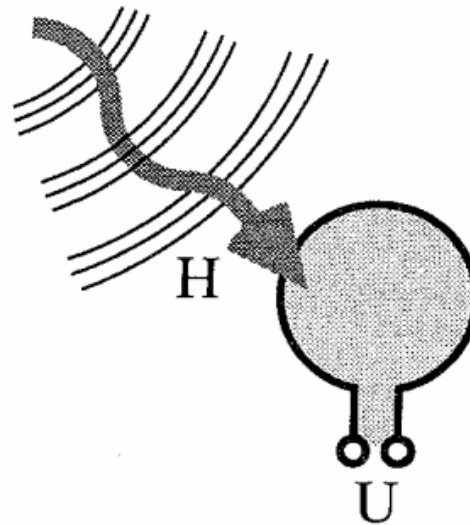


## Couplage inductif

Exemple de couplage inductif

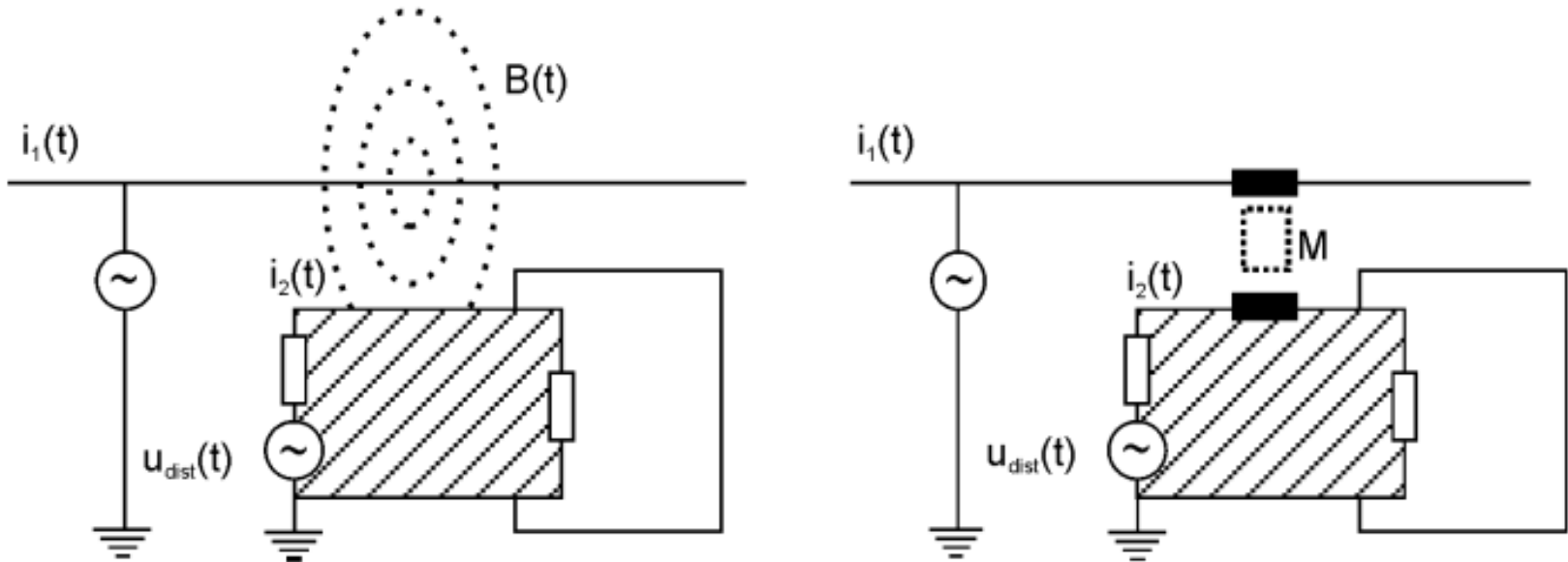
**couplage par champ à boucle**

Si  $H$  variable traverse une boucle il y a un flux variable, ce qui crée une ddp



## Couplage inductif

### Couplage inductive champ à boucle



La force du couplage dépend principalement de trois paramètres :

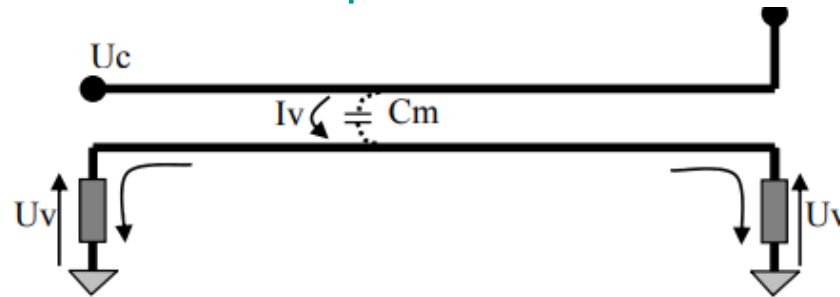
- la force du courant perturbateur
- la distance source et drain
- la fréquence du champ perturbateur.



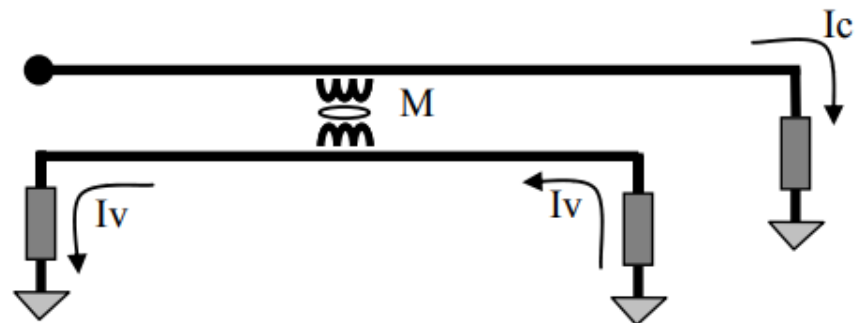
## Couplage par diaphonie

La diaphonie est un couplage de proximité. Une perturbation sur un conducteur va injecter un signal perturbateur sur le conducteur voisin. Ce couplage peut avoir deux origines :

- Lorsqu'un conducteur est soumis à une d.d.p., la capacité mutuelle (notée  $C_m$ ) injecte un courant perturbateur sur le conducteur voisin.

