

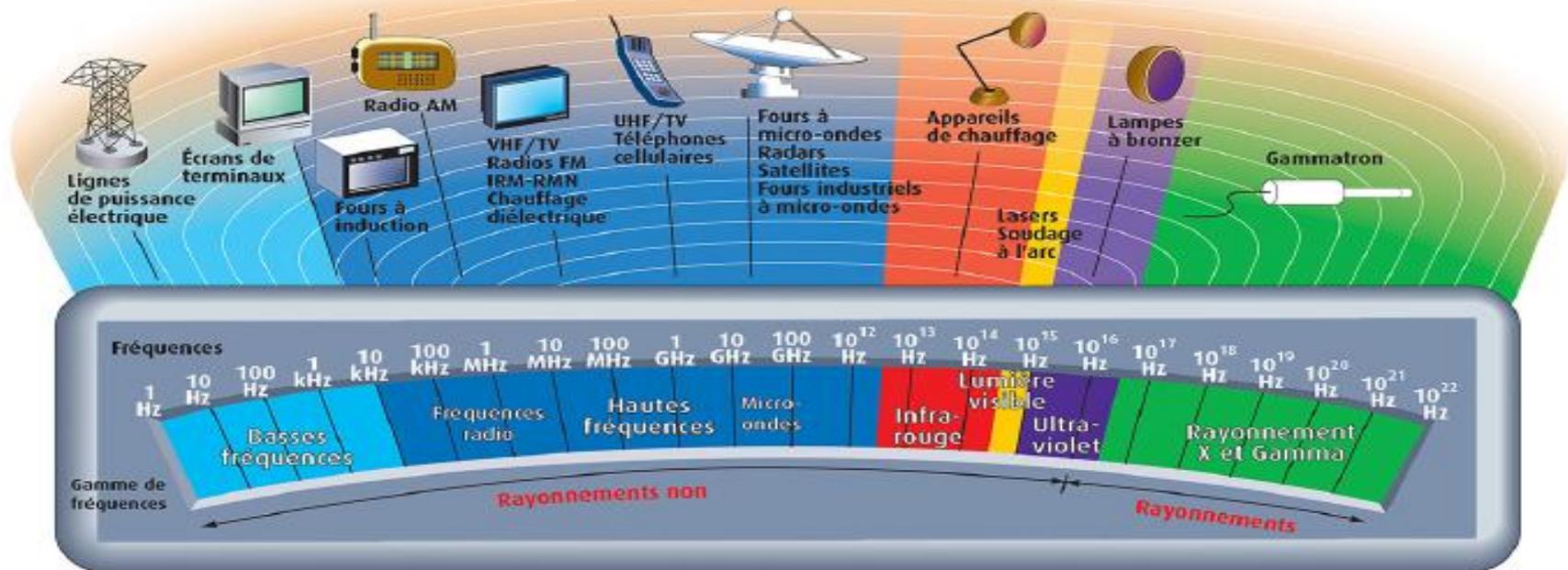
Compatibilité



Electromagnétique

Chapitre I: Introduction à la compatibilité électromagnétique

La **compatibilité électromagnétique (CEM)** est la discipline qui a pour objet d'étudier les problèmes de cohabitation électromagnétique.



Qu'est-ce que la compatibilité électromagnétique ?

- **Sa vocation est :**
 - D'étudier les transferts d'énergie non intentionnels entre systèmes électriques et/ou électroniques ;
 - De mettre au point des procédés permettant de limiter les perturbations électromagnétiques émises et ainsi de satisfaire à la réglementation en vigueur ;
 - De mettre au point des procédés permettant d'accroître l'immunité des systèmes aux parasites dans des limites faisant également l'objet de réglementations.
- **Gamme de fréquence** (de quelques Hz à quelques dizaines de GHz).
- **On peut donc délimiter trois principaux centres d'étude :**
 - Les sources de perturbation ;
 - Leur mode de couplage et de propagation ;
 - Les effets des perturbations sur les "victimes", qui correspondent au concept de susceptibilité électromagnétique.

Historique

- C'est lors des toutes premières applications de l'électricité qu'on s'est aperçu de l'existence de phénomènes perturbateurs.
- L'augmentation la plus significative des problèmes d'interférences est apparue avec l'apparition de la microélectronique. L'énergie requise pour la destruction d'un élément, qui était de l'ordre du milli joule pour les tubes électroniques et les relais, a brusquement baissé de plusieurs ordres de grandeurs pour les circuits intégrés.

