



HAMExpo 22 Octobre 2022 au Mans

Compatibilité Électromagnétique (CEM)
F4GSC

Introduction



Qu'est-ce-qu'une perturbation d'origine électromagnétique?



- Tout **phénomène d'origine électromagnétique** susceptible de **dégrader** le fonctionnement d'un système électrique ou électronique.



Perturbations d'origine électromagnétique large bande apparaissant dans nos bandes amateurs et qui perturbent nos communications radio:

- Émissions d'amateur → activité de transmission intentionnelle et voulue
- Transmission d'une perturbation → activité non voulue n'ayant aucun rôle fonctionnelle

Plan de la présentation



- Qu'est-ce que la *Compatibilité électromagnétique (CEM)*?
- Quelle est l'origine de ces perturbations électromagnétiques (P.E)?
- Sont-elles dangereuses?
- Comment s'en protéger?
- A quoi sont-elles dues?
- Protections contre les P.E
- Conclusions

Qu'est-ce que la CEM?



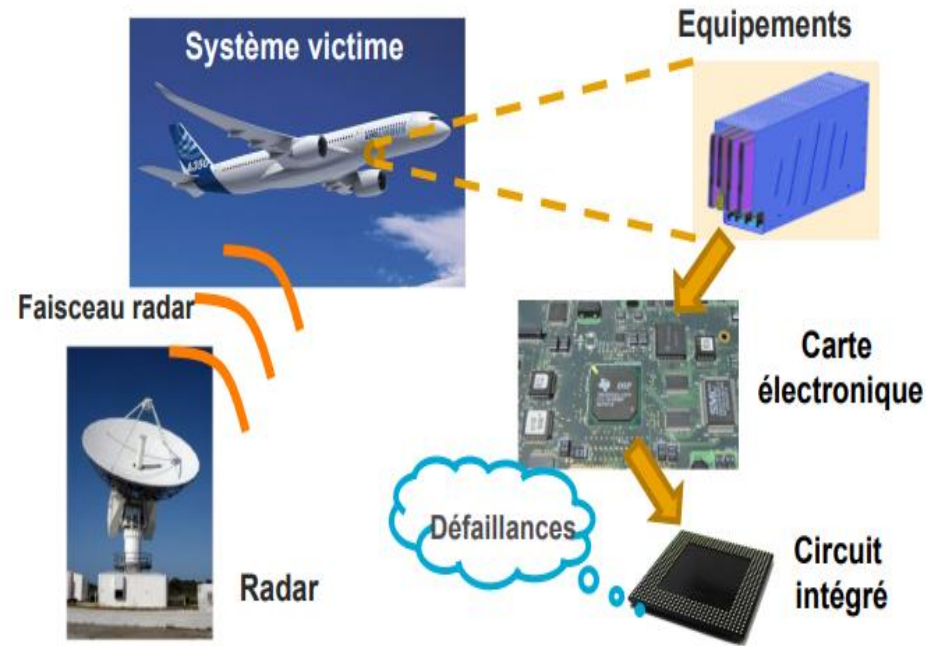
Compatibilité électromagnétique d'un système (CEM), aptitude à:



Fonctionner dans un **environnement électromagnétique partagé** par d'autres systèmes électroniques pouvant générer des P.E (**Immunité**)



A ne pas perturber les équipements qui se trouvent dans cet environnement commun (**Emissivité**)



Note: La CEM a donc deux propriétés: l'émissivité et l'immunité



D'où proviennent ces P.E?

D'où proviennent ces P.E?

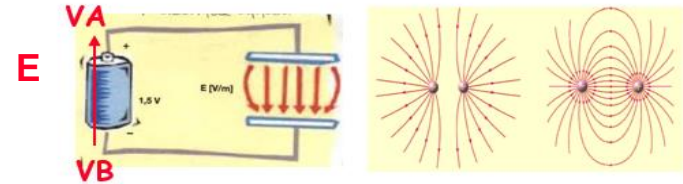


Champs électromagnétiques générés par le fonctionnement des équipements électriques/électroniques (lois générales de l'électromagnétisme et de l'électricité)



La source de tension crée une DDP ($V_A - V_B$) et un champ électrique E entre cette DDP (Faraday).

$$E \left(\frac{V}{m} \right) = \frac{V_A - V_B}{d}$$

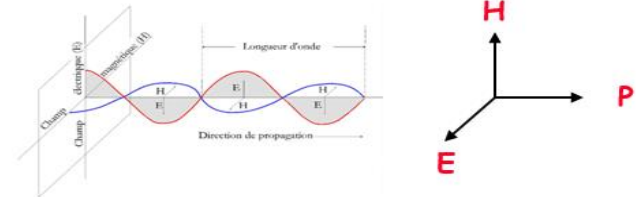


La circulation d'un courant de conduction ou de déplacement i crée une excitation magnétique H (Ampere).

$$H \left(\frac{A}{m} \right) = \frac{i}{2\pi d}$$



Les champs E et H forment une onde électromagnétique (onde plane) qui se propage dans l'espace libre (Maxwell).



Note: Tout système électronique/électrique génère des P.E → Potentiellement un perturbateur

D'où proviennent ces P.E?



- Champ proche et lointain

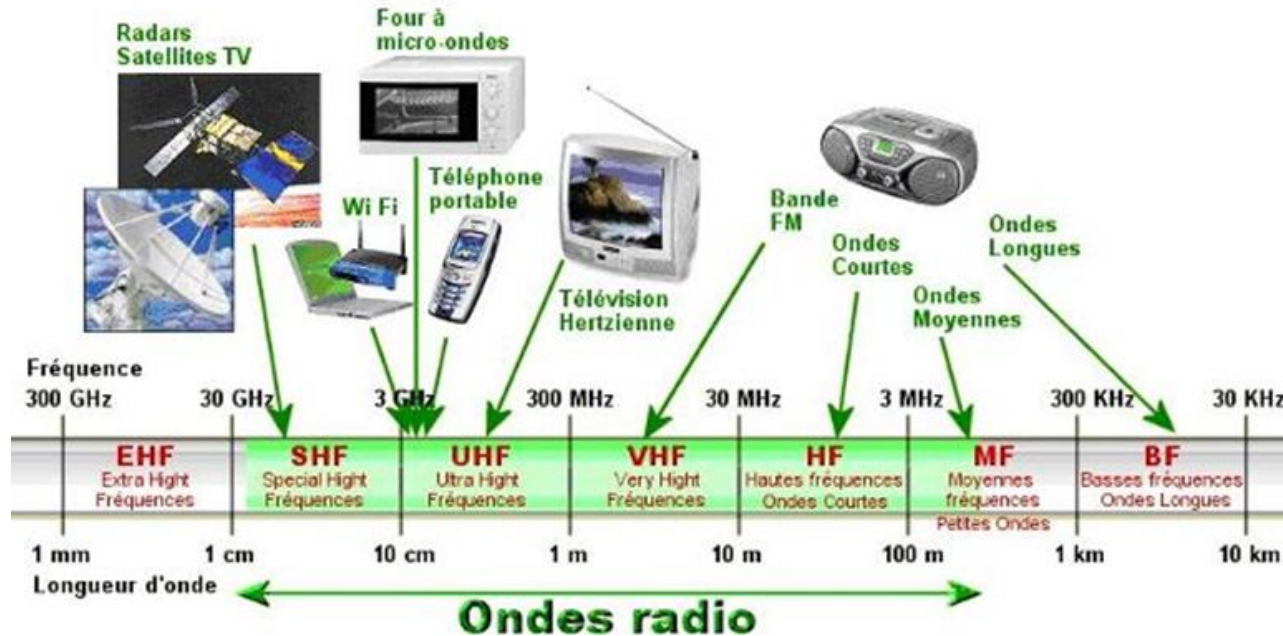
Critère de Fresnel

Champ PROCHE	$d = \frac{\lambda}{2\pi}$	Champ LOINTAIN
$d < \frac{\lambda}{2\pi}$		
Le champ E ou H domine en fonction de l'impédance de l'antenne.		Les champs E ou H sont couplés à 90°C et l'impédance est de 377ohms.
<p style="text-align: center;">E-field</p> <p style="text-align: center;">$Z_{ant} > 377\text{ohms}$</p>	<p style="text-align: center;">H-field</p> <p style="text-align: center;">$Z_{ant} < 377\text{ohms}$</p>	<p style="text-align: center;">$Z_{ant} = 377\text{ohms}$</p>
Faraday,Coulomb,Amper,Lorentz,...		Maxwell,Hertz,Marconi, ...

D'où proviennent ces P.E?



