

# Impulsion électromagnétique

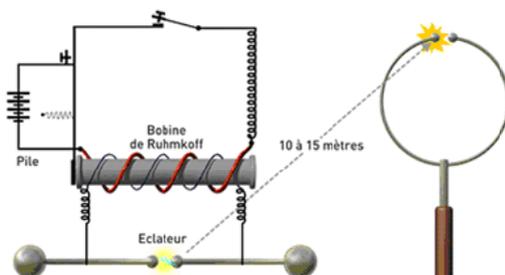
Jacques David, Tân-Hoa Vuong, Jean-Pierre Cabanel

## 1. Un peu d'histoire de l'électromagnétique

- ✚ L'ambre ( $\eta \lambda \varepsilon \kappa \tau \rho \omicron \nu$ ) et l'aimant ( $\mu \alpha \gamma \nu \eta \tau \eta \varsigma$ ) : 3000 ans d'histoire !
- ✚ Premières traces écrites :
  - Thalès (624–547 av. J.C.),
  - Platon (427–341 av. J.C.)
- ✚ Ces philosophes (physiciens) décrivent deux phénomènes distincts des forces mystérieuses dans leurs observations célestes. *Les forces et les phénomènes électromagnétiques se trouvent partout autour de nous ! (mais pourquoi on ne sent rien ?)*
- ✚ Ces pensées ont été unifiées à la fin du XIX siècle (1864) par **James Clerk MAXWELL** (1837-1879). Sa première publication sur ses travaux en matière d'électricité en 1855 est intitulé "On Faraday lines of force". Il y présente des images hydrodynamiques lui permettant d'exprimer les lois connues de l'électromagnétisme dans un langage nouveau largement inspiré par la mécanique des fluides. Il montre en particulier l'analogie formelle entre l'électrostatique, la magnétostatique et le mouvement des fluides idéaux.
- ✚ Ensuite Maxwell a établi un système composé de quatre équations bâties à partir des connaissances de la mécanique rationnelle de **NEWTON** :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{rot}(\vec{H}) = 0 \\ \text{rot}(\vec{E}) = \frac{d\vec{H}}{dt} \\ \frac{d\vec{E}}{dt} = -\text{rot}(\vec{H}) \\ \frac{d\vec{H}}{dt} = \text{rot}(\vec{E}) \end{array} \right. \quad \dots \quad \begin{array}{l} \vec{E} \text{ et } \vec{H} \text{ représentent respectivement le} \\ \text{champ Electrique et le champ} \\ \text{magnétique.} \end{array}$$

- ✚ Les expériences de Heinrich. Rudolf. Hertz (1857 – 1894) en 1888 ont prouvé l'existence et la propagation des ondes électromagnétiques :



## 2. Sources de perturbation électromagnétiques

De très nombreuses sources électromagnétiques peuvent perturber le bon fonctionnement ou même détruire, des équipements électroniques analogiques ou numériques comme en particulier les divers calculateurs et les circuits comportant des microprocesseurs ou des microcontrôleurs. Il en existe deux grandes familles : les sources de perturbations naturelles et les sources de perturbations qui viennent des activités humaines.

### 2.1. Sources de perturbations naturelles :

- Elles peuvent paraître anecdotiques mais elles sont souvent très puissantes et même destructrices comme le coup de foudre au but qui correspond à un courant de décharge entre le nuage et le sol lors de l'éclair compris entre 3 et 300 kA pendant un orage.

- Les orages géomagnétiques dont le plus célèbre et le plus puissant est probablement celui d'août 1859 durant lequel des opérateurs de télégraphe reçurent des commotions électriques et où des aurores boréales furent visibles jusqu'au niveau des tropiques. Plus près de nous l'éruption solaire de 1989 a provoqué une tempête géomagnétique qui a conduit à une panne électrique générale de 9 heures au Québec le 13 mars 1989. De très nombreuses tempêtes solaires passent pratiquement inaperçues comme celle du 23 juillet 2012 et les conséquences dépendent beaucoup de la situation et de la position de la terre dans l'espace. Ces orages magnétiques peuvent conduire à des pannes sur des réseaux de distribution électriques, des communications y compris internet, des satellites et selon la NASA dans les conditions les plus défavorables ce type de tempête pourrait ramener la civilisation au XVIIIème siècle.

- Divers bruits cosmiques dont la découverte et l'étude ont conduit à la naissance de la radioastronomie. Ces bruits ont été découverts en 1932 par Jansky qui investiguait sur l'origine des perturbations de communications radio intercontinentales.

### 2.2. Sources de perturbations artificielles :

La majorité des perturbations sont liées à l'activité humaine, par exemple, les divers bruits électromagnétiques produits par les machines ou les circuits électriques. Il faut y ajouter :

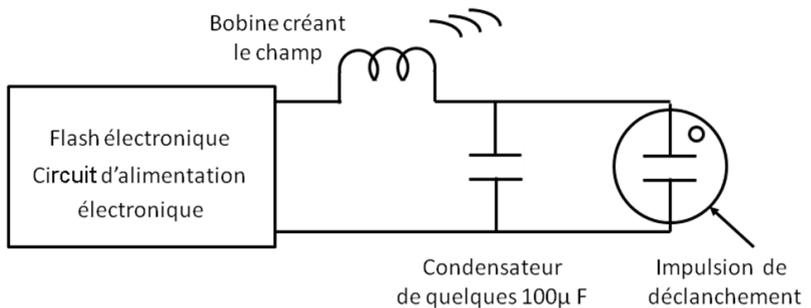
Les sources micro-ondes de forte puissance (MFP) qui utilisent typiquement des générateurs impulsionsnels de fréquence à base de tubes à vide de très grande puissance qui peuvent atteindre voire dépasser le GW crête, de plus il faut tenir compte du gain d'une antenne éventuelle qui va pouvoir encore en démultiplier les effets.

