INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES TOULOUSE

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE ET INFORMATIQUE

Qualité Sécurité Environnement

Risques électromagnétiques – Introduction à la CEM

4ème année AE

Alexandre Boyer

alexandre.boyer@insa-toulouse.fr

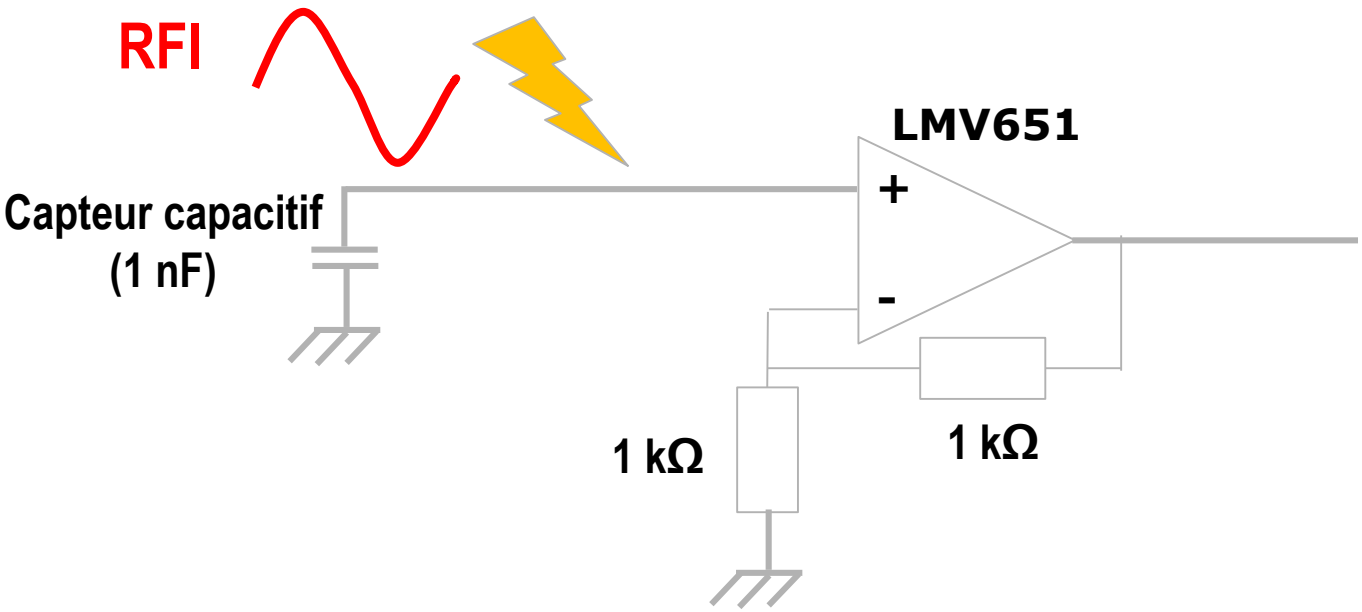
www.alexandre-boyer.fr

Perturbations électromagnétiques ? Un exemple concret

- **Collision d'un quai par le ferry Coastal Inspiration, le 20 décembre 2011, à Nanaimo au Canada.**
- **Des blesses légers et des dégats matériels**
- **Lié à la défaillance d'un amplificateur dans une chaine de mesure, due au coouplage d'une perturbation électromagnétique (EM)**
- **→ Défaut de la commande de reduction de vitesse**

Perturbations électromagnétiques ? Mise en évidence du problème

- **Montage amplificateur non inverseur :**



Effet sur la tension de sortie ?

- **Coupler sur le circuit une perturbation électromagnétique harmonique HF**
- **Observer l'effet sur la tension de sortie.**

Des effets sur la sûreté des systèmes électriques/électroniques ?

The Jammed Wheelchair: A Case Study of EMC and Functional Safety

Figure 1. An ordinary street with cars and an electric wheelchair: one environment – different EMC requirements.

http://www.emcs.org/acstrial/newsletters/fall04/63_67.pdf

- ✓ Quelle est l'origine des problèmes d'interférences électromagnétiques ?
- ✓ Quelles sont les exigences liées à la Compatibilité Electromagnétique ?
- ✓ Comment garantit-on le respect des recommandations de CEM ?
- ✓ Quelles sont les approches pour mettre en conformité CEM ?

I. Onde électromagnétique

II. Environnement électromagnétique

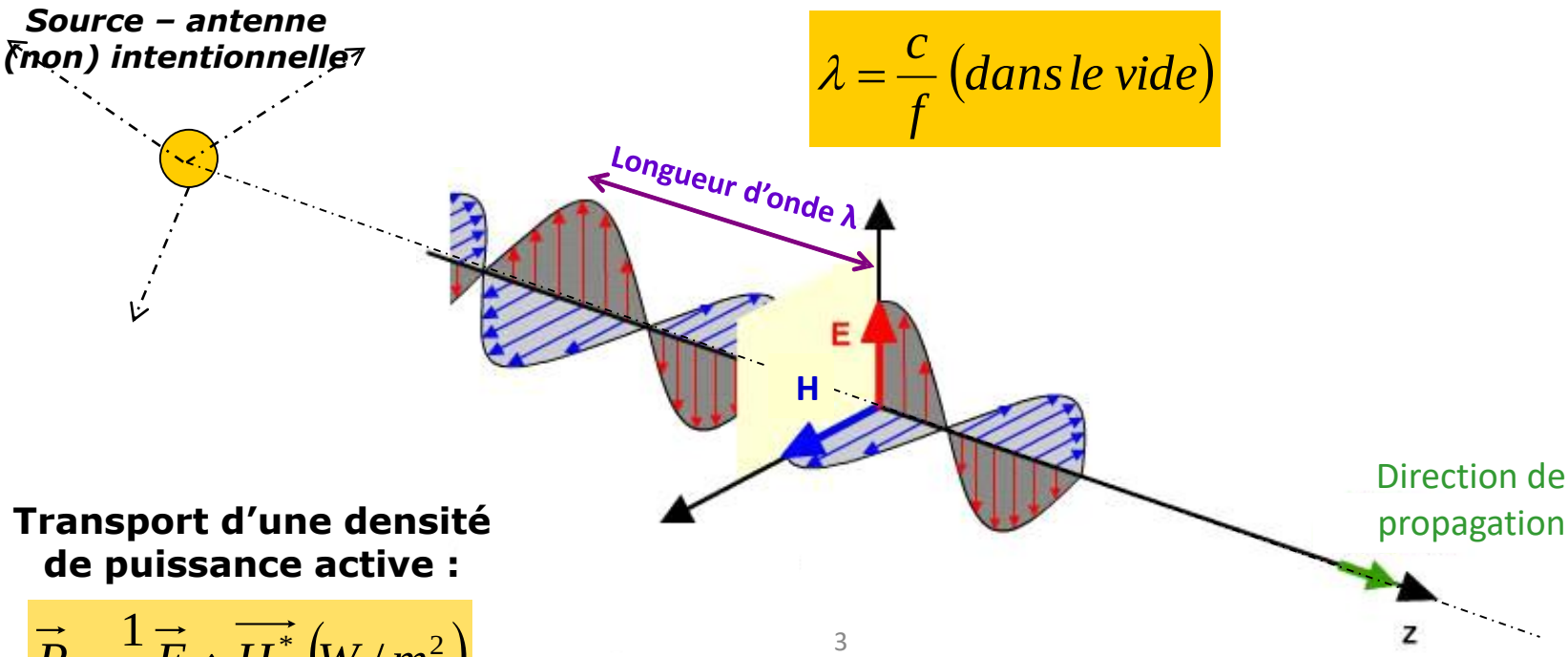
III. Interférences électromagnétiques

IV. Réglementation CEM

V. Mise en conformité CEM

I – Onde électromagnétique

Onde électromagnétique



$$\lambda = \frac{c}{f}\,(dans\,le\,vide)$$

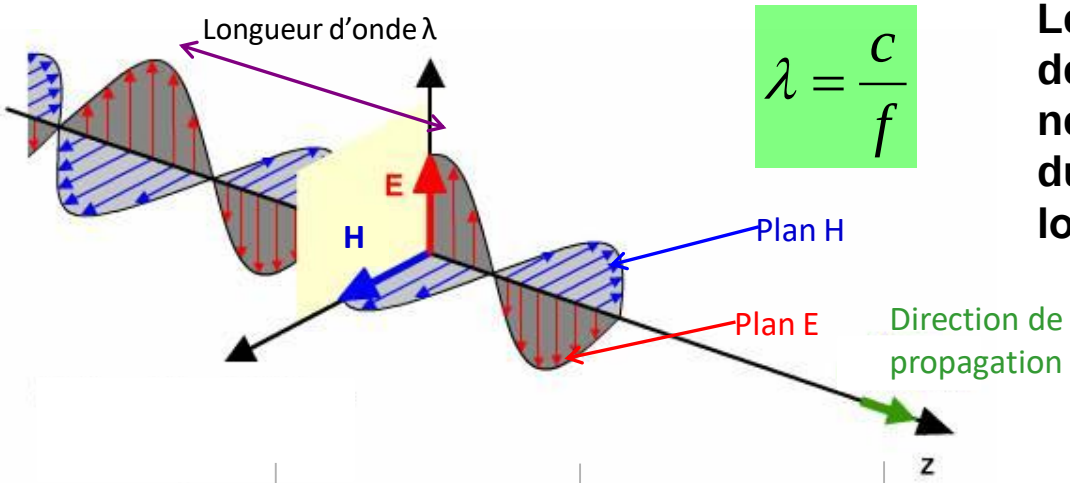
Transport d'une densité de puissance active :

$$\vec{P} = \frac{1}{2}\vec{E} \wedge \overrightarrow{H^*}\ \left(W/m^2\right)$$

Vitesse c = 3×10⁸ m/S

En espace libre, décroissance en 1/r² de la puissance transportée par l'onde.

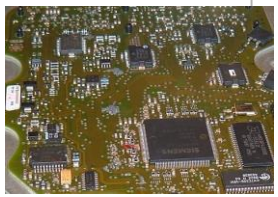
Approximation quasi-statique



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

Les phénomènes de propagation et de rayonnement deviennent négligeables lorsque les dimensions du systèmes sont faibles devant la longueur d'onde.

	300 kHz	3 MHz	30 MHz	300 MHz	3 GHz	30 GHz
Bande	*MF*	*HF*	*VHF*	*UHF*	*SHF*	
λ	1 km	100 m	10 m	1 m	10 cm	1 cm

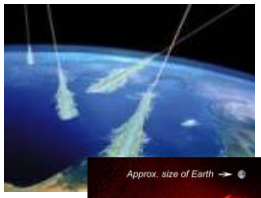


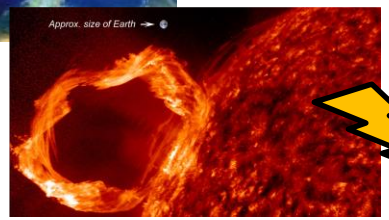
Ligne de transmission - Démo

II – Environnement électromagnétique

Natural Noise vs. Man Made Noise

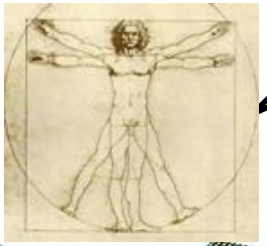
Activité humaine

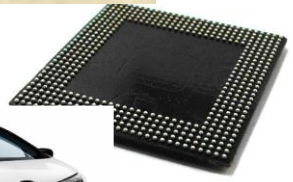


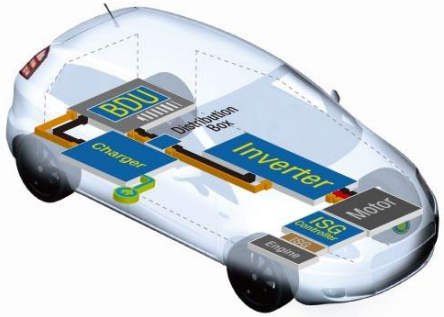


RF jammer

Emission intentionnelle





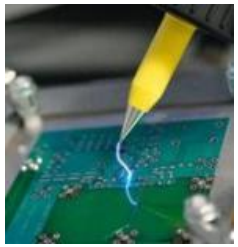


Victimes

Source naturelle

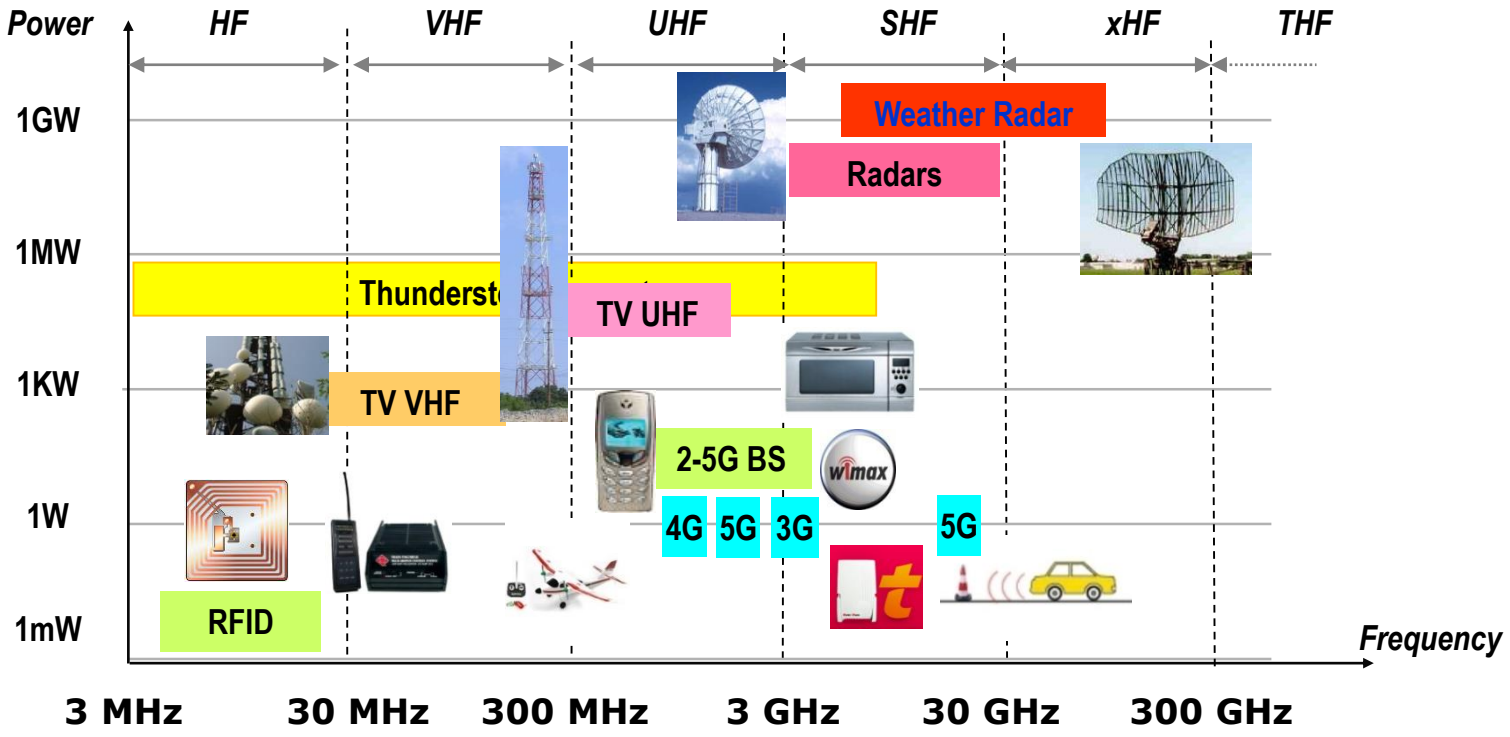
Emission non intentionnelle

Décharge électrostatique



Emission électromagnétique liée aux radiocommunications

- ✓ Forte occupation du spectre radiofréquence par des activités humaines (0 – 300 GHz)



Quelle autorité régule l'utilisation du spectre radiofréquence ?

Emission électromagnétique liée aux radiocommunications

- ✓ Régulation et planification du spectre radioélectrique par l'Union Internationale des Télécommunications (**ITU-R**) au niveau international.
- ✓ Coordination de la régulation du spectre radiofréquence par l'Electronic Communications Commitee (**ECC**) , comité appartenant à la conférence européenne des administrations des postes et télécommunications (**CEPT**).
- ✓ Missions principales: Harmoniser et rendre efficace l'utilisation du spectre radiofréquence en Europe et les orbites satellites
- ✓ Délivrables et recommandations dont la **recommandation ERC/REC 70-03**, définissant les allocations spectrales pour les ***Short Range Devices*** dans les pays membres de la CEPT.

Regulatory parameters related to Annex 1

Frequency Band		Power / Magnetic Field	Spectrum access and mitigation requirement	Channel spacing	ECC/ERC Decision	Notes
a	6765-6795 kHz	42 dBµA/m at 10m	No requirement	No spacing		
b	13.553-13.567 MHz	42 dBµA/m at 10m	No requirement	No spacing		
c	26.957-27.283 MHz	42 dBµA/m at 10m 10 mW e.r.p	No requirement	No spacing		
d	40.660-40.700 MHz	10 mW e.r.p.	No requirement	No spacing		
e	138.20-138.45 MHz	10 mW e.r.p.	< 1.0 % duty cycle (note 1)	No spacing		
f	433.050-434.790 MHz (note 4)	10 mW e.r.p.	< 10 % duty cycle (note 1)	No spacing		
f1	433.050-434.790 MHz (note 4bis)	1 mW e.r.p. -13 dBm/10 kHz	No requirement	No spacing		Power density limited to -13 dBm/10 kHz for wideband modulation with a bandwidth greater than 250 kHz

Tableau national de répartition des bandes de fréquences publié par l'ANFR

830,000-854,000 MHz	Primaire	MOBILE sauf mobile aéronautique	Gouv-ARCEP
854,000-862,000 MHz	Primaire	MOBILE sauf mobile aéronautique	Gouv-ARCEP
862,000-869,200 MHz	Primaire	MOBILE sauf mobile aéronautique	Gouv
869,200-869,700 MHz	Primaire	MOBILE sauf mobile aéronautique	ARCEP
869,700-880,000 MHz	Primaire	MOBILE sauf mobile aéronautique	Gouv
880,000-890,000 MHz	Primaire	MOBILE sauf mobile aéronautique	ARCEP
890,000-915,000 MHz	Primaire	MOBILE sauf mobile aéronautique	ARCEP
915,000-925,000 MHz	Primaire	MOBILE sauf mobile aéronautique	Gouv
915,000-925,000 MHz	secondaire	Radiolocalisation	Gouv
925,000-935,000 MHz	Primaire	MOBILE sauf mobile aéronautique	ARCEP
925,000-935,000 MHz	secondaire	Radiolocalisation	Gouv
935,000-960,000 MHz	Primaire	MOBILE sauf mobile aéronautique	ARCEP
960,000-1 164,000 MHz	Primaire	MOBILE AÉRONAUTIQUE (R)	Gouv
960,000-1 164,000 MHz	Primaire	RADIONAVIGATION AÉRONAUTIQUE	Gouv
1 164,000-1 215,000 MHz	Primaire	RADIONAVIGATION AÉRONAUTIQUE	Gouv
1 164,000-1 215,000 MHz	Primaire	RADIONAVIGATION PAR SATELLITE (espace-espace)	Gouv
1 164,000-1 215,000 MHz	Primaire	RADIONAVIGATION PAR SATELLITE (espace vers Terre)	Gouv
1 215,000-1 240,000 MHz	Primaire	EXPLORATION DE LA TERRE PAR SATELLITE	Gouv
1 215,000-1 240,000 MHz	Primaire	RADIOLOCALISATION	Gouv
1 215,000-1 240,000 MHz	Primaire	RECHERCHE SPATIALE	Gouv
1 215,000-1 240,000 MHz	Primaire	RADIONAVIGATION AÉRONAUTIQUE	Gouv
1 215,000-1 240,000 MHz	Primaire	RADIONAVIGATION PAR SATELLITE (espace-espace)	Gouv
1 215,000-1 240,000 MHz	Primaire	RADIONAVIGATION PAR SATELLITE (espace vers Terre)	Gouv
1 240,000-1 300,000 MHz	Primaire	EXPLORATION DE LA TERRE PAR SATELLITE	Gouv
1 240,000-1 300,000 MHz	Primaire	RADIOLOCALISATION	Gouv
1 240,000-1 300,000 MHz	Primaire	RECHERCHE SPATIALE	Gouv
1 240,000-1 300,000 MHz	Primaire	RADIONAVIGATION AÉRONAUTIQUE	Gouv
1 240,000-1 300,000 MHz	Primaire	RADIONAVIGATION PAR SATELLITE (espace-espace)	Gouv
1 240,000-1 300,000 MHz	Primaire	RADIONAVIGATION PAR SATELLITE (espace vers Terre)	Gouv
1 240,000-1 300,000 MHz	secondaire	Amateur	ARCEP
1 240,000-1 300,000 MHz	secondaire	Amateur par satellite (Terre vers espace)	ARCEP
1 300,000-1 350,000 MHz	Primaire	RADIOLOCALISATION	Gouv
1 300,000-1 350,000 MHz	Primaire	RADIONAVIGATION AÉRONAUTIQUE	Gouv
1 300,000-1 350,000 MHz	Primaire	RADIONAVIGATION PAR SATELLITE (Terre vers espace)	Gouv
1 350,000-1 375,000 MHz	Primaire	RADIOLOCALISATION	Gouv
1 350,000-1 375,000 MHz	Primaire	MOBILE	ARCEP-Gouv
1 350,000-1 375,000 MHz	secondaire	Radioastronomie	Gouv

www.anfr.fr

Fréquences utilisables pour certains matériels (non spécifiques) de faible puissance et de faible portée (publié par l'ANFR) : Bandes ISM