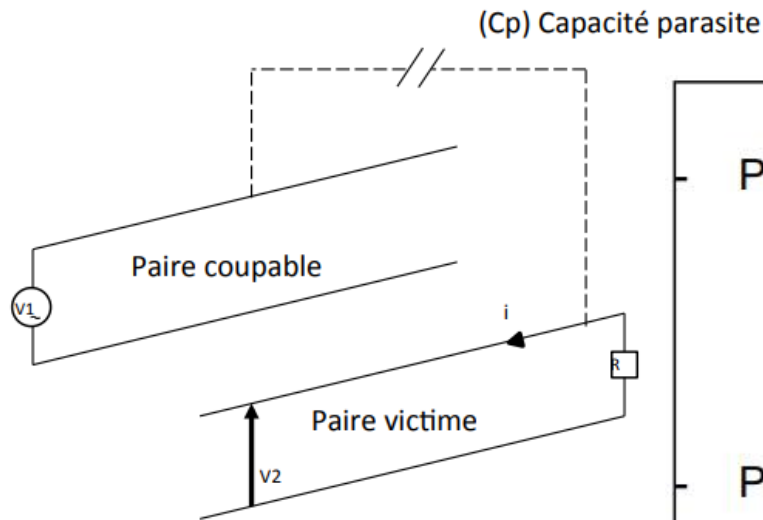


- Lorsqu'un courant circule dans un conducteur, il génère un champ magnétique qui se couple dans la boucle formée par le conducteur voisin par rapport à la masse.



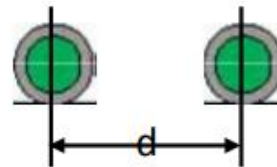
# Couplage par diaphonie

## Exemple de couplage capacitif entre deux paire



### Diminuer la capacité de couplage

Par l'éloignement des conducteurs entre eux



$d =$  quelques centimètres

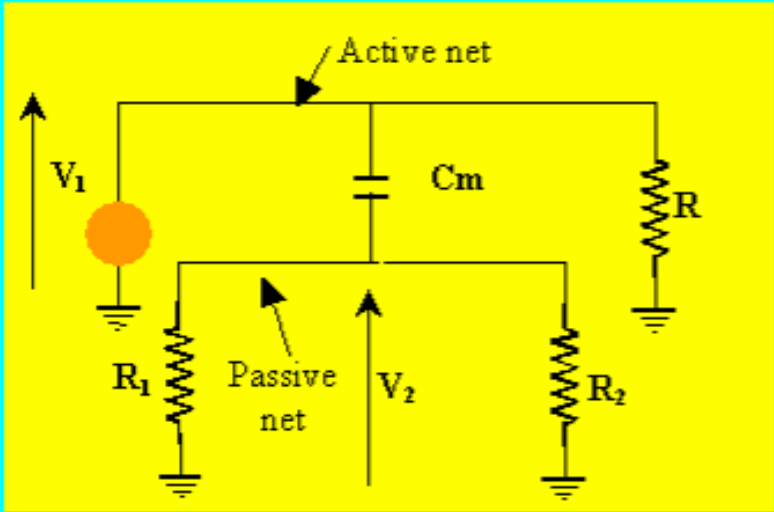
Par utilisation de blindages



Les conducteurs peuvent être jointifs

Le blindage (écran) est relié à la masse

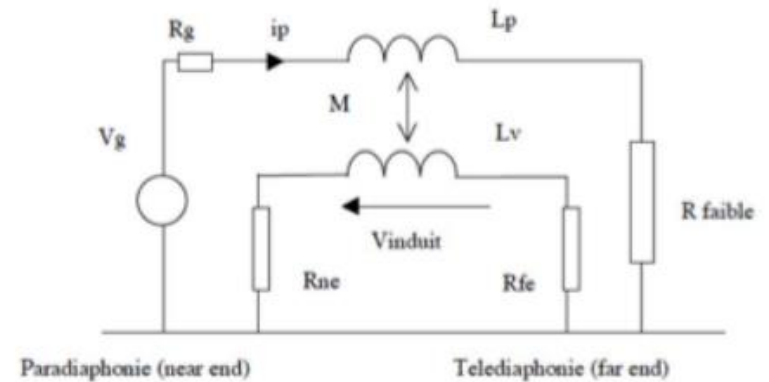
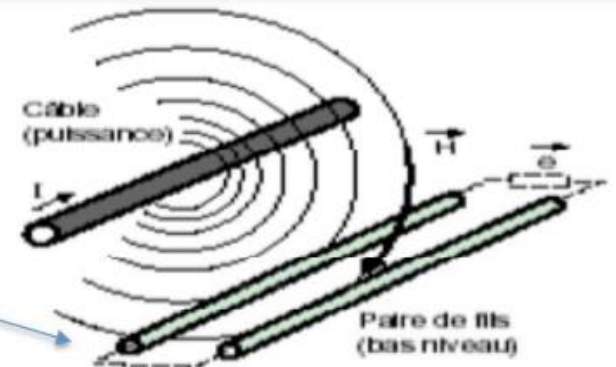
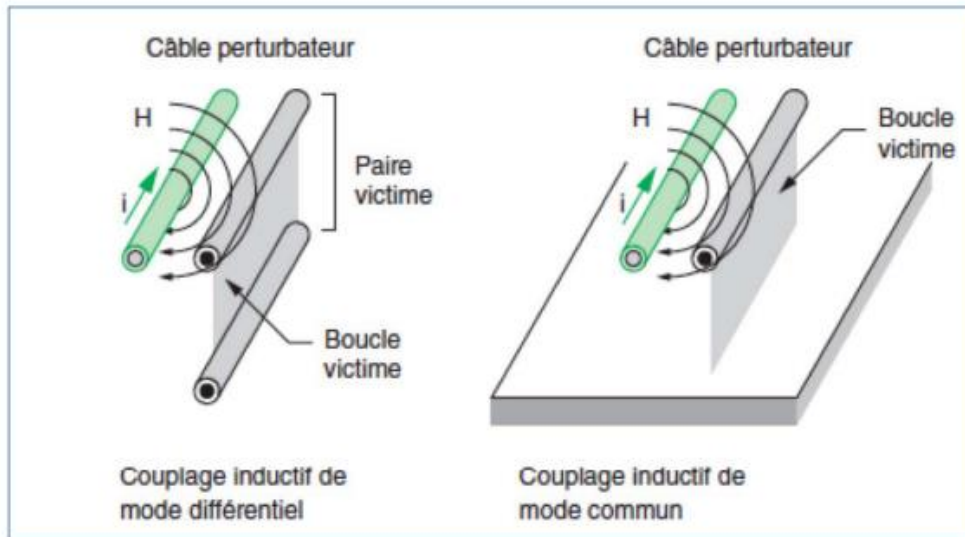
# Couplage par diaphonie

Schematic representation	Induced voltage on the passive net
 <p>The diagram shows two electrical networks. The 'Active net' (top) contains a voltage source <math>V_1</math> in series with a resistor <math>R</math>. The 'Passive net' (bottom) contains two resistors <math>R_1</math> and <math>R_2</math> connected in parallel. A coupling capacitor <math>C_m</math> is connected between the node between <math>V_1</math> and <math>R</math> and the node between <math>R_1</math> and <math>R_2</math>. The voltage <math>V_2</math> is measured across <math>R_2</math>.</p>	$V_2 = V_1 \frac{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}{\sqrt{\left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}\right)^2 + \frac{1}{\omega^2 C_m^2}}}$ <p>with <math>T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} C_m</math>, we have <math>V_2 = V_1 \frac{T \omega}{\sqrt{1 + T^2 \omega^2}}</math></p>
<p>If the coupling capacitance is low, that is if <math>T \ll \frac{1}{\omega}</math> then, <math>V_2 \cong V_1 T \omega</math></p> <p>When resistors <math>R_1</math> and <math>R_2</math> are large or if <math>T \gg \frac{1}{\omega}</math> then <math>V_2 \cong V_1</math></p> <p><b><u>High impedance circuits are greatly disturbed by capacitive coupling.</u></b></p>	