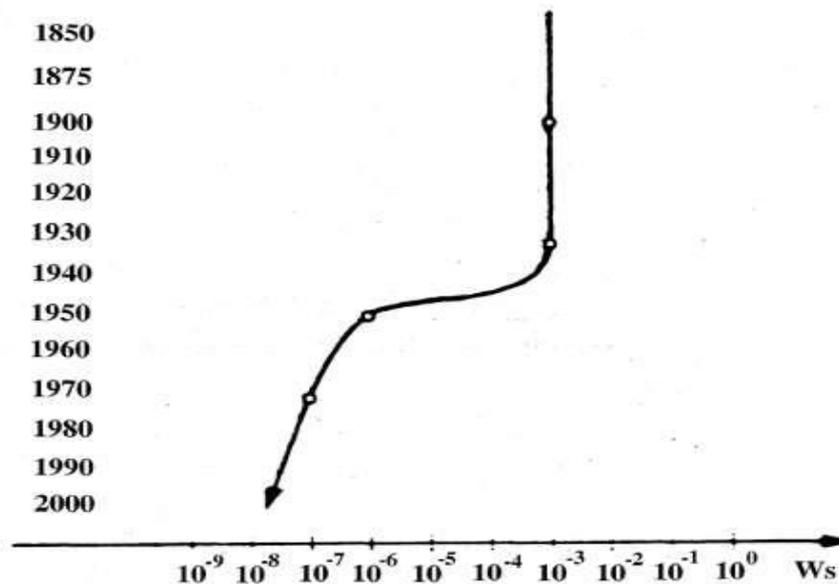
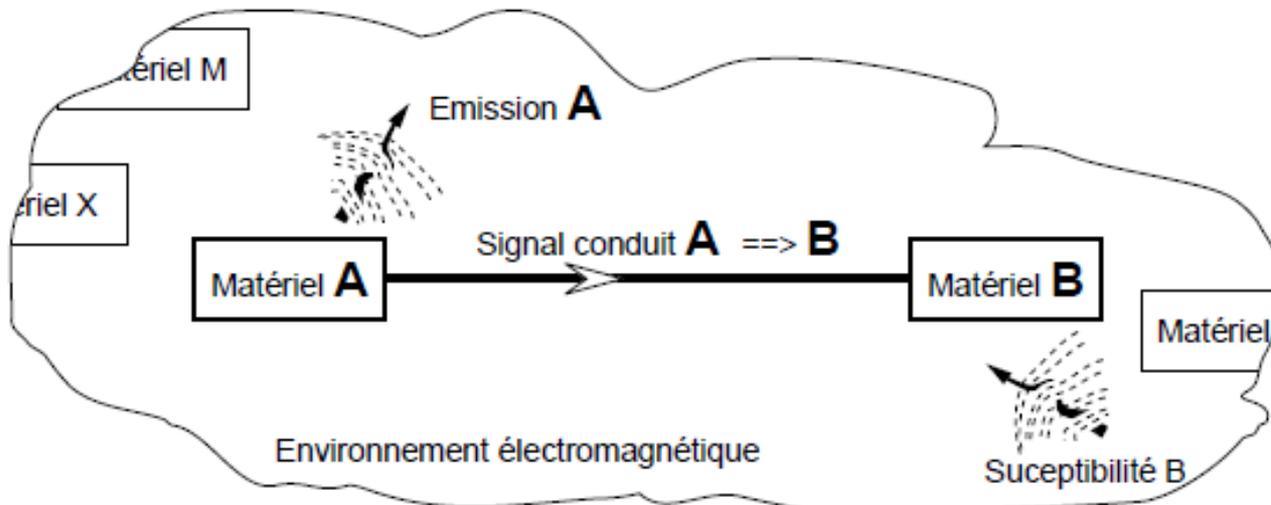


Figure: Évolution du seuil d'énergie de destruction des composants électroniques les plus sensibles

