

Compatibilité Electromagnétique C.E.M

Précautions d'usage pour la limitation des couplages

*ANF « Quelle alimentation pour quel plasma ? »
GREMI Orléans*

CEM - Précautions d'usage pour la limitation des couplages

1- Définition de la CEM

2- Perturbations d'un équipement

3- Définitions des sources de perturbations

4- Les 6 couplages

1- Définition

Qu'est ce que la compatibilité électromagnétique ?

La compatibilité électromagnétique (CEM) est « l'aptitude d'un appareil ou d'un système électrique ou électronique, à fonctionner dans son environnement électromagnétique de façon satisfaisante, sans produire lui-même des perturbations électromagnétiques intolérables pour tout ce qui se trouve dans cet environnement. » (*définition Wikipédia*)

Une bonne compatibilité électromagnétique décrit un état de « bon voisinage électromagnétique » :

- limiter le niveau des *émissions* non désirées provenant de l'appareil, afin de ne pas perturber la réception radio ou les autres équipements ;
- être suffisamment *immunisé* envers les perturbations provenant des autres équipements, ou plus généralement de l'environnement.

1- Définition

Qu'est ce que la compatibilité électromagnétique ?

CEM → Science récente qui s'adresse à « ce qui n'est pas prévu » !

Objet : traiter des parasites électromagnétiques à des fréquences supérieures aux fréquences de travail

Ex :

- Sensibilité d'une télévision à plusieurs GHz alors que les fréquences de travail sont de qqes dizaines de MHz
- Sensibilité d'un AOP (qqes 10kHz) à des bruits situés à qqes 100MHz

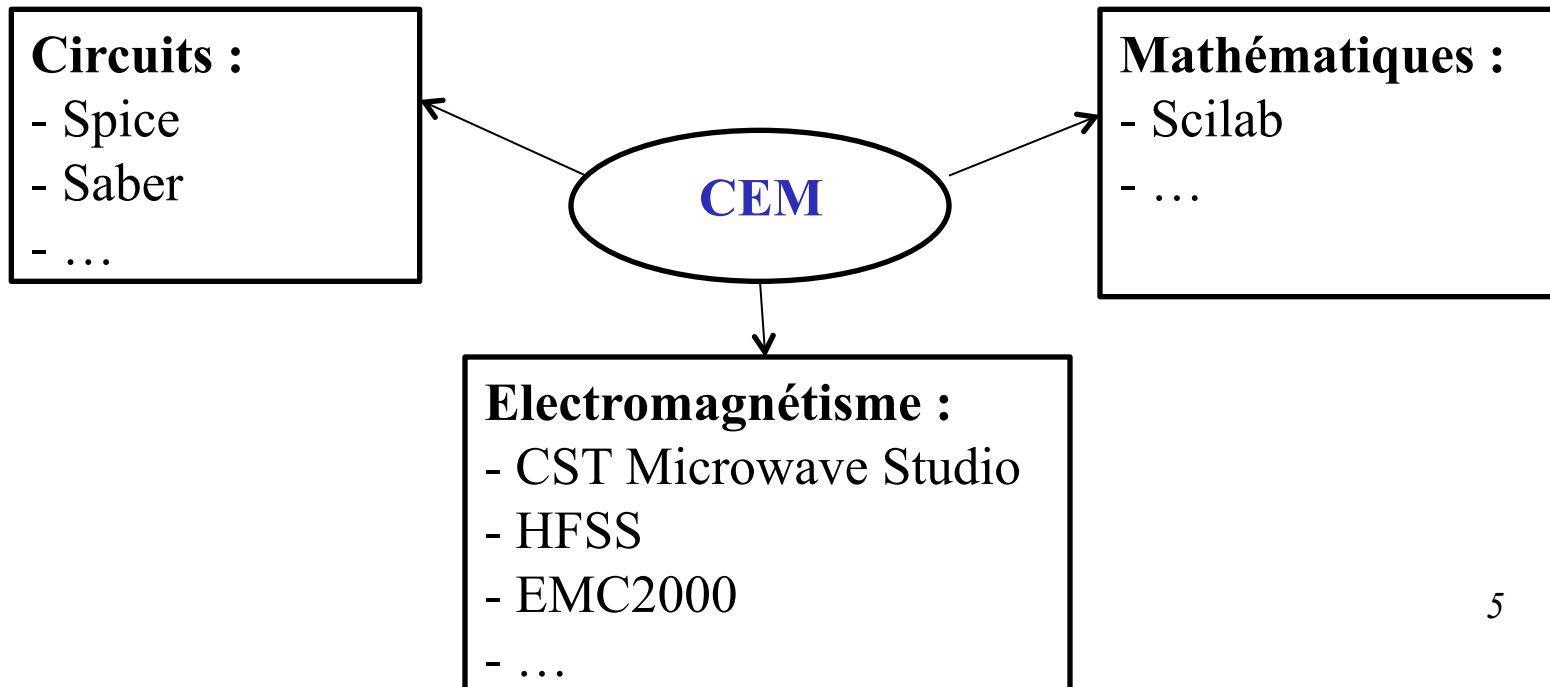
→ **Bandes passantes très larges indépendamment de la BP de l'électronique étudiée**

1- Définition

Qu'est ce que la compatibilité électromagnétique ?

Problématique

Prévision d' autant plus difficile que la fréquence est élevée
→ **Utilisation de logiciels prédictifs par calculs**



2- Perturbation d'un équipement

Définition

Une **perturbation** est un phénomène électromagnétique susceptible de créer des troubles de fonctionnement d'un dispositif, d'un appareil ou d'un système ou d'affecter défavorablement la matière vivante ou inerte. Il peut s'agir d'un bruit, d'un signal non désiré ou d'une modification du milieu de propagation lui-même.

Deux aspects sont inhérents à cette définition :

- l'aptitude d'un appareil à fonctionner dans un environnement plus ou moins perturbé,
- l'aptitude d'un appareil à fonctionner sans perturber l'environnement de manière excessive.

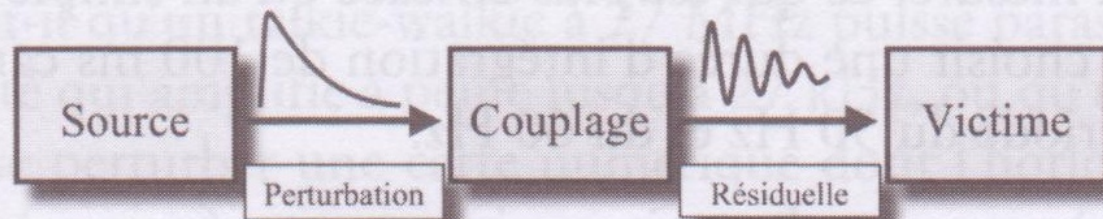
2- Perturbation d'un équipement

La **perturbation d'un équipement** met en jeu trois éléments susceptibles d'être caractérisés :

- la source de perturbation qui se caractérise par sa puissance, sa durée, son spectre de fréquence, les champs qu'elle génère,
- le vecteur par lequel la perturbation est transmise, on parle de mode de couplage,
- l'équipement victime de la perturbation.