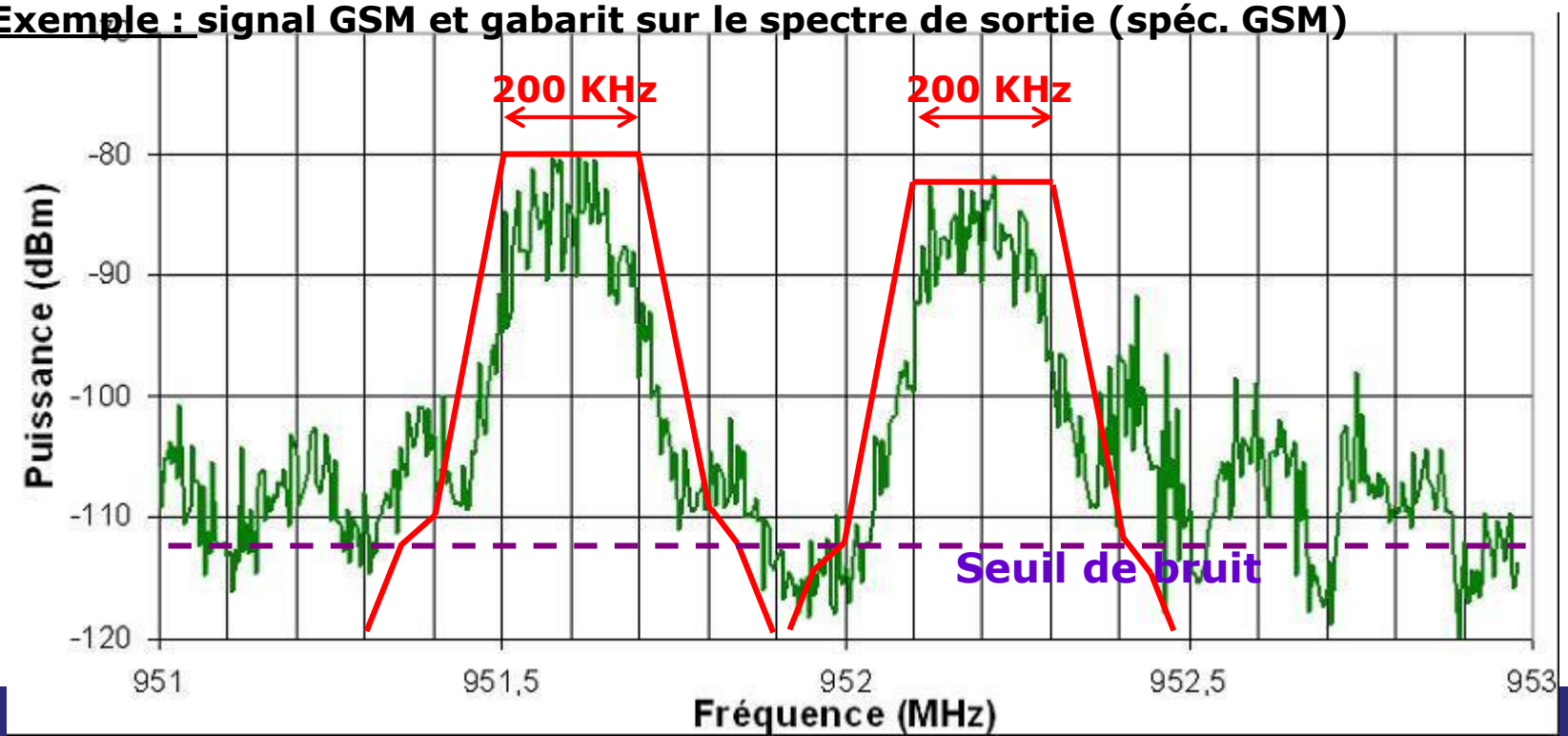
Equipements non spécifiques

Bande de fréquences ou fréquence centrale du canal	Puissance rayonnée / champ max.	Paramètres additionnels	Références / observations
6 765 à 6 795 kHz	42 dBµA/m à 10m	-	Décision 2006/771/CE modifiée
13 553 à 13 567 kHz	42 dBµA/m à 10m	-	
26 957 à 27 283 kHz	10 mW p.a.r. ou 42 dBµA/m à 10m	-	Décision 2006/771/CE modifiée Décisions ART n°02 -934 et 02-938
40,66 à 40,7 MHz	10 mW p.a.r.	-	Décision 2006/771/CE modifiée Décisions ARCEP 2007-0682 et 2010-0910
433,05 à 434,04 MHz	1 mW p.a.r. -13 dBm/10 kHz pour une largeur de bande de modulation supérieure à 250 kHz	-	Décision 2006/771/CE modifiée Décisions ARCEP 2007-0682 et 2010-0910
	10 mW p.a.r.	Avec un coefficient d'utilisation de 10%	
434,04 à 434,79 MHz	1 mW p.a.r. -13 dBm/10 kHz pour une largeur de bande de modulation supérieure à 250 kHz	-	
	10 mW p.a.r.	Avec un coefficient d'utilisation de 10% (ou un coefficient d'utilisation de 100 % sous réserve d'un espacement des canaux allant jusqu'à 25 kHz)	
863 à 868 MHz	25 mW p.a.r	-	Décision 2006/771/CE modifiée Décisions ARCEP 2010-0911 et 2010-0912

www.anfr.fr

Emission électromagnétique liée aux radiocommunications

- ✓ **Signaux « bandes étroites » et intermittents. Les caractéristiques du signal sont liées à la spécification technique de l'interface air :**
  - Bande passante, canaux, séparation
  - puissance d'émission, dynamique, spurious, ACLR…
  - Modulation, débit … Plus le débit est important, plus la bande passante requise est importante.
- ✓ **Exemple : signal GSM et gabarit sur le spectre de sortie (spéc. GSM)**



Emission électromagnétique liée aux radiocommunications

✓ Atténuation du champ et de la puissance rayonnée en espace libre :

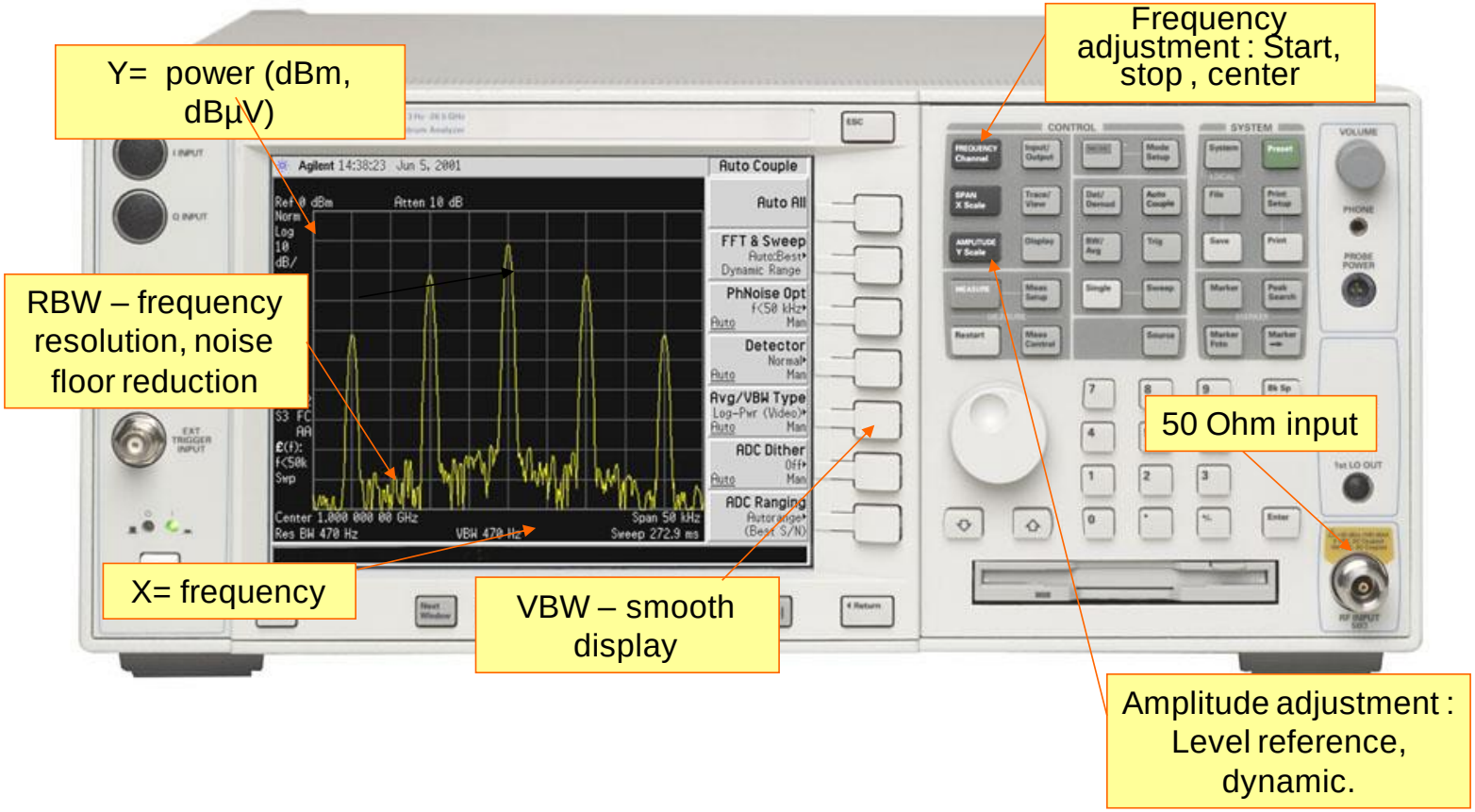
$$P = \frac{PIRE}{4\pi d^2}$$

$$E = \frac{\sqrt{30.PIRE}}{d}$$

✓ Exemples :

- **Emetteur radio FM (PIRE = 50 KW), à 1 km : E = 1.22 V/m, P = 0.12 W/m²**
- **Station de base GSM (PIRE = 1 KW), à 100 m : E = 1.7 V/m, P = 8 mW/m²**
- **Téléphone portable (PIRE = 600 mW), à 1 m: E = 4.24 V/m, P = 47 mW/m²**
- **Limites d'exposition du public (10 MHz – 10 GHz) : 28 – 61 V/m ou 2 – 10 W/m²**

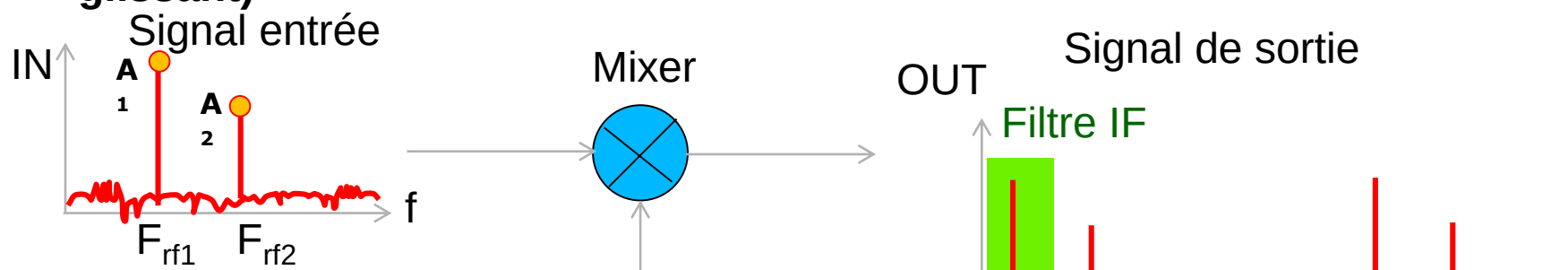
Expérience – mesure de champ ambiant – Analyseur de spectre



- **L'équipement de mesure central pour la caractérisation de l'émission électromagnétique**
- **Grande sensibilité et large bande passante**
- **<u>De manière simple</u> : un récepteur radio à balayage**

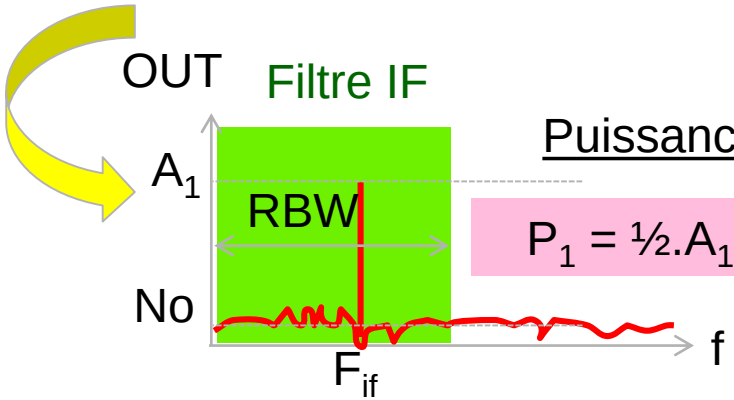
Expérience – mesure de champ ambiant – Analyseur de spectre

- **Réception superhétérodyne (équivalent à un filtre passe-bande réglable glissant)**



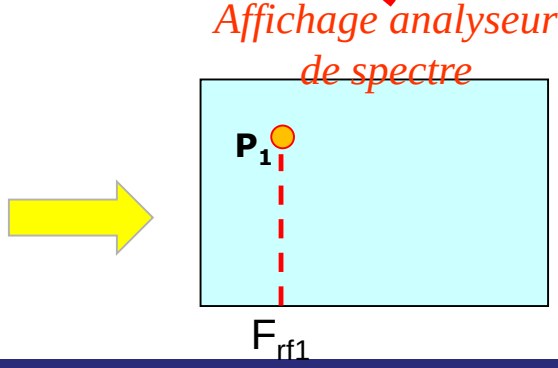
$$\cos\omega_{rf1}t \times \cos\omega_{lo}t = \frac{1}{2}\cos\left(\omega_{rf1}+\omega_{lo}\right)t + \frac{1}{2}\cos\left(\omega_{rf1}-\omega_{lo}\right)t$$

ωif



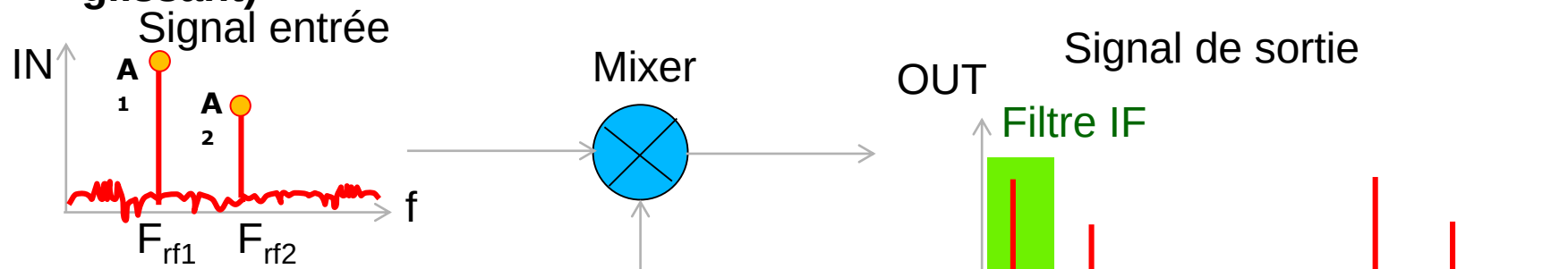
Puissance détectée:

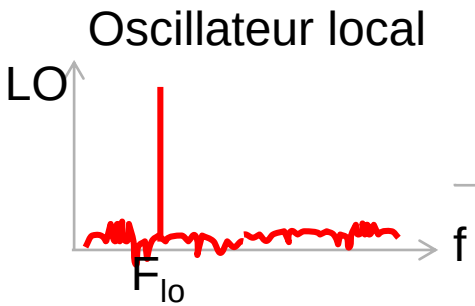
$P_1 = ½.A_1^2 + No.RBW$



Expérience – mesure de champ ambiant – Analyseur de spectre

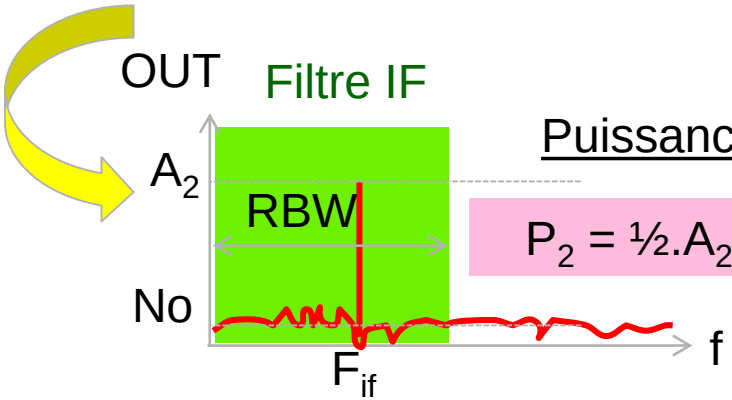
- **Réception superhétérodyne (équivalent à un filtre passe-bande réglable glissant)**





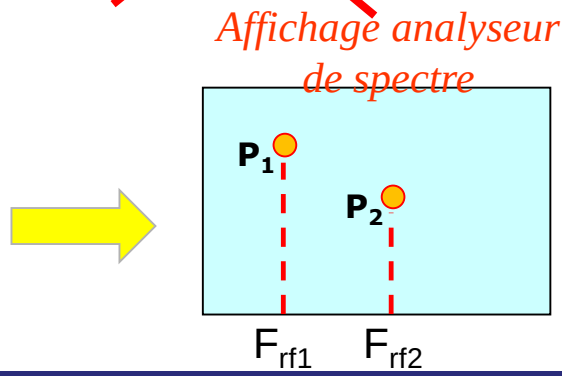
$$\cos\omega_{rf\,2}t \times \cos\omega_{lo}t = \frac{1}{2}\cos\left(\omega_{rf\,2}+\omega_{lo}\right)t + \frac{1}{2}\cos\left(\omega_{rf\,2}-\omega_{lo}\right)t$$

ωif



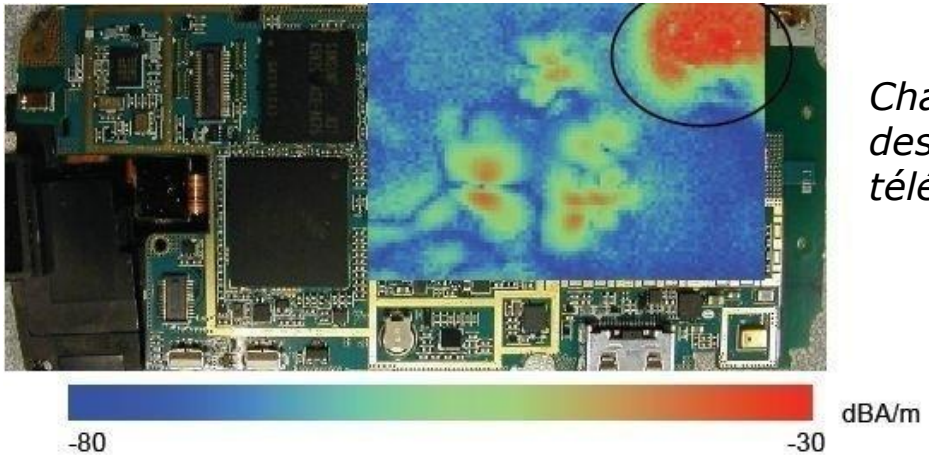
Puissance détectée:

$P_2 = ½.A_2^2 + No.RBW$

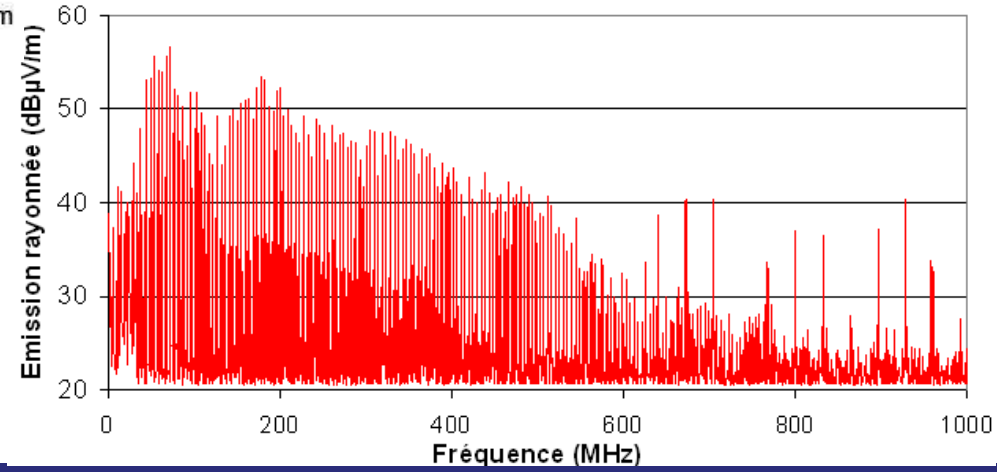


Emission électromagnétique non intentionnelle

- ✓ Bruit parasite lié à l'activité des équipements électriques et électroniques (machines électriques, lignes électriques, composants électroniques).
- ✓ Bruit impulsionnel large bande.