# Exemple de couplage par diaphonie inductive

C'est le cas de figure de deux fils proches, :

- un coupable, parcouru par un fort  $di/dt$ ,
- une victime subissant la tension  $M \cdot di/dt$



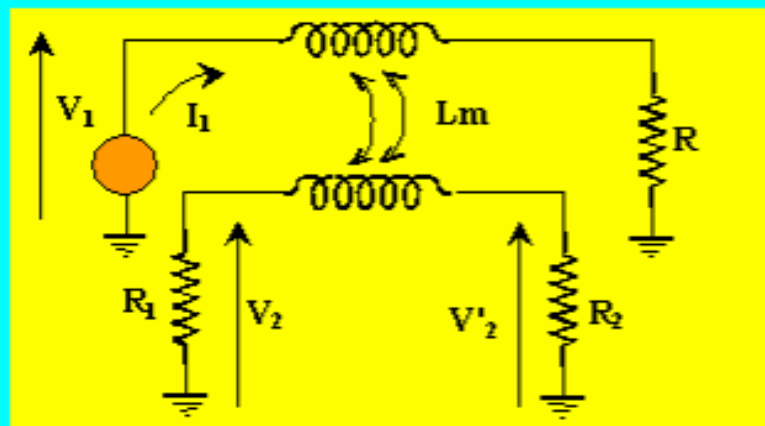
## Solution:

- Utiliser des câbles blindés, le blindage étant relié à la masse.
- Si possible éviter les câbles //, notamment paire torsadée non blindée
- Avoir des de câble séparés ou utiliser des séparateur métalliques

## Exemple de couplage par diaphonie inductive

Le courant passant dans le circuit (1) crée un champ magnétique qui induit des ddp  $V_2$  et  $V'_2$  dans le circuit (2)  
La tension induite résultante dans le circuit (2) vaut en valeur absolue  $|V_2 - V'_2|$

Schematic representation



Equations of the induced voltage

$$|V_2 - V'_2| = \omega L_m |I_1| = \omega L_m \frac{|V_1|}{R}$$

$$|V_2| = \frac{\omega L_m}{R} \frac{R_1}{R_1 + R_2} |V_1|$$

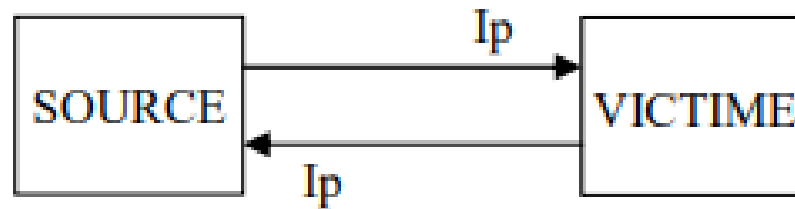
$$|V'_2| = \frac{\omega L_m}{R} \frac{R_2}{R_1 + R_2} |V_1|$$

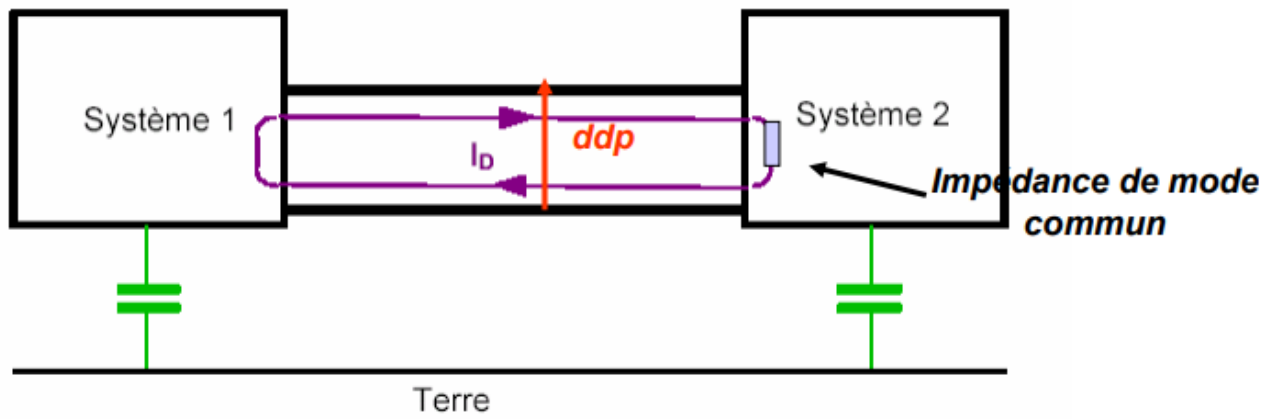
If one of the resistor  $R_1$  or  $R_2$  has a very low value then the entire induced voltage concentrates on the other resistor, that is the greatest. This property allows to discriminate from capacitive and inductive coupling.