Ces champs perturbateurs peuvent occuper un large spectre de fréquences



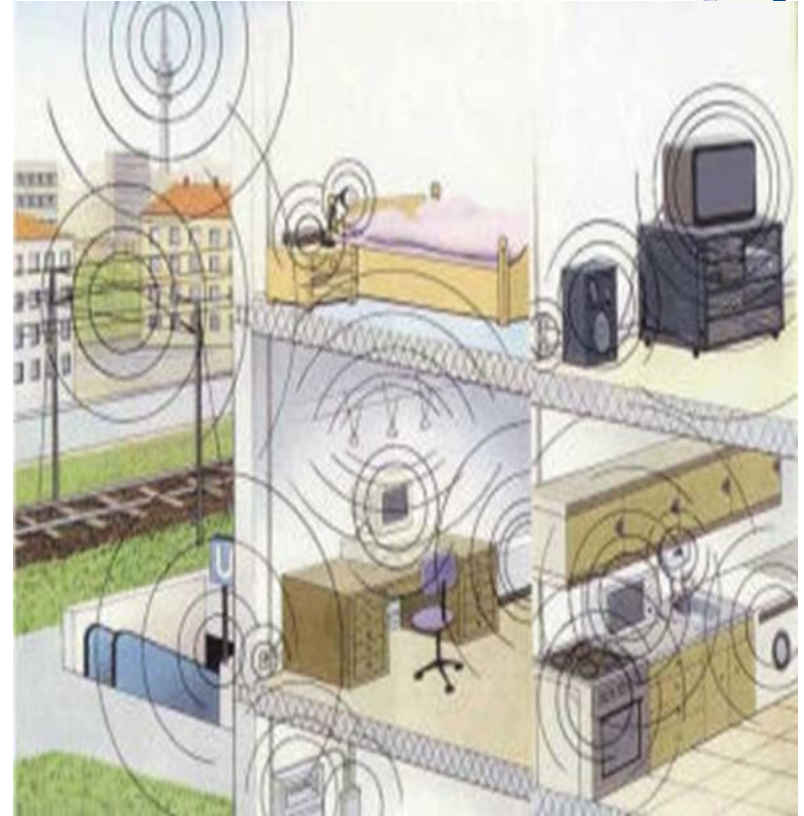
D'où proviennent ces P.E?



Champs perturbateurs et les équipements **partagent** un même espace électromagnétique (espace public hertzien).



La **qualité de l'installation** et le **respect des normes** associées aux différents équipements garantiront un bon niveau de **CEM**.



D'où proviennent ces P.E?



La présence de ces champs peuvent perturber le **fonctionnement attendus des équipements:**



Brouillage sur une TV analogique



Brouillage sur une TV numérique





Sont-elles dangereuses?

Sont-elles dangereuses?



Oui dans les années 1970



Début de l'émergence de l'électronique embarquée et des communications électroniques



Aucun contrôle sur les P.Es générés par les dispositifs



Les assurances imposent la mise en place de normes CEM car les accidents leurs coûtent chers



ABS déclenché par une EMI.



Fauteuils déclenchés par une CB.



Défibrillateur perturbé par les appels radio de l'ambulance. Le patient mort avant d'atteindre l'hôpital.



Un hélicoptère s'écrase du à une l'électronique insuffisamment protégée contre la radiodiffusion.

Sont-elles dangereuses?



Aujourd'hui



Les normes CEM se sont imposées dans tous les domaines (grand public, automobile, spatial, médical...)



Peu d'accident mortels sont relatés depuis



Surtout des brouillages dus à une densité d'équipements électroniques de plus en plus importante



Comment s'en protéger?

Comment s'en protéger?



L'équipement électronique doit être compatible avec son environnement électromagnétique

Il doit respecter la norme associée à son domaine d'application:



Génère des perturbations respectant les **limites des niveaux d'émission**



Possède un **niveau d'immunité** garantissant les performances pour lequel il a été conçu

Comment s'en protéger?



Utilisation des normes CEM

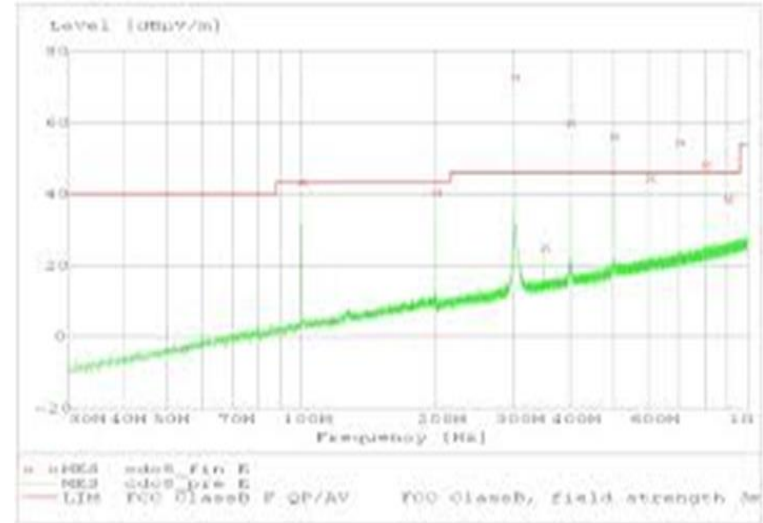
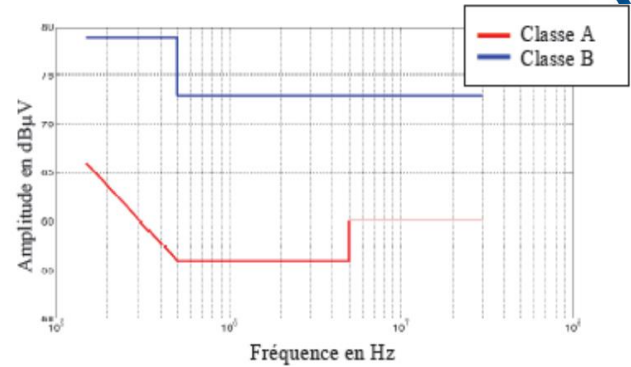


Garantie le fonctionnement optimal de plusieurs systèmes partageant un même environnement électromagnétique en spécifiant:

- Les limites maximales des niveaux d'émission
- Les limites minimales des niveaux d'immunité
- Les moyens d'essais, la procédure et les limites à respecter



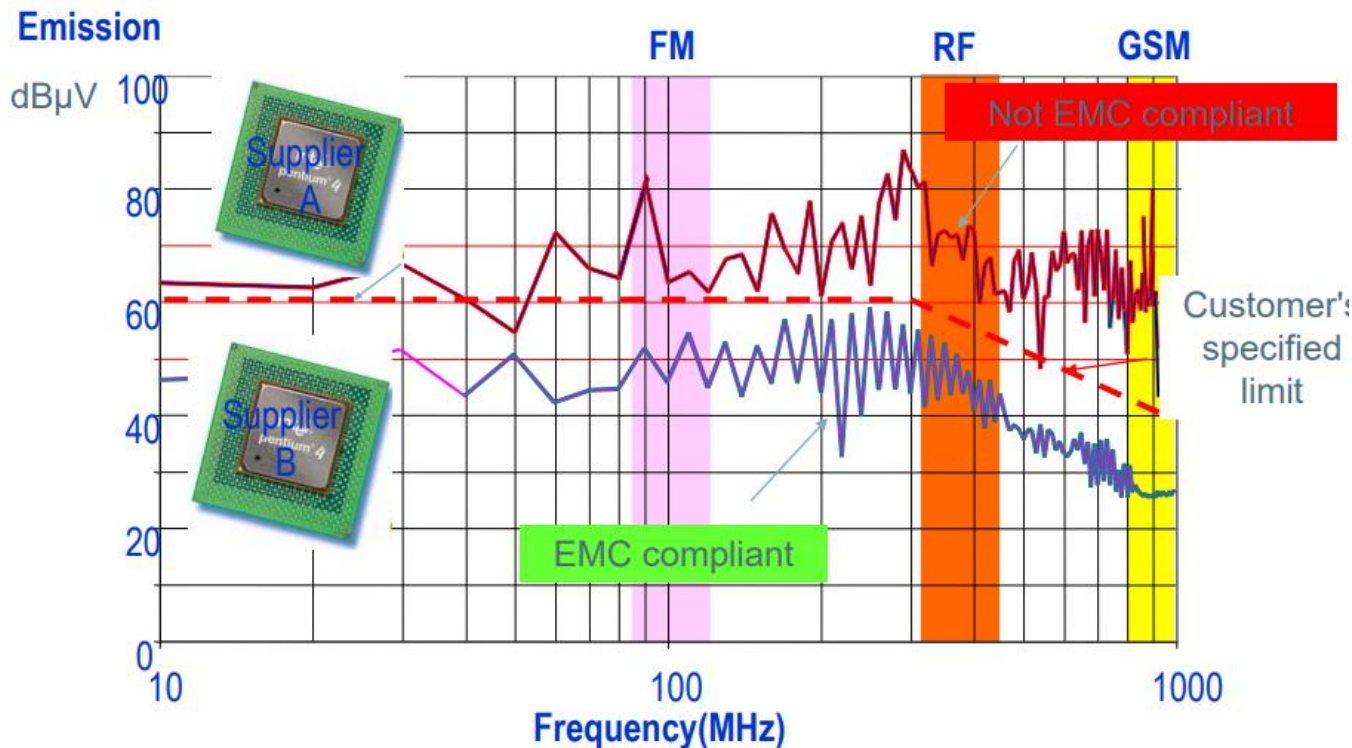
Garantie les mêmes résultats de mesure indépendamment du lieu où sont faites les mesures



Comment s'en protéger?