2- Perturbation d'un équipement

Méthode générale d'analyse de la CEM



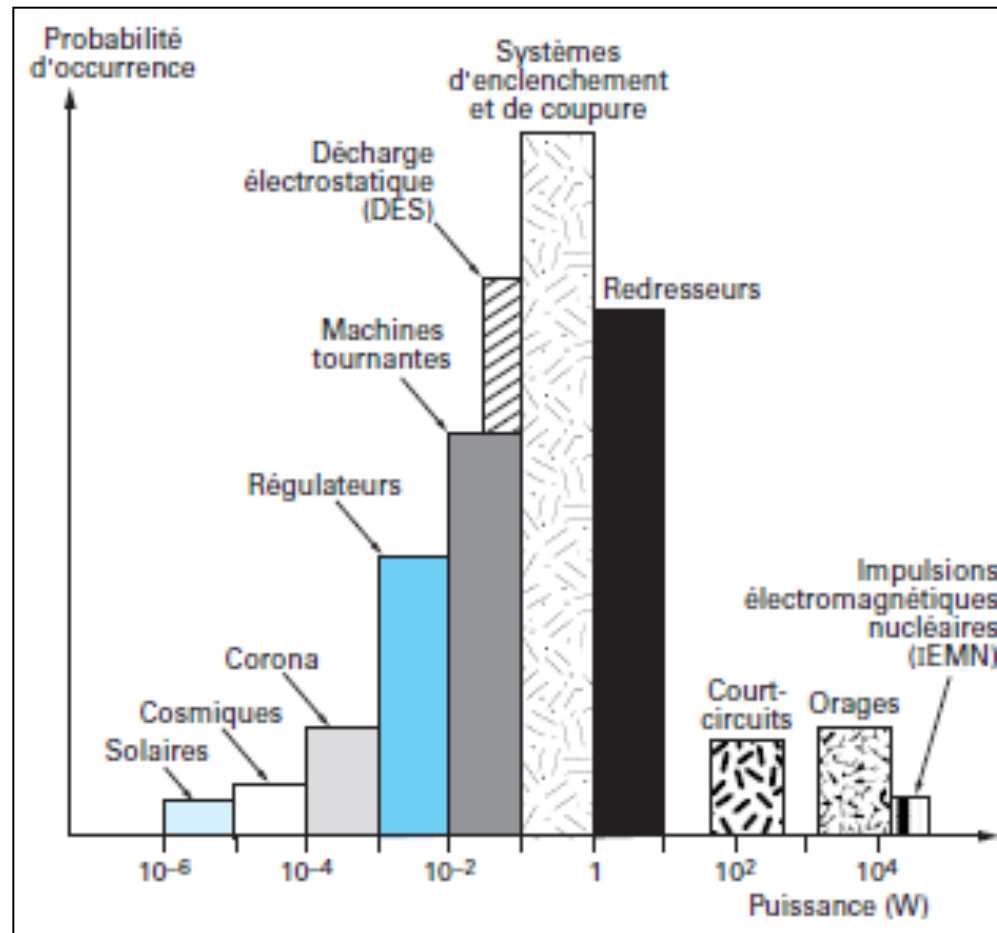
BF
HF
Conduction
Rayonnement
Entretenu
Impulsionnelle

Impédance commune
Capacité à châssis
Diaphonie inductive
Diaphonie capacitive
Champ H à boucle
Champ E à fil

Analogique
Numérique
Récepteur opto.
Récepteur radio
Pyrotechnique
Êtres vivants...

3- Définition des sources de perturbations

Origine des perturbations électromagnétiques



3- Définition des sources de perturbations

Classification BF/HF

Limite fréquentielle conventionnelle : 1MHz

→ Si $f < 1\text{MHz}$ => Source BF

Phénomènes électriques « intuitifs » analysables avec schémas conventionnels

Mesures simples et reproductibles

→ Si $f > 1\text{MHz}$ => Source HF

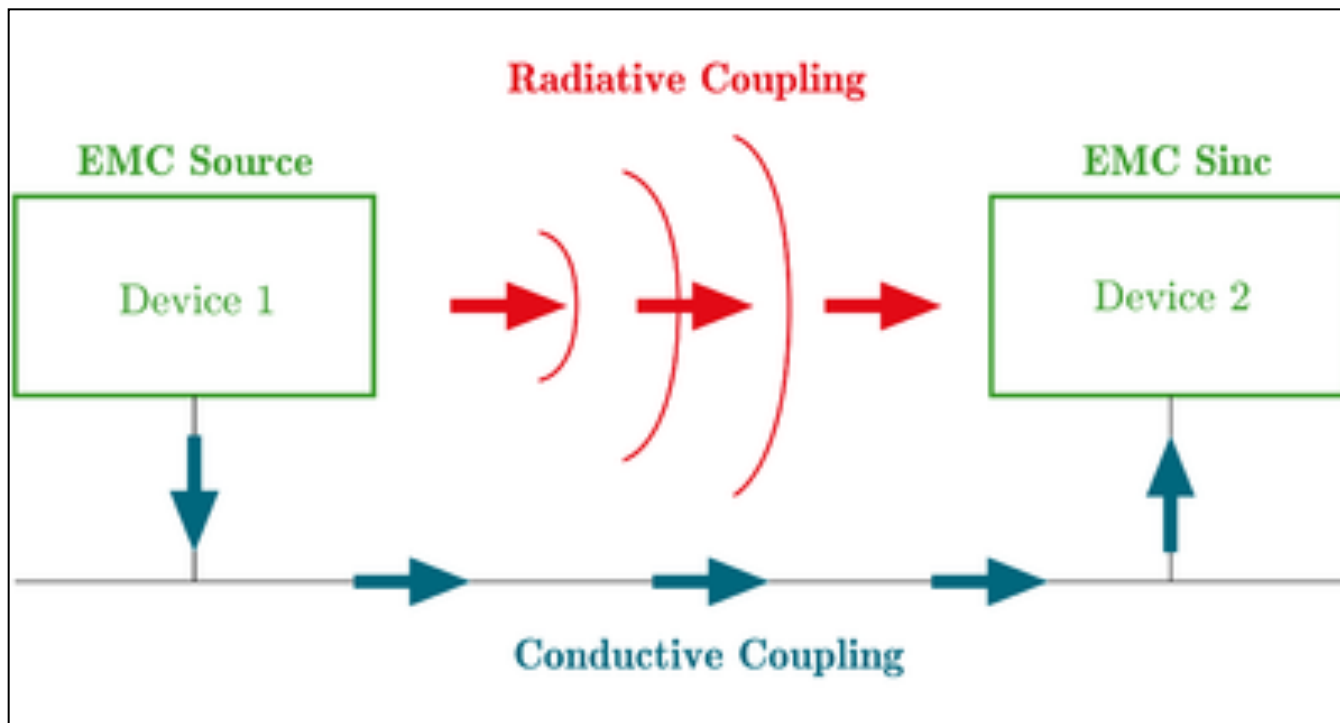
Phénomènes beaucoup moins conventionnels (isolement galvanique inefficace, longueurs des conducteurs critiques, les câbles deviennent des antennes...)