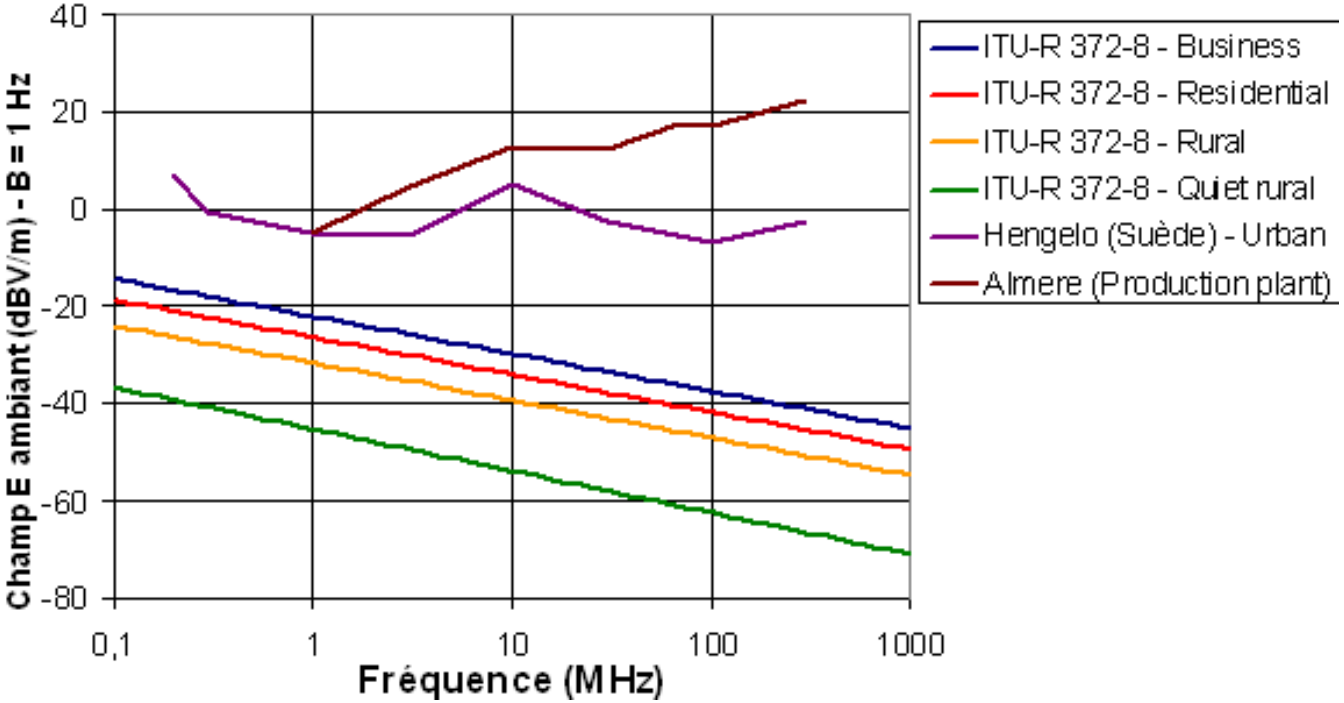


Champ magnétique produit au-dessus d'une plateforme de téléphonie mobile (F = 910 MHz)



Emission rayonnée d'un microprocesseur

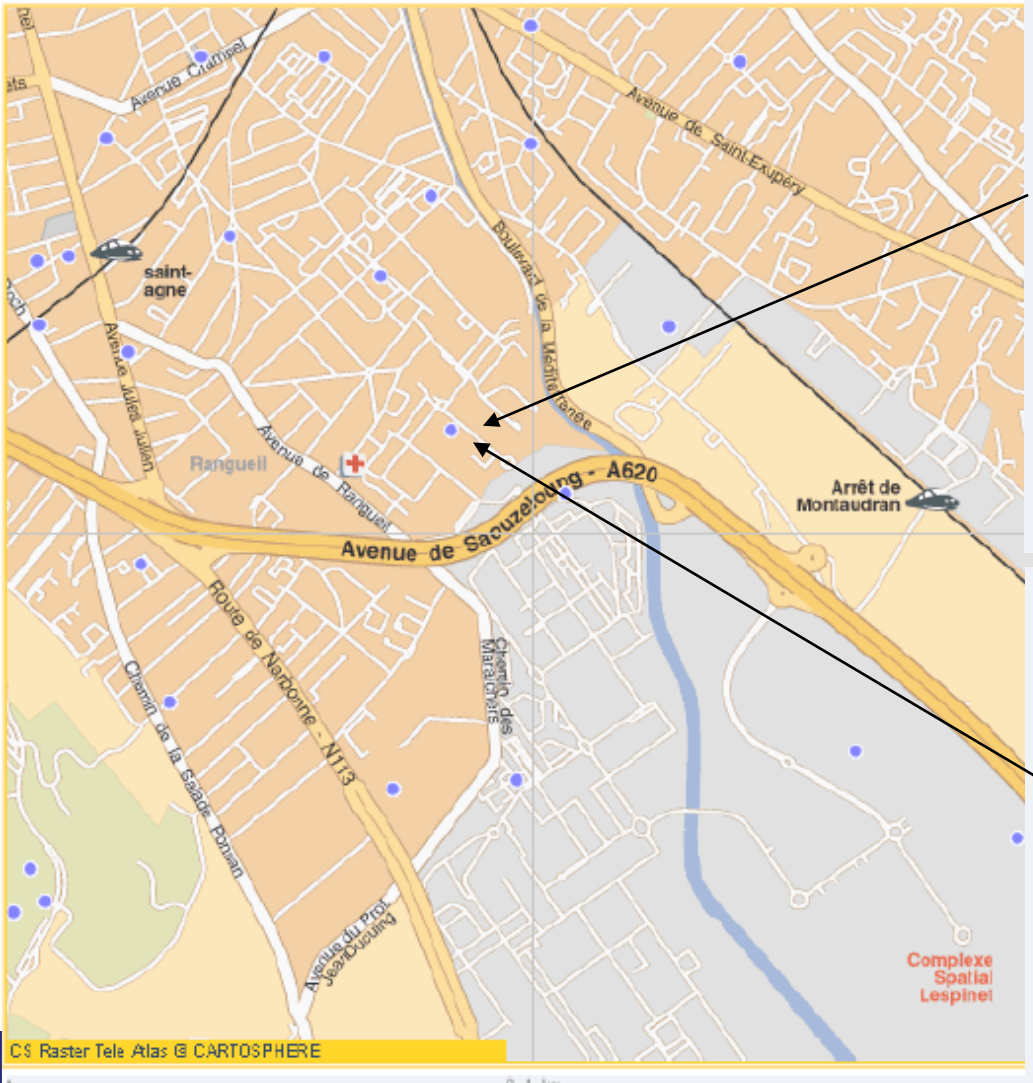
Recommandation ITU-R 372-8



- ✓ Niveaux définis dans les années 70.
- ✓ Augmentation de 20 à 40 dB dans les milieux semi-fermés.
- ✓ Exemple: Surveillance du niveau moyen au Canada en 1990 en milieu urbain et sub-urbain : le champ E maximal varie entre 1 et 20 V/m.

Mesure en environnement urbain

✓ Site Agence Nationale des Fréquences (ANFR) – outil Cartoradio.



Identification de la station

N° d'identification : 354918
Exploitant : ORANGE
Adresse : Allée des Sciences Appliquées

Code Postal / Nom Commune : 31000 / TOULOUSE
Accord ANFR pour l'implantation : 01/10/04
Accord ANFR dernière modification :

Caractéristiques radioélectriques

Hauteur max. des antennes / sol : 17 m

Système	Bande de fréquences
GSM 900/GSM 1800	1713.1 à 1736.9 MHz
GSM 900/GSM 1800	935.1 à 947.5 MHz
GSM 900/GSM 1800	890.1 à 902.5 MHz
GSM 900/GSM 1800	1808.1 à 1831.9 MHz

Identification de la station

N° d'identification : 354922
Exploitant : ORANGE
Adresse : Allée des Sciences Appliquées

Code Postal / Nom Commune : 31000 / TOULOUSE
Accord ANFR pour l'implantation : 01/10/04
Accord ANFR dernière modification :

Caractéristiques radioélectriques

Hauteur max. des antennes / sol : 19 m

Système	Bande de fréquences
UMTS	2154.9 à 2169.7 MHz
UMTS	1910.1 à 1915.1 MHz
UMTS	1964.9 à 1979.7 MHz

Mesure en environnement urbain

✓ Site Agence Nationale des Fréquences (ANFR) – outil Cartoradio.

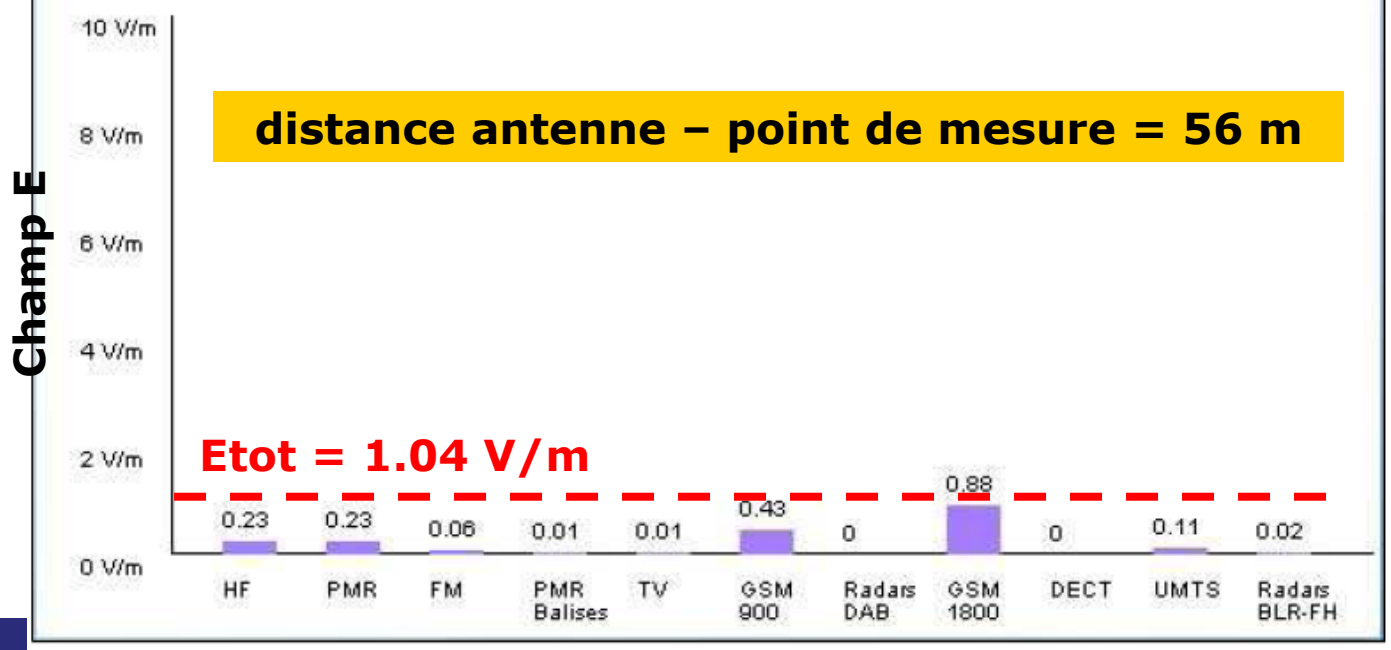
Lieu : TOULOUSE (31)

Référence du point de mesure : 7101
Date de la mesure : 19/10/2005

Situation et caractéristiques du point de mesure

Localisation précise du point de mesure
N°: 16 Rue : Claude de Forbin
Place/Autre :
Code postal : 31400
Ville : TOULOUSE

Caractéristiques du point de mesure
Mesure effectuée à l'extérieur
Type d'environnement : Rue / Route / Parking / Cour
Latitude : 43°34' 31" N
Longitude : 1°27' 49" E



Mesure en environnement urbain

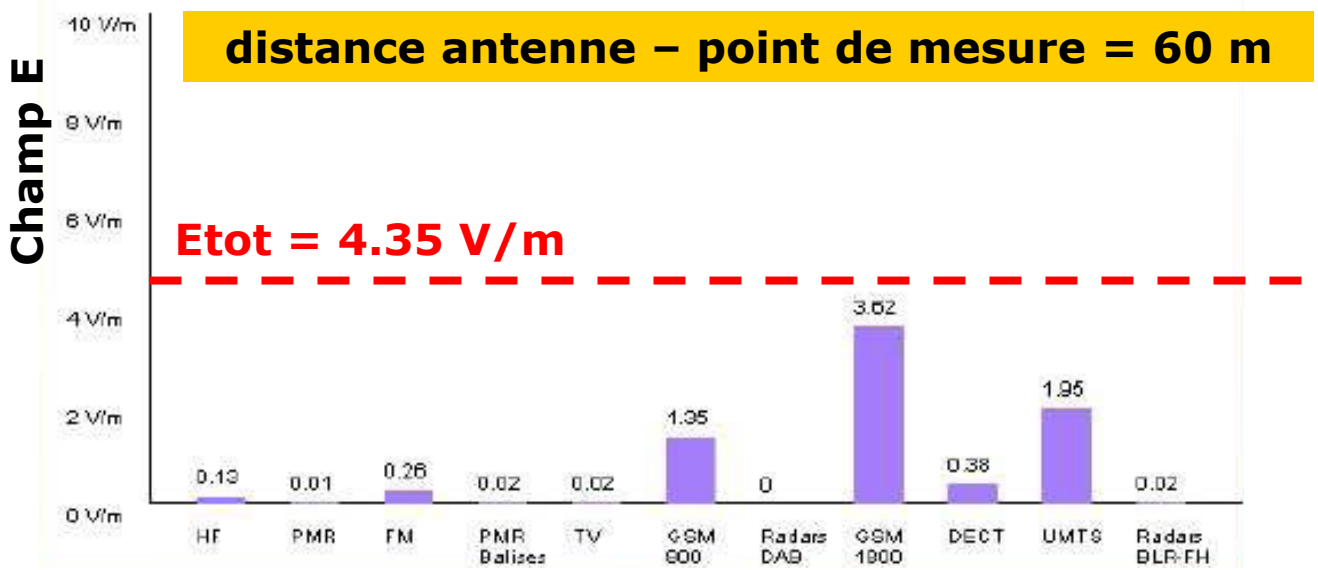
✓ Site Agence Nationale des Fréquences (ANFR) – outil Cartoradio.

Lieu : TOULOUSE (31)

Référence du point de mesure : 15247
Date de la mesure : 09/01/2009

Situation et caractéristiques du point de mesure

Localisation précise du point de mesure	Caractéristiques du point de mesure
N°: 24 Rue : Emile Guyou	Mesure effectuée à l'intérieur
Place/Autre :	Type d'environnement : Appartement / Pavillon / Bureau
Code postal : 31400	Latitude : 43°34' 30" N
Ville : TOULOUSE	Longitude : 1°27' 43" E

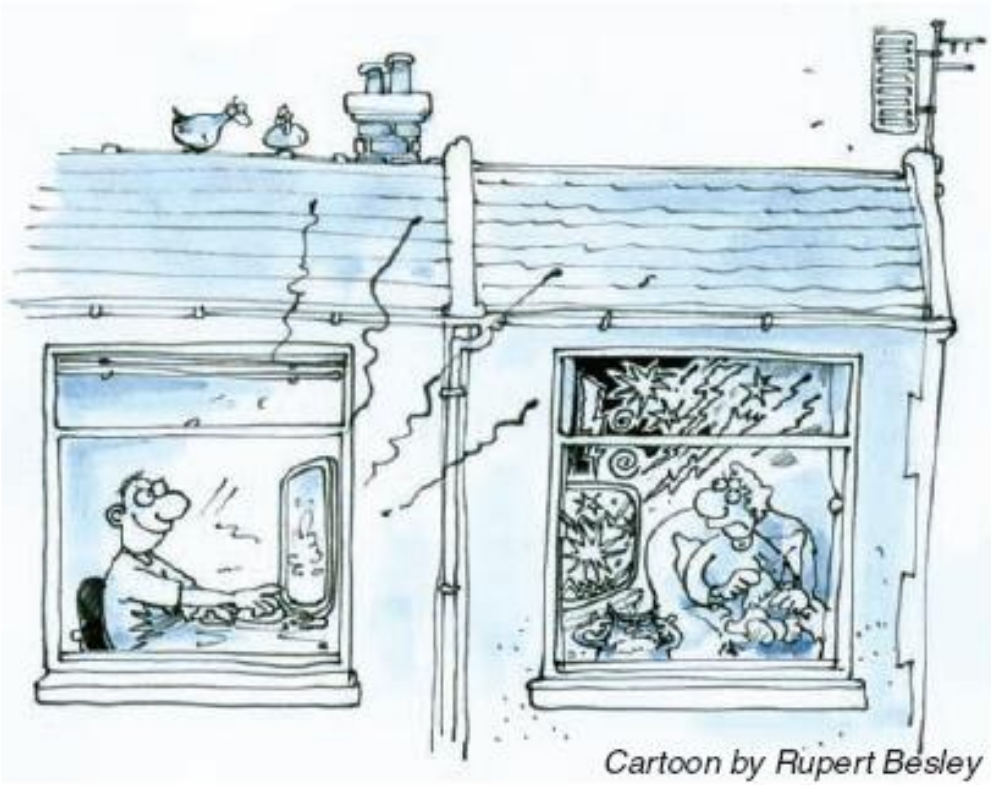


Champ magnétique à proximité d'un poste de recharge sans fil pour véhicule électrique

- ✓**Recharge par induction**
- ✓**85 kHz**
- ✓**3 – 22 kWh**
- ✓**1 – 10 A/m entre 0 et 1 m**
- ✓**Recommandation pour l'exposition aux champ H (3 – 150 kHz) < 5 A/m**

III – Interférences électromagnétiques

Un environnement électromagnétique typique …



Des interférences à l'origine du crash d'un drone

Des interférences à l'origine du crash du drone

Ski alpin Selon un premier rapport d'expertise, l'accident lors du slalom de Madonna di Campiglio mardi soir a été causé par un «dysfonctionnement» dû à de «fortes interférences».

Tribune de Genève – 23/12/2015

Interférences électromagnétiques sur des dispositifs médicaux

- **Problèmes rapportés par la FDA entre 1979 et 1993**

Types	Cas rapportés	Equipements
Interférences conduites	20 (1 mort)	Cardiac monitor, infusion device, defibrilator…
Interférences rayonnées	55 (4 morts)	Pacemaker, ventilator, cardiac monitor
Champ magnétique BF	6 (1 mort)	Respirator, pacemaker
ESD	10	Respirator, infusion pump

The Jammed Wheelchair: A Case Study of EMC and Functional Safety

Figure 1. An ordinary street with cars and an electric wheelchair: one environment – different EMC requirements.

http://www.emcs.org/acstrial/newsletters/fall04/63_67.pdf

- **Entre 1994 et 2005, 405 cas de problèmes liés à des interférences électromagnétiques, conduisant à 6 décès, 170 blessures et 167 dysfonctionnements [FDA].**
- **Entre 2005 et 2015, 4993 cas de problèmes liés à des interférences électromagnétiques, conduisant à 22 décès, 2520 blessures et 2451 dysfonctionnements [FDA].**

Interférences électromagnétiques dans le domaine militaire

29 juillet 1967 : accident du porte avions américain USS Forrestal. Le lancement accidentel d'un missile fit exploser un réservoir de carburants et un stock de munitions, tuant 135 personnes et causant des dommages qui nécessitèrent 7 mois de réparation. L'enquête montra qu'un radar avait induit une tension parasite sur le câblage d'un avion suffisant pour déclencher le lancement d'un missile.

The skipper of the destroyer *USS Rupertus* (DD 851), in what Rear Adm. Harvey P. Lanham, ComCarDiv Two, called an act of "magnificent seamanship," maneuvers his ship to within 20 feet of *USS Forrestal* (CVA 59) so fire hoses could be effectively used on the worst fire aboard a U.S. carrier. More than 130 crew were killed in the blaze 29 July 1967 off the coast of Vietnam. U.S. Navy photograph.

H.M.S. Sheffield catastrophe: "During the Falklands War, the British Ship H.M.S Sheffield sank after being hit by an Exocet missile. Despite the Sheffield having the most sophisticated antimissile defense system available, the system created EMI to radiocommunications to and among the contingent of Harrier jets assigned to the ship. While the Harriers took off, the missile defense was disengaged to allow communications with the jets and provided a window of opportunity for the Exocet missile."

Interférences électromagnétiques dans l'automobile

Mercedez-Benz case: "During the early years of ABS, Mercedez-Benz automobiles equipped with ABS had severe braking problems along a certain stretch of the German autobahn. The brakes were affected by a near-by-near radio transmitter as drivers applied them on the curved section of highway. The near-term solution was to a erect a mesh screen along the roadway to attenuate the EMI. This enabled the brakes to function properly when drivers applied them…. Eventually, automobile ABS was qualified by EMI testing prior to procurement."

Interférences électromagnétiques dans l'automobile

"I got in, shut the door, went to press the start button and a message came up saying 'key not identified'," Amanda Stevens, from Noosa, Queensland, told The Sidney Morning Herald. "All the doors locked themselves. I thought, 'That's not good' … I tried to wind the windows down and open the doors. When that didn't work I started to panic. I was trapped. Within a couple of minutes I was struggling to breathe inside the car, because it was parked in the sun."

Audi to Investigate After Woman Becomes Trapped in Vehicle

INTERFERENCE TECHNOLOGY

Janvier 2014

Interférences électromagnétiques dans l'aviation

« Des perturbations des instruments de bord causant des déviations de trajectoire apparaissent lorsqu'un ou plusieurs passagers allument leurs appareils électroniques. » (Air et Cosmos, Avril 1993)

FAA still searching for cause of ILS interference at the Lubbock Airport

Recommander Soyez le premier de vos amis à recommander ça.

Posted: Feb 12, 2010 6:43 PM

Click image to enlarge

Click Image to enlarge

LUBBOCK, TX (KCBD) - Federal Officials continue the hunt for whatever is causing the interference with the safety equipment at the Lubbock airport.