**Reducing the loop area of the circuits reduces this coupling.**

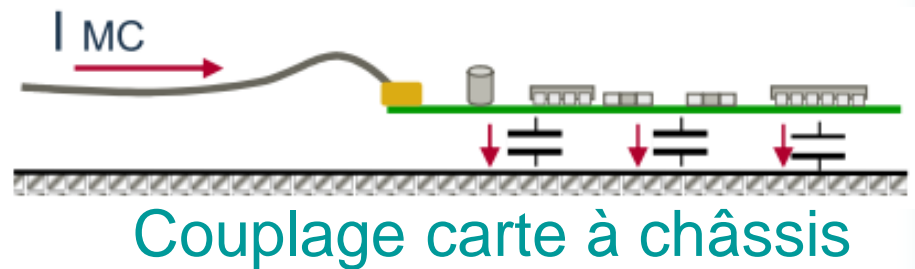
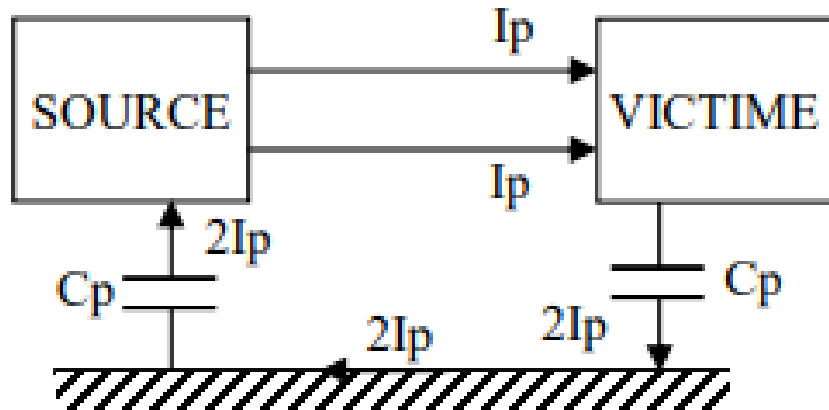
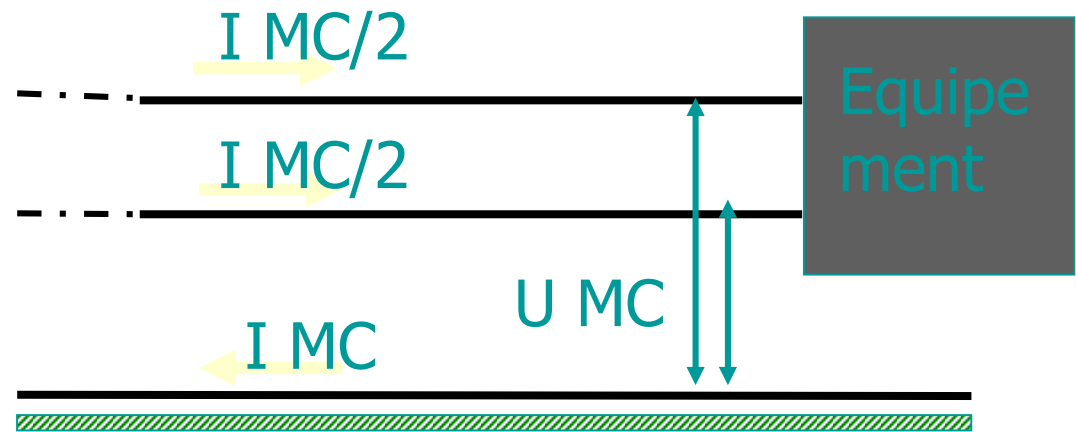
## 5.2. Modes de couplages

**Mode différentiel : mode normal de transmettre un signal électrique.** La perturbation émise par la source se propage sur un conducteur, traverse et pollue la victime puis revient sur l'autre conducteur.





**Mode commun :** La perturbation émise par la source se propage sur tous les conducteurs en même temps, traverse et pollue la victime puis se reboucle par les circuits de masse à travers les capacités parasites.



Couplage carte à châssis



## **6. protection contre les perturbations électromagnétiques**

**Si on cherche à réduire les sources de perturbation électromagnétique trois méthodes sont possibles**

- ✧ **La première méthode consiste à améliorer la structure interne du système vis-à-vis des contraintes de la CEM.**
- ✧ **Une autre stratégie bien connue et utilisée dans la totalité des cartes d'alimentation, consiste à isoler le système perturbateur par un filtre CEM en entrée.**
- ✧ **Blindage électromagnétique**

## 6.1. Réduire les perturbations par amélioration de la structure interne du système

- Pour diminuer les problèmes de transmissions des perturbations, nous pouvons les prendre sous trois angles différents :
  - ◆ tenter de supprimer l'échange d'énergie à la source en diminuant les perturbations transmises par la source,
  - ◆ rendre le canal de transmission aussi inefficace que possible,
  - ◆ rendre le récepteur le moins sensible possible aux perturbations.

## 6.1.1. diminuer les perturbations à la source

- Exemple:

Nous avons un système numérique qui fonctionne avec une horloge présentant des temps de montée/descente de 1 ns.

On sait que plus le temps de montée est bref, plus le spectre du signal est large et étendu.

Ainsi plus le spectre est très large plus sa susceptibilité augmente

la solution est d'augmenter le temps de montée/descente jusqu'à 10ns



On réduit le spectre d'émissions et on diminue l'efficacité de couplage du canal de transmission. Par conséquent on diminue les interférences transmises vers le récepteur.

## 6.1.2. diminuer l'efficacité du canal de transmission

- Pour diminuer l'efficacité du canal de transmission, on peut agir en plaçant le système numérique dans un boîtier métallique, ce qui diminuera les émissions électromagnétique renvoyées vers l'extérieur.

Mais le blindage est une solution plus lourde et plus onéreuse que de diminuer le temps de montée / descente des signaux d'horloges.

### 6.1.3. augmenter l'immunité d'un récepteur

- On pourrait envisager d'augmenter l'immunité d'un récepteur en ajoutant dans le logiciel de la partie numérique un code correcteur d'erreur pour interpoler les informations manquantes et corriger les erreurs.
- L'augmentation de l'immunité de l'appareil peut être obtenue par l'utilisation d'une paire différentielle et un amplificateur d'instrumentation qui rejète la tension de mode commun

## 6.2 Filtrage CEM

en raison des variations très rapides des tensions et courants au sein des composants en commutation ( $dV/dt$ ,  $dI/dt$ ), des perturbations électromagnétiques conduites et rayonnées apparaissent en haute voire très haute fréquence. Afin de protéger le réseau et la charge de ces émissions et de respecter les normes CEM dans un tel environnement ou dans un voisinage sensible, un filtre CEM est impérativement nécessaire.

## 6.2 Filtrage CEM

Pour filtrer les perturbations conduites radiofréquences [9kHz-30MHz] deux techniques existent :

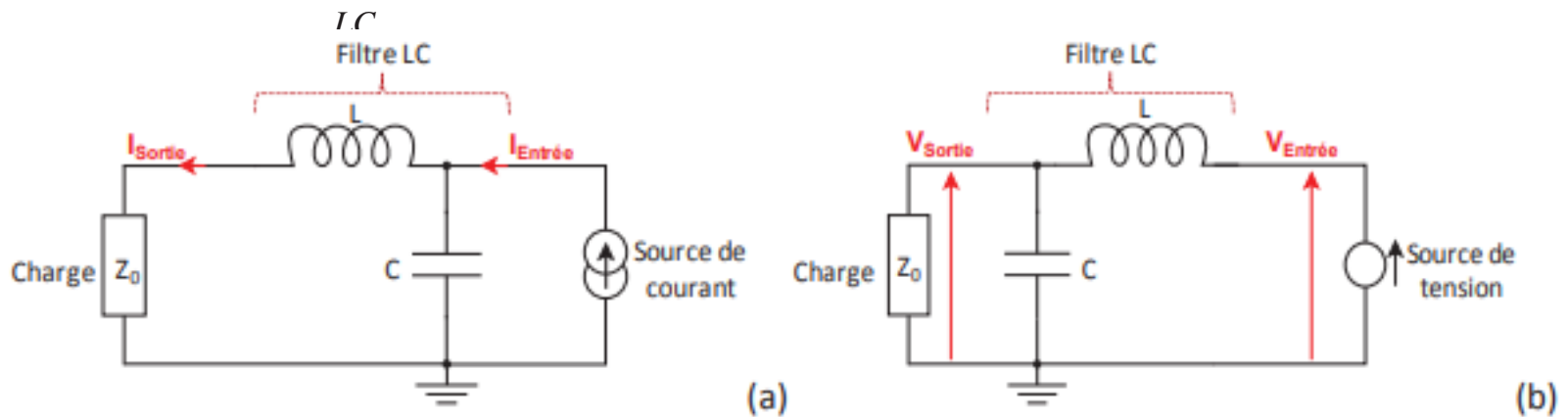
- ◆ Injecter un signal identique au parasite en opposition de phase sur la ligne ; c'est la méthode de compensation.
- ◆ Désadapter les impédances de propagation du signal parasite ; c'est le rôle de tout filtre.