L'impulsion électromagnétique d'origine nucléaire (IEMN) ou electromagnetic pulse (EMP) qui est créée lors d'une explosion nucléaire est particulièrement puissante et destructrice. Les expérimentations américaines à haute altitude dans le pacifique en 1962 (Starfish Prime) ont provoqué de graves dégâts électriques à Hawaï située à 1.445 Km du point zéro. On peut imaginer ce que cela aurait donné dans le cas d'une ville électronique moderne contemporaine.

Une application concrète actuelle est proposée par la société eurekaerospace qui commercialise un dispositif micro onde de puissance capable d'arrêter le moteur d'un véhicule à distance (eurekaerospace.com).

Plus modestement il est possible de réaliser un générateur d'impulsion électromagnétique à partir d'un flash électronique pour la photo ou même celui d'un appareil photo jetable qui comporte un condensateur haute tension de quelques 100  $\mu\text{F}$  chargé sous environ 300 V soit une énergie stockée de l'ordre de quelques dizaines de joules cette énergie est dissipée dans un tube à éclat en environ 1ms pour donner le flash lumineux correspondant à une puissance instantanée d'environ quelques 10kW pendant la durée de l'éclair. En fonction des valeurs des impédances, les courants dans le circuit de décharge vont varier de quelques dizaines d'ampères à pratiquement 1 kA avec un temps de montée de quelques  $\mu\text{s}$ .

Il y a de très nombreuses descriptions de ces bricolages dans internet et il faut rappeler que les tensions mises en jeu et les forts courants obtenus sont très dangereux pour des expérimentateurs non qualifiés et imprudents même si ce dispositif fonctionne à partir d'une simple pile 1.5V. Dans ces sites internet de nombreuses démonstrations sont présentées allant de la destruction de RFID (RFID killer), la destruction sans contacts de petites caulettes et il est facile d'imaginer l'effet produit sur un dispositif comme un ordinateur en optimisant les puissances et la bobine créant l'impulsion électromagnétique.



*Schéma général d'un générateur d'impulsion électromagnétique artisanal construit à partir d'un flash électronique*

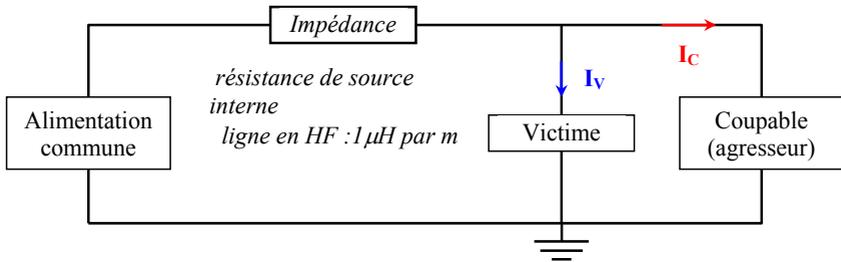
### 3. Notions de CEM (Compatibilité Electromagnétique)

- Une interférence électromagnétique est le résultat de la perturbation d'un système électrique ou électronique par un autre circuit ou un phénomène électrique extérieur au système.

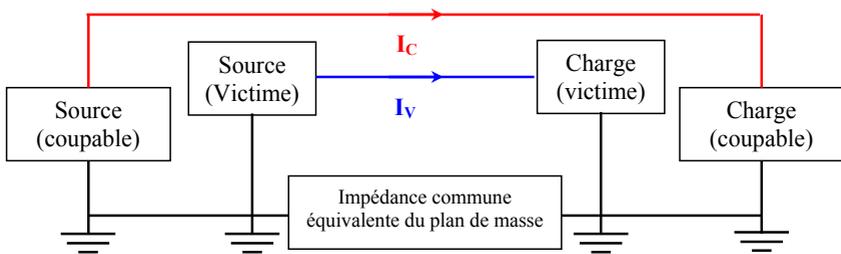
Le signal perturbateur est la source coupable et le circuit ou système perturbé est la victime qui est suffisamment vulnérable pour être affectée.

#### 3.1. Modes de couplages :

### 3.1.1. Couplage par alimentation unique

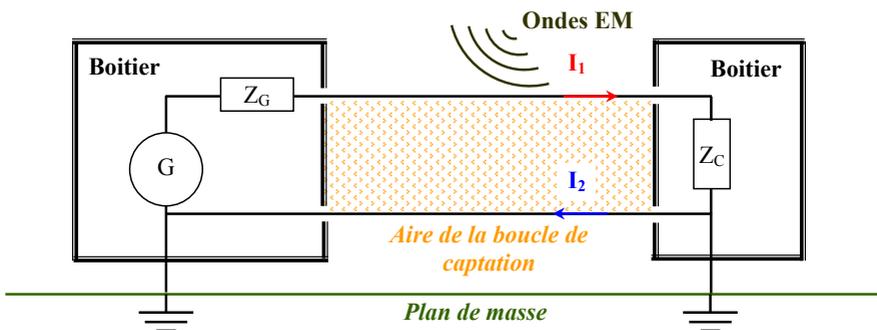


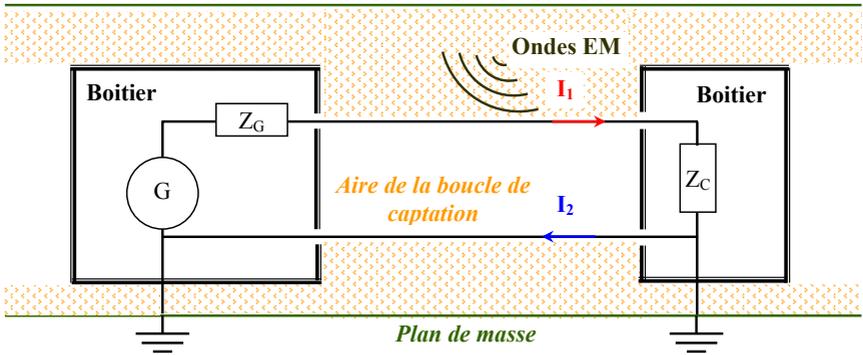
### 3.1.2. Couplage par impédance commune de masse



### 3.1.3. Couplage par champ électromagnétique sur câble en mode différentiel, ou en mode commun :

Mode différentiel





4. Couplage du type antenne-antenne :

Antenne au sens large : simple fil parcouru par un courant, boucle, surface isolée de la masse soumise à une tension variable dans le temps.