Exemple de non conformité aux normes CEM



Comment s'en protéger?



Marquage CE obligatoire depuis 1996 pour tous les équipements entrant sur le marché européen.

La démarche:

- c'est au fabricant de vérifier si son produit entre ou non dans le champ d'application d'une ou de plusieurs directives
- il en est l'ultime responsable
- il peut
 - soit **autodéclarer** la conformité du produit
il procède lui-même à toutes les vérifications
 - soit faire appel à des organismes de contrôle, appelés **organismes notifiés**
- il doit pouvoir en tout temps montrer sa démarche et le résultat de ses test en fournissant son **dossier technique de construction**, en cas de plainte
- en cas de tricherie avérée, son produit est interdit de vente



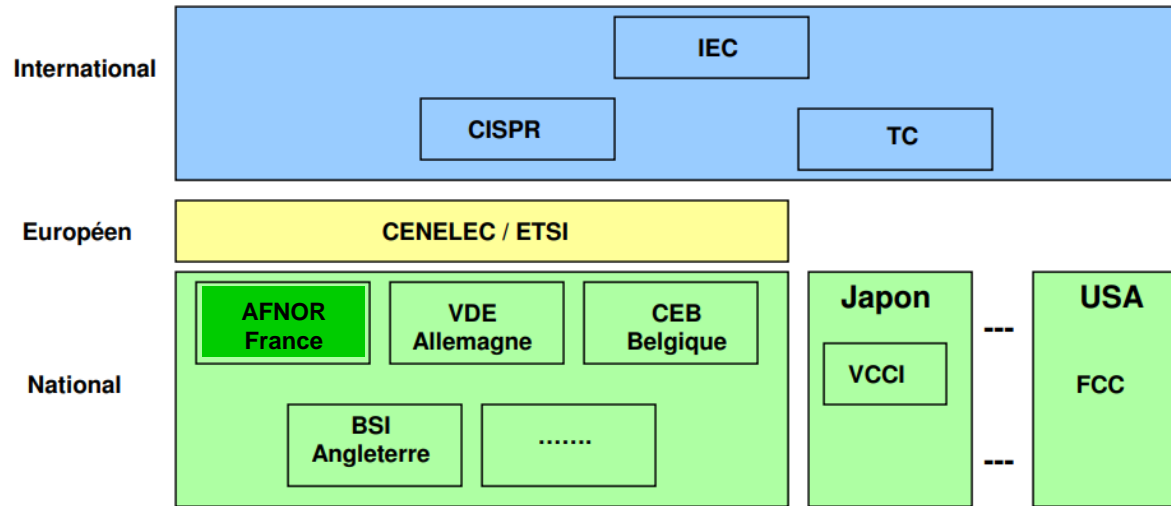
Comment s'en protéger?



- Les normes concernent

- les **appareils** (doivent être conformes)
produit fini pourvu d'une fonction intrinsèque mis sur le marché en une seule entité
 - exemple : moniteur vidéo, clavier d'ordinateur
- les **systèmes** (doivent être conformes)
association de plusieurs appareils conçus pour accomplir une tâche donnée et mis sur le marché comme une seule entité fonctionnelle
 - exemple : PC, imprimante
- les **installations**
association de systèmes ou d'appareils commercialisés séparément
 - exemple : installation d'extrusion des câbles et tubes plastiquesseuls les systèmes et appareils individuels doivent être conformes
les conditions d'installations préconisées par le fabricant doivent être respectées

- Les organismes de normalisation



Comment s'en protéger?



- Les familles de normes du CENELEC

- EN + numéro

- **Les normes de base ou génériques**

- Précisent les **méthodes d'essai et les limites** applicables par défaut pour les **appareils non spécifiques**.

- **Les normes spécifiques**

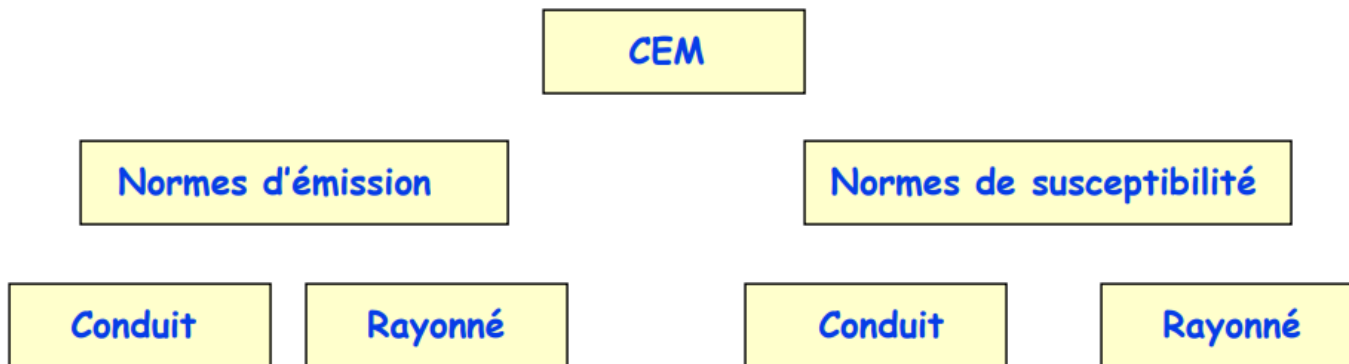
- Précisent les **méthodes d'essai et les limites** applicables à une catégorie d'appareils ou de **produits spécifiques**.

- **Les normes fondamentales**

- Ces normes sont à la base d'autres normes et constituent une **référence en terme de méthodes de mesure ou d'essai**.

Comment s'en protéger?

- Champ d'application des normes



Comment s'en protéger?



Exemple de moyen d'essais

- Mesures des émissions en champ lointain
 - Chambre anéchoïde → Simule un espace champ libre (pas de réflexion sur les parois de la chambre)





Quelle est l'origine de ces P.E?

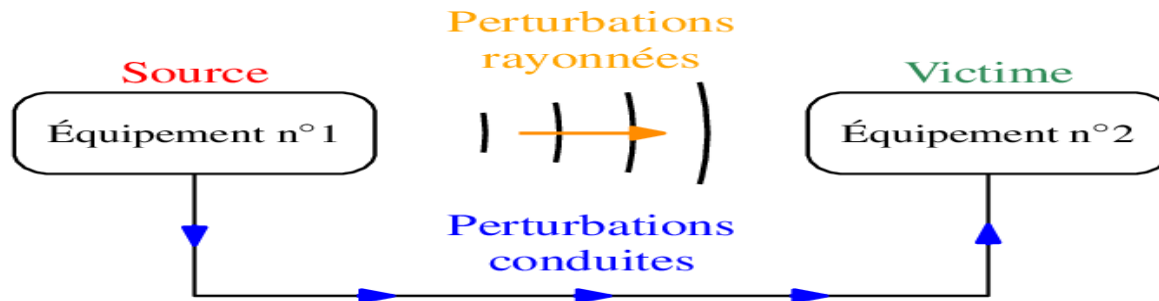
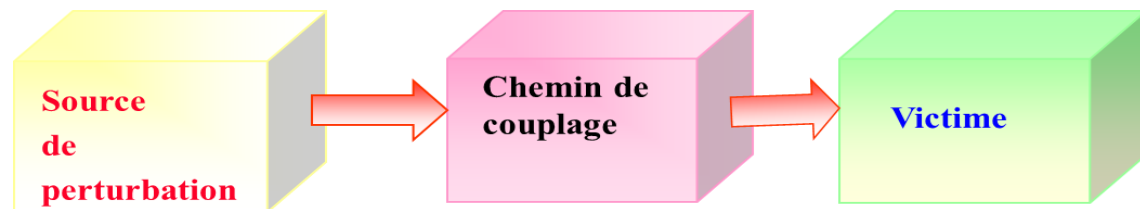
Quelle est l'origine de ces P.E?



Trois acteurs



- Source de perturbation
- Une victime
- Un chemin de couplage entre la victime et la source (transfert d'énergie)



Quelle est l'origine de ces P.E?