The FAA has a test plane that is circling Lubbock that is looking for the source of the interference that has rendered the ILS inoperable.

The ILS is used for landing planes safely when there is bad weather.

Without it, planes cannot land in low visibility and that has caused flight delays and cancellations for the last 10 days.

The FAA tells NewsChannel 11 that all of their tests seem to indicate the system is working. Yet, when pilots have to use it, problems have been reported.

The interference could come from old power lines or local businesses. It could even come from trucks going up and down the interstate.

NASA publication 1374 (1986 – 1995)

Victim Equipment

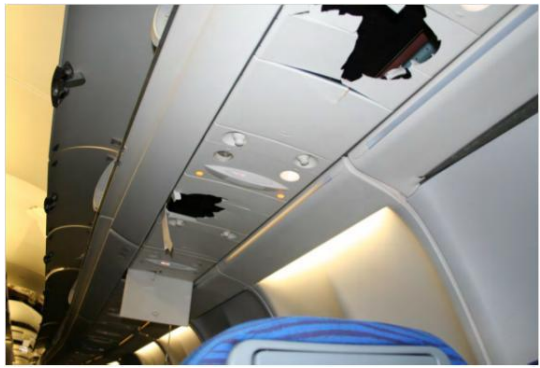
Suspected Cause	Navigation Aids	Communications	VOR	Totals
Cellular Phone	4	1	3	8
Laptop Computer	3	0	2	5
Radio	3	1	0	4
Electronic Game	1	0	2	3
CD Player	0	1	1	2
Tape Player	2	0	0	2
AM-FM Recorder	0	0	1	1
AM-FM Walkman	0	0	1	1
Dictaphone	0	0	1	1
Heart Monitor	0	1	0	2
Television	1	0	0	1
Totals	14	4	11	29

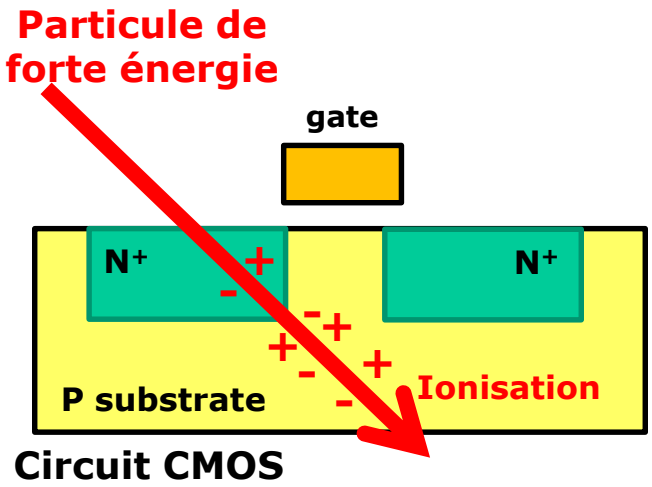
Depuis 2002, l'aviation civile américaine (FAA) rapporte 12 cas avérés de défaillances liées à des interférences électromagnétiques produites pas des appareils électroniques apportés par des passagers.

Interférences électromagnétiques dans l'aviation

Vol 72 Quantas – 7 octobre 2008 :

- Anomalie du fonctionnement du pilotage automatique, qui a entrainé une montée puis une descente de 200 m
- Problème liée à une corruption des données envoyées par l' Air Data Inertial Reference Unit.
- Bien que la cause du problème n'ait pas pu être parfaitement identifiée, la cause la plus probable est liée aux Single Event Effects (SEE)





- ✓ **Risque de changement d'état logique, corruption données mémoire, latch-up**
- ✓ **Avec la réduction de la finesse de gravure des circuits intégrés, la sensibilité aux SEE s'accroit**
- ✓ **Le risque de collision avec une particule à haute énergie s'accroit avec l'altitude**

Interférences électromagnétiques dans le domaine spatial

Russian Satellite Crash May Have Been Caused By EMI

03/09/11 02:16 PM

A Russian Geo-IK-2 satellite launch failed "because of possible external electromagnetic interference from a sea-, land- or air-based source." The satellite was launched by a rocket converted from a SS-19 intercontinental ballistic missile that apparently did its job sufficiently well, but an additional Briz-KM booster malfunctioned. Finally, the Geo-IK-2 was boosted to an abnormal 370 to 1,020 km elliptical orbit. The satellite's solar batteries unfolded and contact was established, but it could not function properly.

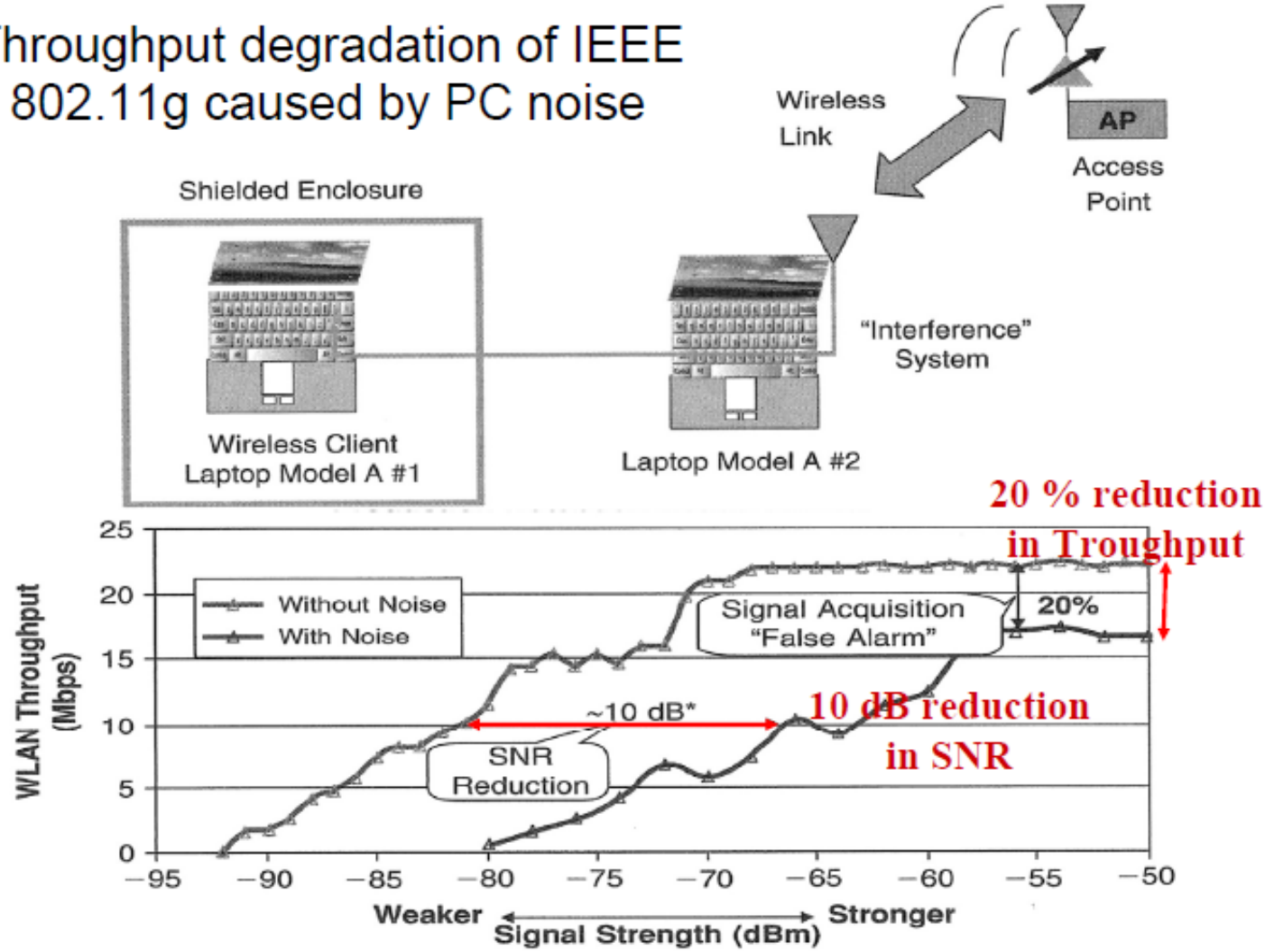
Vacuum cleaner incident: "During a Spacelab mission in 1985, the crew decided to use the middeck vacuum cleaner instead of the one in the lab. Switching the middeck vacuum on caused the voltage to drop and the Remote Acquisition Unit to shut off. In preflight EMI tests, the vacuum cleaner had not been tested and should not have been used in the lab. This case shows how careful and attentive one must when dealing with EMC." [Nasa Publication 1374]

Interférences électromagnétiques entre systèmes radio

- ✓ Des problèmes d'interférences sur la bande ISM 2400-2483.5 MHz ?
- ✓ Les performances d'un réseau WiFi (IEEE 802.11) affectées par les interférences provenant de fours à micro-ondes, de téléphones sans fil, de dispositif Bluetooth, Zigbee… ?
- ✓ « La qualité d'un service de voix transmise sur un réseau WiFi se dégrade lorsqu'un téléphone, une caméra sans fil, un four à micro-onde, ou un autre dispositif WiFi se situe dans un rayon de 8 m » (*Cisco, « 20 Myths of WiFi Interference », White Paper, 2008*).

Interférences électromagnétiques entre systèmes radio

Throughput degradation of IEEE 802.11g caused by PC noise



K. Slattery and H. Skinner, *Platform Interference in Wireless Systems*, Elsevier (2008)

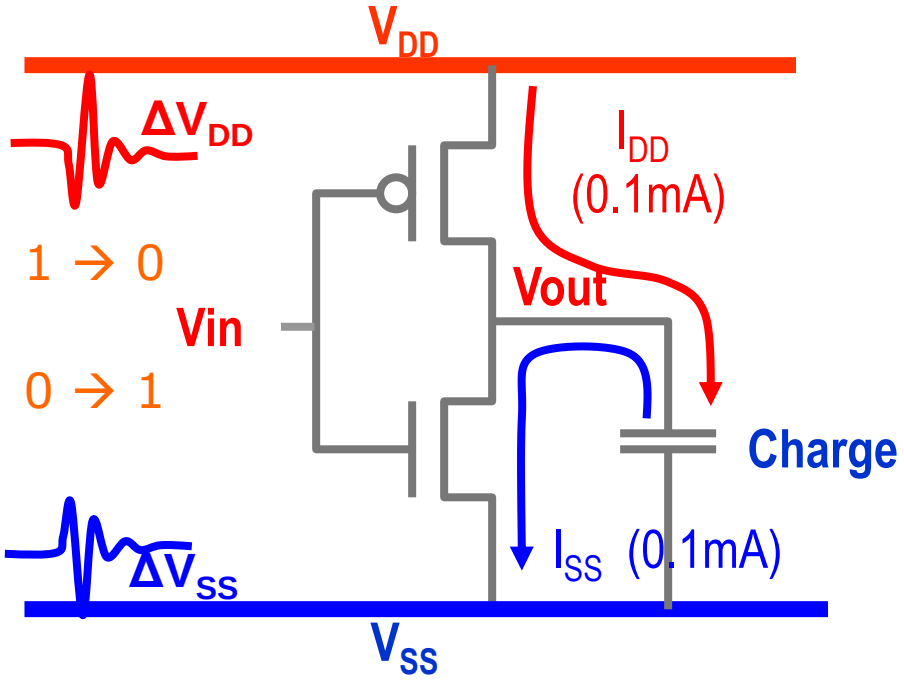
Définition:

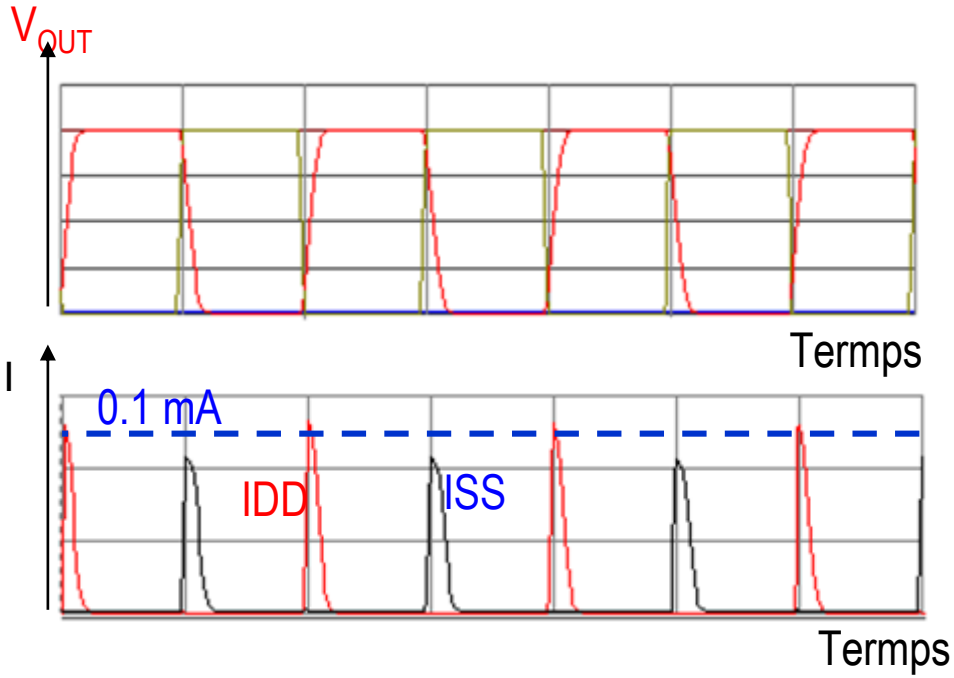
« La capacité d'un composant, équipement ou système à fonctionner de manière satisfaisante dans un environnement électromagnétique donné, sans introduire de perturbations électromagnétiques intolérables pour tout système présent dans cet environnement. »

- ✓ Aspect essentiel pour la sûreté fonctionnelle des applications électroniques
- ✓ Garantir le fonctionnement simultanée de tous les équipements électriques et électroniques dans un environnement électromagnétique donné
- ✓ Réduire l'**émission électromagnétique** parasite et la sensibilité ou **susceptibilité** aux interférences électromagnétiques

Origine du problème - Emission conduite

- Fonctionnement d'un circuit digital CMOS. Exemple : un inverseur.

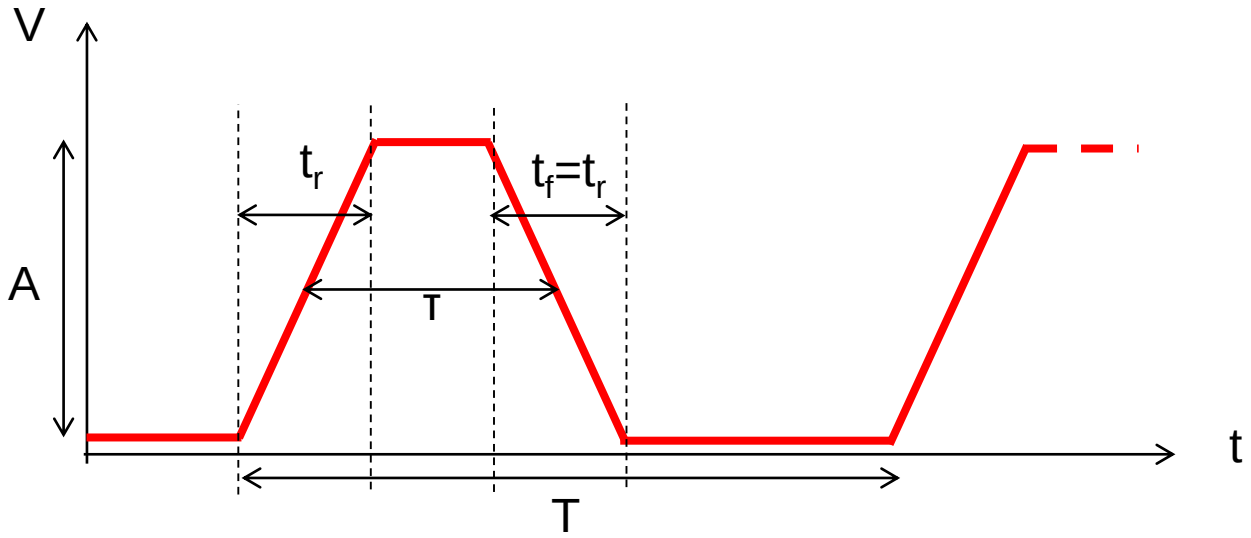




- Tout circuit en commutation est à l'origine l'apparition d'un courant transitoire entre l'alimentation et la masse : circuits digitaux synchrones, entrée-sortie digitale (E/S), convertisseur de tension, driver de puissance …
- Celui-se propage le long des lignes d'alimentation/masse produisant l'émission conduite.

Origine du problème - Emission conduite – Contenu fréquentiel

- Modèle simple des signaux transitoires : série périodique d'impulsion.



Contenu fréquentiel ?

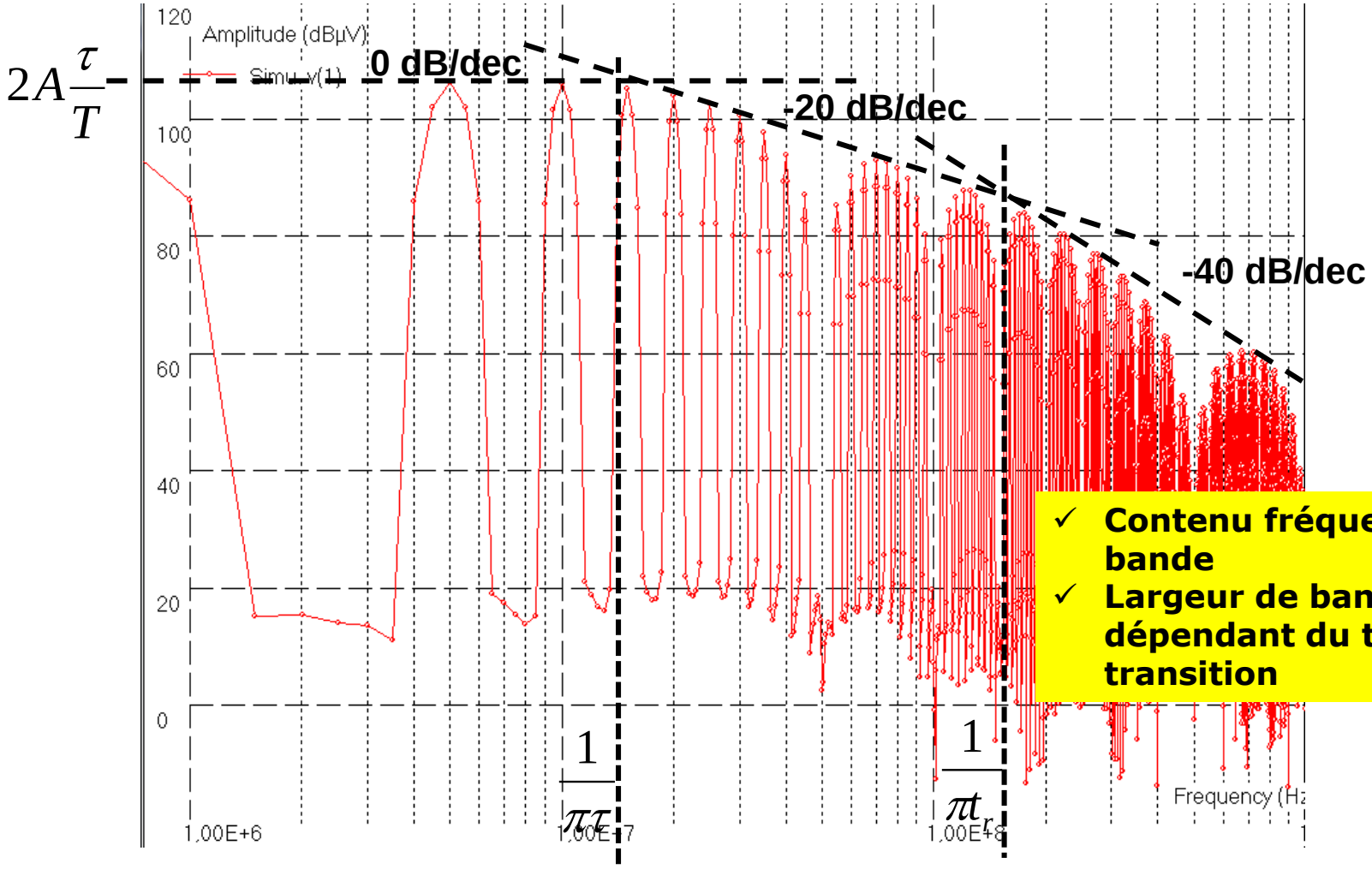
Transformée de Fourier donne une infinité d'harmonique d'indice n d'amplitude :

$$\left|c_n^+\right| = \frac{2A\tau}{T}\left|\frac{\sin\left(n\pi\frac{\tau}{T}\right)}{n\pi\frac{\tau}{T}}\right|\left|\frac{\sin\left(n\pi\frac{t_r}{T}\right)}{n\pi\frac{t_r}{T}}\right|, n>0$$

$$c_0 = \frac{A\tau}{T}$$

Origine du problème - Emission conduite – Contenu fréquentiel

- Exemple : A = 1 V, T = 200 ns, τ = 20 ns, tr = tf = 2 ns



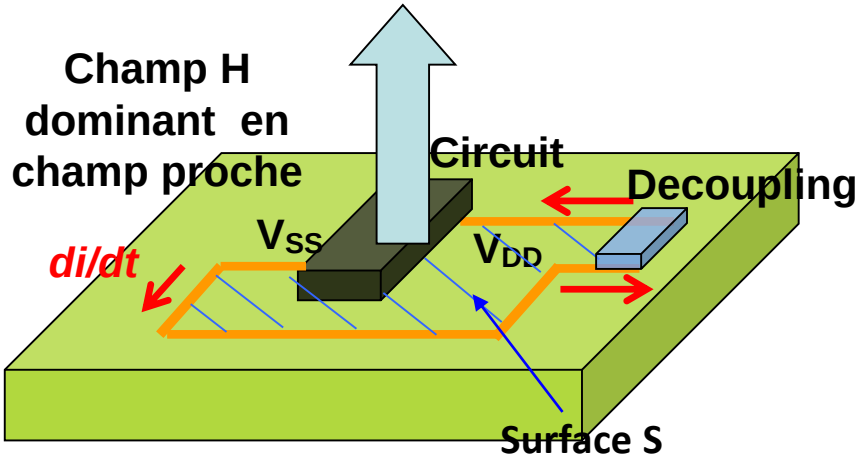
- ✓ **Contenu fréquentiel large bande**
- ✓ **Largeur de bande dépendant du temps de transition**