Réciprocité des antennes :

$$\text{Ondes électromagnétique } (\vec{E}, \vec{H}) \Rightarrow (V, I)$$

$$(V, I) \Rightarrow (\vec{E}, \vec{H}) \text{ Ondes électromagnétique}$$



Baie de mesure pour les tests en CEM

Champ électrique rayonné par une antenne

✚ Notion d'antenne isotrope :

Vecteur de **Poynting** :  $\vec{P} = \frac{\vec{E} \wedge \vec{H}^*}{2}$  ;  $\vec{E}, \vec{H}$  varie en fonction de  $\frac{1}{R}$

La puissance totale émise par une antenne isotrope  $P_0$  correspond au flux du vecteur de Poynting au travers de la sphère de rayon R englobant cette antenne.

$$\text{Ainsi : } E_{eff} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{P_0}{4\pi\epsilon v}}$$

Dans l'air  $\epsilon = \epsilon_0 = \frac{1}{36\pi 10^{+9}}$  et  $v = c = 3.10^{+8}$

$$\boxed{\begin{array}{l} E_{eff} = \left(\frac{1}{R}\right) \sqrt{30.P_0} \\ (V/m) \quad (m^{-1}) \quad (w) \end{array}}$$

Cette expression simplifiée permet de connaître le champ électrique efficace créée en un point par une antenne isotrope émettant la puissance  $P_0$

Equation des télécommunications (FRIS) :

Antenne émission :

La densité de puissance émise par une antenne isotrope en un point qui se trouve à une distance R de l'antenne  $D_{IE}$  :  $D_{IE} = \frac{P_E}{4\pi R^2}$  [ $w.m^{-2}$ ]

La densité de puissance émise par une antenne de gain  $G_E$  en un point qui se trouve à une distance R de l'antenne  $D_{GE}$  :  $D_{GE} = G_E \frac{P_E}{4\pi R^2}$  [ $w.m^{-2}$ ]

Antenne réception :

Surface équivalente d'une antenne isotrope de réception  $S_{IREq}$  :

$$S_{IREq} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad [m^2]$$

Surface équivalente d'une antenne de réception de gain  $G_E$  ,  $S_{GREq}$  :

$$S_{GREq} = G_R \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad [m^2]$$

Bilan de la liaison :  $P_R = G_E G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 P_E$

Hauteur effective et facteur d'antenne mesure des champs :

Une antenne de réception plongée dans un champ électrique  $\vec{E}$  génère une force électromotrice  $V_a$  :

$$V_a = E \cdot h_{eff}$$

$$(\mu V) \quad (\mu V m^{-1}) \quad (m)$$

On préfère plutôt d'écriture :

$$E = V_e \cdot K$$

$$(\mu V m^{-1}) \quad (\mu V) \quad (m^{-1})$$

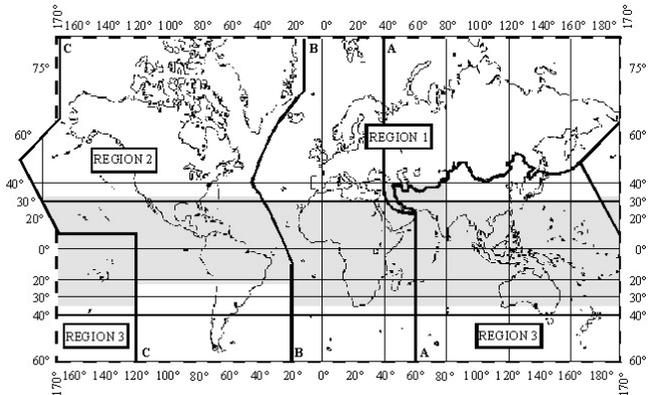
Avec K : le facteur d'antenne

Soit

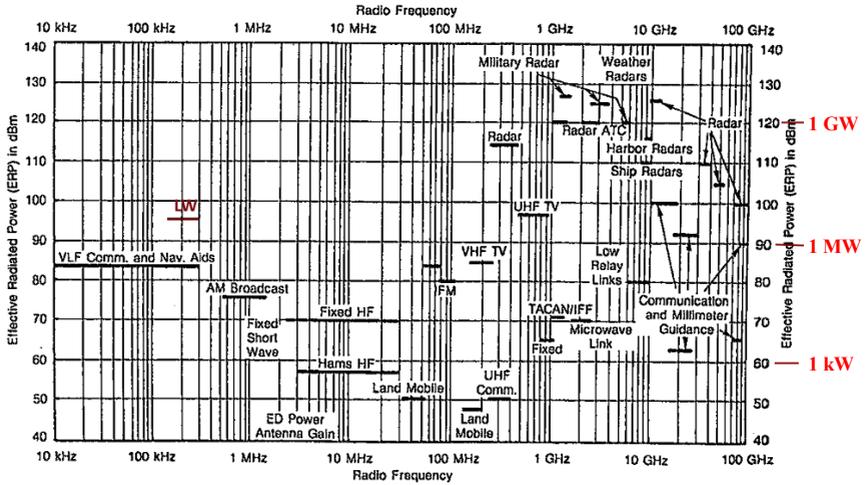
$E = V_e \cdot K$ $(dB \mu V m^{-1}) \quad (dB \mu V) \quad (dB)$
---