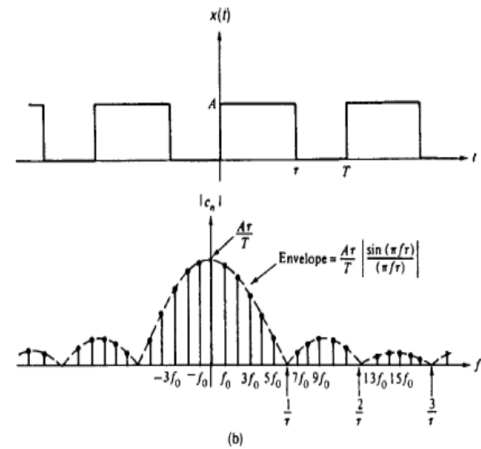
Sources

➤ Deux types de signaux:



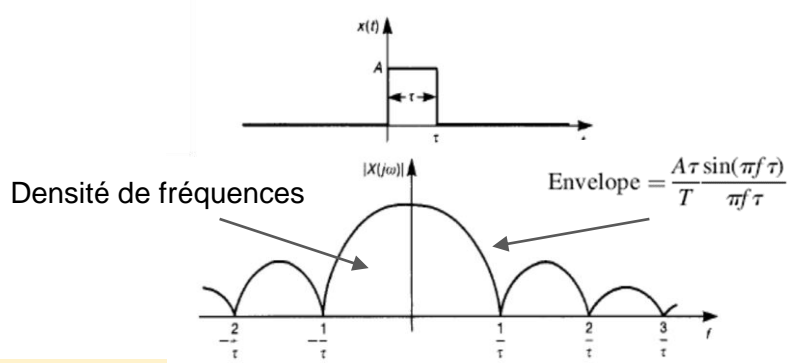
➤ Périodiques

- Qui se répètent sans fin (horloges, circuits numériques, émissions FM des stations broadcast, alimentations à découpage...)



➤ Non périodiques

- Qui apparaissent de manière temporaire et fugitive (ESD, transitoires rapides, foudre, contact de fermeture et d'ouverture....)



Note: La nature des signaux impactent les développements CEM

Quelle est l'origine de ces P.E?

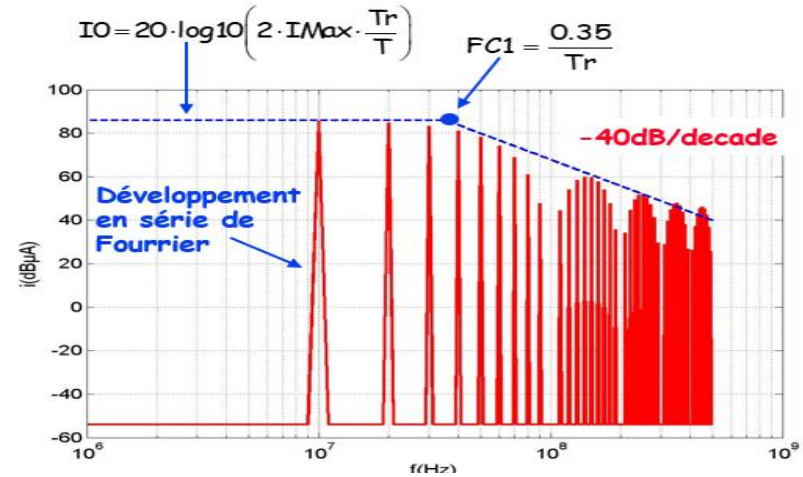
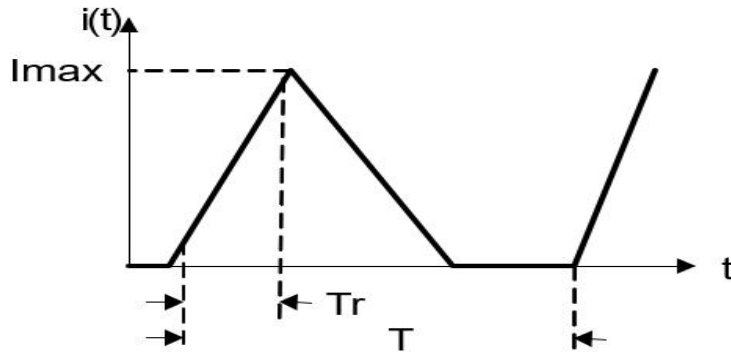


Sources

➤ Forme triangulaire



Très souvent les courants d'alimentation des circuits intégrés CMOS et des étages de puissance de commutation



Exemple: $TR=10\text{ns}$

$FC1=35\text{MHz}$

Quelle est l'origine de ces P.E?

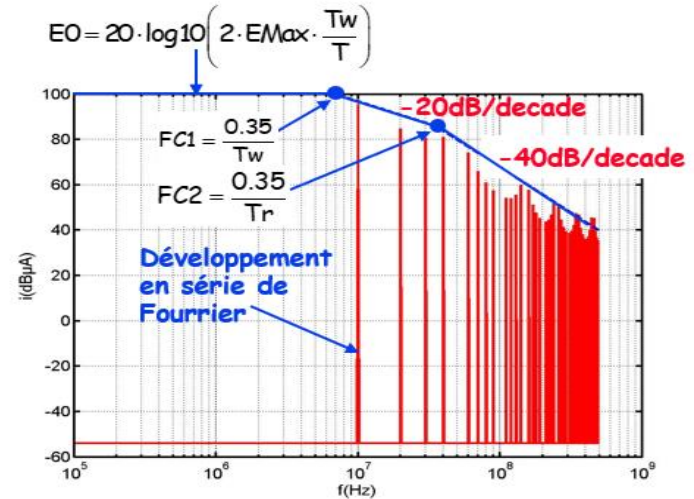
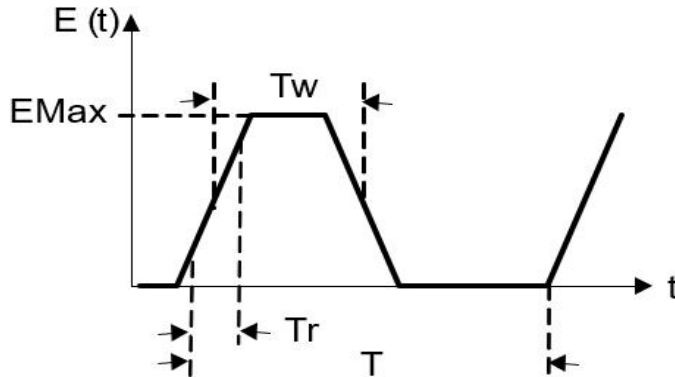


Sources

➤ Forme trapézoïdal



Signaux numériques: horloges, bus de données, d'adresses, bus de communication: USB, Série, I2C, SPI...



Exemple: $T_w=40ns$, $T_r=10ns$

$FC1=8.75MHz$, $FC2=35MHz$

Quelle est l'origine de ces P.E?



Sources

Temps de transition des signaux



Plus ils sont **courts** et plus leur spectre est **large bande**



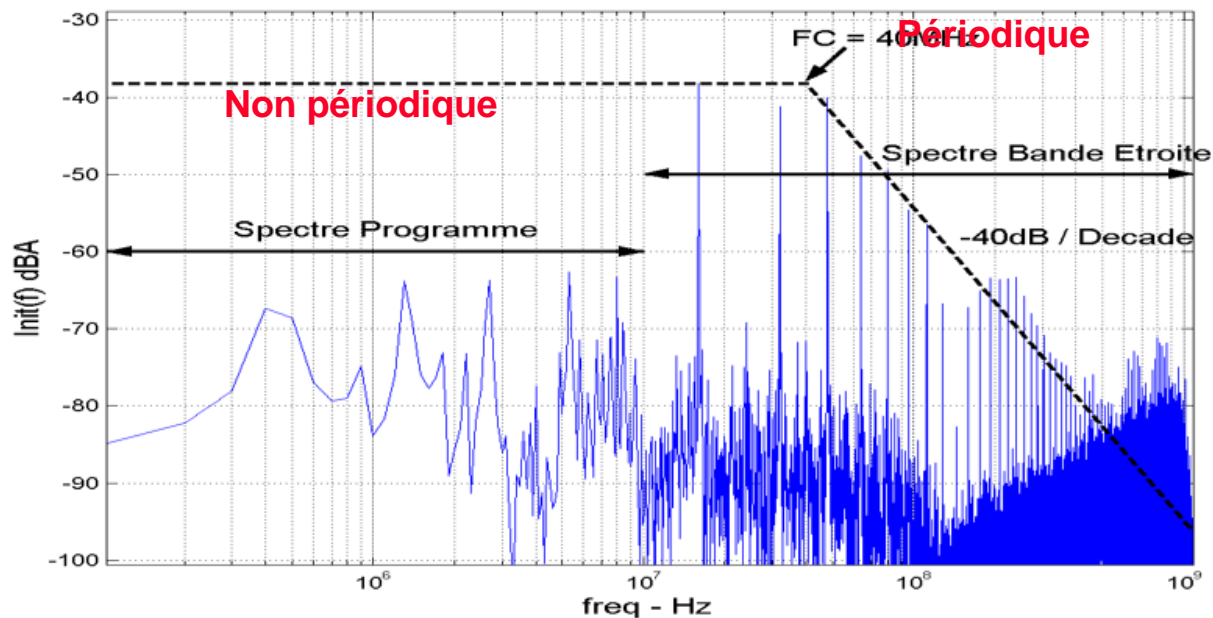
Plus ils ont **rapides** et plus les **contraintes CEM** augmentent

Quelle est l'origine de ces P.E?