Origine du problème - Emission rayonnée

- Tout conducteur excité par une fem transitoire ou parcouru par un courant transitoire devient une antenne (dépendance au rapport longueur du conducteur sur longueur d'onde)

- Illustration : deux antennes élémentaires au niveau circuit imprimé :

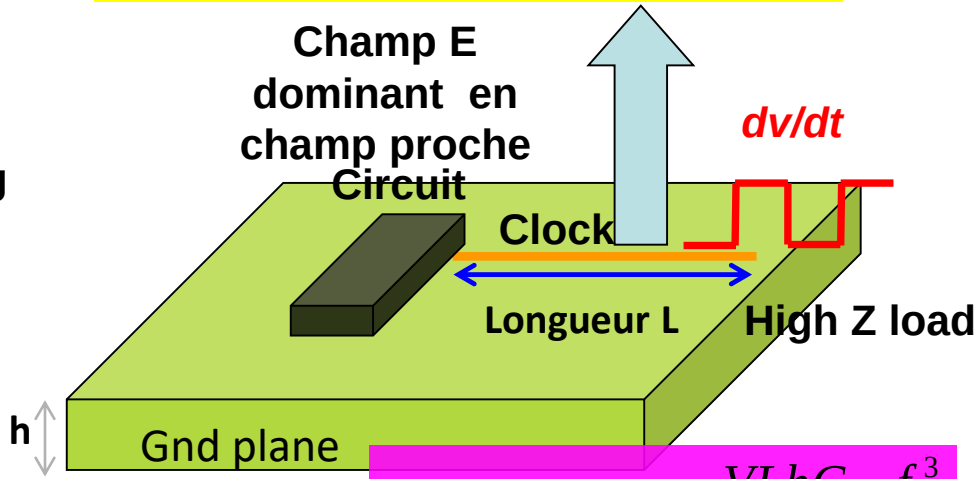
Antenne magnétique (boucle)



En champ lointain : :

$$E_{max} = \frac{1.32.10^{-14} f^2 SI}{r}$$

Antenne électrique (piste ouverte / haute impédance)

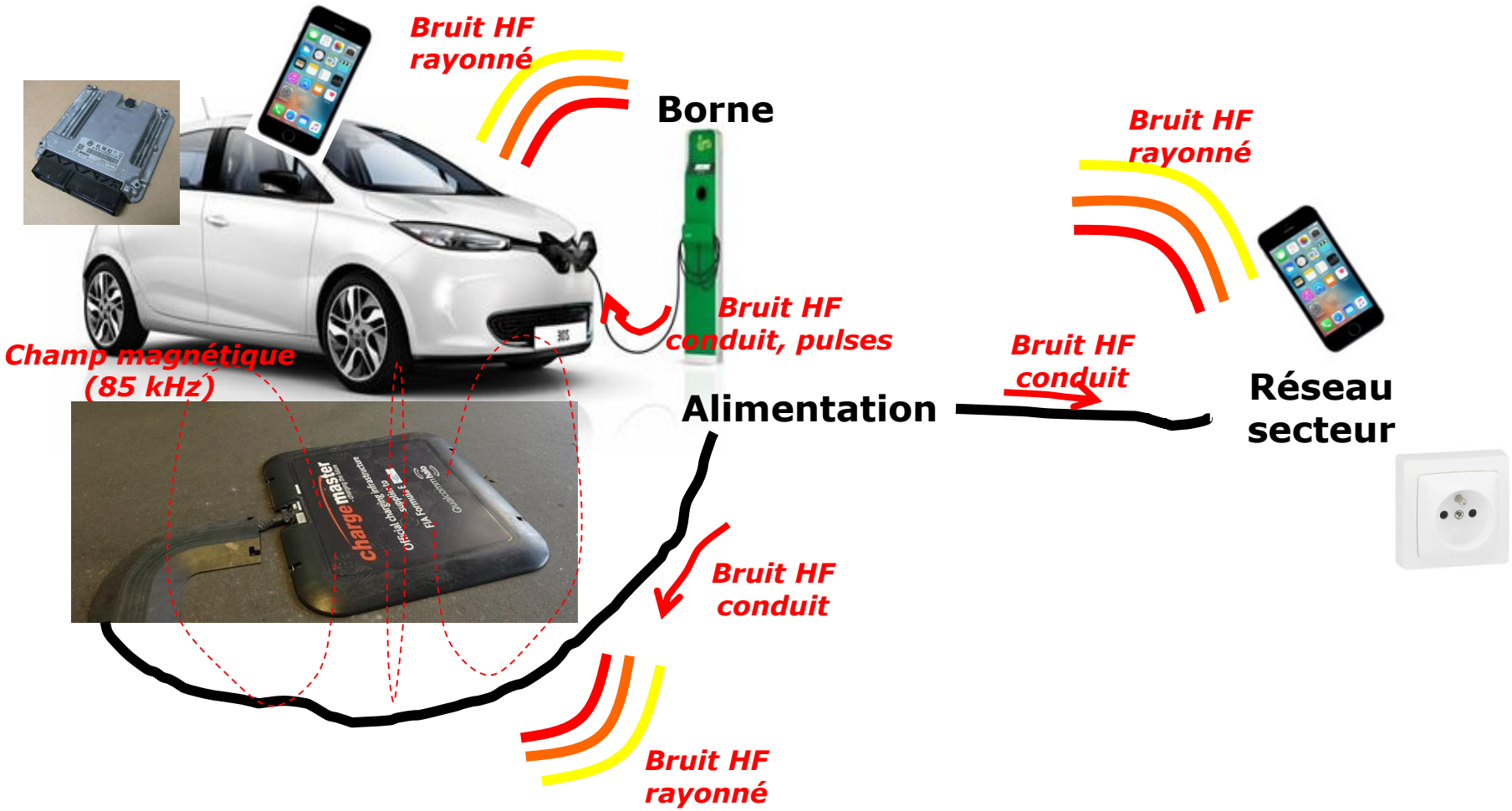


En champ lointain : :

$$E_{max} = 8.27.10^{-14} \frac{VLhC_{line} f^3}{r}$$

$$L = \frac{\lambda}{4} \; si \; f > \frac{c}{4L}$$

Exemples de scénarios de problèmes de CEM possibles



- Les interférences électromagnétiques peuvent induire de graves défaillances des systèmes électriques et électroniques, mettant la vie des utilisateurs en danger.
- Nécessité de garantir une compatibilité électromagnétique entre les systèmes électriques et électroniques dans un environnement électromagnétique nominal (faible émission et faible susceptibilité).
- Quelle réglementation existe t-il vis-à-vis de la CEM ?
- Comment définir des standards de tests CEM pour tous les systèmes électriques/électroniques, représentatifs de tout environnement électromagnétique, et avec un réalisme industriel ?

  - ✓ Diversité en terme d'appareils électriques/électroniques
  - ✓ Nombreux types de perturbations (BF, HF, pulsé, modulé…), nombreux types d'environnements électromagnétiques
  - ✓ Plusieurs mécanismes de couplages des perturbations électromagnétiques

IV– Réglementation CEM

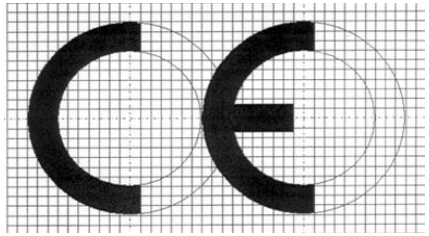
Les directives européennes pour les produits électroniques

- ✓ Directive européenne RED 2014/53/UE : concerne les équipements hertziens et les équipements terminaux de télécommunications
- ✓ Directive européenne CEM 2014/30/UE : compatibilité électromagnétique des produits électroniques
- ✓ Directive européenne basse tension BT 2014/35/UE : sécurité électrique des produits fonctionnant de 0 à 1000 volt AC et 1500 DC
- ✓ Directive européenne RoHS 2011/65/UE : limitation de six substances dangereuses dont le plomb
- ✓ Directive européenne DEEE 2012/19/UE : relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques

Directive européenne CEM

- ✓ La directive européenne 2014/30/UE (2016) exige que tout « appareil électrique » placé sur le marché européen :
  - Ne génère pas d'interférences électromagnétiques capables de perturber les équipements radio ou télécom, ainsi que le fonctionnement de tout équipement
  - Ait un niveau d'immunité aux interférences électromagnétiques tels qu'il n'y ait pas de dégradation de son fonctionnement.

- ✓ Tout fabricant « d'appareil électrique » doit attester que cette directive est **supposée** respectée, en délivrant une déclaration de conformité, un rapport de conformité et en apposant un marquage CE sur le produit.



Marquage CE (Conformité Européenne)

- ✓ Il est recommandé d'utiliser le ou les **standards harmonisés** (limites+ méthodes de test) adaptés au produit et à son environnement pour vérifier la supposition de conformité à la directive CEM.

Directive européenne RED

- ✓ La directive européenne 2014/53/UE (1999) **Radio Equipment Directive** s'appliquant à tout équipement radioélectrique émettant sur la bande 0 Hz – 3000 GHz remplace la directive CE (ainsi que la directive Low voltage sur les risques pour la sécurité et la santé des utilisateurs).
- ✓ Elle exige que les équipements radioélectriques placés sur le marché européen :
  - Respecte les contraintes de sécurité pour les personnes imposées par la directive Low Voltage (**2014/35/UE**) (notamment les limites de rayonnement EM) et les contraintes de protection CEM imposées par la directive **2014/30/UE**.
  - Les équipements radio utilise les ressources spectrales allouées pour les communications terrestres et spatiales de manière à éviter toute interférence
- ✓ Marquage prévu :

Obligatoire pour tous les équipements concernés par la directive RED

Notified Body number

Signe d'alerte obligatoire pour les équipements classe 2

Directive CEM hors d'Europe ?

- Etats Unis : Federal Communications Commission (FCC)
- Canada : Industrie Canada (IC)
- Japon : Voluntary Control Council for Interference by Information Technology Equipment (VCCI)
- Chine : China Compulsory Product Certification (CCC)
- Australie – Nouvelle-Zélande : Australian Communications Authority (ACA)
- Taïwan : Bureau of Standards, Metrology and Inspection (BSMI) et National Communications Commission (NCC)
- Russie : GOST (State Committee for Quality Control and Standardization ...

Des approches réglementaires de la CEM et des standards pas forcément harmonisés entre pays.

Cependant des accords de reconnaissance mutuelle (Mutual Recognition Agreements (MRA)) existent entre différens pays pour faciliter l'accès au marché.

Organismes de standardisation CEM

International

International Electrotechnical Commission(IEC)

TC77

Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques(CISPR)

IEC 61000-X

CISPR-XX

Européen

European Commitee for Electrotechnical Standardization (CENELEC)

European Telecommunication Standards Institute (ETSI)

Standards Harmonisés

EN 50XXX

EN 55XXX

EN 6XXXX

EN 300XX

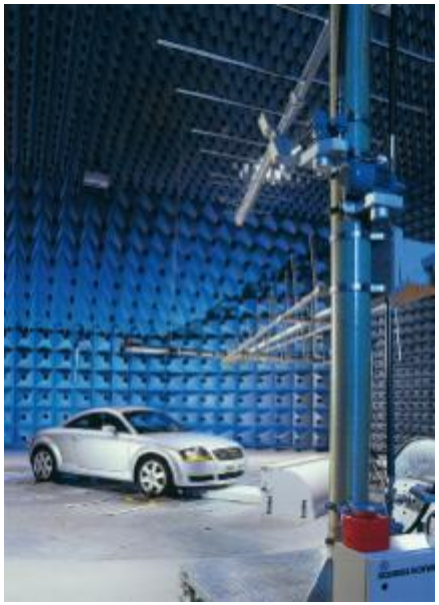
Standards commerciaux harmonisés EN XXXXX (liste non exhaustive)

Basic standard (general and fundamental rules)	*EN 61000-4-x (IEC61000-4-x)*	EMC – Testing and measurement techniques
Generic standard (for equipments in a specific environment)	EN 61000-6-3 *(IEC61000-6-3)*	Generic Emission Standard, for residential, commercial and light industrial environment
	EN 61000-6-1 *(IEC61000-6-1)*	Generic Immunity Standard, for residential, commercial and industrial environment
Product standard (for a specific product family)	EN 55022 *(CISPR22)*	Information technology equipment (ITE)
	EN 55014 *(CISPR14)*	Household appliances, electric tools and similar apparatus
	EN 55012 (CISPR12)	Vehicles, boats and internal combustion engines
	EN 330220 (*ETSI 330 220)*	Electromagnetic compatibility and radio spectrum matters (ERM); Short Range Devices (SRD); Radio equipment to be used in the 25 MHz to 1 000 MHz frequency range with power levels ranging up to 500 mW;
	EN 330330 *(ETSI 300330-1)*	Electromagnetic compatibility and radio spectrum matters (ERM); Short Range devices (SRD); Radio equipment to be used in the frequency range 9 KHz to 25 MHz and inductive loop systems in the frequency range 9 KHz to 30 MHz

Autres standards

- ✓ Les secteurs automobiles, militaires, aéronautiques, ferroviaires ont des standards CEM propres.
- ✓ Raisons historiques ou propres au secteur.

Applications	Références de standard
Automobile	ISO 7637, ISO 11451, ISO 11452, ISO 10605, CISPR 25, SAE J1113
Aeronautique	DO-160, ED-14
Militaire	MIL-STD-461D, MIL-STD-462D, MIL-STD-461E



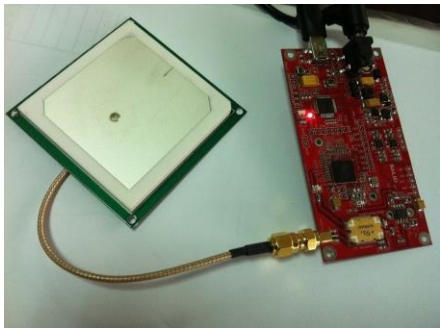
Rohde&Schwarz

Les équipements suivants sont-ils soumis à une directive CEM ?

- ✓ **Une clé USB WiFi fonctionnant sur une bande dite ISM (libre de droit)**

- ✓ **Une carte mère d'un serveur informatique**

- ✓ **Une antenne passive pour application RFID**



- ✓ **Un casque audio sans fil**

Cas d'étude n° 1

- Vous souhaitez vendre sur le marché européen un ordinateur portable type « Notebook ».

- Etes-vous soumis à la directive européenne CEM 2004/108/EC ?

- Si oui, quel(s) standards harmonisés devriez-vous suivre ? Quels sont les tests que vous devriez mener pour assurer la certification CEM ?

Cas d'étude n° 1

- Application des standards harmonisés EN55022 : "Information technology equipment – Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement" et EN55024 : « Information technology equipment – Immunity characteristics – Limits and methods of measurement » :
  - Tout équipement dont la fonction principale est le traitement, le stockage, l'affichage, le contrôle de données, avec au moins un terminal pour le transfert d'information et une tension d'alimentation < 600 V.
  - Exception de tout équipement ou module de l'équipement ayant pour fonction l'émission ou la réception radio.

Cas d'étude n° 1

- Tests d'émission suggérés :

Conducted emission	150 KHz – 30 MHz on power supply mains
	150 KHz – 30 MHz on telecommunication ports
Radiated emission	30 MHz – 6 GHz @ 3 or 10 m

- Tests d'immunité suggérés :

ESD	+/- 4 KV contact, +/- 8 KV air
EFT / burst	5/50 ns, 1 KV, 5 KHz repetition
Conducted immunity	150 KHz – 80 MHz, 3 V rms
Radiated immunity	80 – 1000 MHz, 3 V/m, modulation AM 1 KHz 80%
Surge	1 KV 1.2/50 µs pulse on power
Voltage dips and interruptions	40 % variations of the power supply, repeated 5×

Cas d'étude n° 2

- Vous souhaitez vendre sur le marché européen un émetteur/récepteur radio pour une application de télécommande dans un environnement résidentiel. L'émetteur fonctionne sur une des bandes ISM (434 MHz). Sa puissance d'émission est limitée à 500 mW. Il s'agit d'un équipement portable

- Etes-vous soumis à la directive européenne CEM 2004/108/EC ?

- Si oui, quel(s) standards harmonisés devriez-vous suivre ? Quels sont les tests que vous devriez mener pour assurer la certification CEM ?

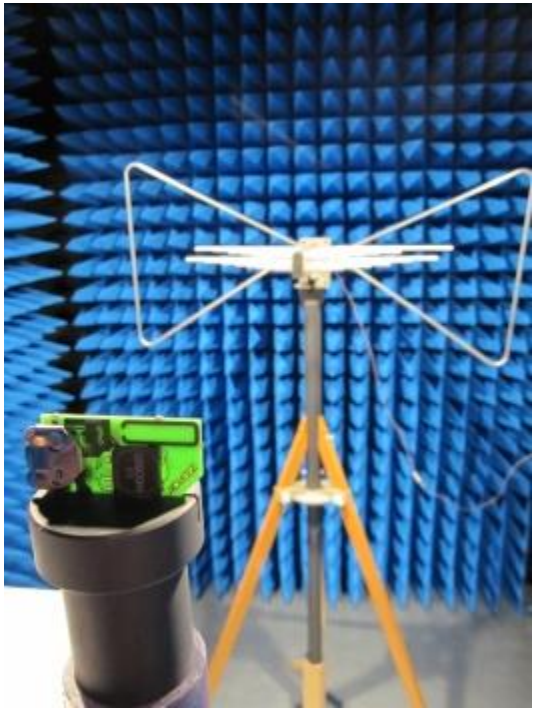
Cas d'étude n° 2

- Pas directement concerné par la directive CEM 2004/108/EC, mais par la directive RED 2014/53/UE.
- Le standard harmonisé EN 300220: "Electromagnetic compatibility and radio spectrum matters (ERM); Short Range devices (SRD); Radio equipment to be used in the 25 MHz to 1000 MHz frequency range with power levels ranging up to 500 mW" est adapté aux équipements radio de faible portée fonctionnant entre 25 et 1000 MHz :
  - Présentant une sortie radiofréquence avec une antenne intégrée ou non;
  - Pour des alarmes, de l'identification, des télécommande, télémétrie…
  - Stations fixes, mobiles et portables;
  - Pas de limitations vis à vis du type de modulation.