Mesures délicates à réaliser

A priori $f_{\text{max}} < 3\text{GHz}$ pour source non intentionnelle (temps de montée de 100ps)

3- Définition des sources de perturbations

Classification Conduction/Rayonnement



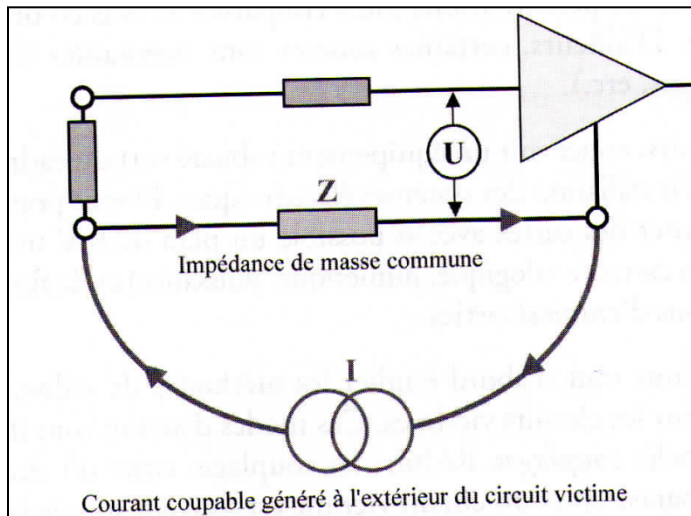
4- Les 6 couplages

Effet d'un courant circulant dans un conducteur

Impédance d'un conducteur est non nulle

→ Génération d'une tension à partir du courant traversant le conducteur

Phénomène appelé **couplage par impédance commune**



Tension ajoutée au signal utile :

$$U=ZI$$

Réduction de ce couplage :

- diminution de l'impédance commune Z
- réduction des courants parasites qui y circulent

Couplage par impédance commune

Mise en équation

Généralisation élémentaire : $U = ZI$

avec U: tension aux bornes de l'impédance commune en V

Z : impédance du conducteur commun entre ces deux points en Ω

I : courant circulant dans le conducteur en A

En BF, Z est une résistance.

Ex1 pour un conducteur de cuivre :

$$R = \frac{17L}{S}$$

avec R : résistance du conducteur en $m\Omega$

L : longueur du conducteur en m

S : section du conducteur en mm^2

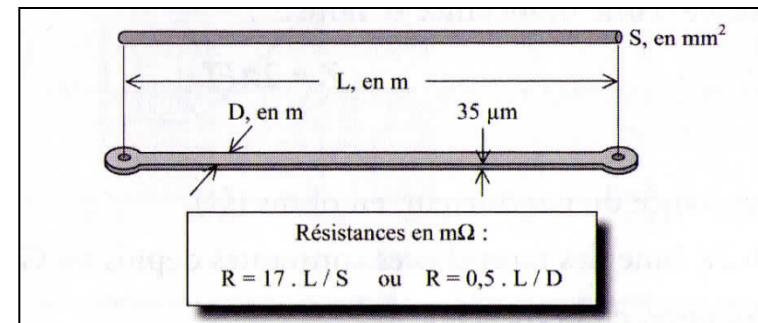
Ex2 pour une piste de cuivre de $35\mu m$ d'épaisseur :

$$R = \frac{0,5L}{D}$$

avec R : résistance de la piste en $m\Omega$

L : longueur du conducteur en m

D : largeur de la piste en m



Couplage par impédance commune

Mise en équation

En HF, Z est une inductance : $Z = 2\pi fL$

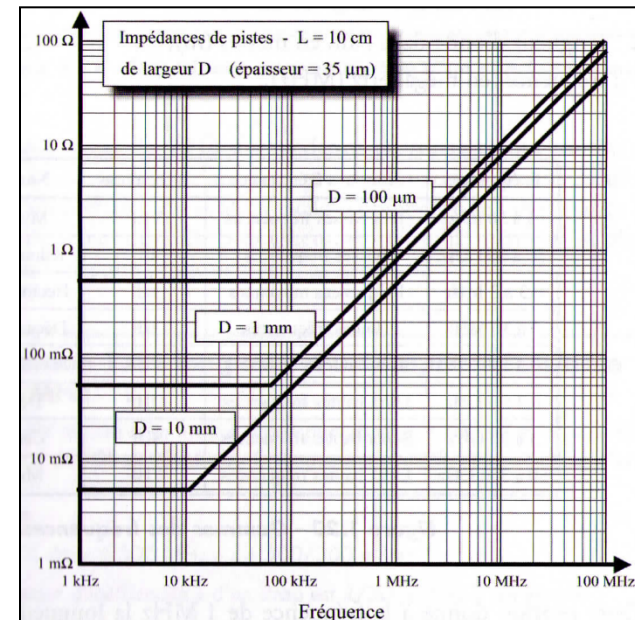
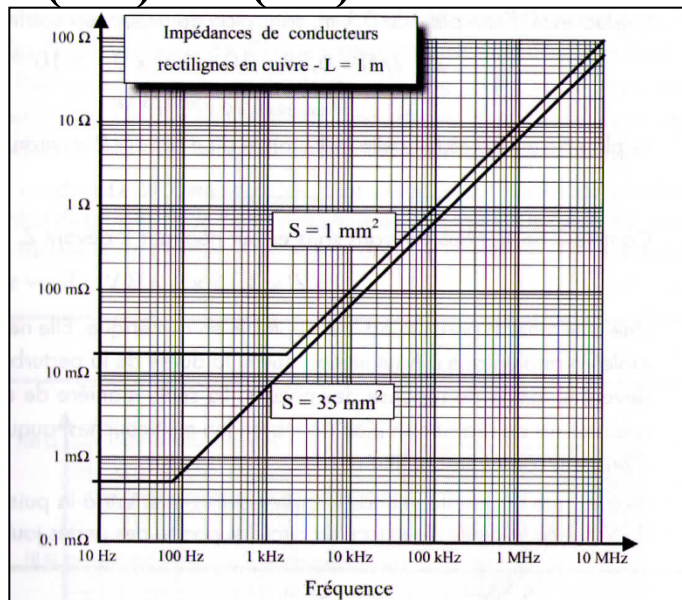
avec Z : impédance du conducteur en Ω

f : fréquence en Hz

L : inductance du conducteur en H

Ordre de grandeur de l'inductance d'un conducteur $\approx 1\mu\text{H/m}$

→ $Z(\text{HF}) > R(\text{BF})$



Piste sans 0V, sinon diviser $Z(\text{HF})$ par 2

Couplage par impédance commune

Cas d'une impulsion HF

Pour une impulsion de courant de temps de montée connu :

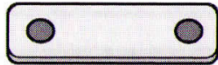
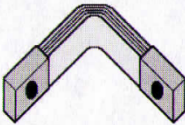


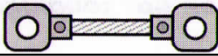
$$U = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

avec U : tension aux bornes de l'inductance en V

L : inductance du conducteur en H

ΔI : impulsion de courant crête à crête en A

Δt : temps de montée de l'impulsion en s (10% à 90%)

	NATURE	SECTION (mm ²)
	Cuivre Laiton Acier zingué	20 à 200 BON
	Cuivre Aluminium Acier...	100 à 500 BON
	Tresse Cuivre	50 à 200 CORRECT
	Tresse Cuivre	50 à 200 CORRECT
	Conducteur Cuivre	< 35 ÉVITER