Sources

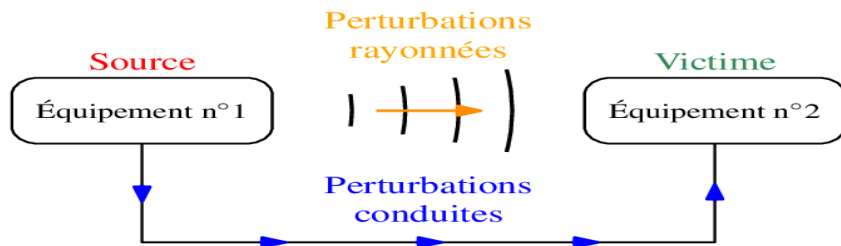
Exemple de signatures spectrales du courant consommé par un circuit intégré



Quelle est l'origine de ces P.E?

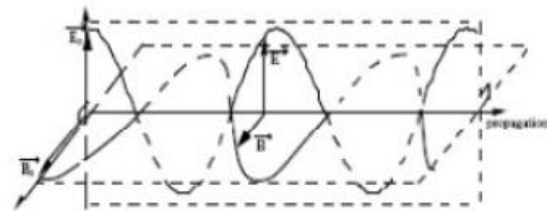


Chemins de couplage



➤ Mode rayonné

- La perturbation se propage au travers d'un diélectrique (induction inductive, capacitive et rayonnement hertzien)



➤ Mode conduit

- Les perturbations se propagent par les connexions physiques de type piste, câble, fils...

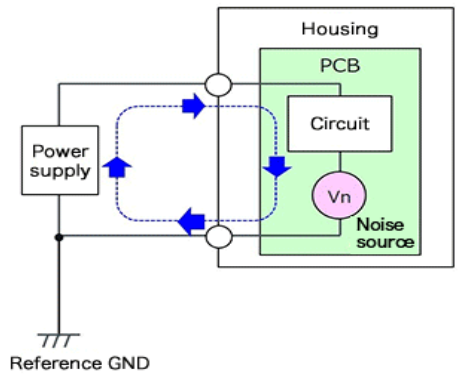


Quelle est l'origine de ces P.E?



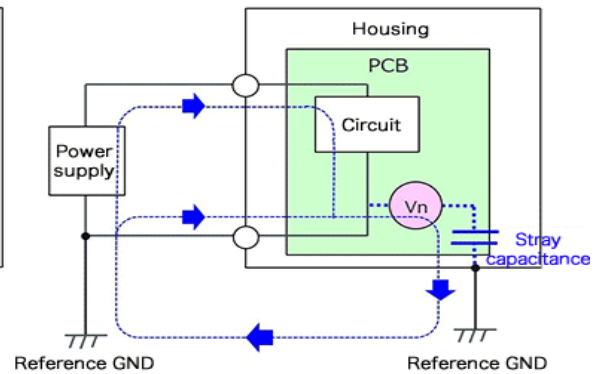
Nature du mode de propagation des P.E: Mode commun et différentiel

Differential (normal) mode noise



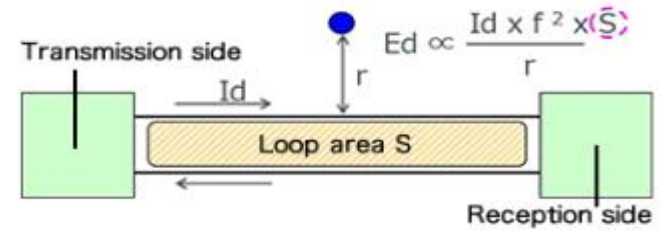
- A mode in which a noise current flows on the same path as the power supply current
- Noise voltage occurs across power supply lines

Common mode noise

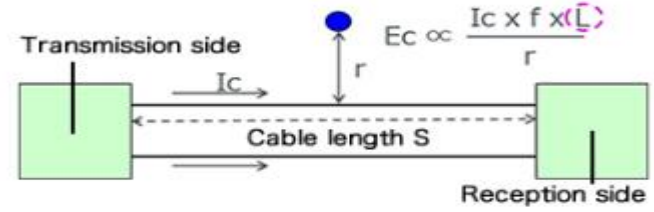


- Noise voltage does not occur across power supply lines
- Noise voltage occurs across power supply line and reference GND
- Noise currents flow in the same direction on the power supply positive and negative sides

Radiation due to differential mode noise



Radiation due to common mode noise



Note: Dans le cas d'un câble, le mode commun prédomine en général sur le mode différentiel -> longueur du câble à comparer à la surface développée entre les différents conducteurs.



Quelle est l'origine de ces P.E?



Victimes



Tout dispositif dont le fonctionnement est dégradé et dont les spécifications électriques ne sont plus respectées:

- Fonctions analogiques:

- *Horloge → Gigue de phase, modulation d'amplitude...*
- *Convertisseur analogique/numérique → perte de résolution (ex: 8-bits au lieu de 10 -bits)*
- ...

- Fonctions numériques:

- *Distorsion dans les signaux → violation des temps propagation, de temps de maintien...*
- ...

Quelle est l'origine de ces P.E?



Exemple la foudre

➤ Perturbation naturelle



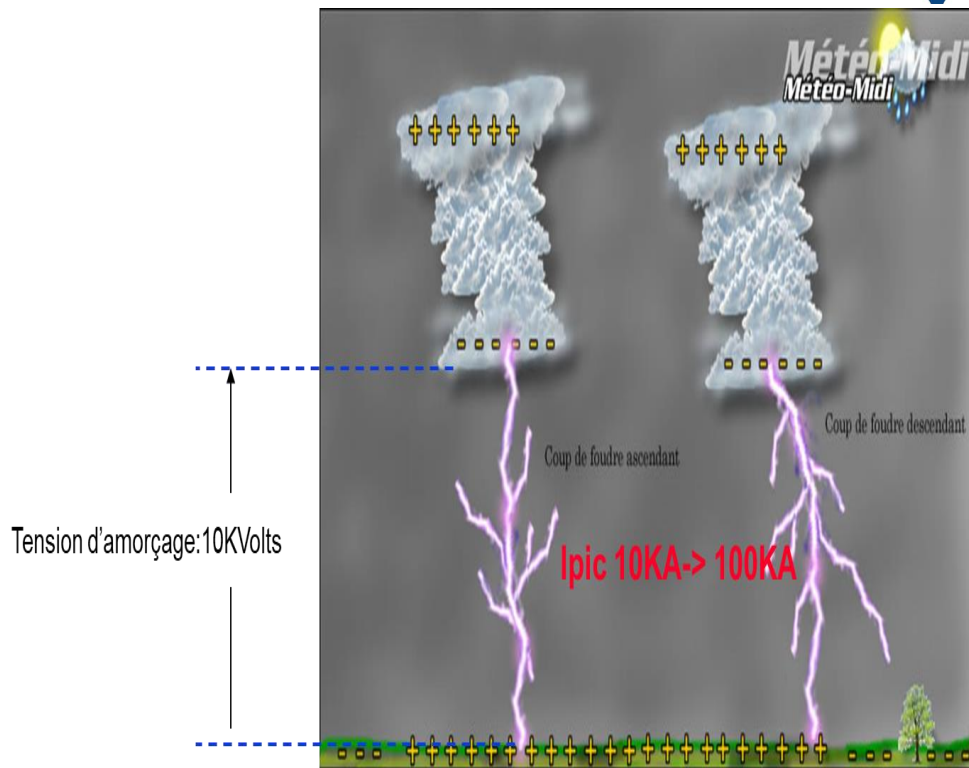
2 principales causes

- Champ magnétique intense
- Courant de conduction dans le sol



2 conséquences

- Forte surtension dans les réseaux électriques
- Electrocution

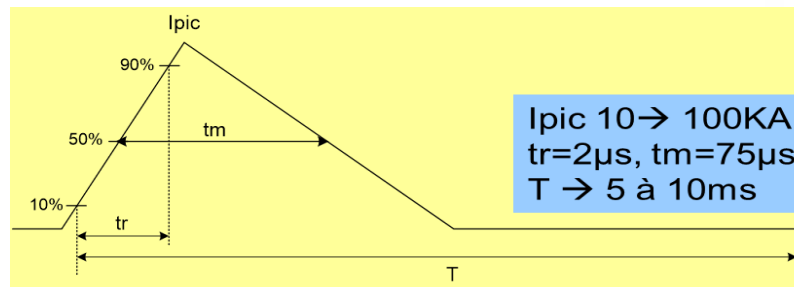


Quelle est l'origine de ces P.E?