Cas d'étude n° 2

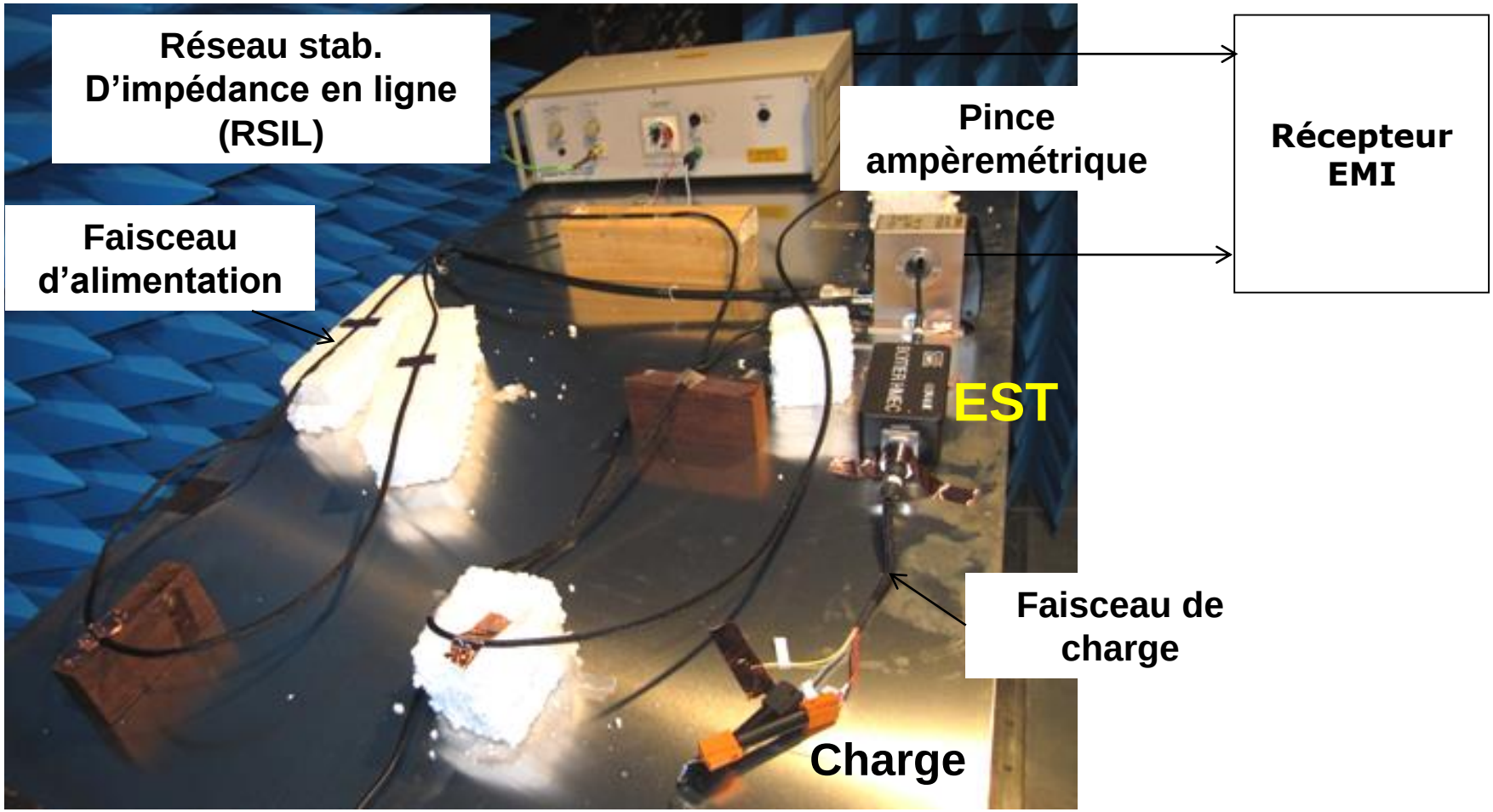
- Tests suggérés :

Frequency error or drift	Does the carrier frequency remains stable?
Effective radiated power	The radiated power must not exceed a max. level (< 500 mW)
Transient power	The switching of the transmitter produces interferences in adjacent spectrum
Adjacent channel power	The power transmitted in adjacent band must be limited.
Spurious emissions	Parasitic emissions from the emitter and receiver between 9 KHz and ?? Must be limited.
Frequency stability under low voltage conditions	The emission from the transmitter must remain stable even in extreme low power conditions.
Duty cycle	The manufacturer must indicate the duty cycle of the equipment
Blocking or desensitization	Capability of the receiver to receive a wanted signal in presence of unwanted signal



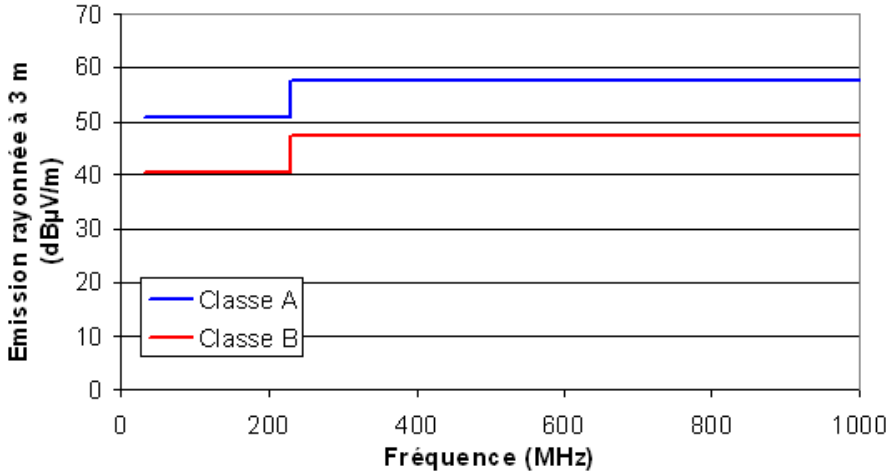
- Bien que non indiqués, des tests ESD devraient être faits.

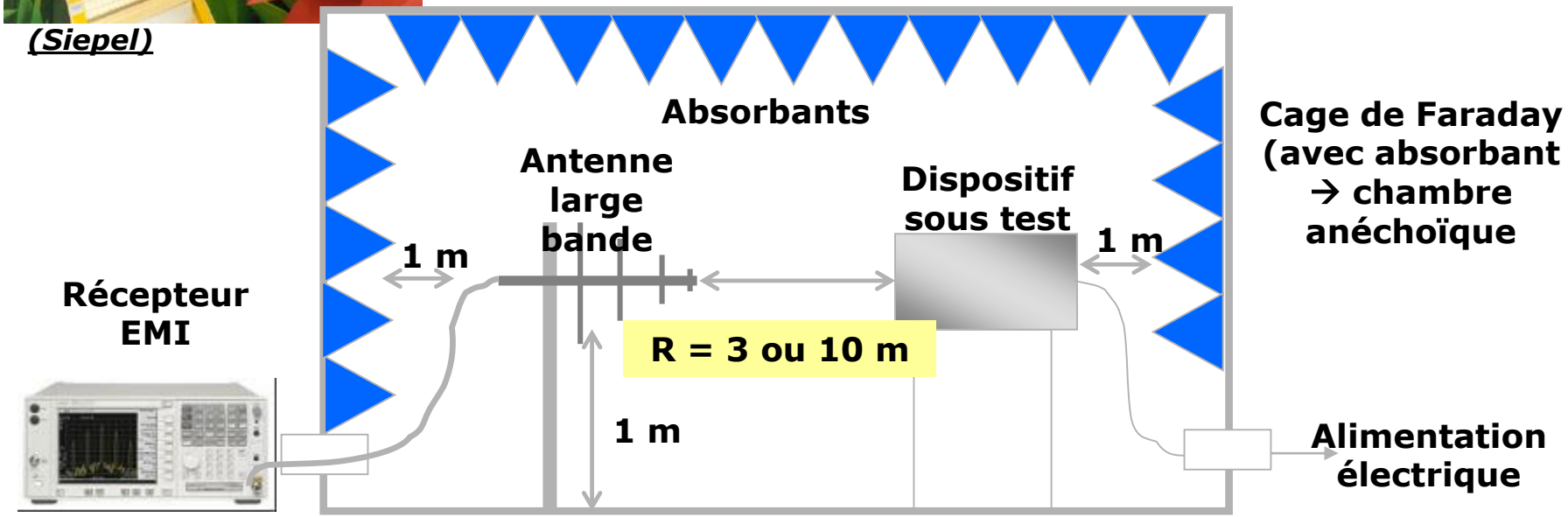
Exemple de test d'émission : émission conduite (150 kHz – 30/150 MHz)



Exemple de test d'émission : émission rayonnée en chambre anéchoïque (30-1000 MHz)

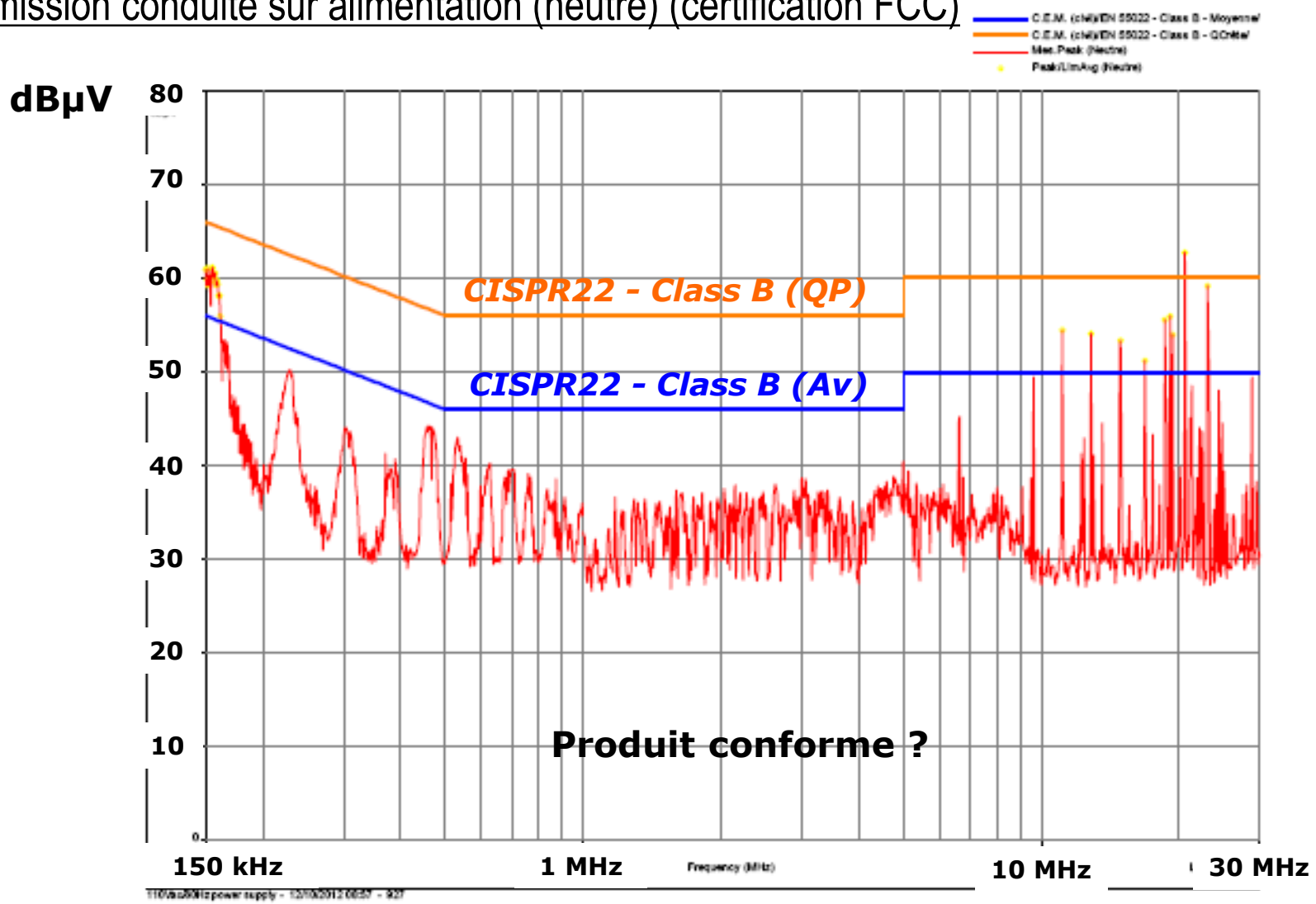
(Siepel)





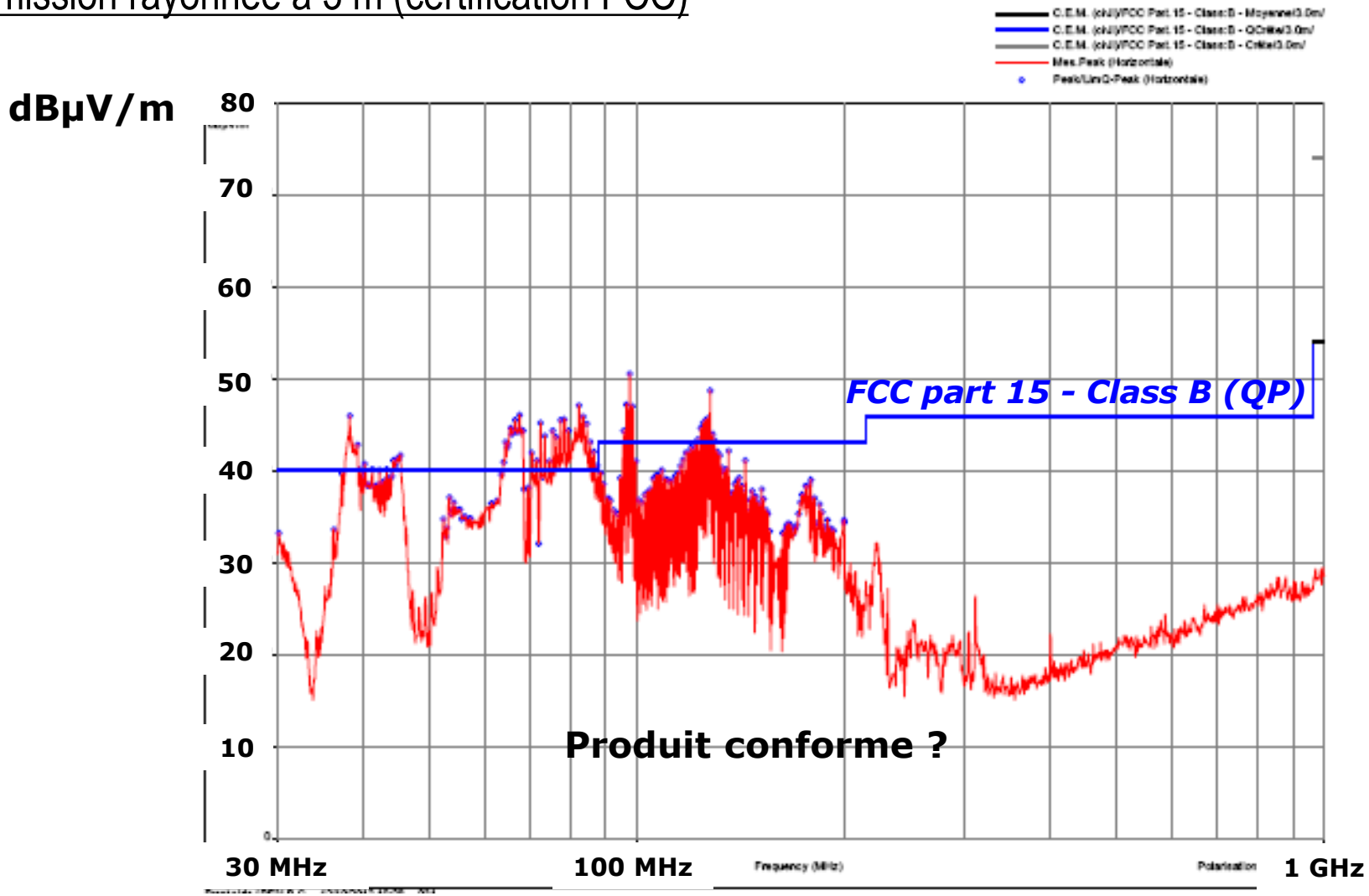
Exemple de test d'émission

Emission conduite sur alimentation (neutre) (certification FCC)



Exemple de test d'émission

Emission rayonnée à 3 m (certification FCC)



Exemple de test d'immunité : immunité rayonnée en chambre anéchoïque (30-1000 MHz)

(Siepel)

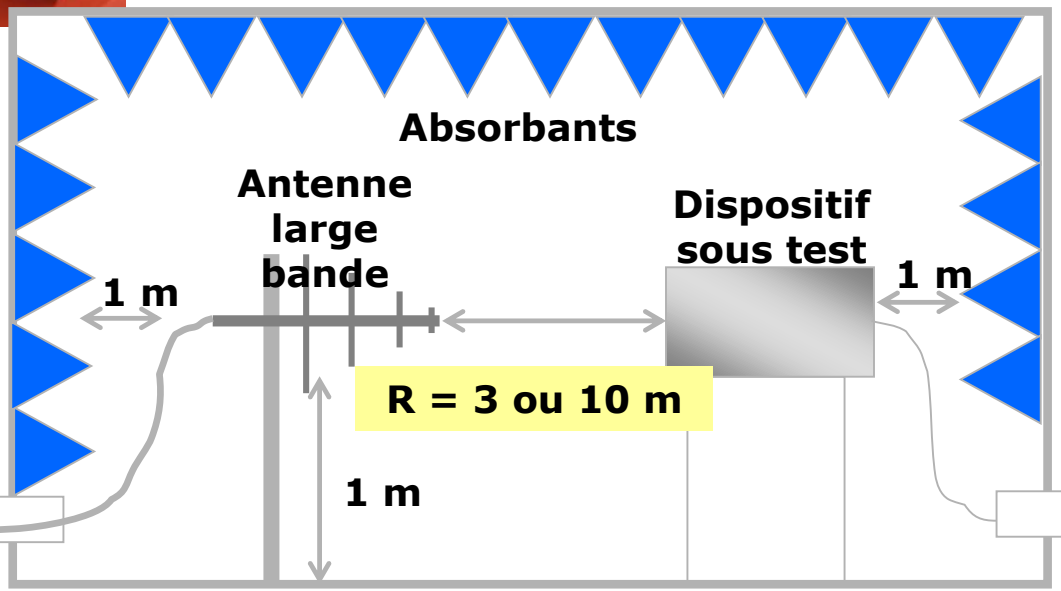
Niveau RI typique (harmonique) :

Produit commercial (marquage CE) : 3 – 10 V/m

Automobile (ISO-11452-2): 25 – 200 V/m

Militaire, espace (MIL-STD461G): 20 – 200 V/m

Aviation civile (DO160-D): 8 – 800 V/m



V– Mise en conformité CEM

Vue générale d'un problème de CEM – Où agir pour améliorer la CEM

✓**Réduire l'émission à la source** (temps de commutation + long, découplage, étalement de spectre…)

Source

(dv/dt, di/dt)

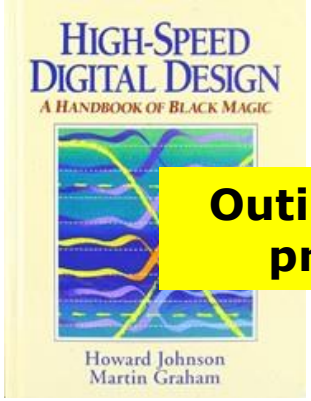
Chemin de couplage de l'énergie électromagnétique (mode conduit, rayonné)

✓**Maîtriser la propagation des champs électromagnétiques** (placement&routage, éloignement, filtrage, blindage…)

Victime

✓**Augmenter l'immunité de la victime** (Filtrage, découplage, suppresseur transitoire, design robuste, …)

Vue d'ensemble



Outils, Bonnes pratiques

La CEM est la 3e cause de remise en conformité des équipements électriques et électroniques.

La CEM est vue par les concepteurs électroniques comme de la "magie noire".

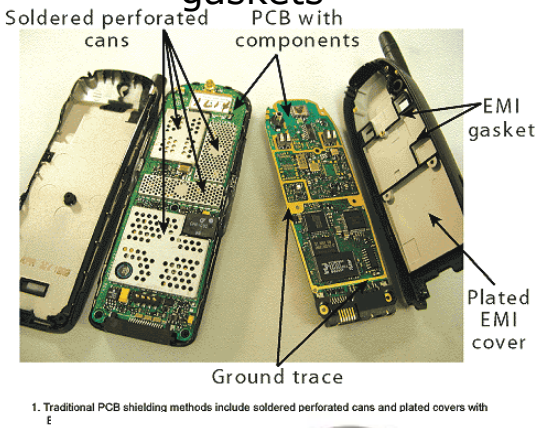
Les solutions (entre autres) :

Découplage

Common-mode choke

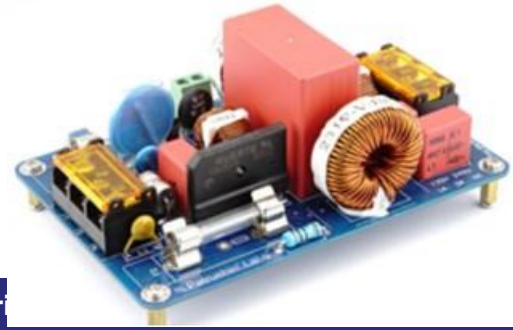
Diode TVS, MOV

Shielded cabinet, EMI gaskets

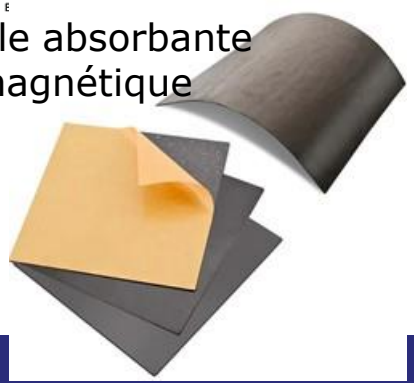


Ferrites

Filtre EMI

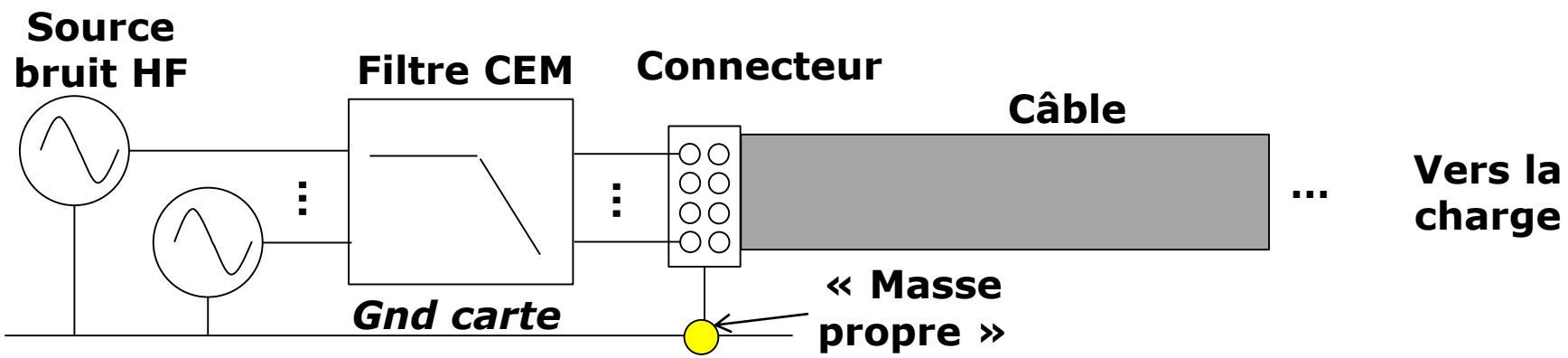


Feuille absorbante magnétique



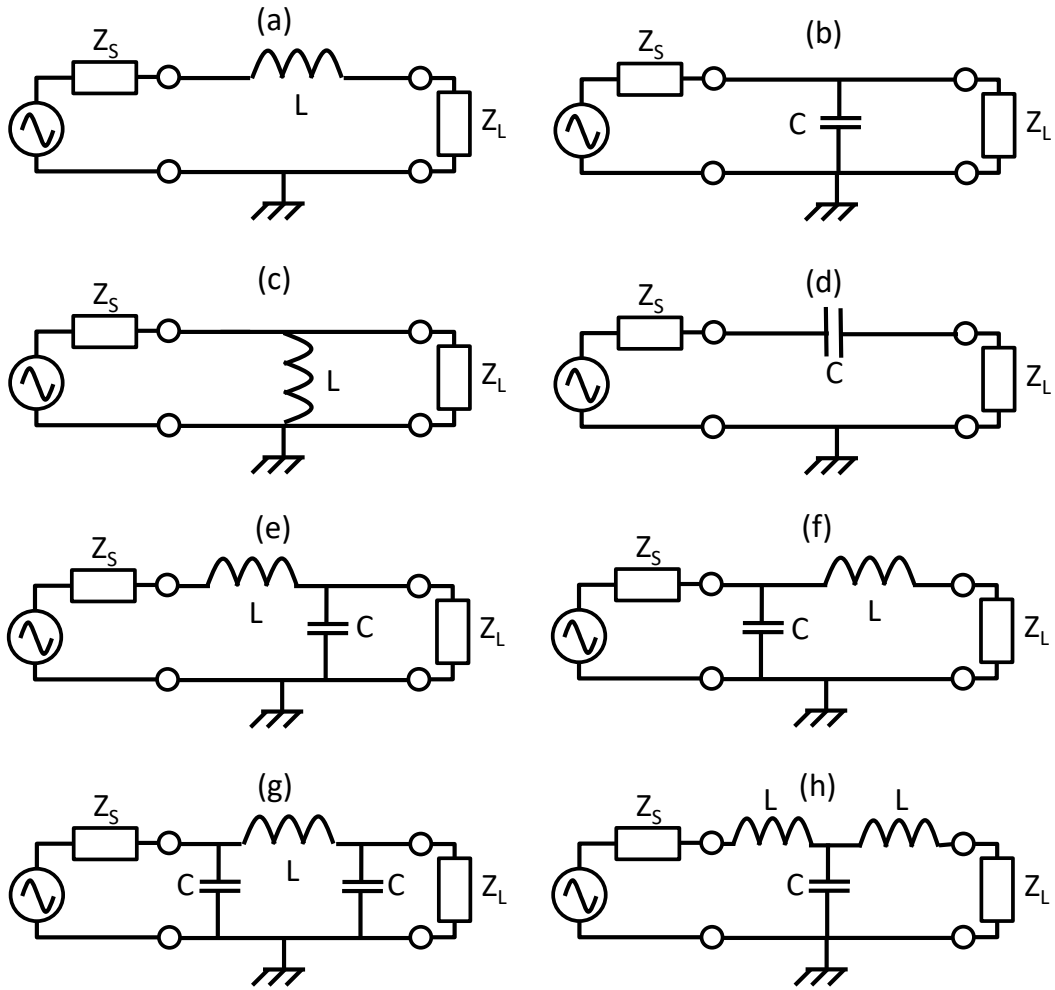
Filtre CEM

- **Rôle d'un filtre CEM :** supprimer les émissions conduites produites par le système pouvant se propager sur les câbles (alimentation et signaux) → rayonnement
- Comportement du filtre : passe-bas (filtrage du contenu HF)