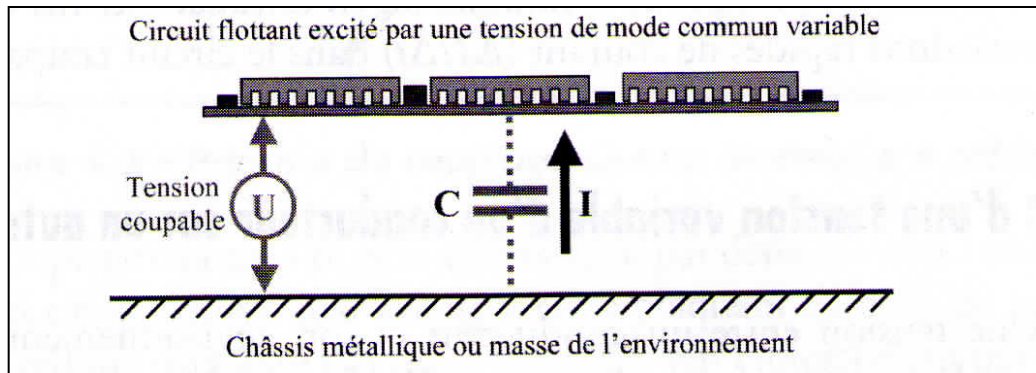
4- Les 6 couplages

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

Capacité entre deux conducteurs voisins est non nulle

→ Injection d'un courant de l'un vers l'autre à partir d'une variation de potentiel

Phénomène appelé **couplage capacitif carte à châssis**



Courant total injecté :

$$I = C \Delta U / \Delta t$$

Réduction de ce couplage :

- diminution de la capacité parasite entre le circuit sensible et la masse
- réduction des variations rapides de tension entre la carte et la masse

Couplage capacitif carte à châssis

Mise en équation

Capacité intrinsèque = capacité minimale d'un disque conducteur **éloigné** de toute masse d'un diamètre égal à la diagonale de la carte : $C_i \approx 35D$

avec C_i : capacité intrinsèque en pF

D : diamètre du disque ou diagonale de la carte en m

Elle rend compte des « effets de bords ».

Capacité plane = capacité d'un condensateur plan proche du plan de masse dans l'air :

$$C_p \approx 9 \frac{S}{h}$$

avec C_p : capacité plane en pF

S : surface des électrodes en regard en m^2

h : distance de la carte par rapport au plan en m

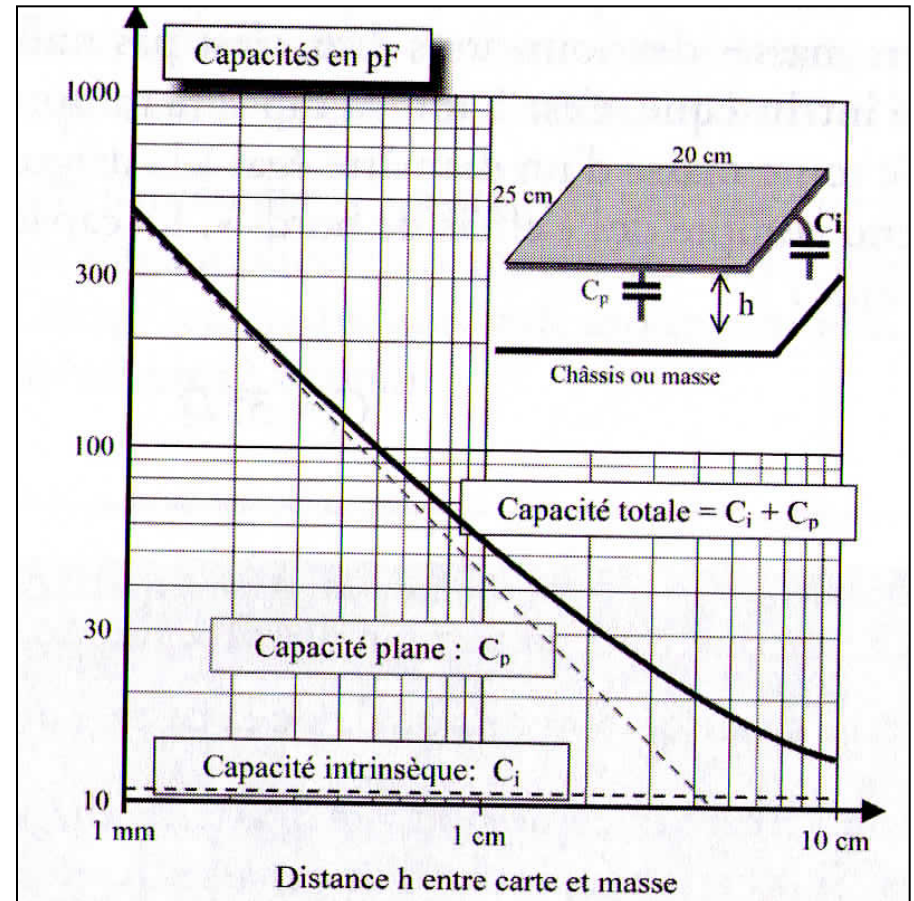
Capacité totale : $C_t \approx C_i + C_p$

Couplage capacitif carte à châssis

Notion de capacité victime

L'ensemble des lignes de champ électrique « tombe » sur toute la surface de la carte. Chaque piste ou composant ne reçoit qu'une partie de ces lignes

→ $C_v \ll C_t$ où C_v est la capacité victime



Couplage capacitif carte à châssis

Mise en équation suite

En cas de variation de la tension entre la carte et son environnement, une piste victime reçoit un courant :

$$I = 2\pi f C_v U \quad \text{ou} \quad I = C_v \frac{\Delta U}{\Delta t}$$

avec I : courant parasite collecté par la victime en A

U : tension appliquée entre la carte et la masse en V

f : fréquence de la tension entre carte et masse en Hz

C_v : capacité entre la piste victime et la masse en F

ΔU : tension crête à crête appliquée entre carte et masse en V

Δt : temps de montée de la perturbation (10% à 90%) en s

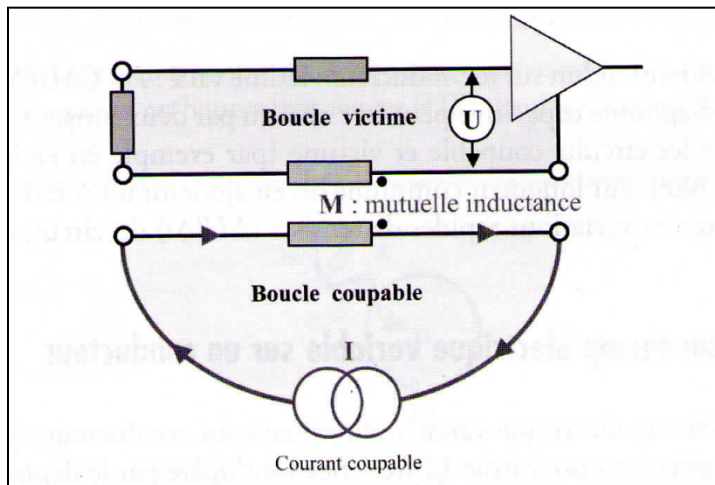
Conclusion : comme une capacité parasite de 0,1pF est inévitable, il faut blinder les circuits électroniques avec leur référence potentiel raccordée à la masse du blindage

Pour améliorer l'immunité, on peut ajouter un écran en champ électrique (ou écran électrostatique) relié à la masse