Exemple la foudre

- Caractéristiques de l'impulsion foudre



- Effets électriques instantanés de la foudre:



Élévation des potentiels le long des structures verticales.



Élévation des potentiels autour du point d'impact (terre).



Rayonnement d'un fort champ électromagnétique.

Quelle est l'origine de ces P.E?



Exemple la foudre

- élévation du potentiel au point d'impact due à la résistance du sol entre deux points

$$U(V) = 0.16 \cdot I \cdot \rho \cdot \left(\frac{1}{D2} - \frac{1}{D1} \right)$$

I (A) : Courant foudre au point d'impact.

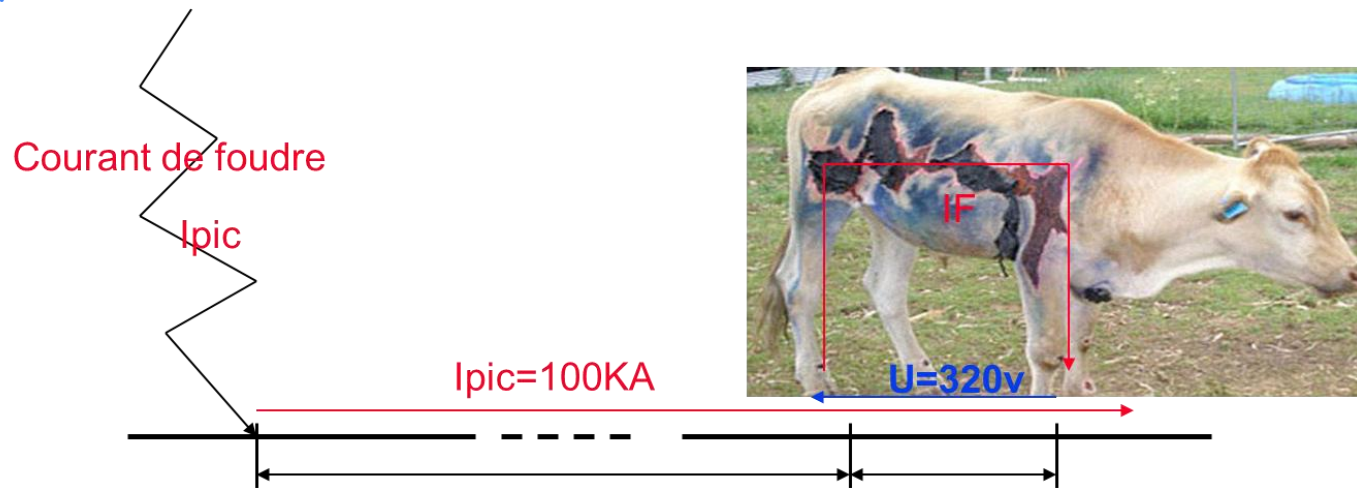
$D2, D1$ (m) : Distances par rapport au point d'impact foudre.

ρ ($\Omega \cdot m$) : Résistivité moyenne du sol.

Quelle est l'origine de ces P.E?



Exemple la foudre

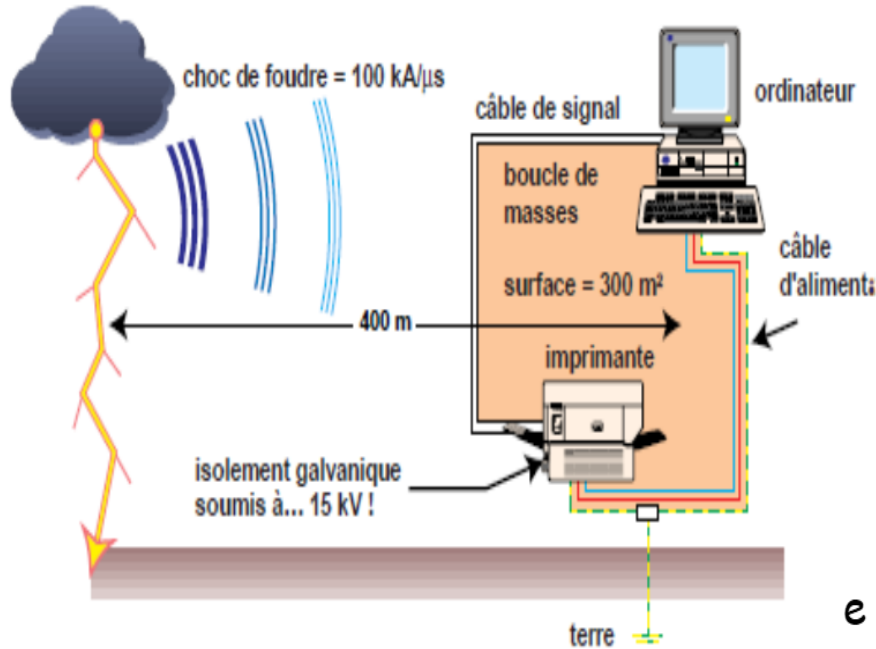


$$\rho(\Omega \cdot m) = 1000 \quad I_{pic} = 100KA$$

$$U = 0.16 \cdot 100kA \cdot 1000 \cdot \left(\frac{1}{100} - \frac{1}{102} \right) = 320v$$

Quelle est l'origine de ces P.E?

Rayonnement et induction magnétique



$$e = -\frac{d\phi}{dt} = \frac{dB}{dt} \cdot S = -\mu_0 \cdot \frac{dH}{dt} \cdot S$$

$$H = \frac{i}{2\pi D}$$

$$e = -4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{10^5}{10^{-6}} \cdot \frac{1}{2\pi \cdot 400} = -15 \text{KVolts}$$



Protection contre les P.E

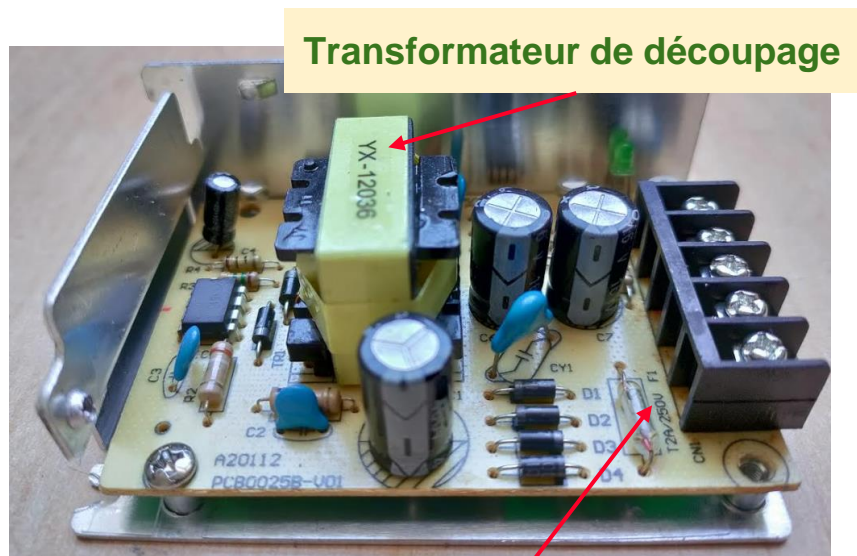
- *Exemple filtrage des alimentations*

Protection contre les P.E



Cas d'une alimentation à découpage à 8.56 € (Aliexpress)

- L'absence de filtrage sur le 220 v AC cause des PE sur les bandes basses décimétriques




Pas de filtre de mode commun et différentiel sur le 220v AC


Protection contre les P.E

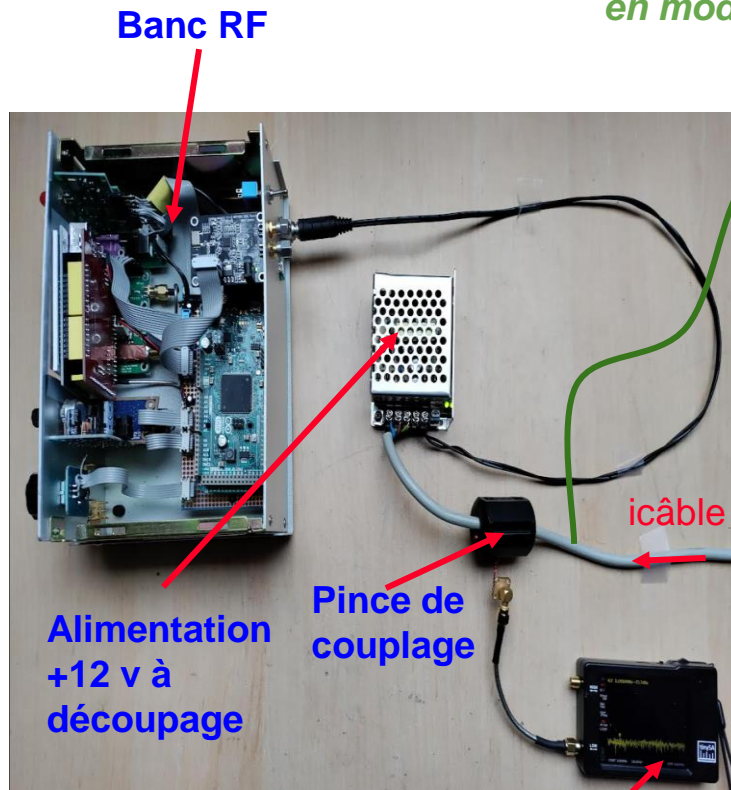


Filtrage des alimentations

 Banc RF connectée à l'alimentation à découpage +12 v.