- Composants usuels d'un filtre CEM ?
  - Condensateur, inductance, ferrite, inductance de mode commun
  - Suppresseur de transitoires (TVS, diode transil, varistor, …)

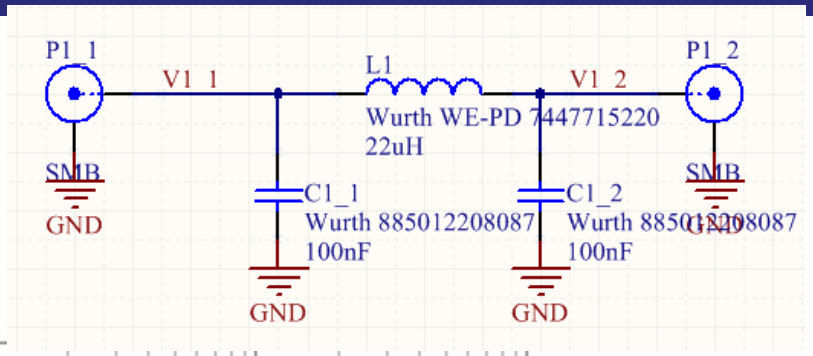
Filtre CEM

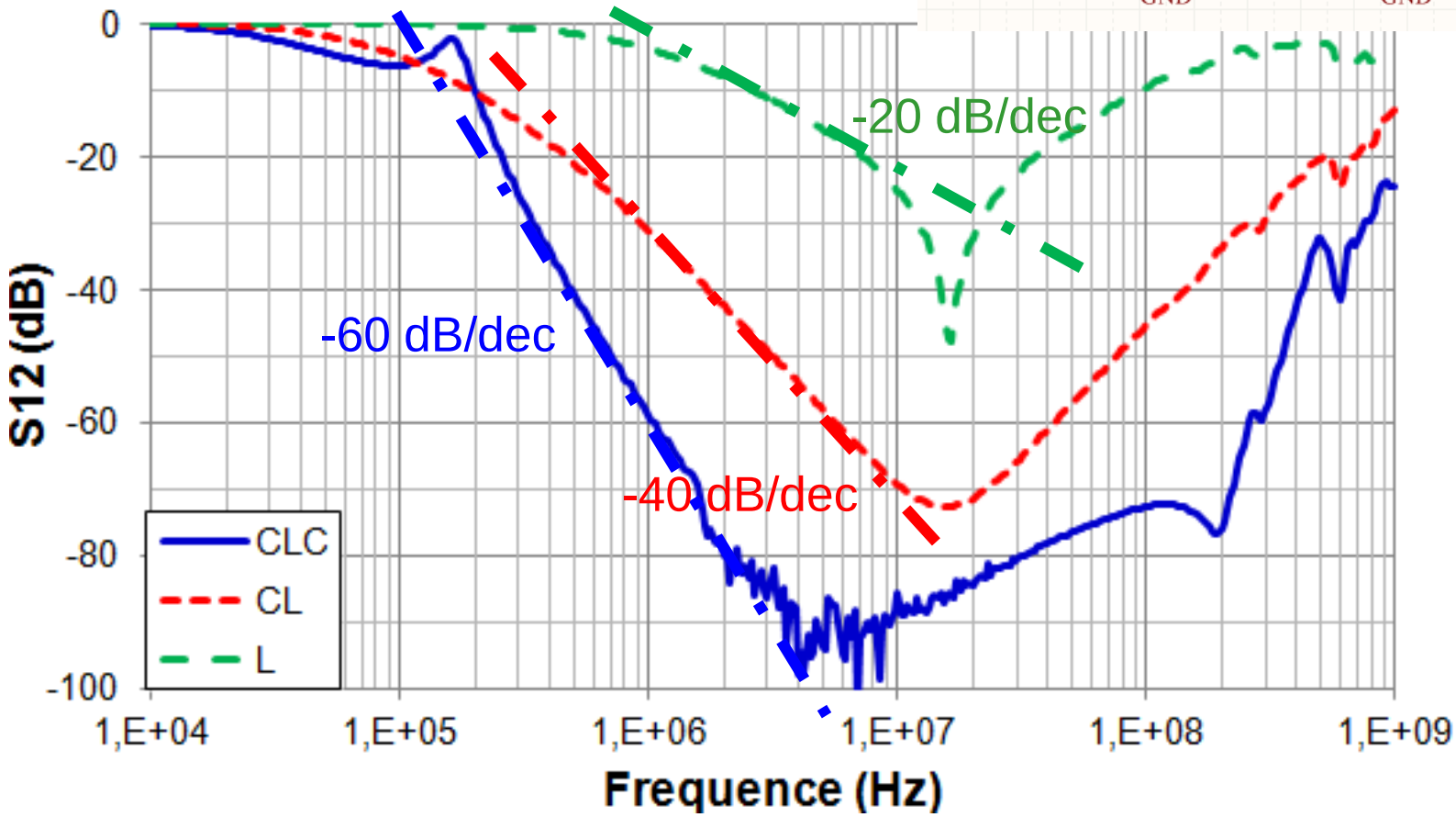


- **Parmi ces 8 structures de filtre, lesquelles correspondent à des filtres CEM**
- **Pour quelles conditions d'impédance fonctionnent-ils de manière optimale ?**
- **Lequel ou lesquels sont les plus efficaces ?**

Filtre CEM

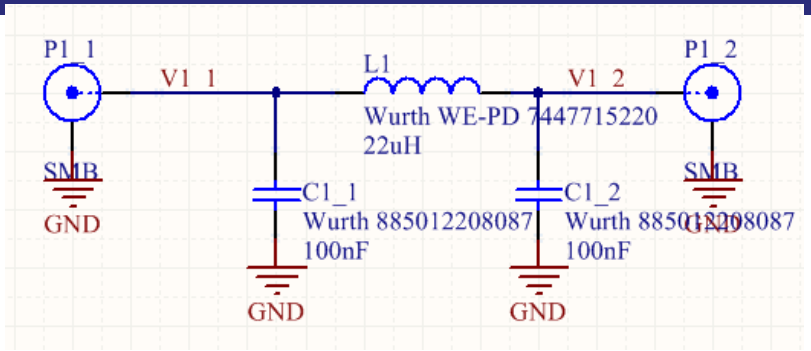
- **Comparaison structure du filtre (CLC, CL, L)**

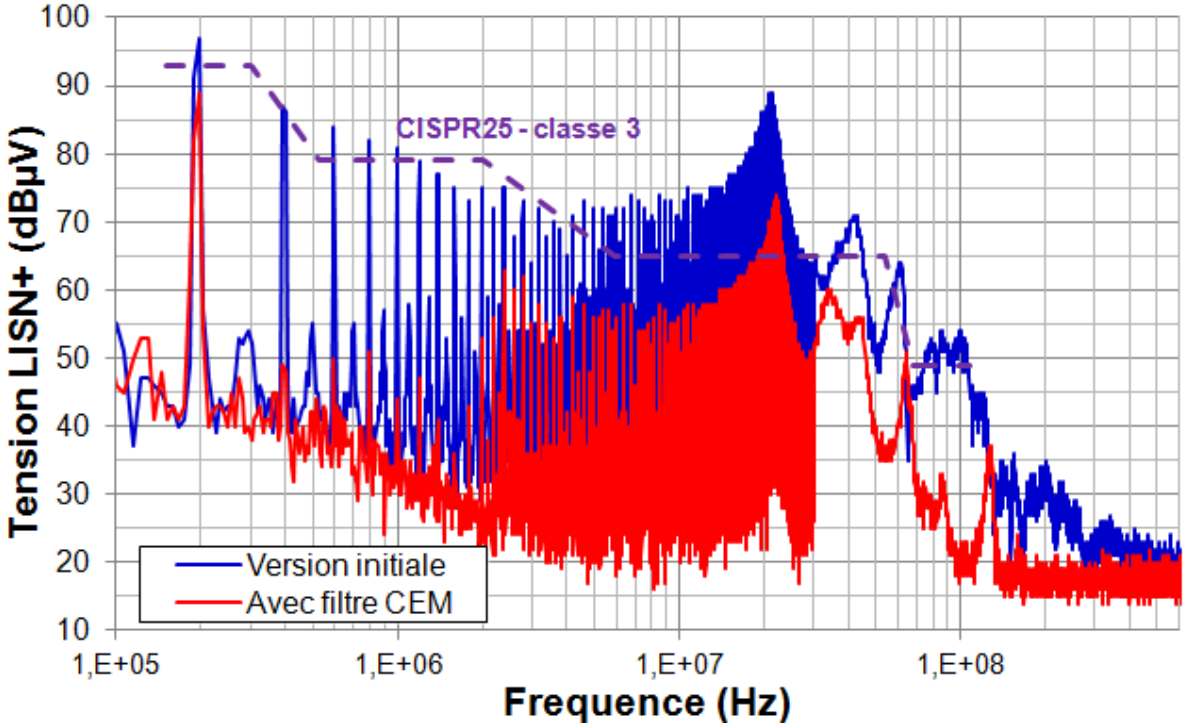




Filtre CEM

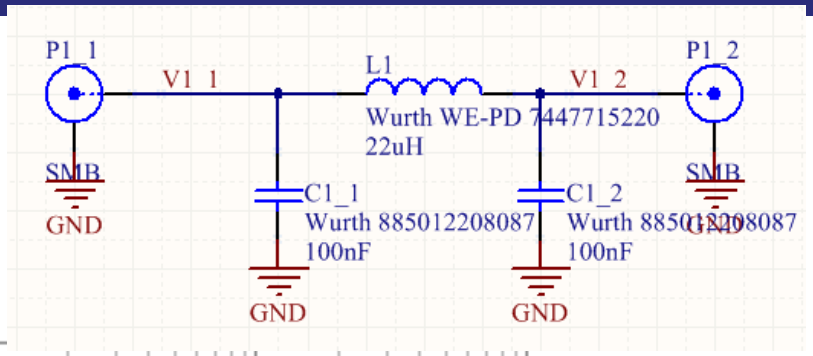
- **Exemple : impact sur l'émission conduite d'un filtre CLC placé sur l'alimentation en entrée d'un convertisseur DC-DC**

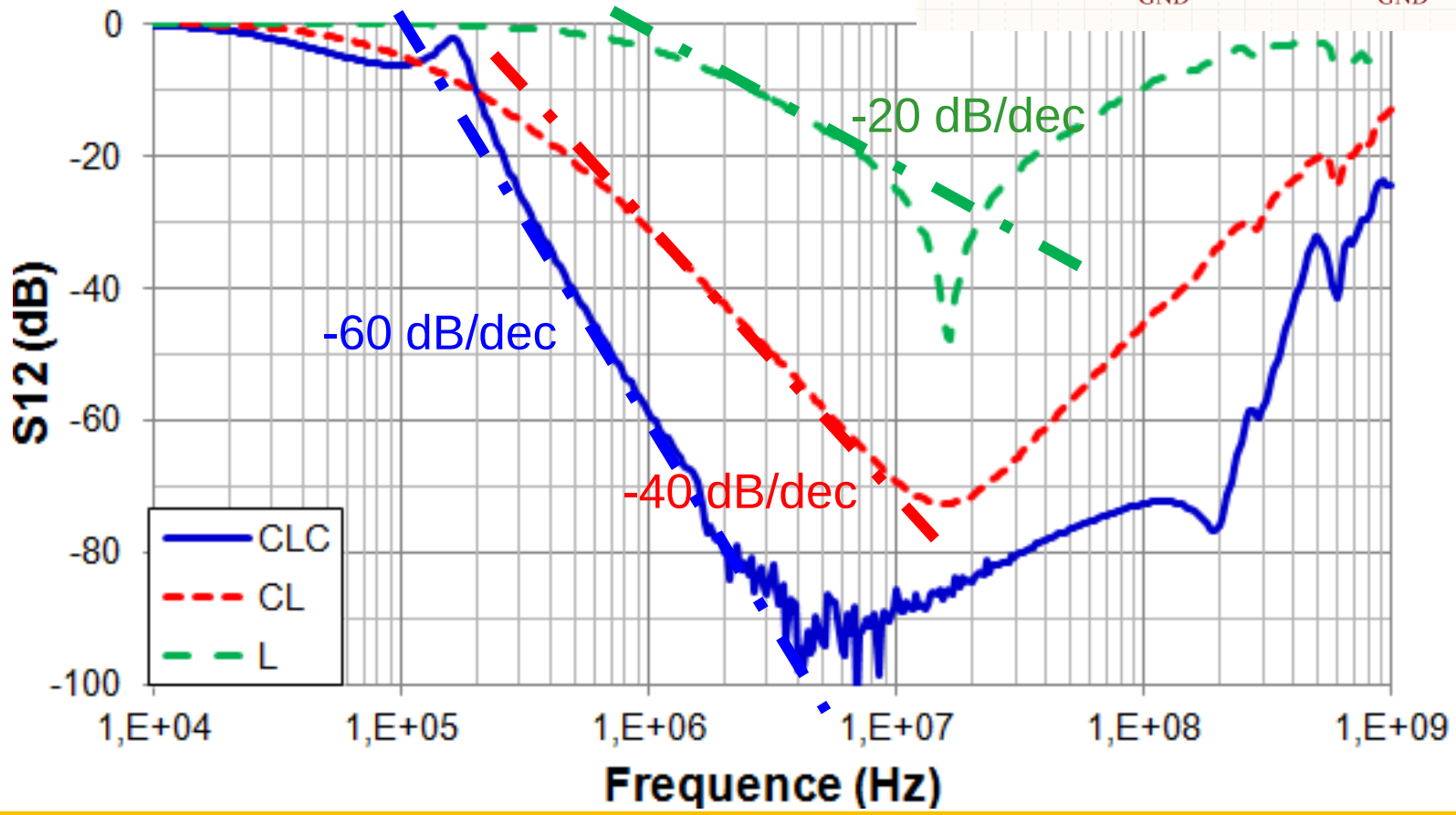




Filtre CEM

- **Comparaison structure du filtre (CLC, CL, L)**





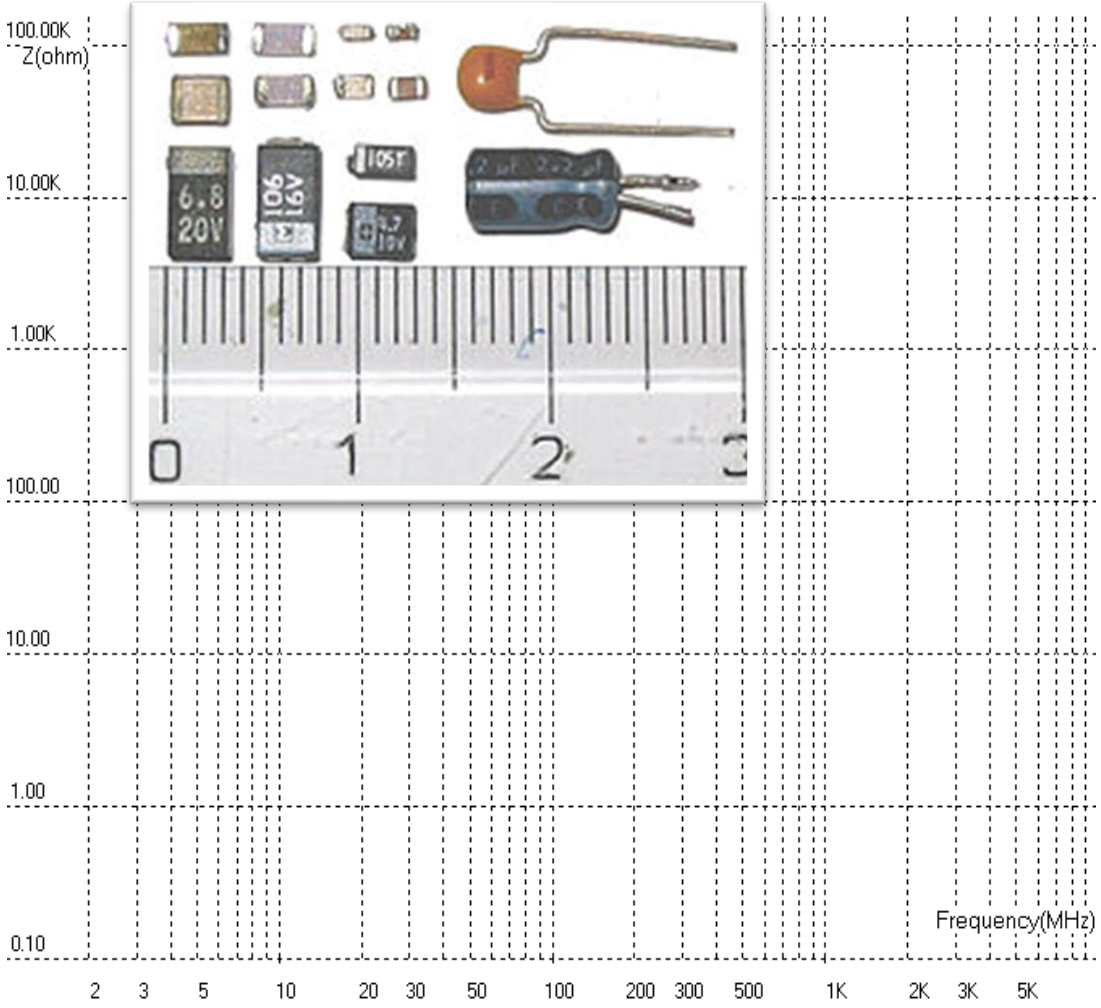
Pourquoi ces filtres sont-ils moins efficaces au-delà d'une dizaine de MHz ?

Impédance HF des composants passifs

Profil fréq. d'impédance

- Condensateur céramique X7R 100 nF 0805

Modèle électrique équivalent ?