## Emission et Susceptibilité

🚦 Tableau des Régions de l'UIT

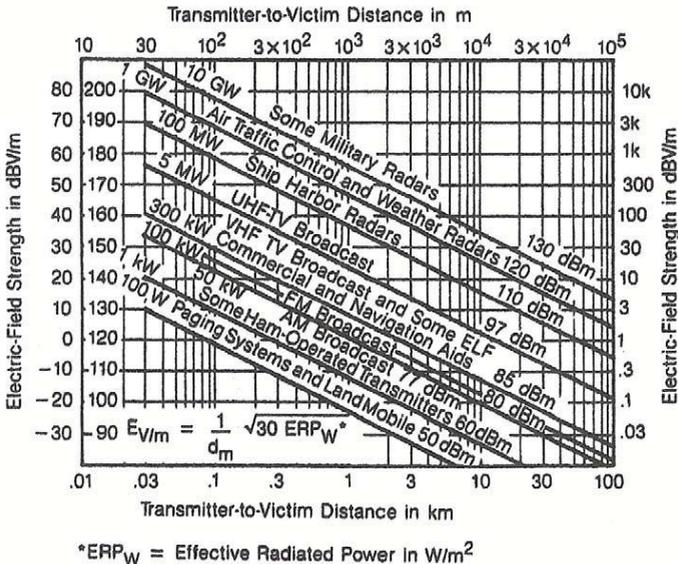


Allocation de fréquences et la puissance maximum effective associée de la région 2 :

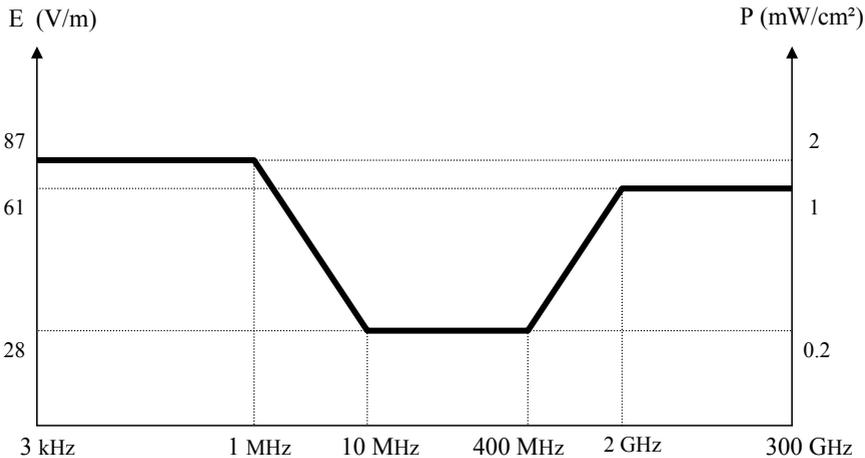


W.G. DUFF, "Fundamentals of electromagnetic", INTERFERENCE CONTROL TECHNOLOGIES, GAINESVILLE, 1980. p 4-8

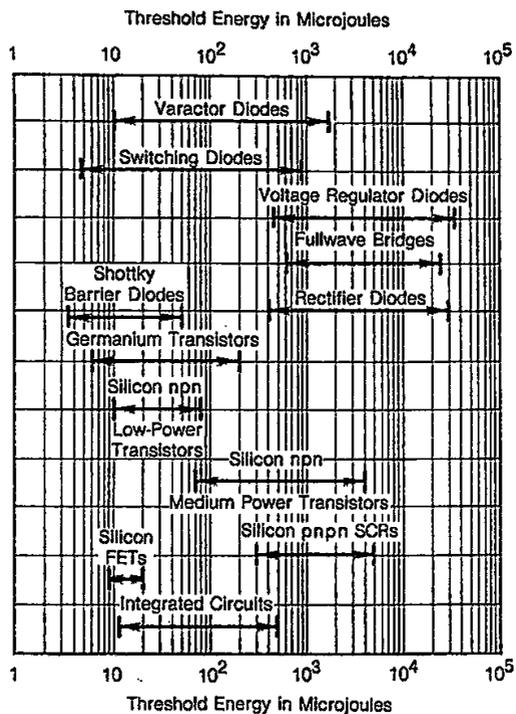
Champ électrique créée par quelques sources :



W.G. DUFF, "Fundamentals of electromagnetic", INTERFERENCE CONTROL TECHNOLOGIES, GAINESVILLE, 1980. p 4-17



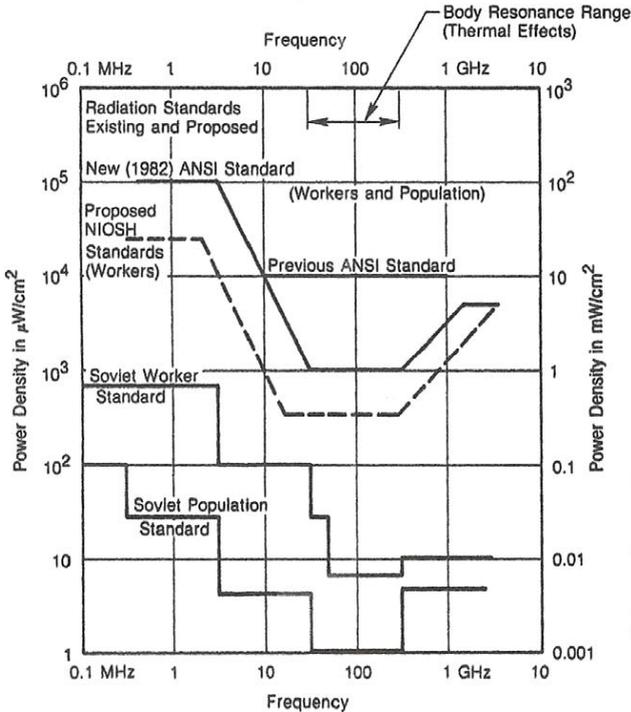
European Electromagnetic Wave Exposure Standard  
( 1999/519/CE -- 12 july 1999 )



Seuil de dommage de quelques composants

W.G. DUFF, "Fundamentals of electromagnetic", INTERFERENCE CONTROL TECHNOLOGIES, GAINESVILLE, 1980. p 4-28

Sécurité des personnes :



W.G. DUFF, "Fondamentals of electromagnetic", INTERFERENCE CONTROL TECHNOLOGIES, GAINESVILLE, 1980. p 1-18

Principes généraux pour atténuer des perturbations

Les principes généraux consistent soit de réduire à la source la puissance des signaux perturbateurs, soit de diminuer les susceptibilités des circuits perturbés, soit d'isoler par des filtres (dans le cas de perturbation transmises par conduction), soit d'effectuer le blindage des dispositifs (dans le cas de perturbation transmises par rayonnement).