Définitions

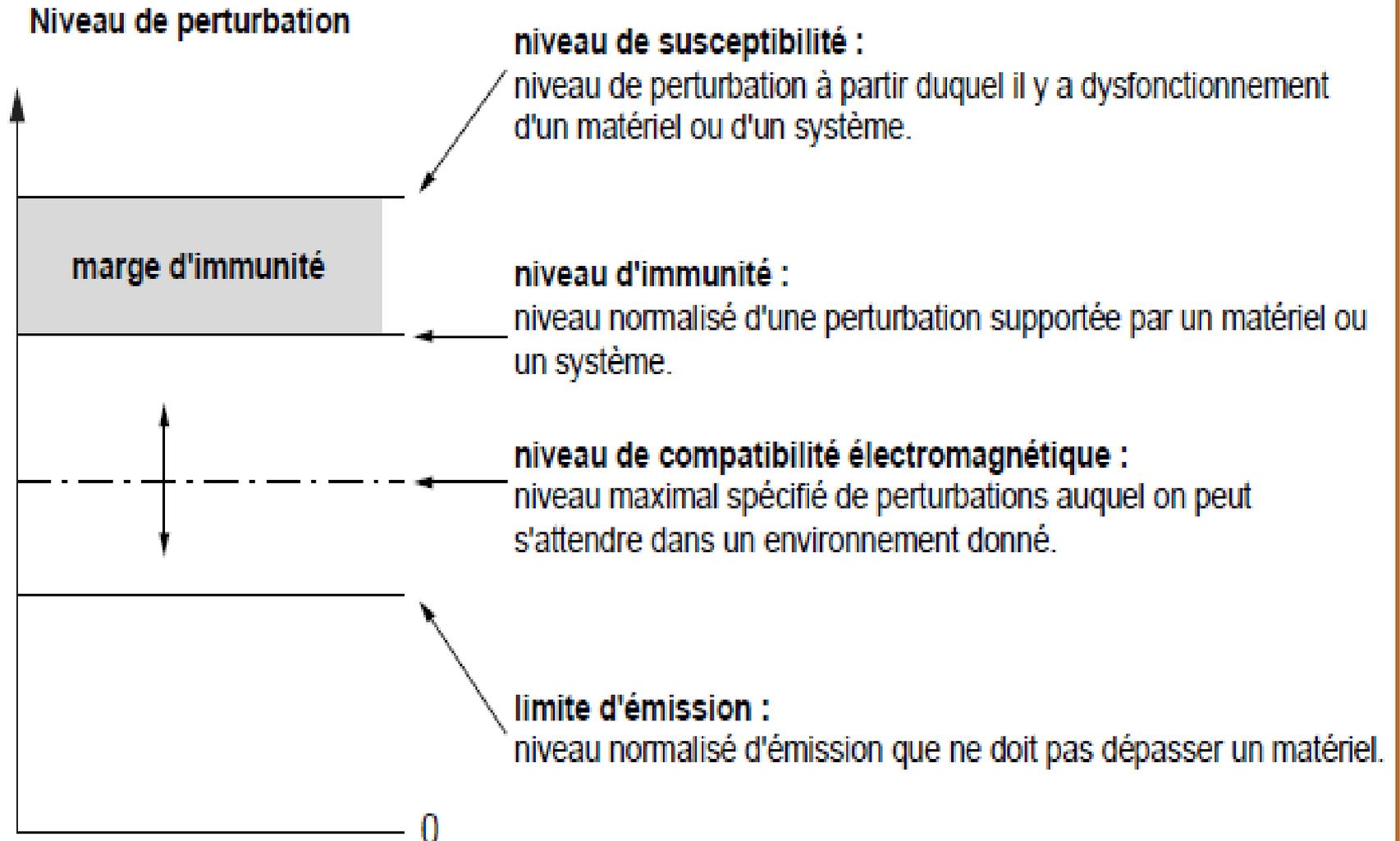
Les Normes définissent la compatibilité électromagnétique «CEM» comme «l'aptitude d'un dispositif, d'un appareil ou d'un système à fonctionner dans son environnement électromagnétique de façon satisfaisante et sans produire lui-même des perturbations électromagnétiques intolérables pour tout ce qui se trouve dans cet environnement».(VEI161-01-07)



Définitions

- Nous appelons système; un ensemble d'équipements (actionneurs, moteurs, capteurs ...) participant à la réalisation d'une fonction définie.
- Il faut noter que d'un point de vue électromagnétique, le système comprend tous les éléments en interaction et ce, en remontant jusqu'aux dispositifs de découplage du réseau.
- Les alimentations électriques, les liaisons entre les différents équipements, les matériels associés ainsi que leurs alimentations électriques font partie du système.
- **Cela signifie qu'elle ne peut pas se mesurer directement.** Pour pouvoir décrire quantitativement la CEM, on distingue:
 - Le niveau d'immunité de chaque appareil est tel qu'il n'est pas perturbé par son environnement électromagnétique.
 - Son niveau d'émission de perturbation doit être suffisamment bas pour ne pas perturber les appareils se trouvant dans son environnement électromagnétique.

Définitions



Equipements concernés

- Traitement de l'information (Ordinateur, serveurs...)
 - Récepteur radio et télévision
 - Matériel électronique embarqué (calculateur d'un véhicule...)
 - Equipement de traitement de l'énergie (lignes électriques, moteurs...)
 - Appareils électroménagers
 - Téléphonie (relais HF, mobiles...)
-
- **Bref... l'ensemble des équipements utilisant l'électricité.**

Perturbation électromagnétique (PEM)

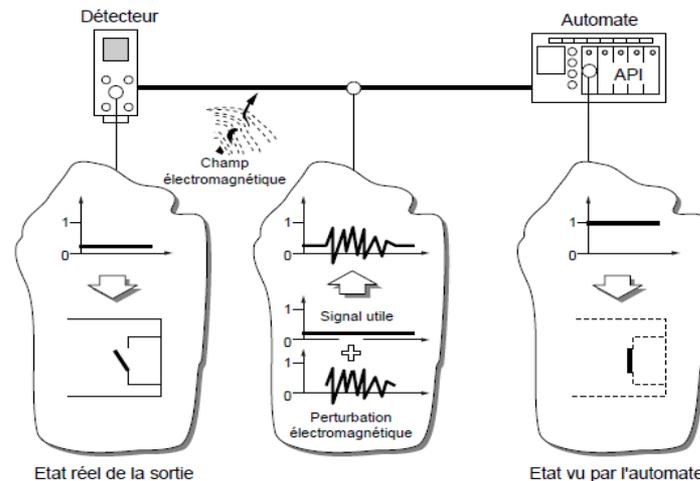
- Les systèmes électriques et/ou électroniques ne sont pas isolés de leur environnement. De l'énergie électromagnétique peut donc franchir non intentionnellement leurs frontières soit pour y pénétrer, soit pour s'en échapper. Cette énergie parasite est appelée perturbation électromagnétique.
- **PEM: Phénomène électromagnétique susceptible de créer des troubles de fonctionnement d'un dispositif, d'un appareil ou d'un système, ou d'affecter défavorablement la matière vivante ou inerte. (VEI 161-01-05)**

