

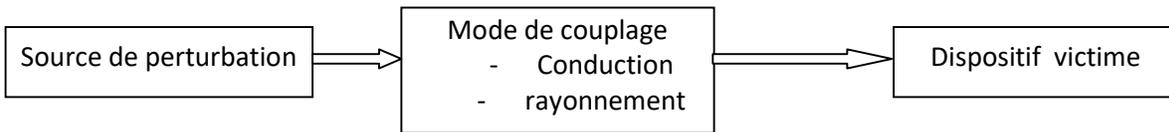
# Chapitre 1

## Phénomènes électrostatiques et magnéto-statiques

### 1 Introduction à la CEM

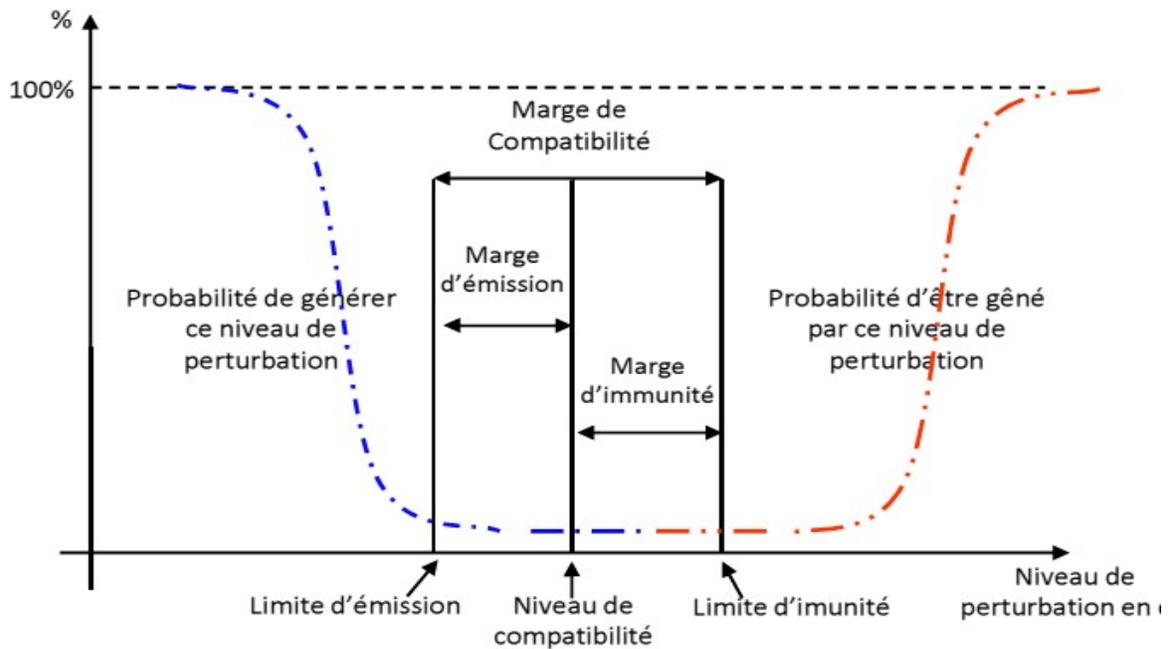
#### 1.1 Définition

CEM : la compatibilité électromagnétique d'un équipement ou d'un système est son aptitude à fonctionner de façon satisfaisante dans un environnement électromagnétique et sans produire lui-même des perturbations électromagnétiques susceptible de perturber le bon fonctionnement des éléments se trouvant dans cet environnement.



#### 1.2- Notions de la compatibilité magnétique

La notion de la compatibilité électromagnétique naît de la confrontation de ces deux aspects autour d'une ligne de partage, comme elle le présente la figure suivante:



**CEM INTER SYSTEME** : Tient compte du déploiement réel du système et doit garantir que le système et les autres systèmes existants partageant la (les) même(s) sous-bandes de fréquences, seront en mesure de cohabiter, sans causer ni subir de dégradation.

**CEM INTRA SYSTEME** : Concerne le CEM des systèmes faisant partie d'installations ou plates-formes importantes (navires, avions,...) et a pour but de réduire à un niveau acceptable les brouillages entre systèmes co-implantés et par conséquent d'éviter toute détérioration de leurs performances.

**CEM DE MATERIEL** : Concerne la CEM des sous-ensembles constituant un matériel donné (baies, coffrets, cartes, rack,..) et a pour but d'assurer le bon fonctionnement du sous-ensemble.

### 1.2.1 Notion d'Emission :

Production et propagation de perturbation électromagnétiques. Autrement émission ou **perturbations** désignent les signaux émis volontaires ou non dont la propagation est de nature à nuire au bon fonctionnement des appareils ou à la santé des êtres vivants situés au voisinage ; c'est le pouvoir perturbateur d'un équipement électrique (EMI = ElectroMagnetic Interference).

### 1.2.2 Immunité

Fonctionnement d'un appareil ou d'un équipement d'une manière satisfaisante dans un environnement électromagnétique. L'immunité est aussi appelé la **susceptibilité** ; la capacité à supporter les perturbations (EMS = ElectroMagnetic Susceptibility).