Couplage champ à boucle

La tension v collectée par une boucle de surface S est donnée par :

$$v = S \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot H$$

(V) (m<sup>2</sup>) (Hz) (4π10<sup>-7</sup>) (A.m<sup>-1</sup>)

La solution la plus simple pour réduire l'amplitude du signal de perturbation est de réduire la surface des boucles.

✚ Couplage champ à fil :

📖 En base de fréquence (BF), si la longueur  $L$  d'un conducteur (fil) est très petite devant la valeur d'un quart de la longueur d'onde  $\lambda$  ( $L \ll \frac{\lambda}{4}$ ), alors le courant

$I$  parcourait ce fil sous effet du champ électrique  $E$  sera

$$I \cong \frac{E.L}{100.\lambda} \quad \left[ A \cong \frac{(V.m^{-1}).(m)}{m} \right]$$

📖 En haute fréquence (HF), dans ce pire cas  $L \approx \lambda$  on aura :

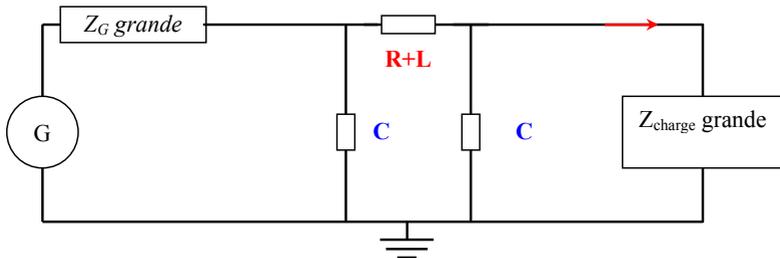
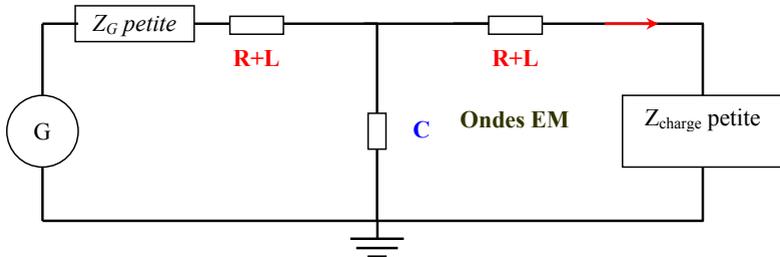
$$I \cong \frac{E.\lambda}{240} \quad \left[ A \cong (V.m^{-1}).(m) \right]$$

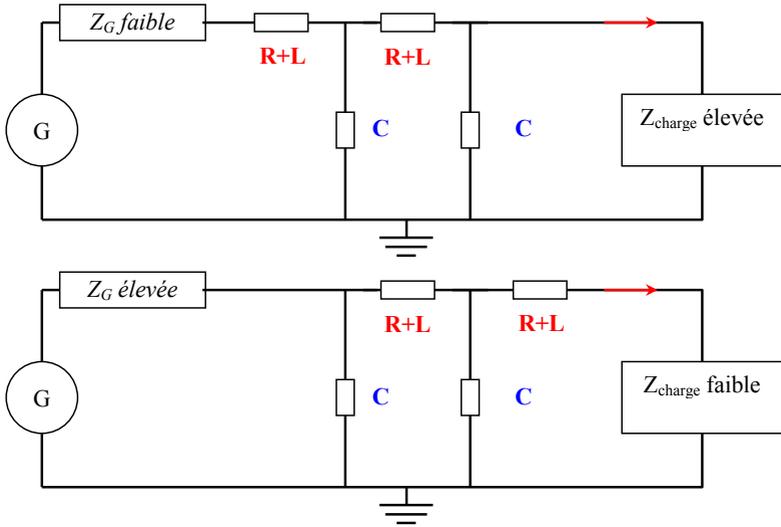
Dans le cas du couplage de fil à fil, on parlera de diaphonie.

✚ Filtrage :

Le filtrage permet d'atténuer les perturbations à condition de tenir en compte des impédances de sources et de charges.

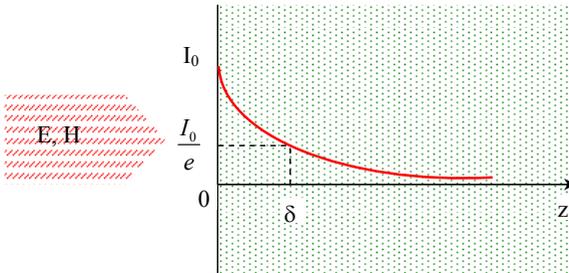
Par exemple :





Blindage :

☑ Pénétration des courants dans les conducteurs d'épaisseur infinie :



$$I = I_0 \exp\left(-\frac{z}{\delta}\right) \cdot \cos\left(\omega t - \frac{z}{\delta}\right)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}}$$

$\delta$  : épaisseur de peau (m)

$\sigma$  : conductivité ( $S \cdot m^{-1}$ )

$\mu$  : perméabilité

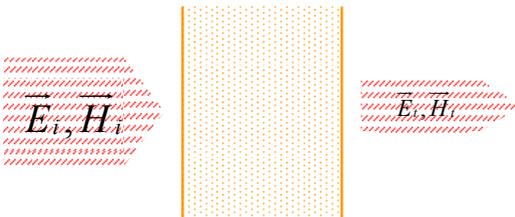
électromagnétique ( $H \cdot m^{-1}$ )

$f$  : fréquence (Hz)

Il existe d'autres lois de répartition de la densité de courant dans chacun des cas particuliers, par exemple, d'une plaque plane d'épaisseur finie, des conducteurs cylindriques pleins et creux,...