Perturbation électromagnétique (PEM)

- Note : une perturbation électromagnétique peut être un bruit, un signal non désiré ou une modification du milieu de propagation lui-même.

Une perturbation électromagnétique peut devenir nuisible

- elle agit en se superposant aux signaux utiles
- si la perturbation est trop importante, l'interprétation du signal est faussée

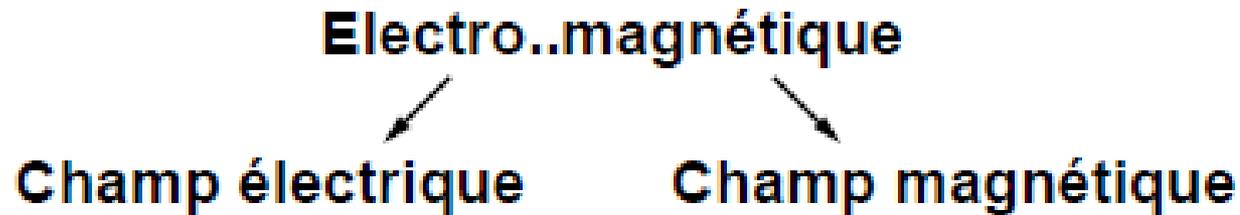


dans les cas extrêmes, la perturbation peut être destructrice

- La perturbation électromagnétique « parasite » n'est qu'un signal électrique indésirable qui vient s'ajouter au signal utile.

Perturbation électromagnétique

- De plus, une perturbation électromagnétique, comme son nom l'indique est composée d'un champ électrique généré par une différence de potentiel et d'un champ magnétique ayant pour origine la circulation d'un courant I dans un conducteur.



Explication - 4 - C_est quoi une onde électromagné.mp4

Pollution électromagnétique

La plupart des équipements électriques et électroniques génèrent des champs électromagnétiques perceptibles dans leur environnement; l'ensemble de ces champs crée une véritable pollution qui perturbe parfois le fonctionnement des autres équipements.

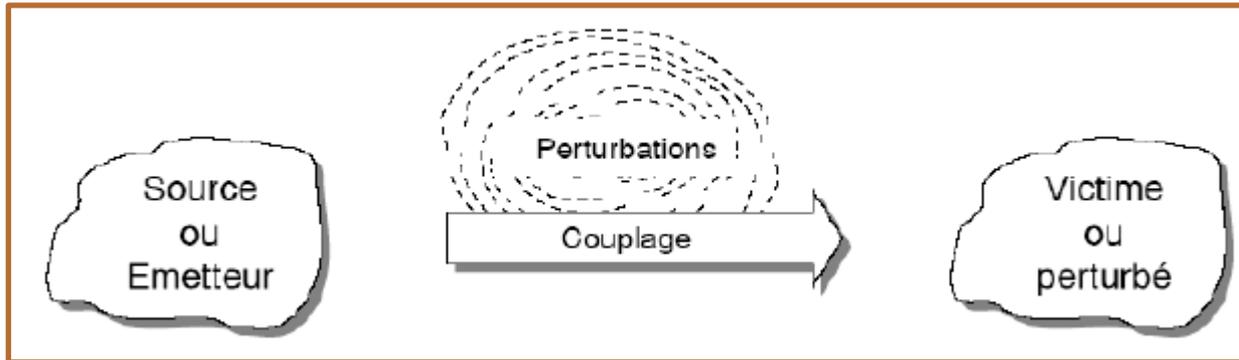
Ainsi, il est interdit d'utiliser un téléphone portable dans un avion parce qu'il émet un champ électromagnétique auxquels les systèmes radioélectriques d'aide au pilotage (navigation, décollage / atterrissage) risquent d'être sensibles.



- Le décollage et l'atterrissage sont les étapes les plus dangereuses et les plus cruciales du vol lorsque les pilotes doivent coordonner leurs actions avec le contrôle au sol, tout cela est fait en utilisant le système de navigation de l'avion.
- le mode avion du téléphone portable désactive tous les services de données : Wifi, GSM, Bluetooth...