La compensation des signaux parasites (filtrage actif) présente des limitations de performances à partir des quelques centaines de kHz. La stratégie de filtrage passif reste la plus standard et est souvent utilisée pour la plage fréquentielle [150 kHz-30MHz].



## 6.2.1. Principe de dimensionnement d'un filtre CEM standard

- Pour avoir une structure optimale du filtrage passif compte tenu de la nature de la source, le composant d'entrée du filtre doit avoir le comportement « *dual* » de l'impédance de la source de perturbation.
- Un filtre  $LC$  du second ordre est caractérisé par sa fréquence de coupure ( $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ ) et son impédance caractéristique ( $Z_C = \sqrt{\frac{L}{C}}$ ).



Mise en place des composants passifs du filtre CEM dans le cas où les perturbations sont considérées comme: (a) une source de courant, (b) une source de tension.

## 6.2.2. Filtrage passif d'une source de tension

- Considérons une source de tension de perturbation chargée par une impédance  $Z_0$  à travers un filtre  $LC$ , l'atténuation est donnée par l'équation:

$$Att_{Filtre(j\omega)} = 20 \log \left| \frac{V_{Source}}{V_{Charge}} \right| = 20 \log \left| \frac{Z_L + (Z_C \parallel Z_0)}{(Z_C \parallel Z_0)} \right|$$

- D'après l'équation (7), l'atténuation dépend de l'impédance de la charge :

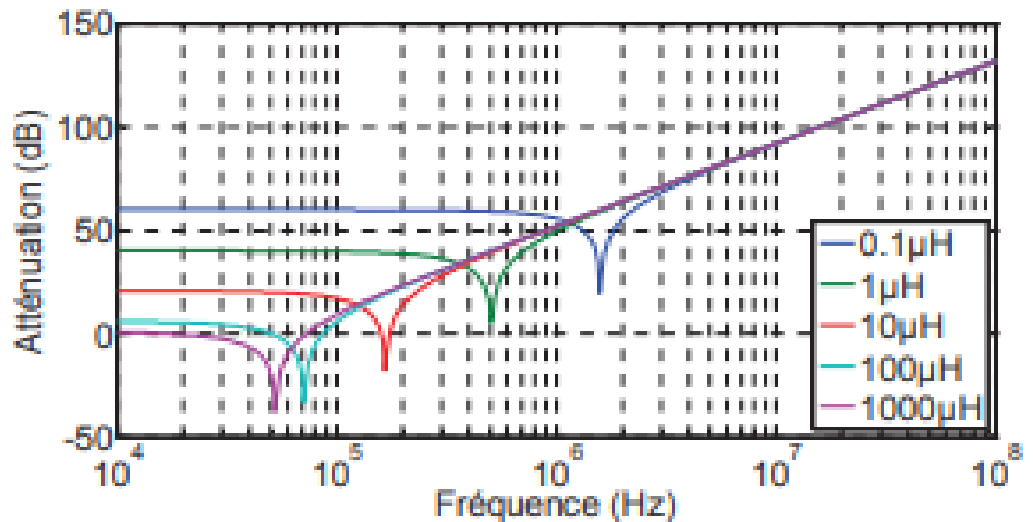
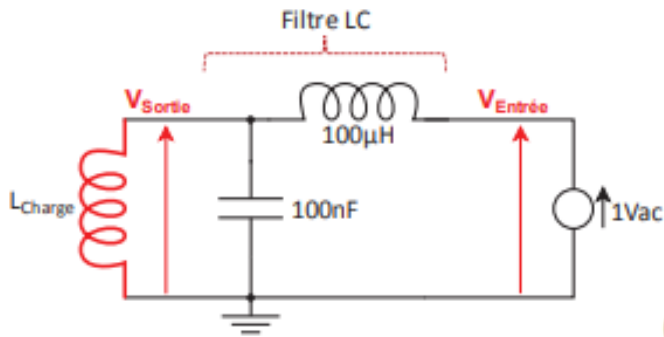
$$Att_{Filtre(j\omega)} = 20 \log \left| 1 + \frac{Z_L}{(Z_0 \parallel Z_C)} \right| = 20 \log \left| 1 - LC\omega^2 + \frac{jL\omega}{Z_0} \right|$$

- Si la charge est inductive ( $Z_0 = j\omega L_{Charge}$ ), l'atténuation s'écrit comme suit

$$Att_{Filtre(j\omega)} = 20 \log \left| 1 - LC\omega^2 + \frac{L_{Filtre}}{L_{Charge}} \right|$$

## 6.2.2. Filtrage passif d'une source de tension

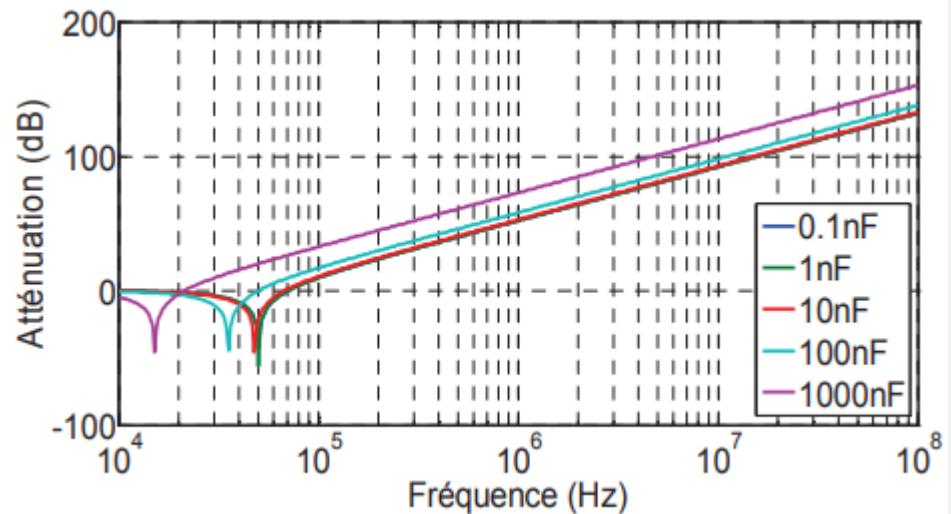
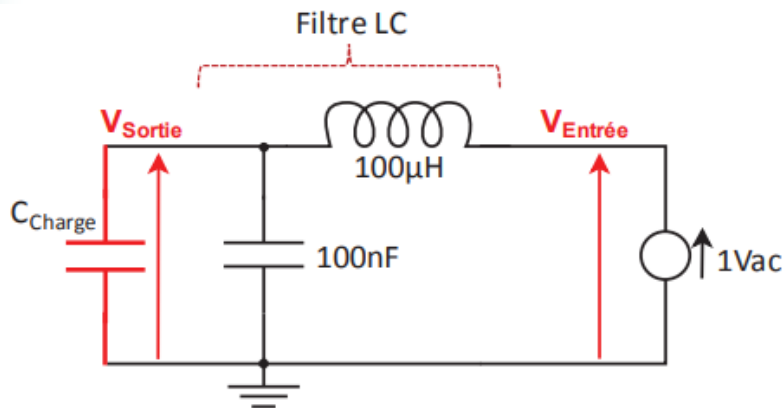
Une simulation paramétrique du circuit est illustrée à la Figure suivante montre l'évolution de l'atténuation en modifiant la valeur de la charge inductive.