 Le courant *icâble* est mesuré par la pince de couplage et l'analyseur de spectre (TinySA)

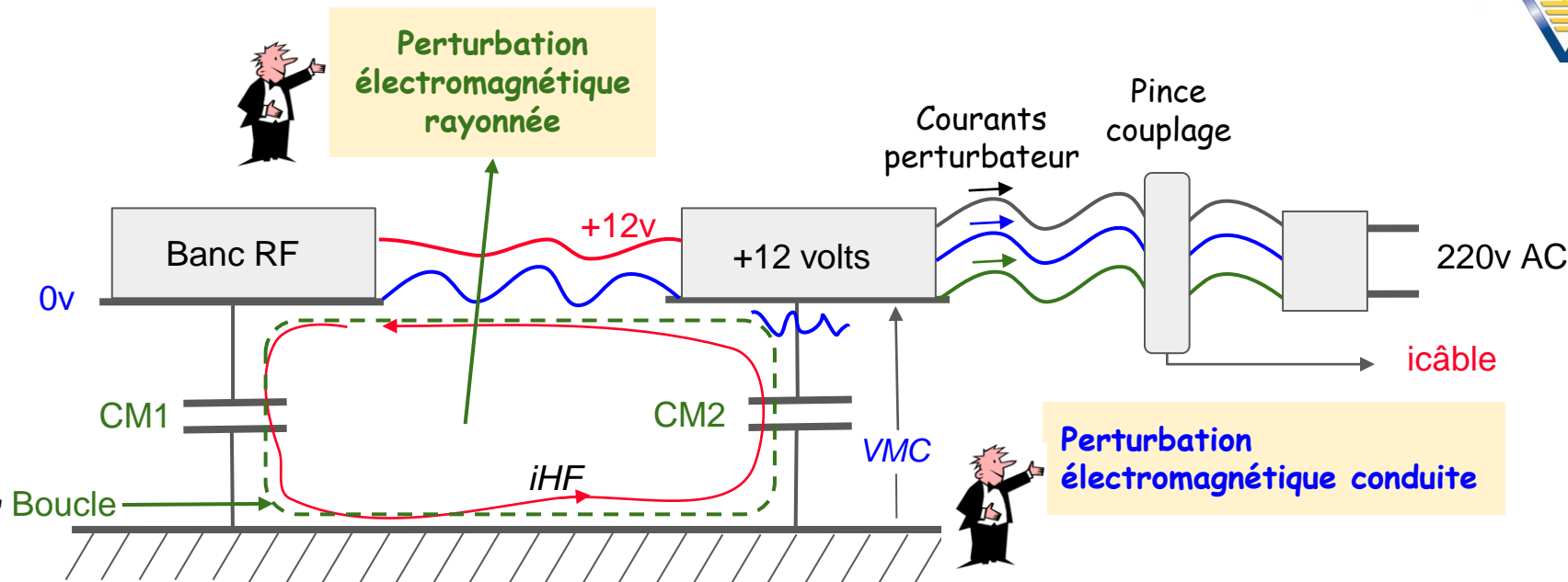
 Le câble et le courant rayonnent des perturbations électromagnétiques captées par l'antenne décimétrique.



Perturbation propagée en mode rayonné



Protection contre les P.E



CM1, CM2: Capacité de mode commun carte/chassis à terre ~ 10 pF à 100 pF

- Filtrage insuffisant de l'alimentation → Courants perturbateurs
- Provoque une perturbation de mode commun (VMC) aux bornes de CM2 → Courant $i_{HF} = VMC/Z_{CM2}$ (quelques dizaines de μA)
- La boucle se referme par CM1 et provoque une perturbation de mode rayonnée reçue par le 7300