☑ Efficacité de blindage (Shielding Effectiveness – S.E.) :

Par définition :  $SE = 20 \cdot \log \frac{\text{champ sans blindage}}{\text{champ avec blindage}}$



$$SE_e = 20 \cdot \log \left| \frac{\bar{E}_i}{\bar{E}_t} \right| \quad (\text{dB})$$

$$SE_h = 20 \cdot \log \left| \frac{\bar{H}_i}{\bar{H}_t} \right| \quad (\text{dB})$$

- Efficacité de blindage en champ magnétique et en champ proche  $r \ll \frac{\lambda}{2\pi}$  :

$$SE_h = 131,43.d.\sqrt{f.\mu_r.\sigma_r} + 74,6 - 10.\log\left(\frac{\mu_r}{\sigma_r.f.r^2}\right)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} d : \text{épaisseur du blindage en mm} \\ f : \text{fréquence en MHz} \\ \mu_r : \text{perméabilité magnétique relative au cuivre} \\ \sigma_r : \text{conductivité électrique relative au cuivre} \\ r : \text{distance entre la source et le blindage} \end{cases}$$

- Efficacité de blindage en champ électrique et en champ proche  $r < \frac{\lambda}{2\pi}$  :

$$SE_e = 131,43.d.\sqrt{f.\mu_r.\sigma_r} + 141,7 - 10.\log\left(\frac{\mu_r.f^3.r^2}{\sigma_r}\right)$$

- Efficacité de blindage en régime d'onde plane  $r > \frac{\lambda}{2\pi}$  :

$$SE_e = 131,43.d.\sqrt{f.\mu_r.\sigma_r} + 108,1 - 10.\log\left(\frac{\mu_r.f}{\sigma_r}\right)$$

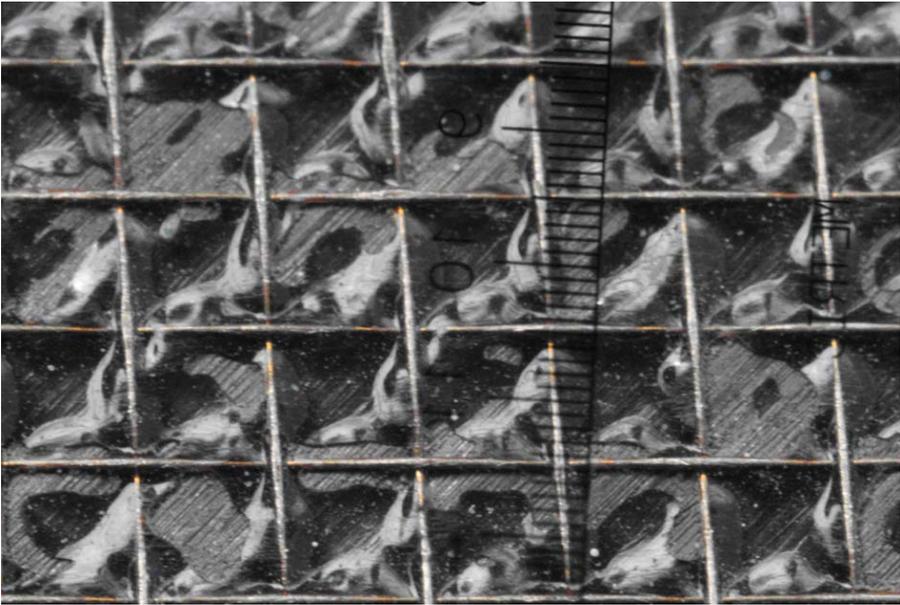
- à titre d'exemple : **avion construit en composite carbone**

Comme les fibres de carbone disposées dans une résine époxy ne sont finalement pas très conductrices et en tout cas incapables de supporter les très forts courants correspondants à un coup de foudre direct, la conductivité a été augmentée par la mise en place sur la surface d'un fin et léger treillis métallique comme le montre la photo.

Il est facile de voir sur la macro photo avec l'échelle en 0.1mm que la grille métallique présente une maille carrée de 1mm de coté et que le diamètre des fils conducteurs est voisin de 0.1mm.

Il faut noter également que les mailles sont soudées au niveau du croisement des fils horizontaux et des fils verticaux afin d'améliorer l'efficacité du blindage et ainsi les guides d'onde carrés de 1 mm de coté qui en résultent vont présenter une fréquence de coupure très élevée supérieure à 150 GHz. C'est un comportement comparable à celui de la porte grillagée d'un four micro onde domestique qui permet de voir les plats pendant la cuisson sans que les ondes ne puissent sortir de l'enceinte.

C'est cette organisation pour des avions en composite carbone qui leur permet finalement de résister à un coup de foudre direct.



*Couche de blindage sur composite de carbone de la structure des avions*

### Raccordement des entrées sorties

- 🔧 Ouvertures rectangulaires dans une tôle mince :

$$SE = [97 - 20 \cdot \log(l) - 20 \cdot \log(f)] + \left[ 20 \cdot \log \left( 1 + 2,3 \cdot \log \left( \frac{l}{h} \right) \right) \right] + \left[ 30 \cdot \frac{e}{l} \right]$$

pertes par réflexion                      +    facteur de minceur                      +    perte dans la traversée

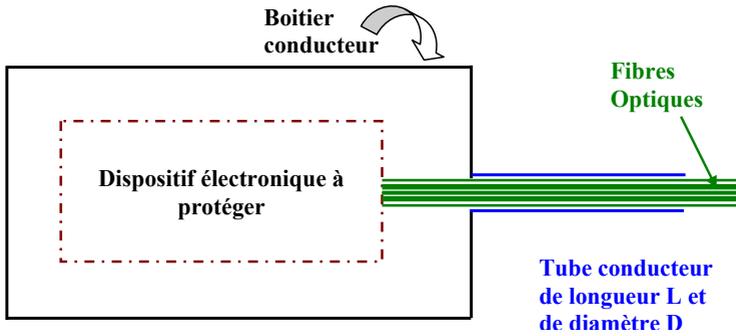
- 🔧 Ouvertures cylindriques et application à la protection des entrées sorties de fibres optiques :

Selon ORTUSI, dans un guide d'onde quelconque :  $\frac{1}{\lambda_c^2} = \frac{1}{\lambda^2} - \frac{1}{\lambda_g^2}$

Si  $\lambda > \lambda_c \Rightarrow \lambda_g$  sera un nombre complexe imaginaire pur et l'onde ne se propage plus dans le guide circulaire.