## 6.2.2. Filtrage passif d'une source de tension

- Si la charge est capacitive ( $Z_0 = -j/(wC_{Charge})$ ), le niveau d'atténuation est directement proportionnel à la valeur de la capacité de charge qui s'ajoute en parallèle à celle de la capacité du filtrage

$$Att_{Filtre(j\omega)} = 20 \log |1 - LC\omega^2 - LC_{Charge}\omega^2| = 20 \log |1 - L\omega^2(C + C_{Charge})|$$

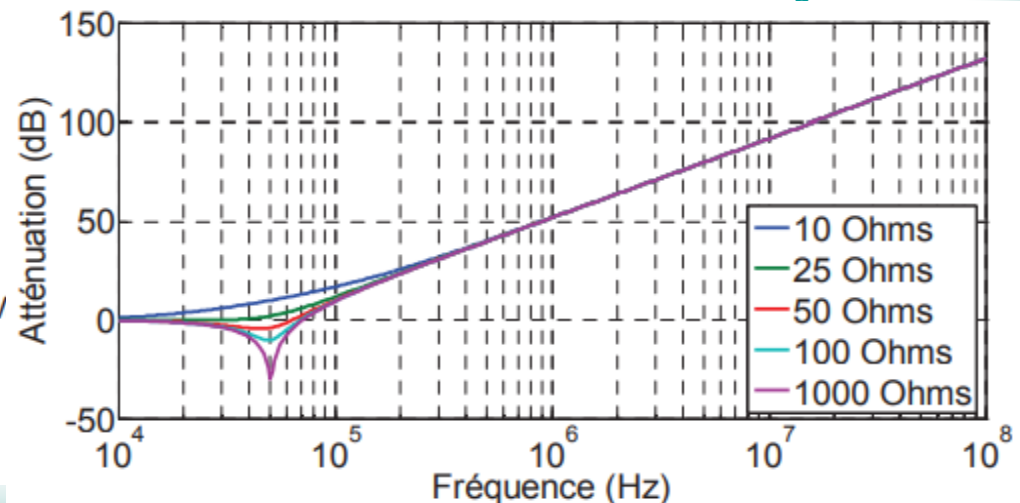
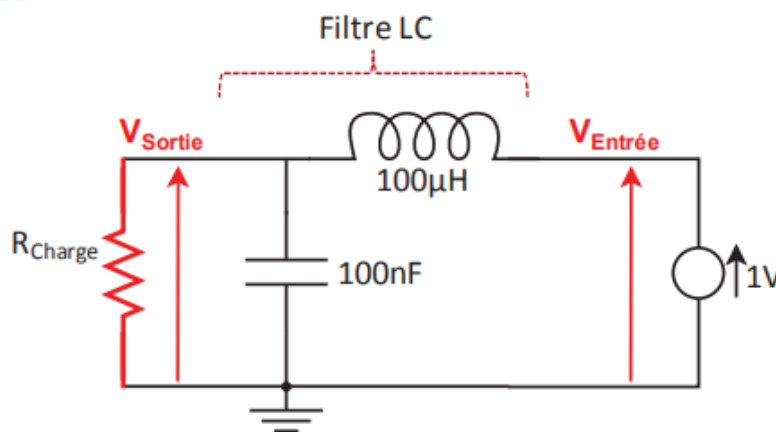


## 6.2.2. Filtrage passif d'une source de tension

- Si la charge est résistive ( $Z_0=R_0$ ), l'atténuation est composée d'une partie principale de second ordre ( $LC\omega^2$ ) et d'une partie de premier ordre dépendante de la valeur de la résistance de charge :

$$Att_{Filtre(j\omega)} = 20 \log \left| 1 - LC\omega^2 + \frac{jL\omega}{R_0} \right|$$

- Une simulation paramétrique dans ce cas, montre l'évolution des pics de résonance en faisant varier  $R_0$  (voir Figure). D'après l'équation ci-dessus, l'atténuation à la fréquence de coupure est positive (suffisamment amortie) si  $R_0 < Z_C$ . Cette hypothèse est confirmée par les courbes d'atténuation pour différentes valeurs de  $R_0$  ( $R_{charge}$ ).



## 6.2.2. Filtrage passif d'une source de tension

- Ces résultats montrent que la nature de la charge influe considérablement sur l'atténuation. Les conditions normatives représentent une situation favorable ; il faut en toute rigueur pouvoir estimer l'impédance du réseau sur lequel est connecté l'équipement et son filtre pour pouvoir estimer correctement son effet.

## 6.2.3. Filtrage passif d'une source de courant

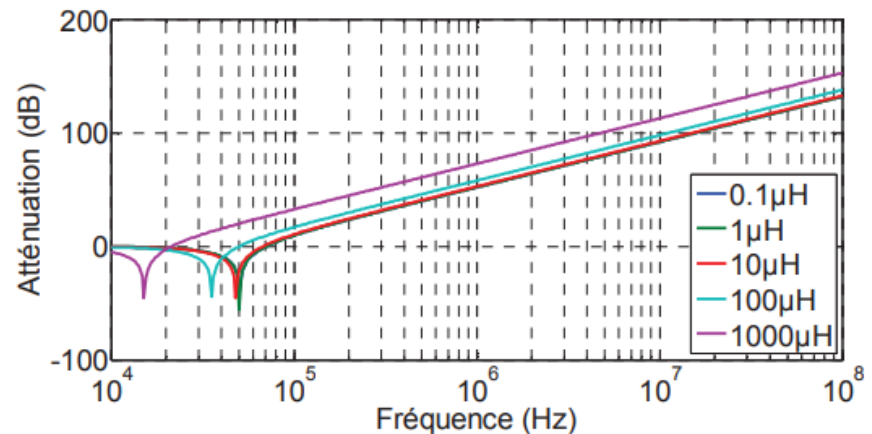
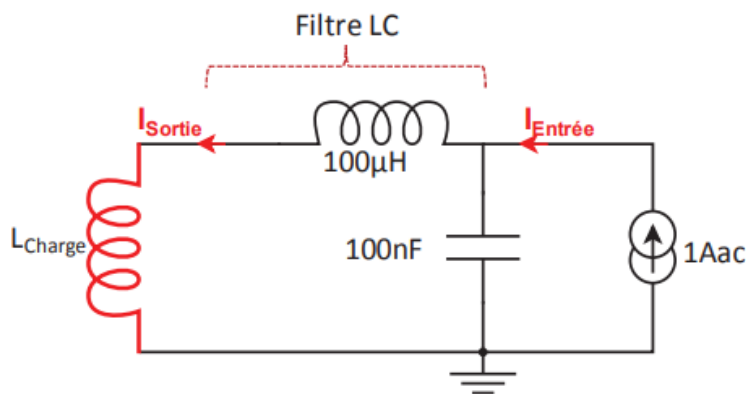
- Dans le cas d'une source de courant chargée par l'impédance  $Z_0$  à travers un filtre  $CL$ , l'atténuation du courant perturbateur est calculée comme suit :