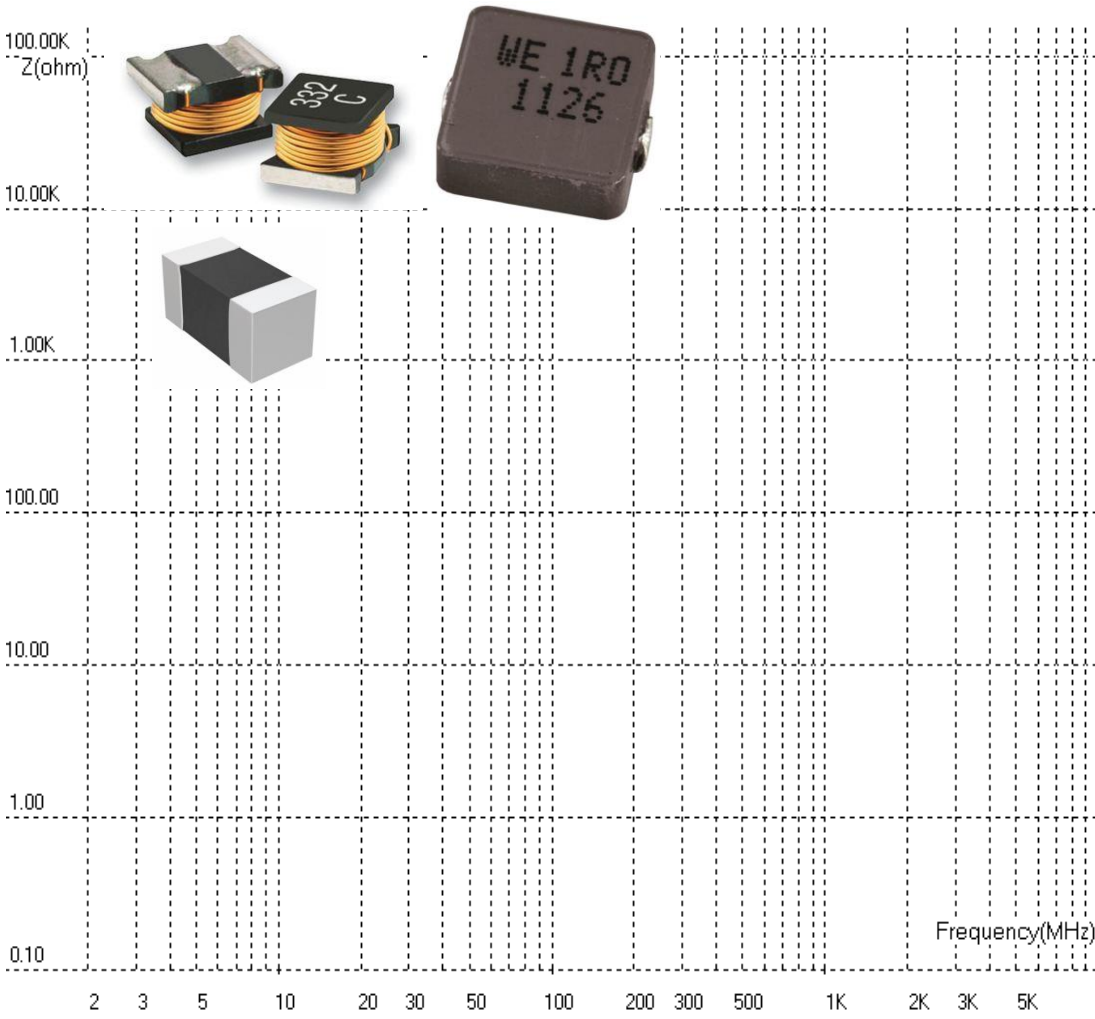


Impédance HF des composants passifs

Profil fréq. d'impédance

- Inductance CMS 47 µH
- Perle de ferrite (BLM18HK102SN1 - 1 kΩ at 100 MHz)

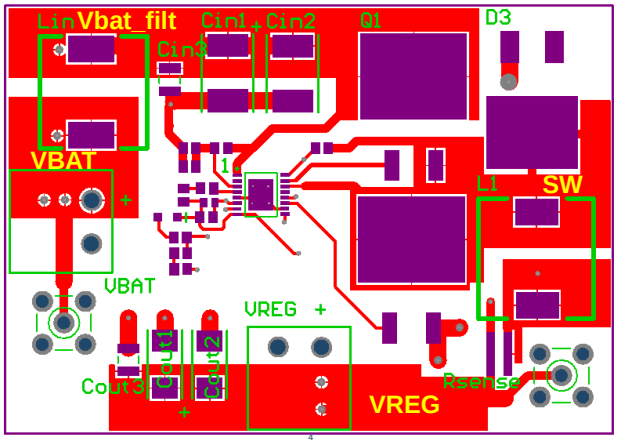
Modèle électrique équivalent ?



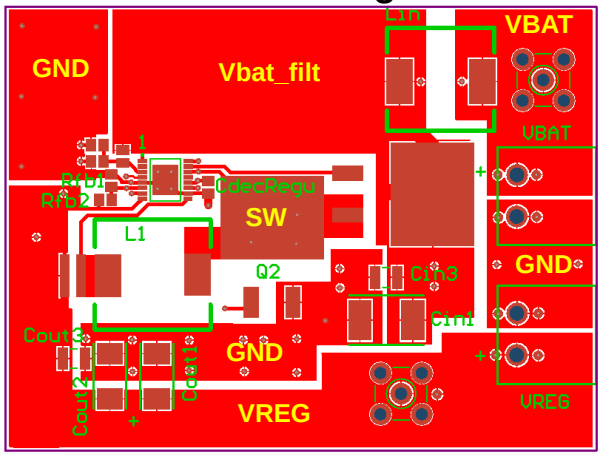
Impact du placement-routage

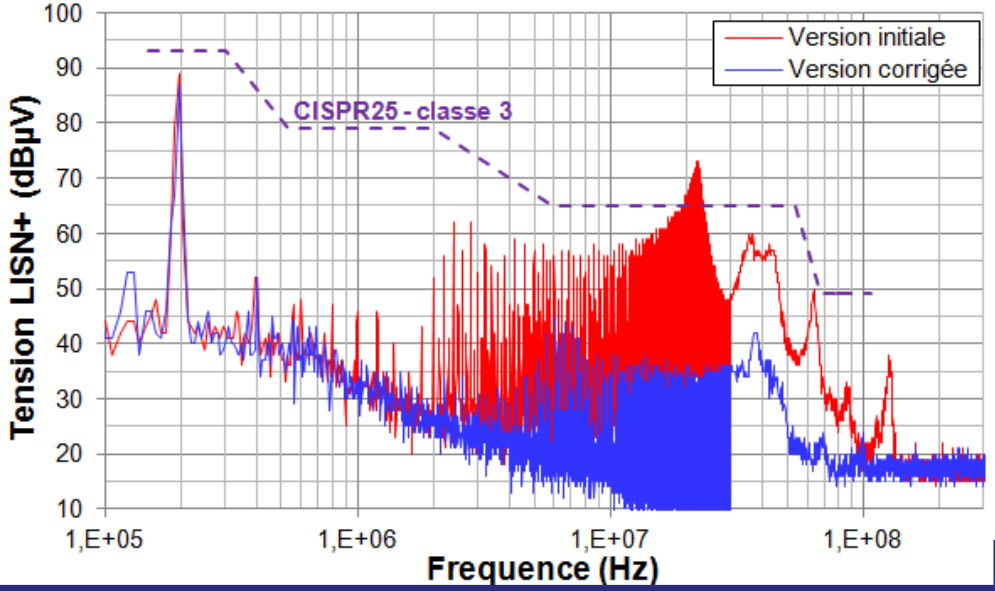
- **Exemple : convertisseur DC-DC – même schéma électrique mais deux versions de placement-routage**

Version initiale



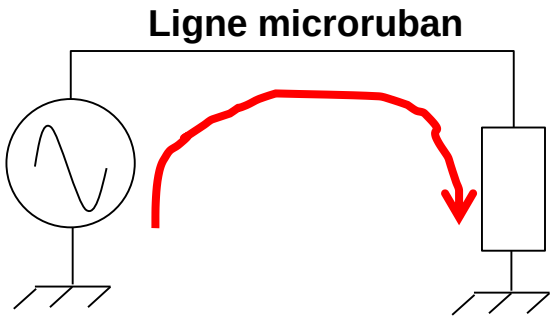
Version corrigée



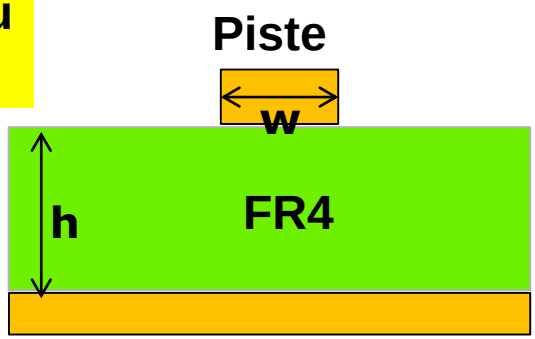


Impact du placement-routage – Une erreur fondamentale

- **Retour du courant HF dans une ligne micro-ruban**



Vue en coupe du circuit imprimé



Plan de masse carte (plan de référence)

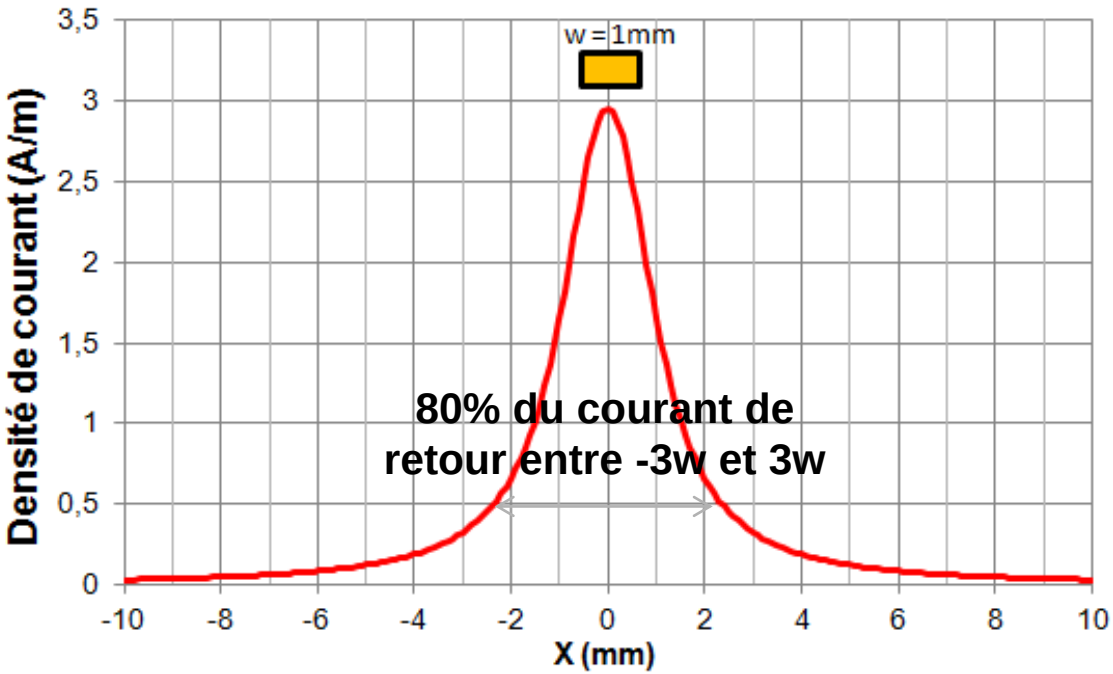
Par où revient le courant ? Comment se répartit-il ?

- ✓**En DC ?**
- ✓**En HF ?**

Impact du placement-routage – Une erreur fondamentale

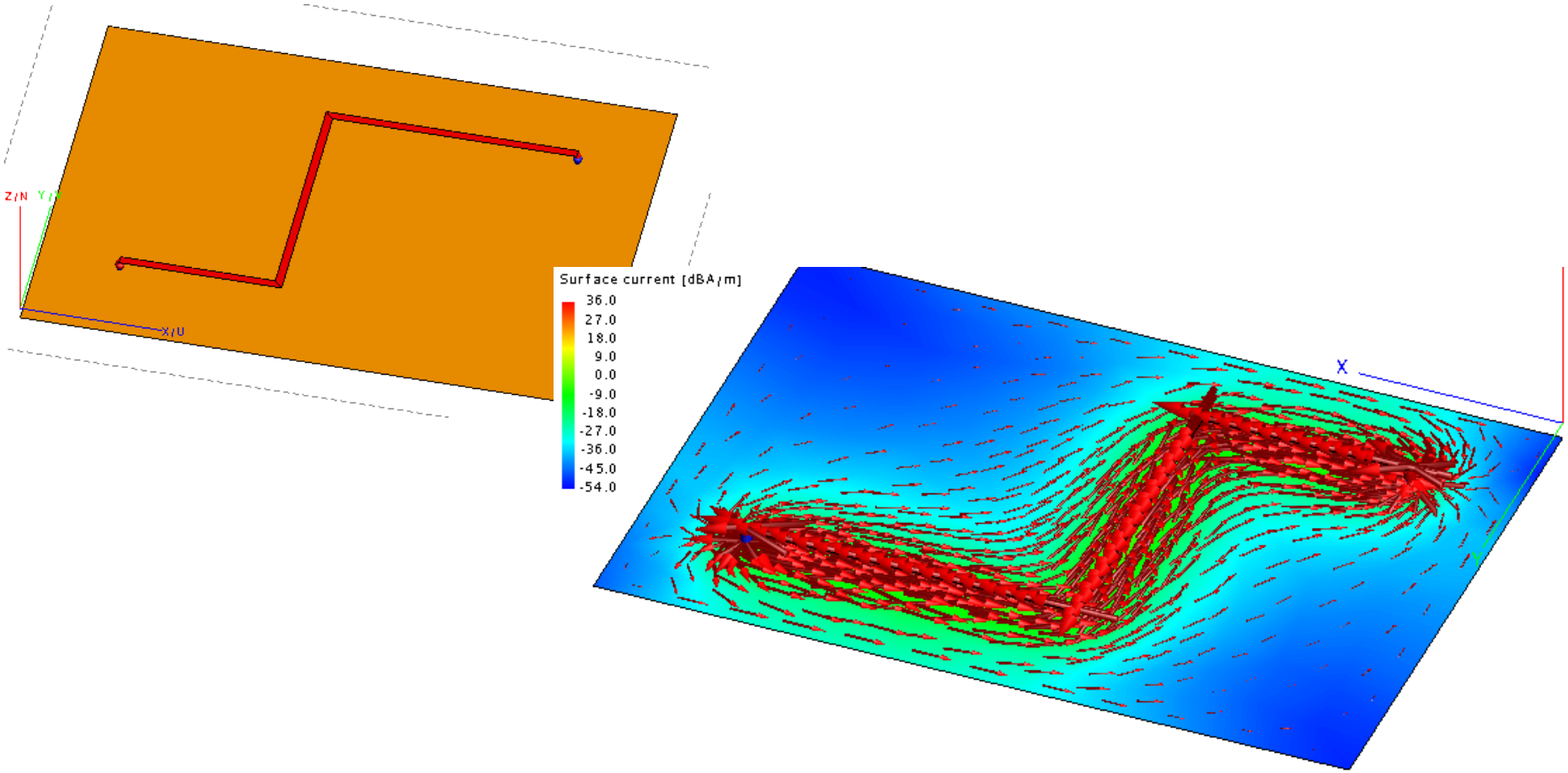
- **Le courant revient par le chemin de plus basse impédance (résistance en BF, inductance en HF)**
- **En HF, le courant de retour se répartit sur le plan de référence sous la piste. Tout se passe comme si le courant revenait par un conducteur fictif symétrique par rapport au plan image.**
- **Distribution du courant dans le plan de référence :**

$$J(A/m) \approx \frac{I_0}{\pi h} \frac{1}{1+\left(\frac{x}{h}\right)^2}, w < h$$



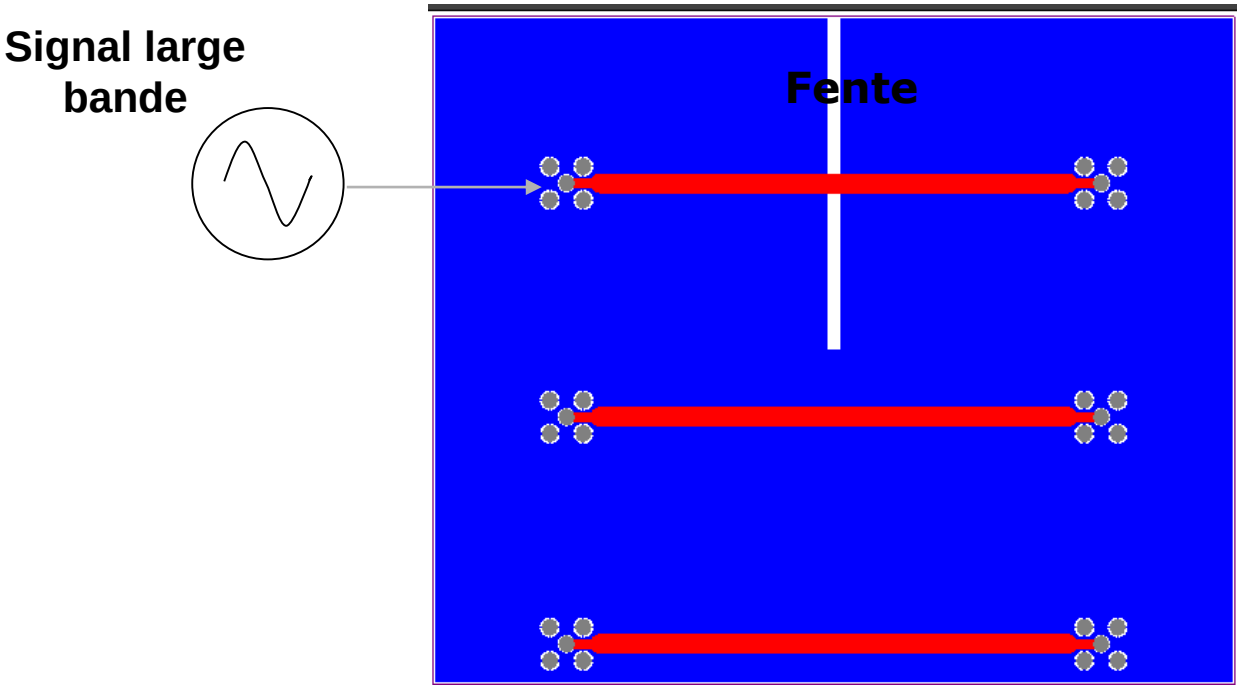
Impact du placement-routage – Une erreur fondamentale

- **Retour du courant HF dans une ligne micro-ruban**
- **Simulation (I = 10 mA, F = 100 MHz)**



Impact du placement-routage – Une erreur fondamentale

- **Impact des fentes dans un plan de référence (plan de masse)**

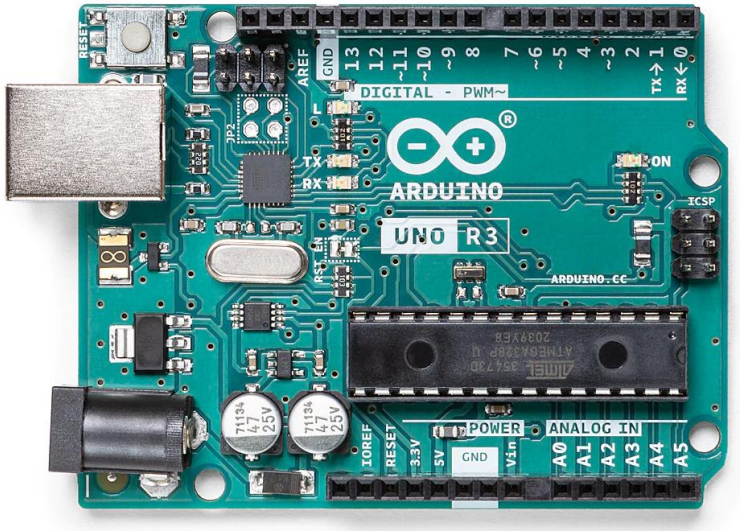


Analyser l'impact de la fente sur :

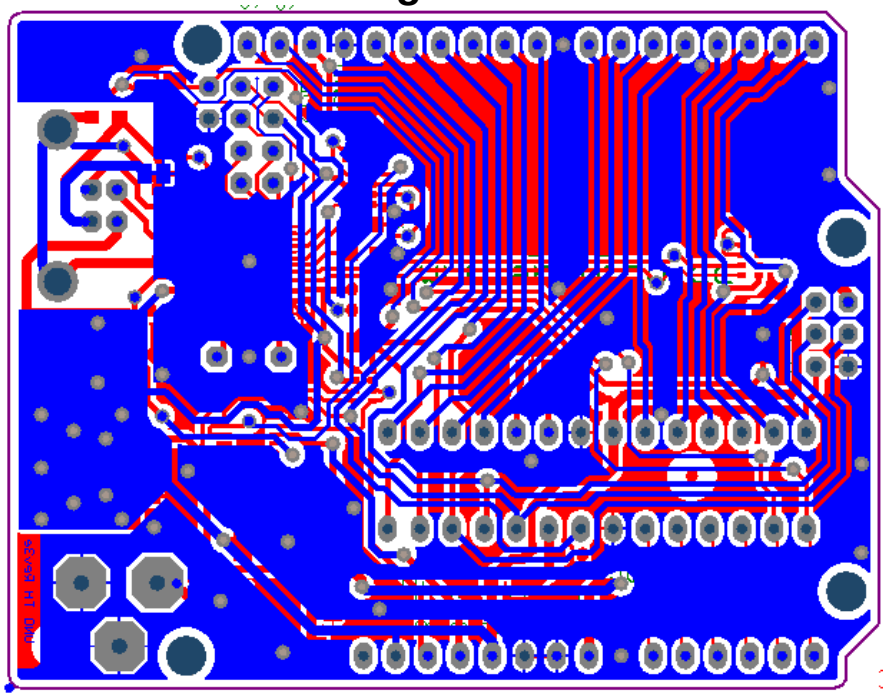
- **La distribution du courant sous la ligne**
- **Le champ rayonné**

Impact du placement-routage – Une erreur fondamentale

- **Exemple concret : carte Arduino Uno**



Routage en bottom



Signalétique (ISO/DIS 7010 – NF X 08-003)

Radiations non ionisantes, danger

Champ magnétique, danger

Entrée interdite aux porteurs d'un stimulateur cardiaque