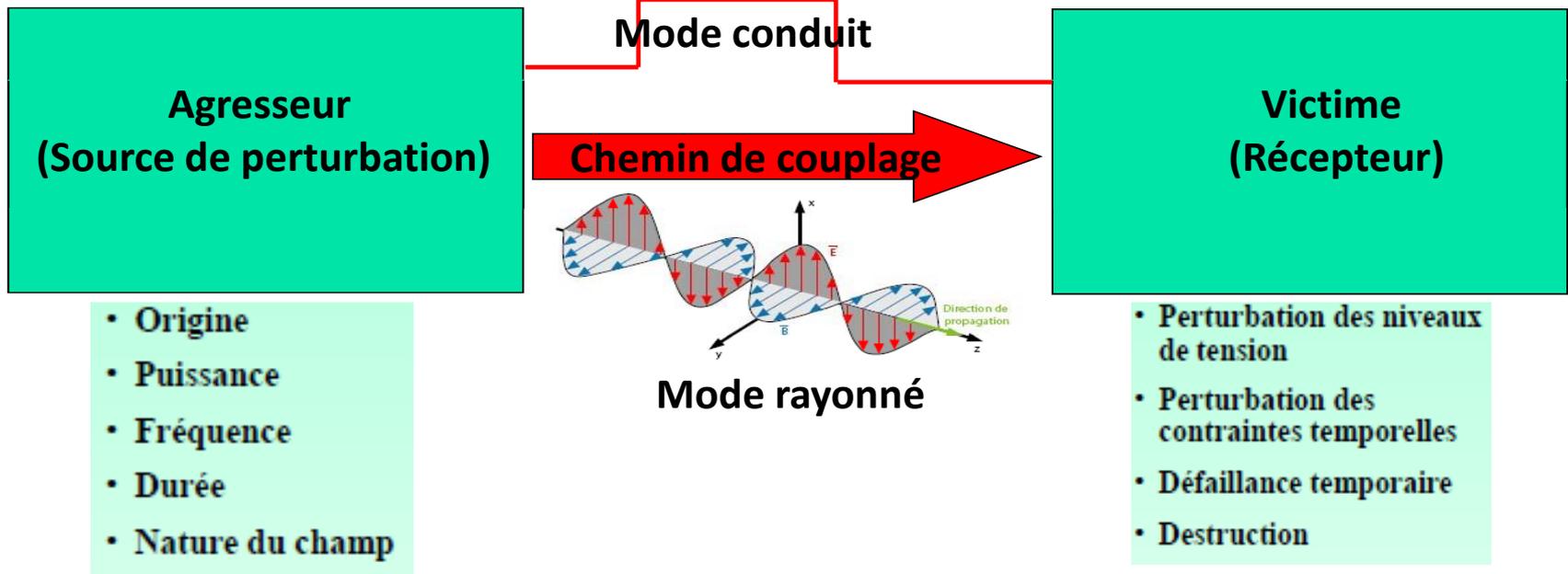
Les Couplages

- Les couplages sont les modes d'action des perturbation "PEM" sur les victimes.



- Qu'il s'agisse d'émission ou de susceptibilité (ce n'est qu'une question de direction), le phénomène ne se produit, que s'il y a, simultanément:
 - **Source** = *Perturbateur caractérisé par son émission*
 - **Victime** = *Élément perturbé caractérisé par son immunité ou sa susceptibilité*
 - **Mode de couplage** = *Milieu de propagation ou chemin de couplage*
 - Qu'un seul de ces éléments soit absent, la PEM est restaurée.

Représentation d'un problème de CEM



Ce signal se propage en conduction dans les conducteurs et par rayonnement dans l'air

3 moyens d'action

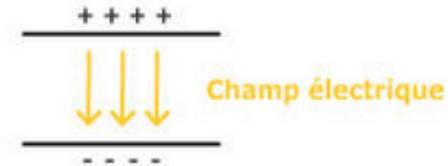
- Diminuer les émissions à la source
- Augmenter le niveau de susceptibilité du récepteur
- Réduire l'efficacité du couplage

Champ électrique

Champ électrique:

- **Principe**

- Un champ électrique est généré par la présence de charges électriques. Par convention, le champ électrique est orienté de la zone positive vers la zone négative.



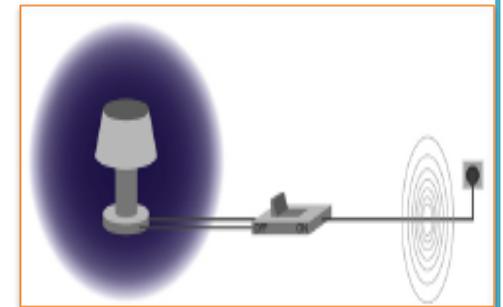
- **Unité de mesure**

- Le champ électrique est lié à la notion de tension, qui représente la différence de potentiel (différence de concentration des charges électriques), et dont l'unité est le volt. Le champ électrique a donc une unité en **volt/mètre**.

- **Exemple**

- Pour créer un champ électrique, il suffit de brancher un appareil électrique, sans l'allumer.