$$Att_{Filtre(j\omega)} = 20 \log \left| \frac{I_{Source}}{I_{Charge}} \right| = 20 \log \left| \frac{Z_T}{Z_C} \right| = 20 \log \left| 1 + \frac{Z_L + Z_0}{Z_C} \right|$$

- Si la charge est inductive le filtrage est calculé comme suit :

$$Att_{Filtre(j\omega)} = 20 \log \left| 1 - (L_{Filtre} + L_{Charge}) C_{Filtre} \omega^2 \right|$$

- Dans ce cas, l'inductance de la charge influe positivement sur le filtrage pour n'importe quelles valeurs d'inductance (voir Figure).

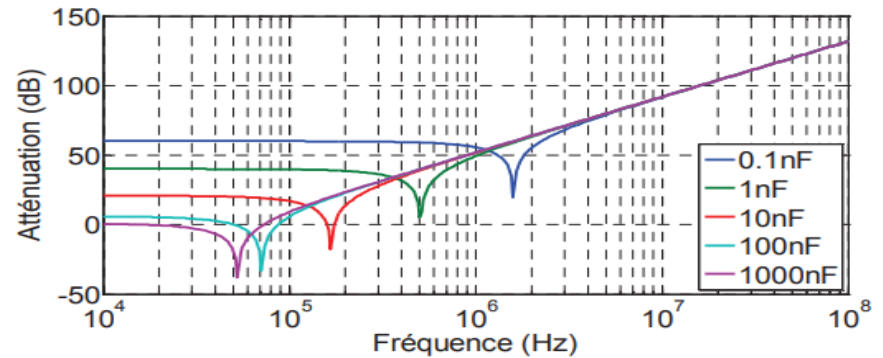
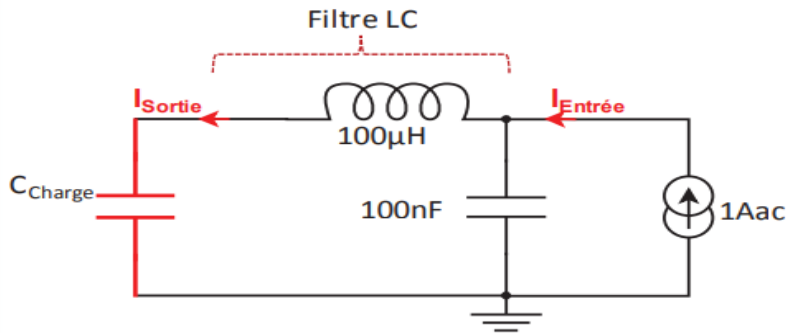


- Si la charge est capacitive, l'atténuation est donnée par :

$$Att_{Filtre(j\omega)} = 20 \log \left| 1 - L_{Filtre} C_{Filtre} \omega^2 + \frac{C_{Filtre}}{C_{Charge}} \right|$$

D'après cette équation, le rapport des valeurs des condensateurs s'ajoute à la valeur d'atténuation principale du filtrage. Par conséquent, une charge capacitive importante par rapport à  $C_{Filtre}$  n'aura quasiment pas d'influence sur l'atténuation. Par contre, dans le cas où  $C_{Charge} \ll C_{Filtre}$  une résonance supplémentaire entre  $L_{Filtre}$  et  $C_{Charge}$  apparaît et peut dégrader la performance du filtrage en absence d'amortissement (voir Figure).

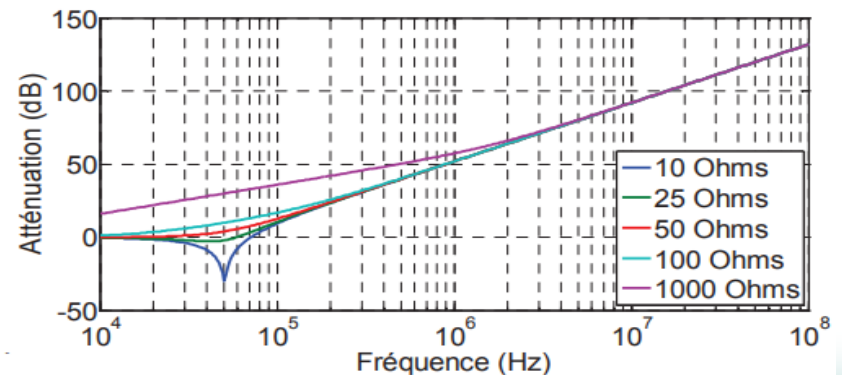
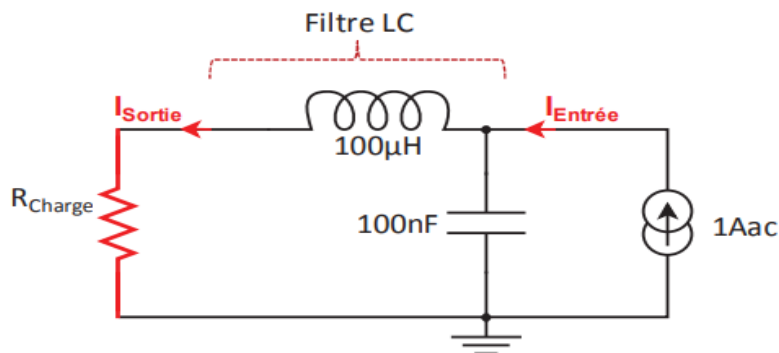