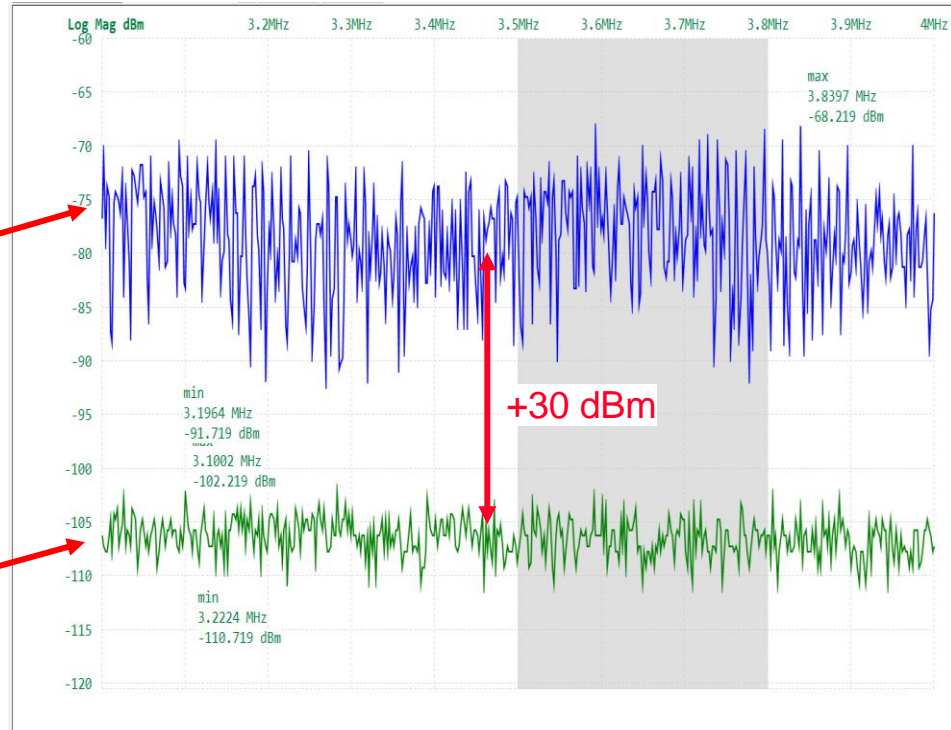
Protection contre les P.E



Mesures Mode rayonné



Mesures Mode conduit





L'alimentation génère -75 dBm de rayonnement

Protection contre les P.E



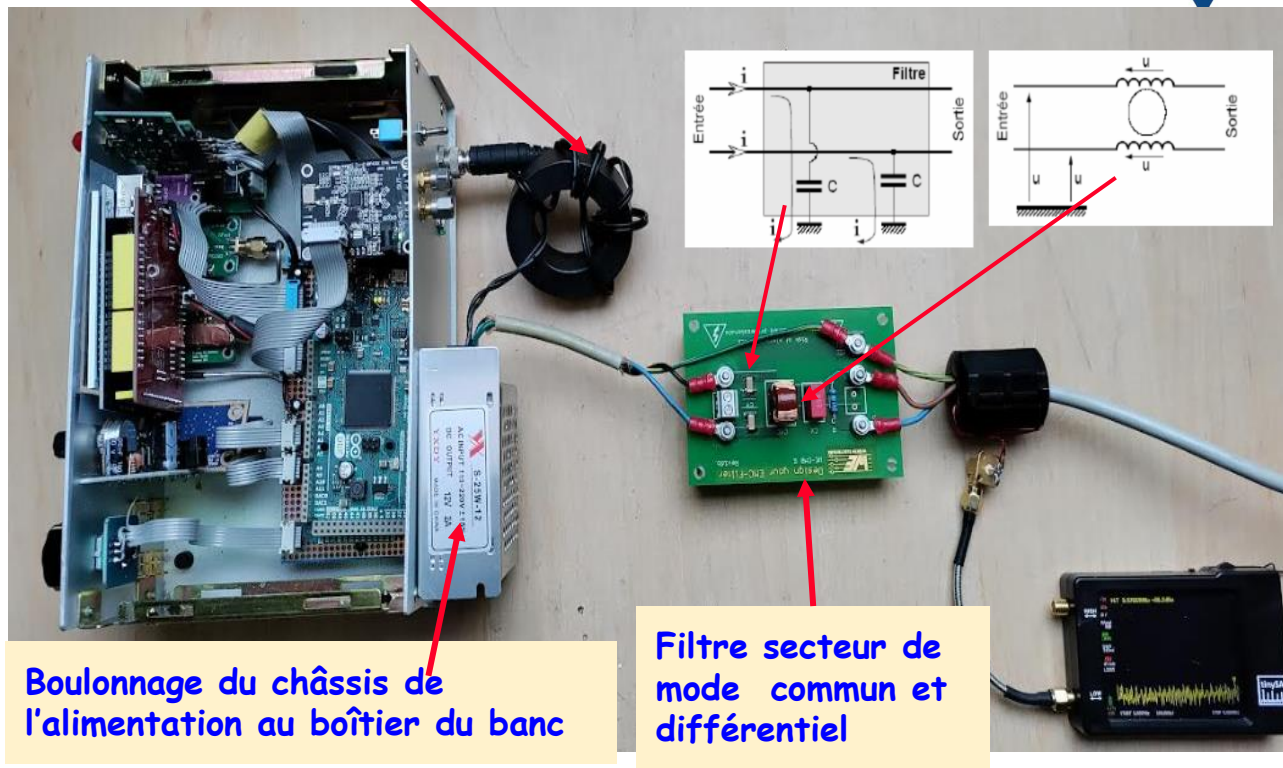
Solutions

 Les courants HF se rebouclent par la capacité parasite formée entre le boîtier métallique et la masse.

 Les courants de fuite sont de l'ordre ~ dizaines de μA .

 Mise en place des filtrages de mode commun.

Ferrite de mode commun



Note: Il n'y a pas de masse mécanique. Le zéro volt électrique est connecté au boîtier.

Protection contre les P.E

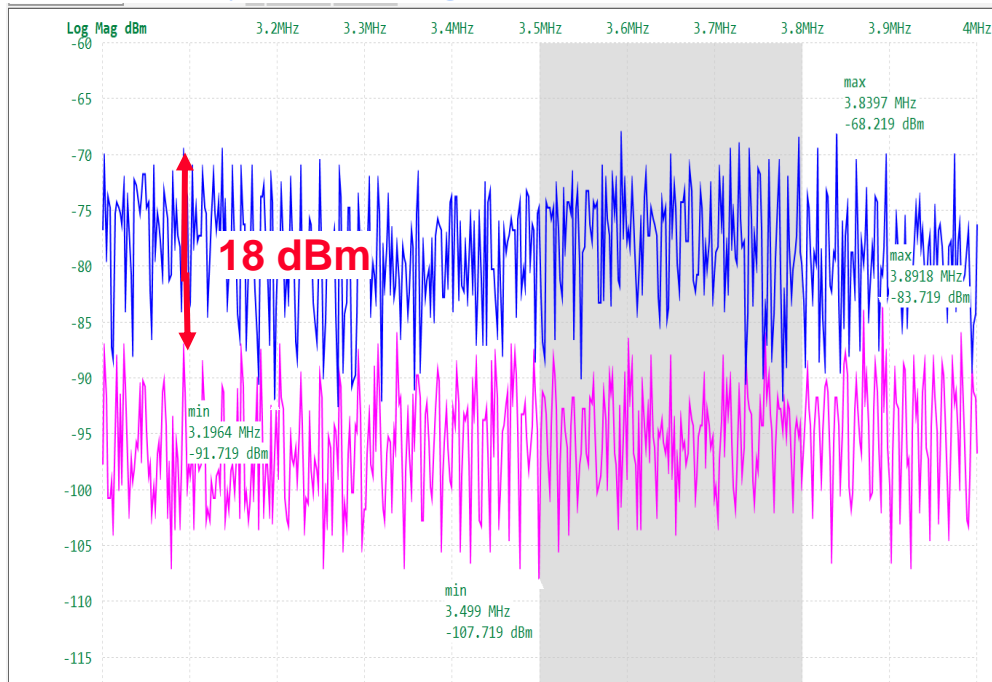
Performances du filtre CEM secteur



Protection contre les P.E



Résultats après filtrages



Réduction de 18 dB soit ~3 points de S-Mètre, S9 → S6

mesures Mode conduit



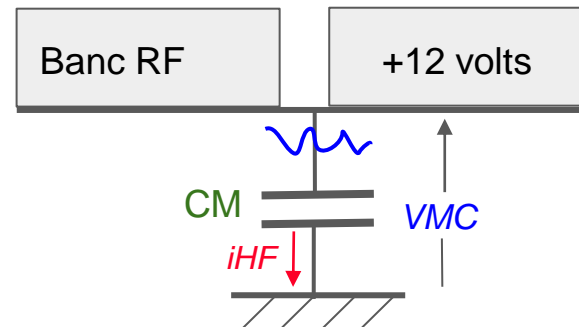
Mesures Mode rayonné

Protection contre les P.E



Autres solutions

- dissocier la masse mécanique et la masse électrique:
 - Connecter les masses mécaniques de l'alimentation et de l'application ensemble
 - la boucle est drastiquement réduite
 - Connecter les masses électriques ensemble
- Remplacer le Tore de Ferrite par une self de mode commun
 - Elle doit être insérée entre l'alimentation et l'application à alimenter (+V et mass)



Note: La self de mode commun n'a pas d'impact sur le mode différentiel (pas de chute de tension).



Protection contre les P.E



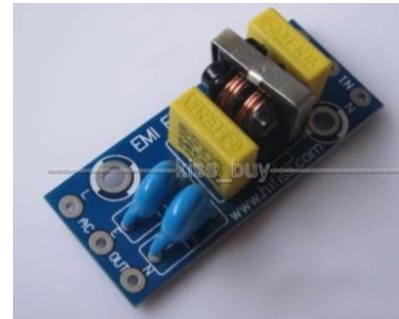
Différents filtres secteur de mode différentiel et mode commun



9€



1.75€



2€

Conclusions



Tout dispositif électrique/électronique fonctionnant génère des perturbations électromagnétiques



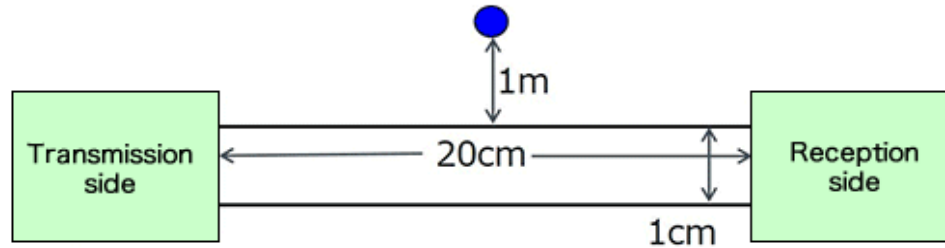
Les normes de CEM:

- assurent qu'un dispositif partageant un espace public hertzien pourra continuer à fonctionner comme prévu dans son cahier des charges
- fixent les limites à respecter, les moyens d'essais à utiliser ainsi que la procédure de mesure à suivre.



L'emploi du TinySA et de la pince couplage permet de mesurer et d'évaluer le gain d'une solution

Annexe 1 - Mode commun et différentiel



Differential mode noise

For a 100 MHz differential mode noise current of $1 \mu\text{A}$ flowing in a loop of area 20 cm^2

The value of the electric field intensity at a distance of 1 m (90°) is:

$$\begin{aligned} E_d &= 1.316 \times 10^{-14} \times \frac{I_d \times f^2 \times S}{r} \\ &= 1.316 \times 10^{-14} \times \frac{1\mu\text{A} \times (100\text{MHz})^2 \times (0.2 \times 0.01)}{1} \\ &= \mathbf{0.26\mu\text{V/m}} \end{aligned}$$

Common mode noise

For a 100 MHz common mode noise current of $1 \mu\text{A}$ flowing in a 20 m cable

The value of the electric field intensity at a distance of 1 m (90°) is:

$$\begin{aligned} E_c &= 1.257 \times 10^{-6} \times \frac{I_c \times f \times L}{r} \\ &= 1.257 \times 10^{-6} \times \frac{1\mu\text{A} \times 100\text{MHz} \times 0.2}{1} \\ &= \mathbf{25.1\mu\text{V/m}} \end{aligned}$$

Annexe 2 - Liens



<https://product.tdk.com/en/contact/faq/emc-components-0032.html#:~:text=What%20is%20the%20difference%20between%20common%20mode%20and%20differential%20mode%3F,-EMC%20Components%20%3E%20EMC&text=A.,in%20a%20pair%20of%20lines.>

https://www.youtube.com/watch?v=1PzVPP_X3-0

<https://www.youtube.com/watch?v=ONbGT35G6jo>

<https://www.youtube.com/watch?v=UOCsqNtRL74>