Une tension apparaît alors et un champ électrique est généré.



Phénomène d'induction –(Loi de Faraday)

Champ magnétique

A l'inverse du champ électrique, le champ magnétique apparaît lorsque les charges se déplacent. Par exemple, dans un circuit alimenté par une pile, le courant circule et génère un champ magnétique circulaire autour du fil. Ce champ magnétique a pour unité: **le Tesla (T)** , H: **ampère/mètre**.

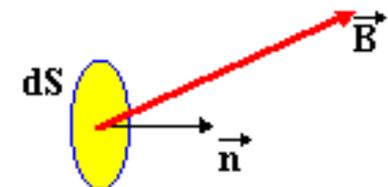
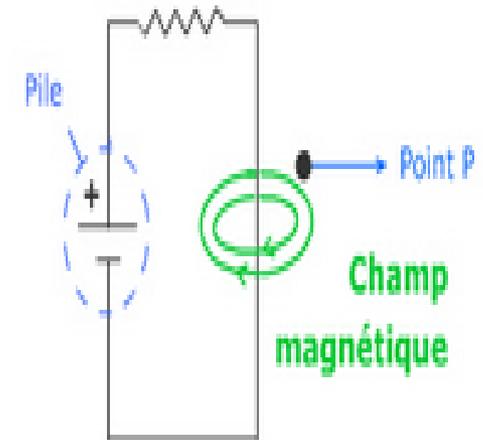
Flux magnétique (dans le vide)

- élément de surface dS , et plan de normale \vec{n}
- Champ magnétique \vec{B}

$$d\Phi = \vec{B} \cdot \vec{n} dS = \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

- à travers une surface S , le flux magnétique :

$$\Phi = \Sigma d\Phi = \int_S d\Phi$$



Champ magnétique créé par un courant - Loi de Biot et Savart

- Champ créé par un élément de courant $d\mathbf{l}$.**

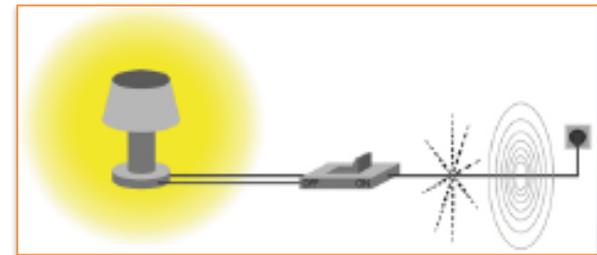
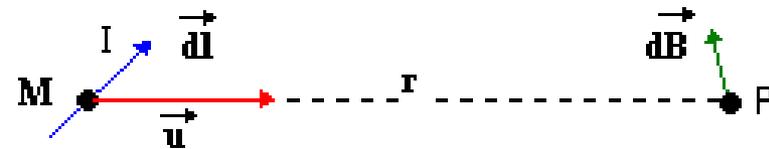
Un élément de courant $d\mathbf{l}$ d'un circuit filiforme, au voisinage de 'M', orienté dans le sens du courant génère en un point 'P' distant de 'r' un champ magnétique

$$\vec{r} = \overrightarrow{MP} \qquad \vec{u} = \frac{\overrightarrow{MP}}{MP}$$

orienté de l'élément (M) vers un point d'analyse (P)

$$\overrightarrow{dB} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r^2} d\mathbf{l} \wedge \vec{u}$$

loi de Biot et Savart



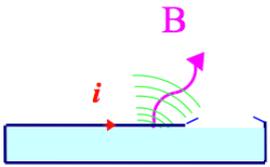
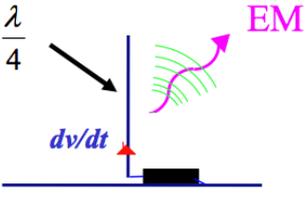
- dB proportionnel à I,
- dB proportionnel à $1/r^2$
- $(\overrightarrow{dl}, \vec{u}, d\vec{B})$ est un trièdre direct
- unités/constantes :
- B en tesla (T) ou weber/m² (Wb.m⁻²)
- I en ampère (A) ; I et r en mètre (m)
- μ_0 perméabilité magnétique du vide ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ SI (T.m.A⁻¹ ou H.m⁻¹))

1 Tesla = 10 000 Gauss.

Conséquences

- **Conséquences :**

- a) Un conducteur de type « boucle » parcouru par un courant i variable (l'effet est nul en continu) peut, via le champ magnétique B qu'il crée, perturber d'autres conducteurs placés à proximité.
- b) Un conducteur de type « brin » (antenne) alimenté par une source de tension variable (effet nul en continu) génère un champ électromagnétique pouvant perturber les conducteurs placés à proximité.