Une bonne solution pour protéger les signaux dans un environnement électromagnétique très puissant est de les propager dans des fibres optiques car il n'y a pas d'interaction connue entre un champ électromagnétique dans lequel se trouve une fibre optique et le signal lumineux qui existe dans la fibre. Il reste toutefois à assurer la continuité de la protection à l'entrée des modules.

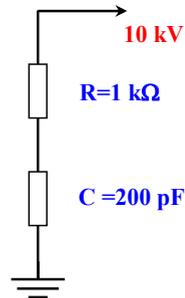
En effet si le tube conducteur cylindrique conducteur est à la coupure, les ondes ne pénétreront pas dans le circuit électronique du fait de la très forte atténuation A des modes évanescents donnée par :  $A = 32 \frac{L}{D}$  (en dB)



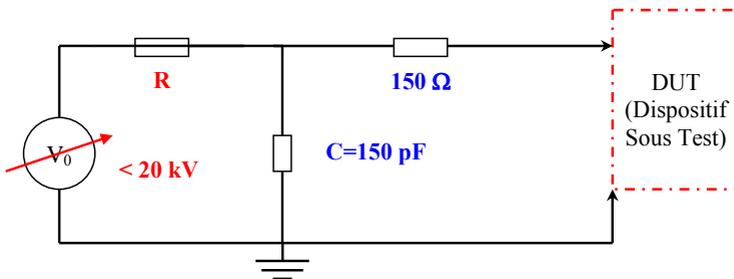
Protection et blindage des entrées / sorties de fibres optiques dans un boîtier électronique

### Décharges électrostatiques (DES)

⚡ Modèle électrique simplifié du corps humain :



⚡ Modèle électrique simplifié d'un pistolet de test de DES :



## Impulsion électromagnétique

L'industrie de la défense ne cesse d'innover, poussée par des besoins toujours plus grands de réduction des coûts et d'amélioration de la sécurité du personnel en situation de combat. La Navy américaine va bientôt mettre en service le canon à impulsion électromagnétique illustré par la photo suivante :



*Canon à impulsion électromagnétique*

Les armes à impulsions électromagnétiques (IEM ou EMP en anglais), sont des armes redoutables capables d'endommager les systèmes électroniques, qu'ils s'agissent d'ordinateurs, de véhicules personnels ou encore de systèmes d'armes. Ces systèmes sont des armes de guerre électronique (EWW - Electronic Warfare Weapons), qui peuvent brouiller des signaux ou endommager des systèmes électroniques et informatiques, mais les IEM constituent également des armes stratégiques, de part leur capacité à endommager des systèmes critiques et à rendre inopérantes des infrastructures entières.

Il existe deux type de IEM : IEMN (IEM Nucléaire ou NEMP – Nuclear EMP en anglais) et IEMNN (IEM Non Nucléaire ou NNEMP – No Nuclear EMP en anglais).

Dans le cas des IEMNN également appelées "Armes radiofréquences" qui restent majoritairement expérimentales il en existe deux grandes catégories, les armes UWB (Ultra Wide Band) et les armes HPM (High Power Microwave), qui portent le nom de micro-ondes à forte puissance (MFP) en français.

Ces dispositifs émettent un champ électromagnétique de forte intensité, au rayon d'action et à la puissance plus limités qu'une IEM nucléaire. La concept de ces dispositifs est basé sur un générateur de micro-ondes à forte puissance d'émission.

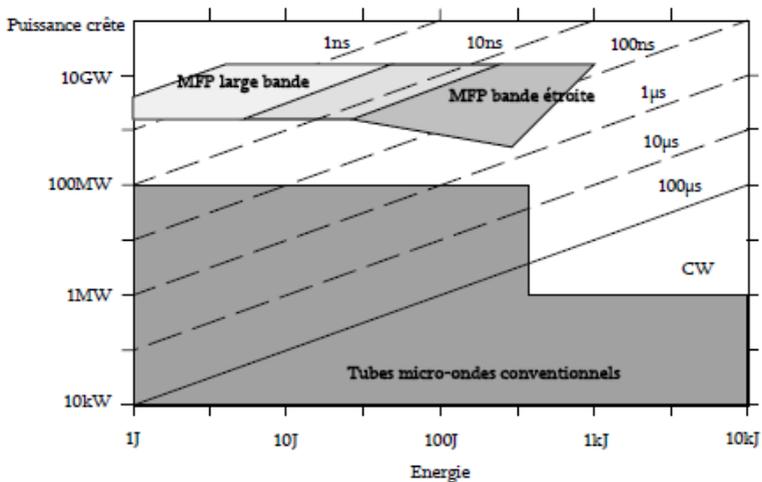
Certains radars militaire (émettant des micro-ondes) sont capables de diffuser des impulsions d'intensité limitée, mais suffisante pour brouiller ou endommager certains systèmes. Ce serait notamment le cas des radars AESA qui équipent les hélicoptères d'attaque et les avions de chasse moderne, tel que le F-35.

D'autres systèmes HPM plus anciens (low-tech), tels que des HERF Guns ou des appareils émettant d'intenses décharges électrostatiques (TED) peuvent être produits à moindres coûts, suscitant les craintes des services de sécurité, notamment dans l'hypothèse d'une utilisation terroriste.

Pour ces raisons, malgré le fait que le niveau réel de la protection des équipements militaires est une donnée largement classifiée, la défense de divers pays ont commandé des audits auprès d'experts indépendants concernant leurs systèmes. Par exemple dans le rapport d'audition en 2008 un expert recommandé par le "House Armed Services Committee", laisse supposer que la majorité des systèmes américains étaient jusqu'alors testés pour résister à des niveaux d'exposition EM équivalents à 50kv/m, une valeur bien inférieure à la puissance théorique qu'émettraient les prototypes russes les plus récents.

La présence d'électronique dans la plupart des systèmes utiles aux activités civiles, les rendent particulièrement vulnérables aux effets des attaques électromagnétiques. Une attaque EMP à grande échelle toucherait de nombreux secteurs critiques que sont l'approvisionnement électrique, les communications, les transports, le système bancaire ou encore les commodités, impactant de manière très sensible l'activité économique, voire les activités les plus basiques des particuliers.