4- Les 6 couplages

Effet d'un courant variable dans un conducteur filaire sur un circuit voisin

Courant dans un fil génère autour de ce fil un champ magnétique
 → Génération d'une différence de potentiel dans toutes les boucles voisines
 Phénomène appelé **couplage par diaphonie inductive**



Tension induite dans la boucle victime :

$$U = M \Delta I / \Delta t$$

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

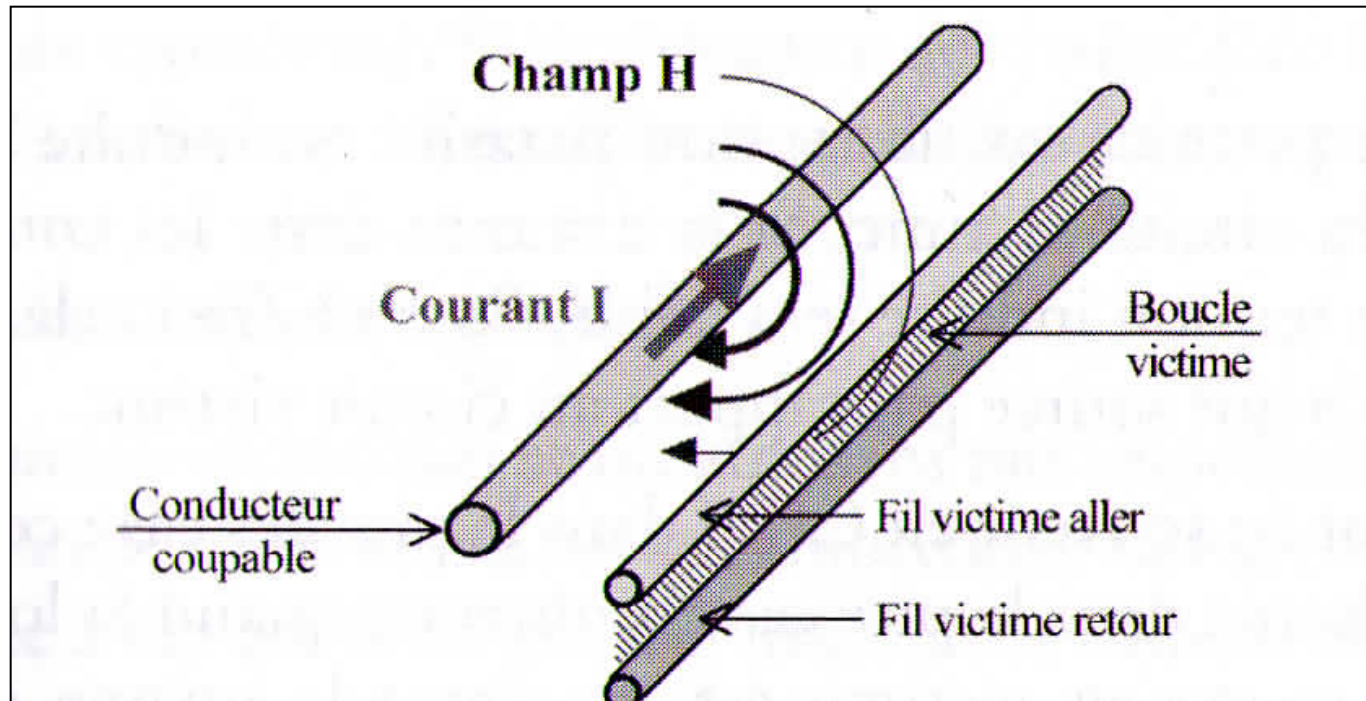
Réduction de ce couplage :

- diminution de la mutuelle inductance entre les deux circuits
- limitation des variations rapides de courant dans le circuit coupable

Couplage par diaphonie inductive

Diaphonie inductive de mode différentiel

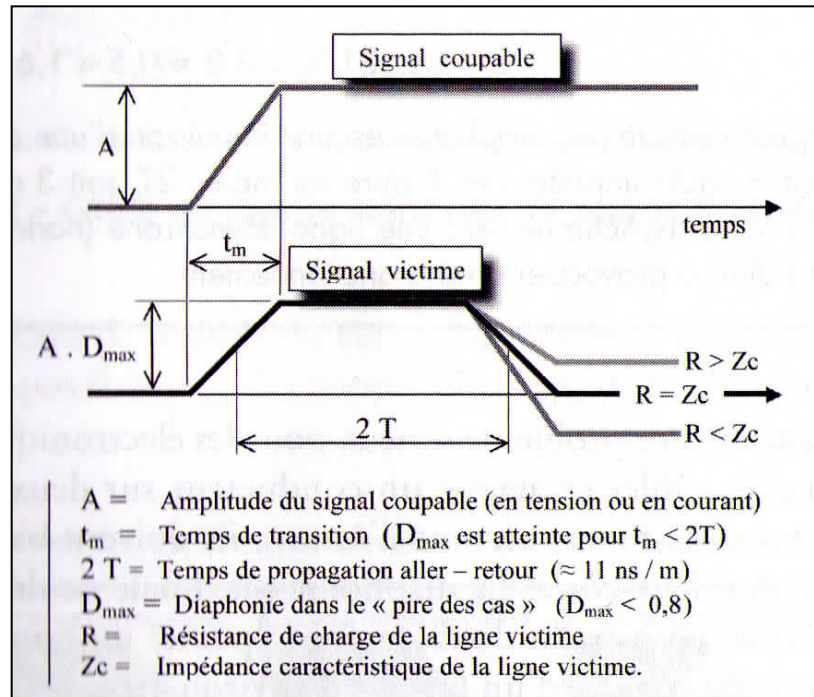
La tension parasite est induite entre le fil aller et le fil retour du circuit victime.



Raisonnement dans « le pire des cas » i.e. quand la longueur commune entre les circuits source et victime est plus grande que $\lambda/2$.

Couplage par diaphonie inductive

Diaphonie dans le pire des cas d'une ligne adaptée à un bout

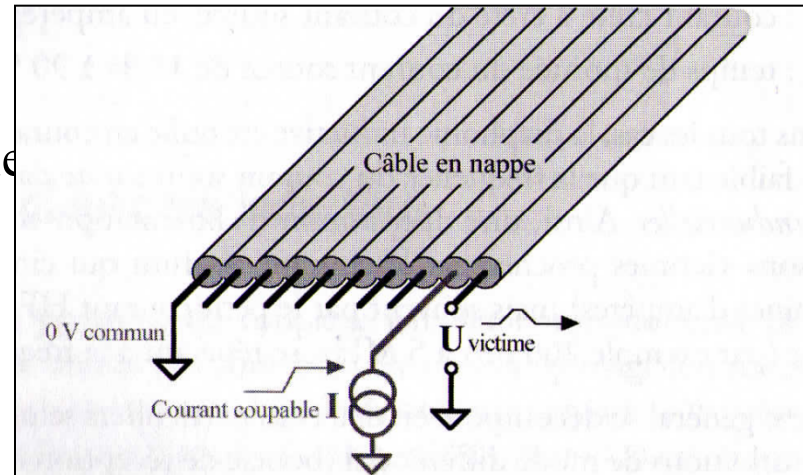


Si ligne chargée par son impédance caractéristique, diaphonie divisée par 2 mais signal utile également → **Rapport signal/bruit inchangé**