Si la charge est résistive,  $Z_0 = R_0$  :

$$Att_{Filtre(j\omega)} = 20 \log |1 - LC\omega^2 - j\omega R_0 C|$$

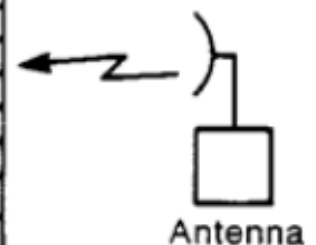
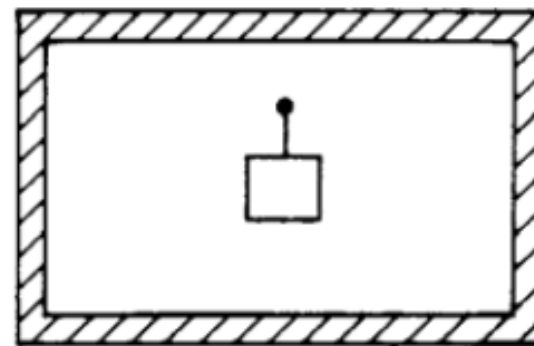
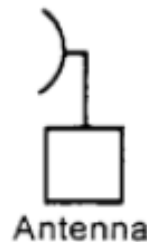
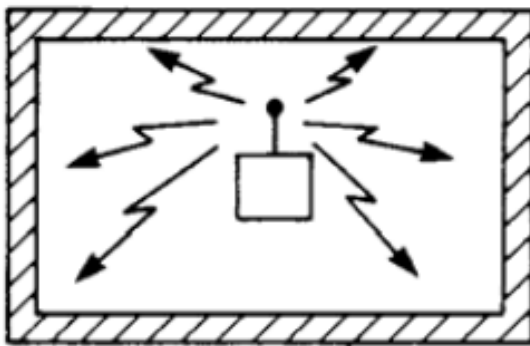
La Figure suivante illustre l'allure des atténuations pour différentes charges résistives. Nous remarquons clairement que la résonance à la fréquence de coupure peut être amortie dans le cas où  $R_0$  est supérieure à  $Z_C$ , ce qui est conforme avec l'équation précédente.



Ces résultats montrent que la nature de la charge influe considérablement sur l'atténuation. Les conditions normatives représentent une situation favorable ; il faut en toute rigueur pouvoir estimer l'impédance du réseau sur lequel est connecté l'équipement et son filtre pour pouvoir estimer correctement son effet.

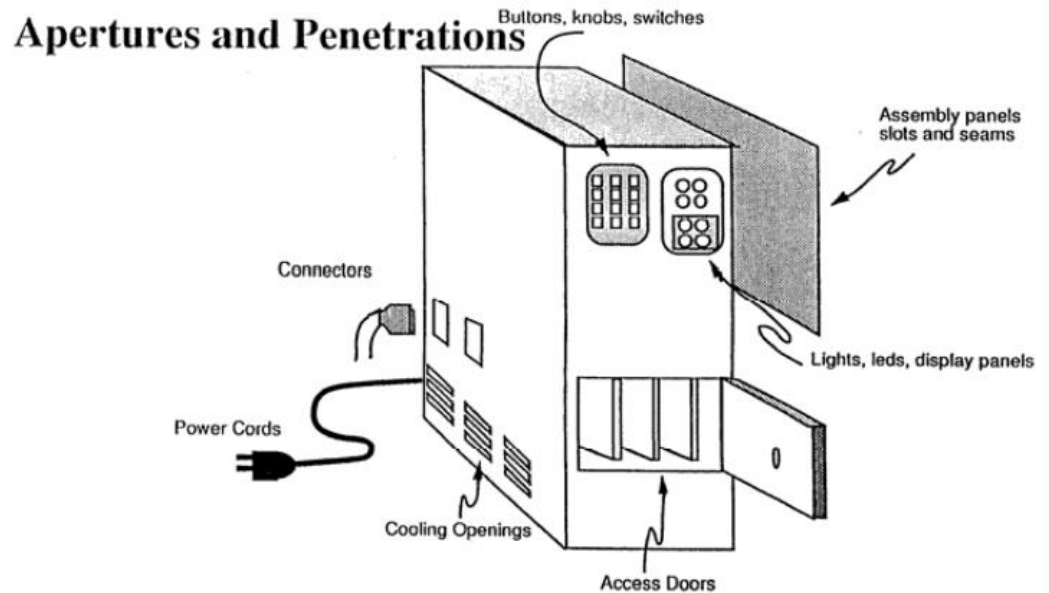
## 6.3. Blindage électromagnétique

- Un blindage est une enveloppe conductrice continue, entourant un circuit
  - ◆ Empêche les émissions du circuit de rayonner à l'extérieur (émission rayonnée)
  - ◆ Empêche les champs EM de parvenir dans le circuit et d'y créer des perturbations (immunité aux rayonnements)



## 6.3.1. Blindage réel

Généralement, toutes les ouvertures dégradent l'effet de protection



Un blindage réel ne peut que s'approcher d'un blindage idéal:

- ◆ D'une part le matériau du blindage n'a jamais une conduction infinie (ou une résistivité nulle), il laissera donc une partie des champs le traverser.
- ◆ D'autre part, pour assurer le fonctionnement, il est nécessaire de percer des ouvertures (boutons, affichage, passage de câble, de prévoir des portes ... ainsi que des ouvertures d'aération, par lesquelles passe une partie importante des champs EM.

## 6.3.2. Efficacité d'un blindage

- L'efficacité du blindage est le rapport entre le champ incident et le champ transmis de l'autre côté ou Rapport entre le champ sans blindage et le champ après introduction du blindage
  - ◆  $SE = 10 \text{ Log } (P_i / P_t) = 20 \text{ Log}(E_i / E_t)$ 
    - ☞ Champ électrique E :  $SEE = 20 \text{ Log}(E_i / E_t)$
    - ☞ Champ magnétique H :  $SEH = 20 \text{ Log } (H_i / H_t)$

En champ lointain les deux valeurs sont identiques ( $E/H = Z_w = 377\Omega$ )

En champ proche on utilise généralement la définition pour le champ électrique.

- **En basse fréquence,**
  - ◆ le blindage du champ électrique est toujours excellent
  - ◆ le champ magnétique est presque impossible à blinder
- Les blindages **HF** sont conditionnés non pas par la qualité du métal utilisé mais par les ouvertures et les différentes pénétrations conductrices

## Fente dans un blindage

- Une ouverture de type fente dans un blindage présente une atténuation donnée par cette formule approchée :

$E_{fente} \text{ (dB)} = 100 - 20 \cdot \text{Log}(L) - 20 \cdot \text{Log}(F)$  Avec L : Longueur de la fente en mm F : fréquence en MHz

- ◆ On peut voir que pour une ouverture de 1 m, l'atténuation est de 0 dB à 100 MHz.
- ◆ Lorsque la longueur d'une fente est égale à la demi-longueur d'onde, l'atténuation est au voisinage de 0 dB

Il est clair que les blindages très haute fréquence vont être très délicats à réaliser puisque les ouvertures tolérables seront de très faible longueur.

- Un blindage est très efficace en théorie, dès que les fréquences mises en causes dépassent le MHz. En pratique, il en est tout autrement, car une carte électronique est généralement en relation avec l'extérieur par des câbles électriques, ne serait-ce que l'alimentation. On constate alors que l'efficacité du blindage peut être réduite à néant si les courants de "mode commun" ne sont pas bloqués au niveau des entrées des câbles.