De nombreuses infrastructures industrielles, usines de produits chimiques, raffineries ou encore centrales électriques gèrent leurs installations grâce à des systèmes électroniques (SCADA), qui régulent les différents flux en envoyant des ordres à des automates programmables industriels (API ou PLC). Ces modules électroniques ne sont généralement pas protégés contre les IEM et peuvent être installés dans des zones reculées. Plusieurs incidents liés à des impulsions électromagnétiques accidentelles sur les modules SCADA de pipelines et de gazoduc, ont eu des conséquences désastreuses.



Classement des sources micro-ondes selon leur rapport puissance/énergie (les diagonales représentent les largeurs d'impulsions)

#### ⚡ Générateur de Marx:

Le principe du générateur de Marx consiste à charger, à une même tension  $V_0$ ,  $N$  étages de condensateurs, ou de bancs de condensateurs, associés en parallèle puis à les associer en série pour les décharger dans la résistance d'utilisation. La tension aux bornes de celle-ci est, alors,  $N \times V_0$ . La mise en série des  $N$  étages est assurée par la fermeture des  $N$

commutateurs. Le circuit élémentaire d'un générateur de Marx N étages est représenté figure II-1. Chaque étage est, ici, composé d'un condensateur (C), d'une résistance de charge (Rc), d'une résistance de queue (RQ) et d'un commutateur (E).

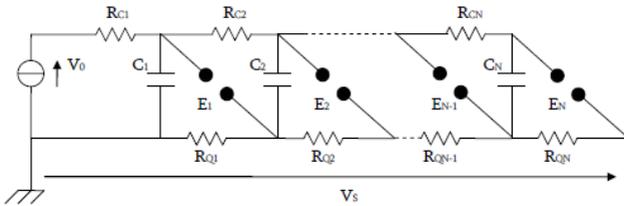


Fig II-1 : Schéma électrique d'un générateur de Marx à N étages

Une alimentation continue, ou pulsée, charge, à une même tension initiale  $V_0$ , au travers des impédances de charge  $Z_C$ , les étages des condensateurs associés en parallèle.

Ces impédances de charge sont souvent des résistances  $R_c$  et leur valeur est déterminée en fonction de la puissance de la source d'alimentation de tension  $V_0$  et de la fréquence de récurrence souhaitée pour le générateur. Lorsque les condensateurs sont chargés (ce temps de charge n'est pas identique pour tous les étages et évolue en fonction du nombre d'étages), les N commutateurs vont les associer en série pour transférer l'énergie capacitive vers la résistance d'utilisation  $R_u$ .

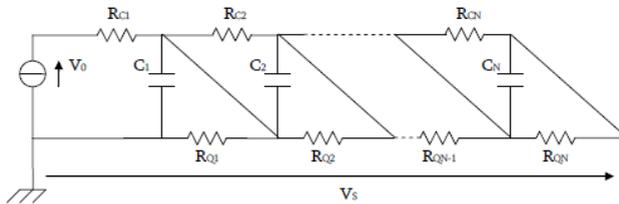


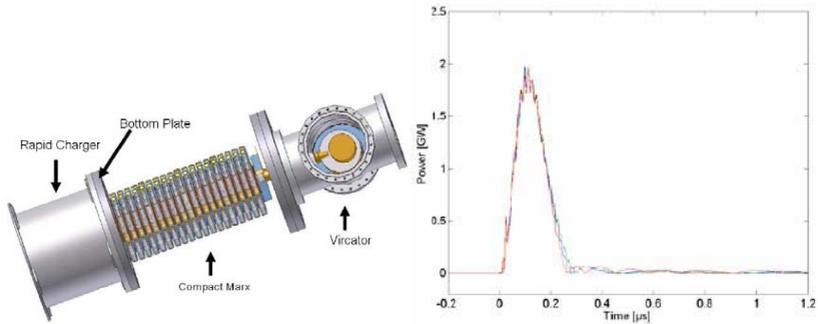
Fig II-2 Schéma équivalent du générateur de Marx lors de la phase de décharge des condensateurs

Ces commutateurs peuvent fonctionner en mode relaxé ou être commandés au déclenchement. Dans le premier cas, le commutateur devient passant lorsque la tension à ses bornes dépasse son seuil de claquage propre, fonction de la rigidité diélectrique du gaz qui le compose et de la géométrie de l'éclateur. Dans le second cas, la tension aux bornes du commutateur s'annule lorsqu'un signal de commande externe autorise le passage du courant.

🚧 Quelques sources :



Magnétron MC567 développé par TED  
Régime pulsé :  $P_{max} = 2,4\text{MW}$  dans la bande 1,217 – 1,370GHz,  
durée d'impulsion : 5 $\mu\text{s}$ , facteur d'utilisation : 0,00125



Tube Vircator piloté par un générateur de Marx 500kV/500J/10Hz

Pour info :

- [http://fr.wikipedia.org/wiki/Orage\\_magn%C3%A9tique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Orage_magn%C3%A9tique)
- [http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89ruption\\_solaire\\_de\\_1859](http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89ruption_solaire_de_1859)
- [http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89ruption\\_solaire\\_de\\_1989](http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89ruption_solaire_de_1989) >> panne électrique au Québec
- [http://fr.wikipedia.org/wiki/Temp%C3%AAt\\_solaire\\_de\\_juillet\\_2012](http://fr.wikipedia.org/wiki/Temp%C3%AAt_solaire_de_juillet_2012)
- <http://www.wikihow.com/Build-an-EMP-Generator>
- <https://www.youtube.com/watch?v=JkpboTeTm9A>
- <https://www.youtube.com/watch?v=rHM26ODThnU> >> destruction par flash électronique
- <https://www.youtube.com/watch?v=c0vZigwn09I> >> RFID KILLER
- [https://www.youtube.com/watch?v=13JdZB\\_CZmw](https://www.youtube.com/watch?v=13JdZB_CZmw) >> RFID KILLER