Si temps de montée t_m plus long que durée d'un aller-retour $2T$, alors pour obtenir la diaphonie crête il faut multiplier la diaphonie maximale par le **coefficient réducteur $2T/t_m$**

Couplage par diaphonie inductive

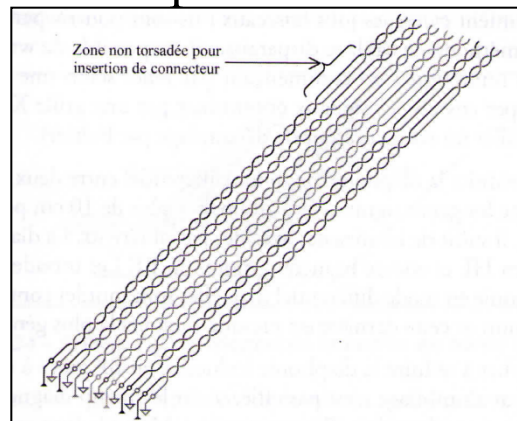
Si câble mal utilisé, alors diaphonie maximale de 80%



Solutions adoptées

Pour les électroniques numériques, alterner dans les câbles en nappe un conducteur sur 2 au 0V → Diaphonie maximale de 8%

Pour les signaux rapides, utiliser des paires torsadées S-Z → Diaphonie maximale de 2%

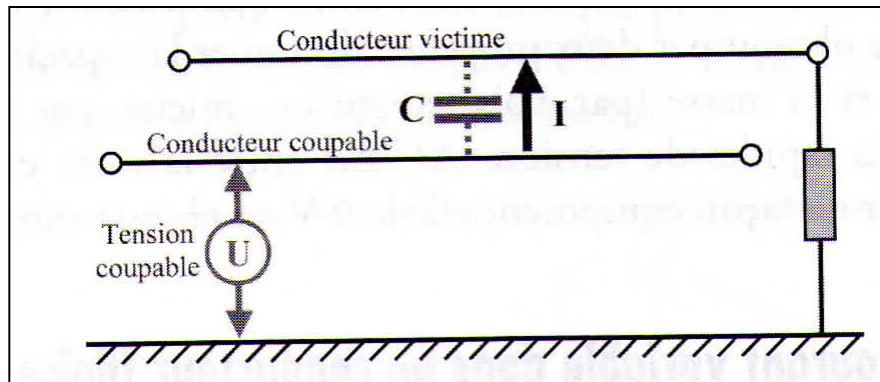


4- Les 6 couplages

Effet d'une tension variable d'un conducteur sur un conducteur voisin

Tension entre un conducteur et son environnement génère un champ électrique autour de ce conducteur

→ Ce champ déplace à son tour un courant dans les conducteurs proches
Phénomène appelé **couplage à diaphonie capacitive**



Courant induit sur le conducteur victime :

$$I = C \Delta U / \Delta t$$

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

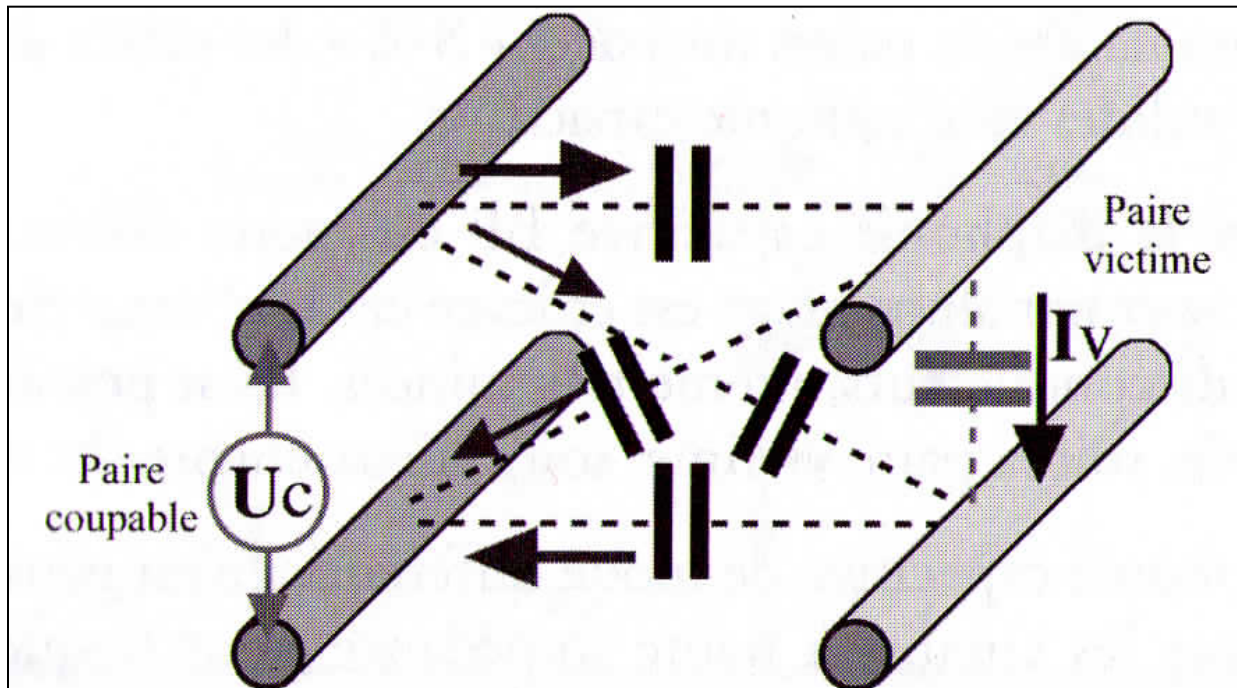
Réduction de ce couplage :

- diminution de la capacité parasite entre les circuits coupable et victime
- réduction des variations rapides de tension du circuit coupable

Couplage par diaphonie capacitive

Diaphonie capacitive de mode différentiel

Le courant parasite est collecté entre le conducteur aller et le conducteur retour du circuit victime.



Raisonnement dans « le pire des cas » avec les mêmes problèmes et valeurs que dans le cas de la diaphonie inductive

Couplage par diaphonie capacitive

Diaphonie capacitive de mode différentiel

Phénomène qui dure un aller-retour du signal transmis dans la nappe

Si temps de montée t_m plus long que durée d'un aller-retour $2T$, alors pour obtenir la diaphonie crête il faut multiplier la diaphonie maximale par le **coefficient réducteur** $2T/t_m$ (dans câble)

Solutions adoptées

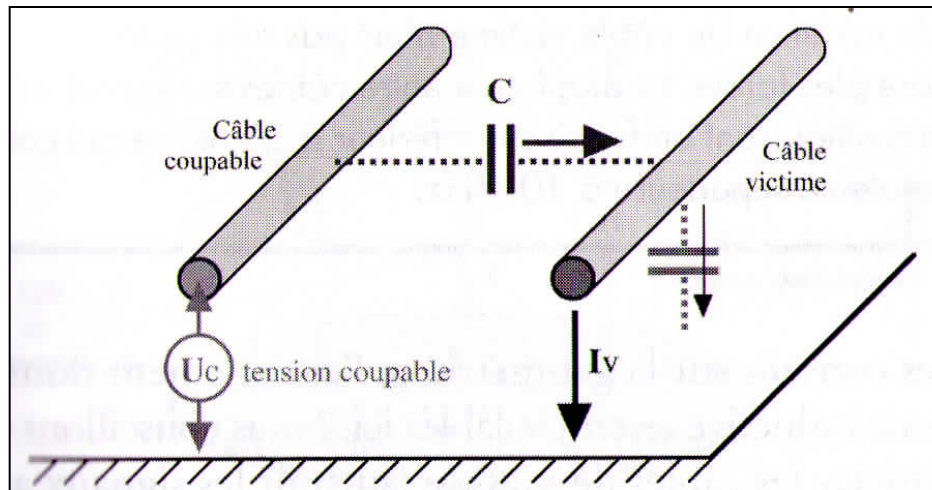
Idem diaphonie inductive de mode différentiel (câblage des nappes, paires torsadées S-Z...)