Génération d'un champ...	« Phénomène d'antenne »
Loi de Biot et Savart	$antenne = \frac{\lambda}{4}$
	
$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i \, d\vec{s} \times \vec{r}}{r^3}$	$\lambda = \frac{c}{f}$ <p>$c = 300000 \text{ km/s}$, $f = \text{fréquence en Hertz}$, $\lambda = \text{longueur d'onde en m}$</p>
➡ On génère Champ Magnétique	➡ On génère une Onde Electromagnétique

Conséquences

- c) Un conducteur placé dans un champ magnétique B ou électrique E variables devient respectivement le siège d'un courant i ou d'une ddp v induits.

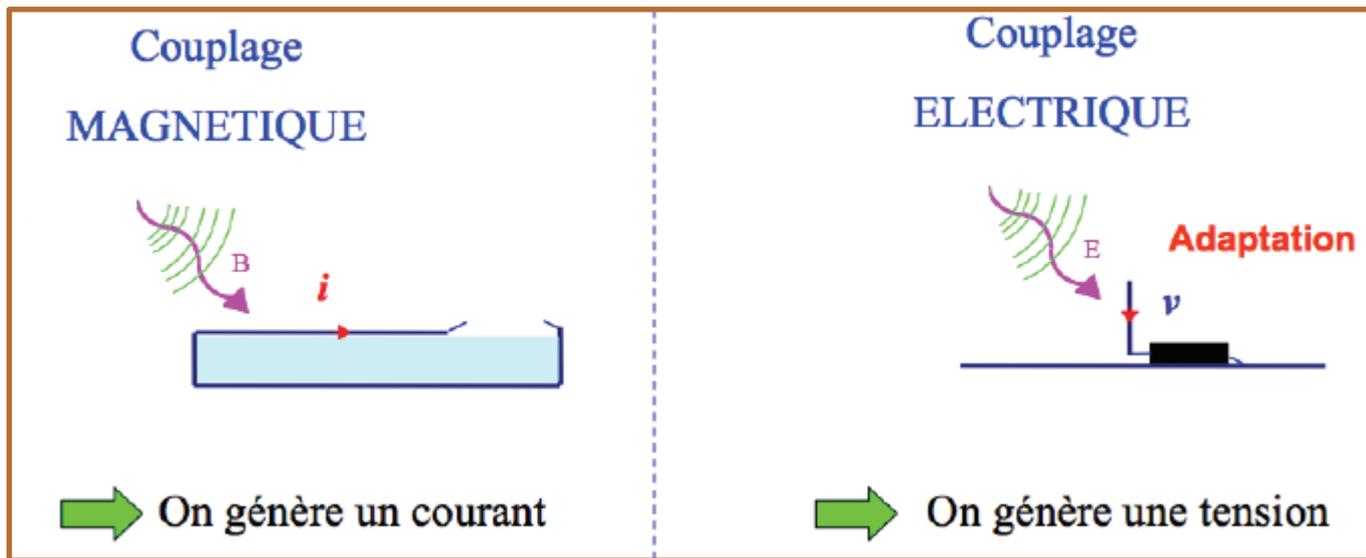


Fig. : Phénomènes de couplage

Les équations de Maxwell

La loi de Faraday, le théorème d'Ampère et le théorème de Gauss ont été réunis par James Clerk Maxwell (1831-1879).

Ce savant a été capable de donner la formulation la plus complète de l'électromagnétisme liant les grandeurs électriques et magnétiques dans les quatre équations aux dérivées partielles suivantes:

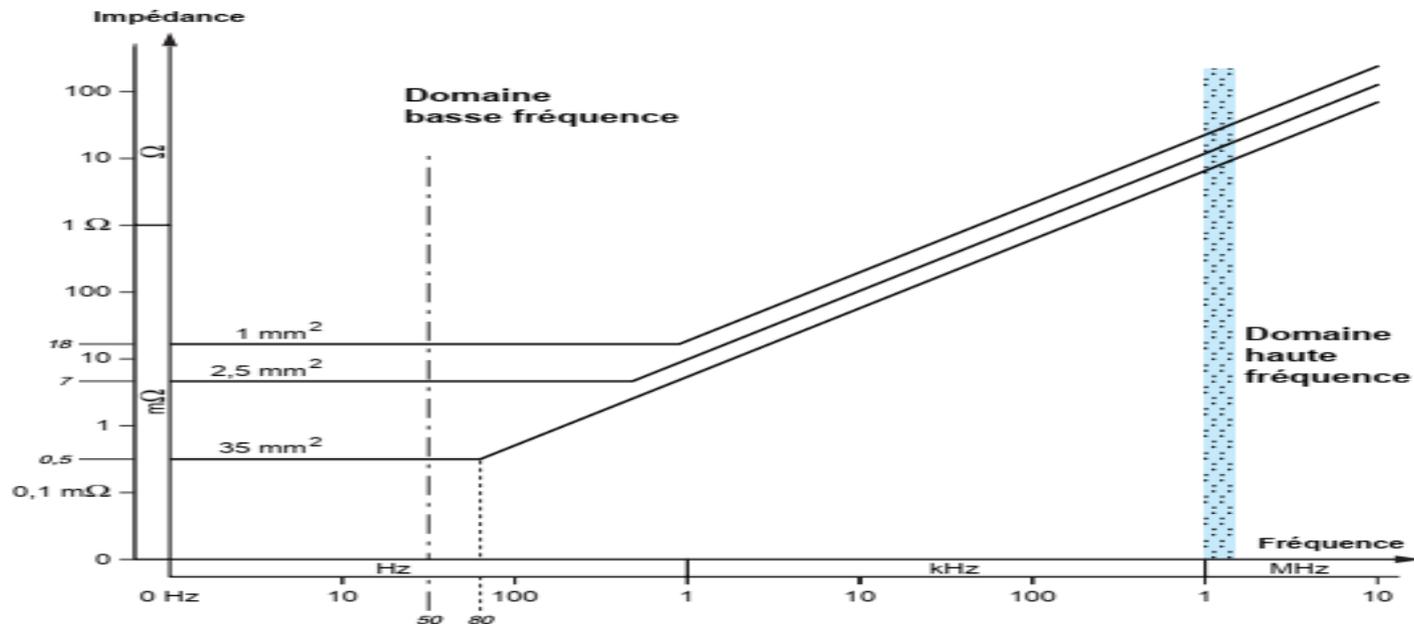
1. Equation de Maxwell-Ampère : $\text{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$