Par contre, il est possible de blinder la paire coupable, la paire victime ou les deux car le champ électrique ne traverse pas les feuillards conducteurs même très minces.

Couplage par diaphonie capacitive

Diaphonie capacitive de mode commun

Le champ électrique est généré par la tension de mode commun entre un câble et la masse. Le courant parasite est collecté par un câble victime parallèle au câble coupable.



Même loi de décroissance géométrique que diaphonie inductive

→ Si $e < h$, alors diaphonie max voisine de 50%

→ Si $e > h$, alors diaphonie max environ égale au carré du rapport h/e

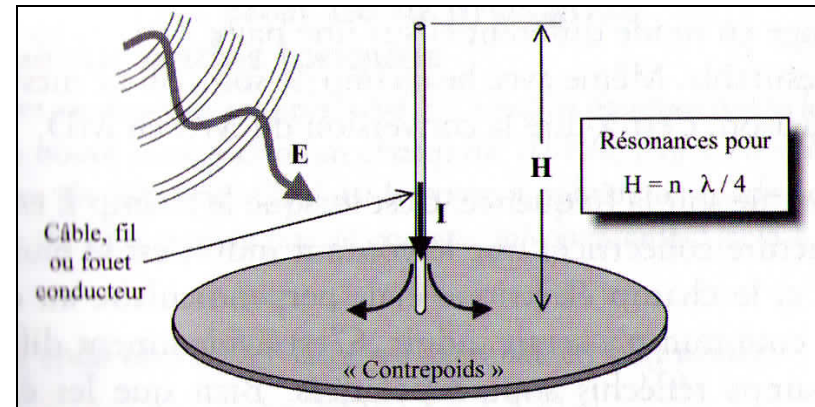
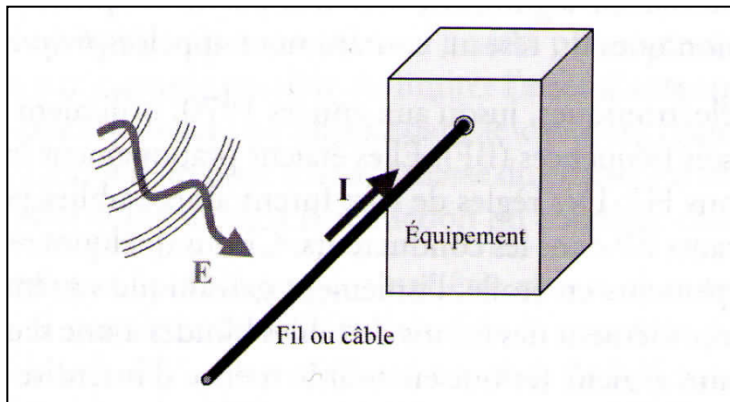
→ Utilisation éventuelle du coefficient réducteur $2T/t_m$ dans air

4- Les 6 couplages

Effet d'un champ électrique variable sur un conducteur

Champ électrique variable illuminant un conducteur s'y réfléchit
 → Cette réflexion s'opère par le déplacement d'un courant en surface du conducteur éclairé

Phénomène appelé **couplage champ à câble (ou à fil)** qui devient non négligeable lorsque longueur antenne avoisine $\lambda/4$.



Réduction de ce couplage :

- réduction de l'effet d'antenne du câble victime
- réduction du champ électrique coupable

Couplage champ à fil

Solutions adoptées

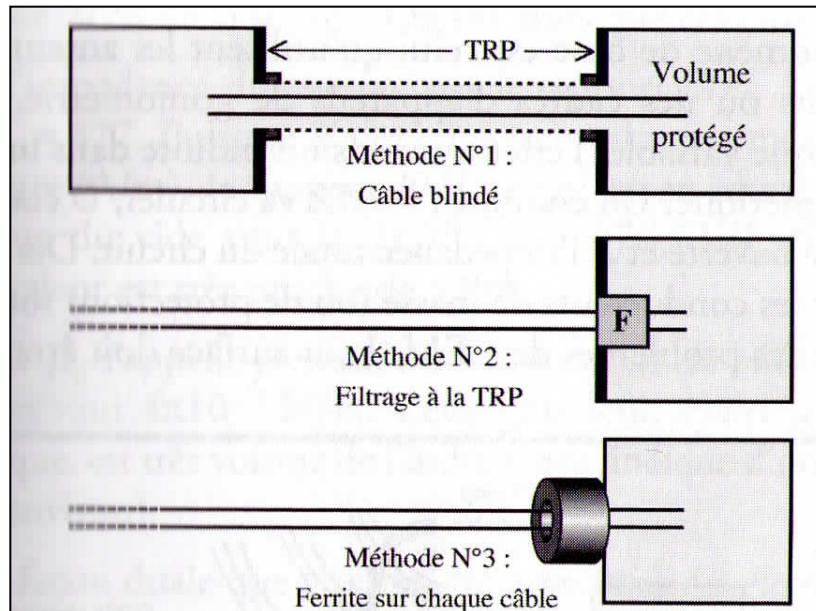
Protection simple contre champ électrique BF avec vulgaire feuillard

Utilisation d'un effet réducteur en plaquant le câble victime contre un plan de masse

Blinder les câbles avec reprise de masse de chaque côté

Installer des filtres passe-bas référencés sans trop d'inductance parasite

Ajouter des tores de ferrite sur les câbles vulnérables



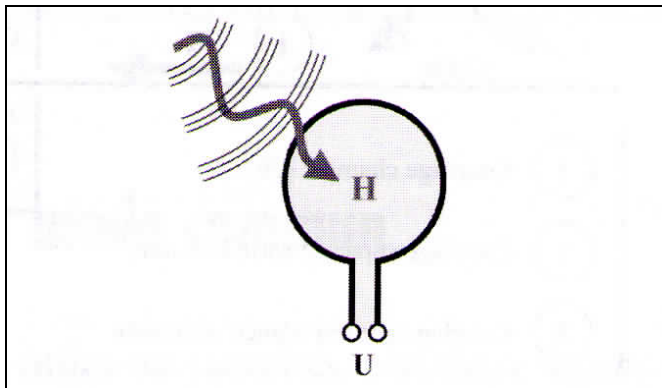
4- Les 6 couplages

Effet d'un champ magnétique variable dans une boucle

Champ magnétique variable traversant une boucle y induit un flux magnétique variable

→ Toute variation de flux crée une force contre-électromotrice

Phénomène appelé **couplage champ à boucle**



Si dimensions de la boucle petites devant λ
alors tension induite :

$$U = S\mu_0 \Delta H / \Delta t$$

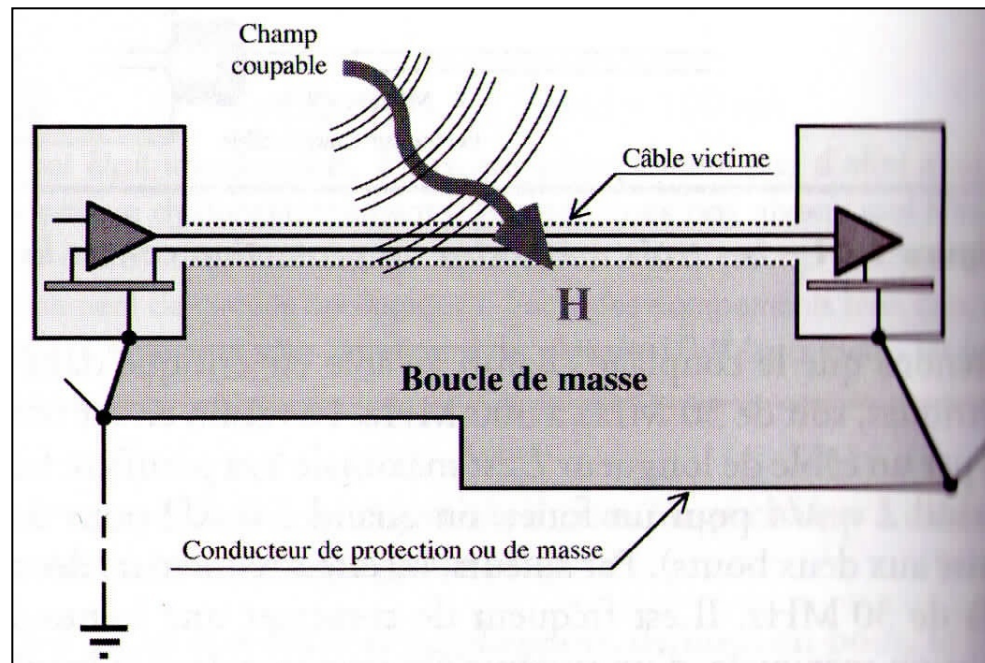
Réduction de ce couplage :

- réduction de la surface de la boucle victime
- réduction du champ magnétique coupable

Couplage champ à boucle

Phénomène physique

La cause est un champ magnétique variable, l'effet une tension induite dans une boucle interceptant du flux magnétique. Un courant va circuler ($I=U/Z$ avec U : tension induite et Z : impédance). Des boucles de masse entre les câbles et les conducteurs de masse sont inévitables. Leur surface doit être aussi faible que possible → Pires problèmes de la CEM



Couplage champ à boucle

Effet du champ magnétique dans une petite boucle

Le flux d'induction magnétique Φ (en Weber) est le produit de l'induction magnétique B (en T) par la surface de la spire. De plus B est égal au produit du champ magnétique H par μ_0 .

La tension induite dans une petite boucle (plus grande dimension inférieure à $\lambda/4$) d'une seule spire dans l'air vaut :

$$U = S\mu_0 \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad \text{ou} \quad U = 2\pi f S\mu_0 H$$

avec U : tension induite dans la boucle en V

S : surface de la boucle en m^2

ΔH : amplitude crête à crête du champ magnétique en A/m

Δt : temps de montée du champ magnétique en s

f : fréquence du champ magnétique en Hz

H : champ magnétique en A/m

Ecran contre le champ magnétique difficile à réaliser

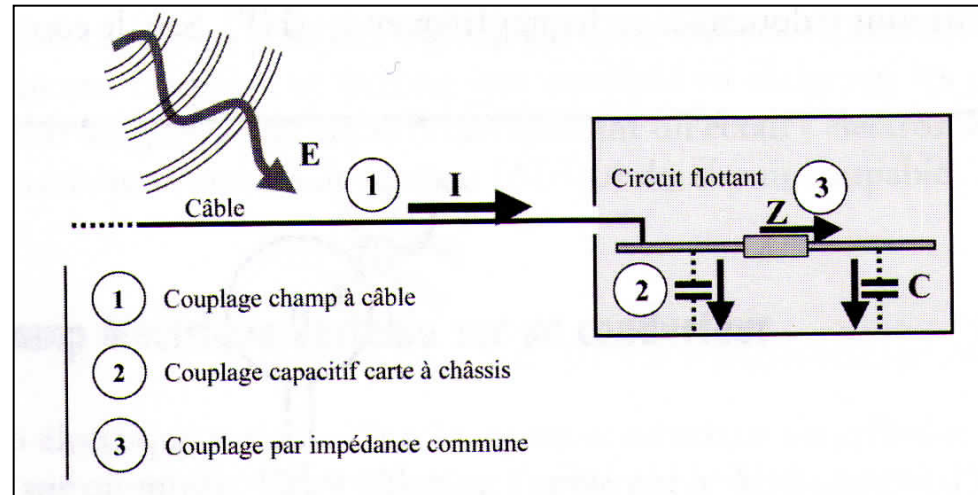
En HF, les effets des champs E et H sont superposés ($E=377H$). Il est donc impossible de se protéger contre l'un sans se protéger aussi contre l'autre

→ Tout conducteur de retour doit être routé aussi prêt que possible du conducteur d'entrée

4- Les 6 couplages

Exemple de combinaison de 3 couplages

Couplage par impédance commune est redoutable en BF (autres nuls en BF)
 et 5 sont redoutables en HF
 Parfois couplages simultanés



Réduction de ces couplages :

- si réduction suffisante du couplage champ à câble → OK (câble plaqué contre un plan de masse ou câble blindé, ajout d'un filtre relié à la masse du châssis)
- réduction du couplage par impédance commune (mailler le 0V)
- réduction du couplage carte à châssis (raccord soigneux en HF du potentiel de la carte à celui du châssis)

Bibliographie

Guy-Gérard CHAMPIOT, « Présentation générale de la compatibilité électromagnétique », Techniques de l'ingénieur, traité Génie Electrique (D1-300)

Alain CHAROY, « CEM Parasites et perturbations des électroniques - Tome 1 sources, couplages, effets », Edition Dunod

Alain CHAROY, « CEM Parasites et perturbations des électroniques - Tome 3 blindages, filtres, câbles blindés », Edition Dunod

Yvon MORI, « Compatibilité électromagnétique : une introduction », Volume VIII, Edition Hermès

Pierre DEGAUQUE, Ahmed ZEDDAM, « Compatibilité électromagnétique: des concepts de base aux applications – Tome 2 », Edition Hermès



C.E.M

Précautions d'usage pour limiter les couplages

L. Pécastaing

laurent.pecastaing@univ-pau.fr

05 59 84 53 24

3- Définition des sources de perturbations

Parmi les **sources de perturbation**, on peut distinguer :

- les sources naturelles (les phénomènes atmosphériques, l'effet des rayons ionisants, les impulsions électromagnétiques...),
- les sources électrostatiques (friction de matériaux en mouvement ou du corps humain sur des matériaux textiles),
- les sources électrochimiques et thermoélectriques (phénomène d'électrolyse, effet de thermocouple),
- les sources technologiques (appareils dont l'activité électrique est de nature à se propager dans l'environnement).