2. Equation de Maxwell-Faraday : $\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$

3. Equation de Maxwell-Gauss : $\text{div} \vec{D} = \rho$

4. Equation de Maxwell-flux : $\text{div} \vec{B} = 0$

Comportement en fréquence d'un conducteur électrique



Valeurs caractéristiques de l'impédance d'un conducteur électrique de longueur $L = 1$ m

Nous constatons que l'impédance du câble augmente très vite avec la fréquence du signal qui y circule: (impédance Ω) $Z = K$ (cste) \times f (fréquence Hz)

- Pour des signaux basse fréquence «BF» (exemple 50-60 Hz)

==> **l'impédance du câble est peu significative**

==> la section du câble est prépondérante

- Pour des signaux haute fréquence «HF» ($f > 5$ MHz)

==> **l'impédance du câble est déterminante**

==> **la longueur du câble est déterminante**

==> la section du câble est peu significative

Comportement en fréquence d'une inductance et d'une capacité

$$Z = 2\pi Lf$$

- En haute fréquence «HF», l'**impédance** d'un câble devient très élevée.
==> La «longueur» des conducteurs devient non négligeable,
==> Déformation du signal (amplitude, fréquence...)

$$Z = 1/2\pi Cf$$

- En haute fréquence «HF», l'**impédance** d'une capacité parasite devient très faible.
==> Les couplages capacitifs deviennent efficaces,
==> Apparition de courants de fuite dans l'installation,
==> Le parasitage du signal utile devient facile

Z = Impédance L = Inductance C = Capacité f = fréquence du signal

Exemple : câble

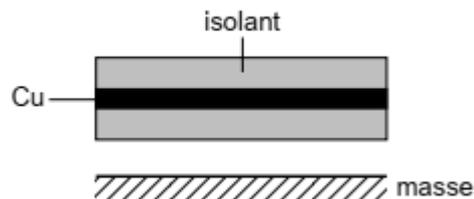


Schéma équivalent en basse fréquence «BF»

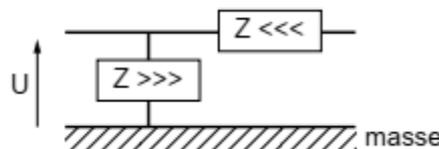
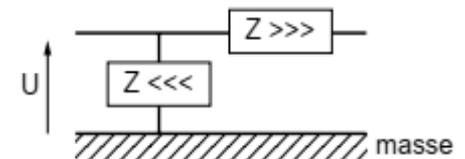


Schéma équivalent en haute fréquence «HF»



Domaines couverts par la CEM

- La CEM s'applique dans différents domaines d'activité. Des normes ont été établies, elles sont orientées produites, et réparties d'après 3 domaines:
- Médical: la CEM assure la protection des personnes, c'est le plus haut niveau de protection. En effet, si le fonctionnement d'un quelconque appareil médical est perturbé par un autre appareil électronique nécessaire au même patient, la sécurité de ce dernier est en jeu;
- Industriel: la CEM assure la protection de processus, l'association d'appareils de production ne doit pas entraîner une qualité de fabrication aléatoire due à des dysfonctionnements des centres de contrôle électroniques;
- Grand public: la CEM contrôle les perturbations de tous les appareils électroniques qui n'entraînent aucun danger, mais qui n'altèrent que le confort de leurs usagers (appareils ménagers, audio-vidéo, jouets, ...).
- **Directive européenne :**
 - « Les PEM générées doivent être limitées à un niveau permettant aux appareils sensibles de fonctionner conformément à leur destination »
 - « Les appareils doivent avoir un niveau d'immunité intrinsèque (essentiel) suffisant contre les PEM leur permettant de fonctionner conformément à leur destination »