## 1.3- Thèmes de la CEM

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

Les principaux centres d'étude de la CEM:

- les sources de perturbations et les procédés permettant de limiter les perturbations électromagnétiques émises (analyse des sources de perturbations);
- Les modes de couplage et de propagation (possibilité de passage d'une perturbation d'un dispositif vers un autre / environnement électromagnétique);
- immunité des appareils et des systèmes aux perturbations (développer des procédés permettant d'accroître l'immunité des systèmes aux parasites).

Les effets des perturbations sur les "victimes", qui correspondent au concept de susceptibilité électromagnétique.

- protection contre la foudre

### 1.3.1 - Sources de perturbations.

Les sources des émissions électromagnétiques peuvent être d'origine naturelle ou artificielle liée à l'activité humaine (intentionnelle ou non intentionnelle).

**Sources naturelles** : foudre, rayonnement solaire, bruit thermique terrestre, galactique...

**Sources artificielles intentionnelles** : équipement de télécommunication (émetteurs radio et télévision, radar, téléphones portables, ...), appareils électroménagers (micro-ondes, fours à induction, fours...), soudure à arc, lampes à décharge, ...

**Sources artificielles non intentionnelles** : fluctuations de tension et de courant, les courts circuits, systèmes d'allumage des moteurs à explosion, tous les systèmes d'enclenchement et de coupure d'un signal électrique, lampes à décharge, Electronique de contrôle-commande et électronique de puissance, électronique de protection, appareillage de puissance, Moteur puissant à collecteur, démarrage de tout type de moteur électrique puissant, Les décharges électrostatiques qui impliquent le corps humain ou des matériaux mis en mouvement par l'homme...

### 1.3.2 Mode de propagation des perturbations

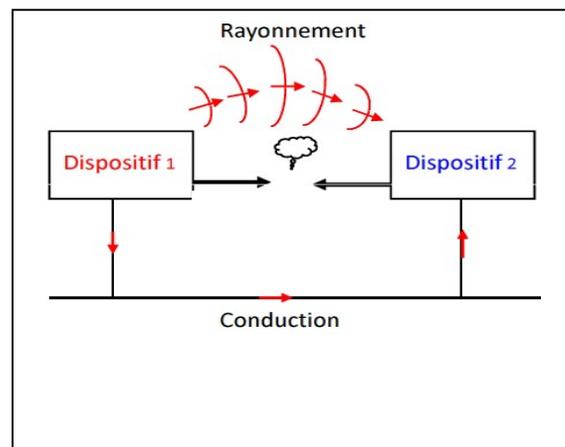
Les perturbations électromagnétiques se propagent par deux voies distinctes, par *Conduction* et/ou par *Rayonnement*.

**Perturbations rayonnées** se propagent dans l'air et elles sont transmises par :

- un champ électrique (E)
- un champ magnétique (B)
- un champ électromagnétique (E, B)

#### **Perturbations conduites**

Les perturbations électromagnétiques conduites sont transmises par les connexions électriques entre différents équipements.



## 1.4. Terminologie CEM

### **Niveau de susceptibilité.**

Il s'agit du niveau à partir duquel il y a dysfonctionnement d'un matériel ou d'un système.

### **Niveau d'immunité.**

C'est le niveau d'une perturbation supportée par un matériel ou un système.

### ***Niveau de compatibilité.***

C'est le niveau maximal de perturbation auquel on peut s'attendre dans un environnement donné.

### ***Marge d'immunité.***

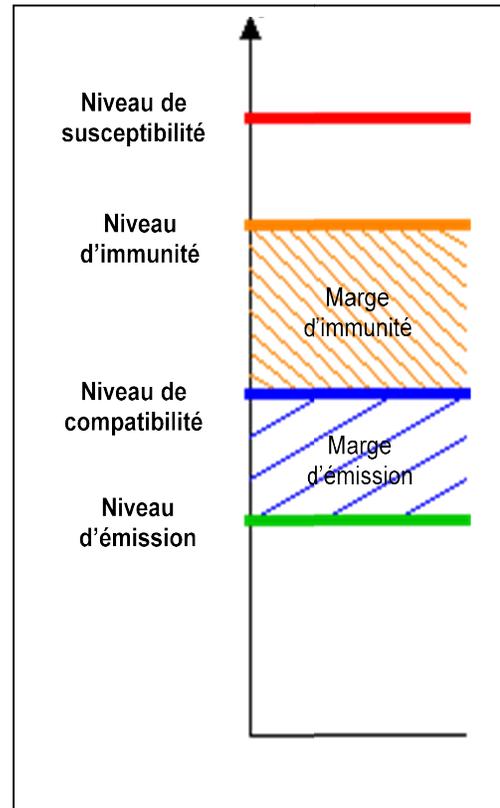
C'est la marge qui existe entre le niveau de compatibilité et le niveau de limite d'immunité.

### ***Niveau d'émission.***

C'est le niveau maximal d'émission de perturbation que ne doit pas dépasser un matériel.

### ***Marge d'émission.***

C'est la marge qui existe entre le niveau de compatibilité et le niveau de limite d'émission.



## **1.5- Définitions et abréviations**

E3 = EEE electromagnetic environmental effects  
Effets de l'environnement électromagnétique

EMS : electromagnetic susceptability  
Susceptibilité électromagnétique

EMV: electromagnetic vulnerability  
Vulnérabilité électromagnétique

EOS: electrical overstress  
Surcharges électriques

HERF: hazards of electromagnetic radiations to fuel  
Dangers électromagnétiques pour les carburants

HERO: hazards of electromagnetic radiations to ordnance  
dangers des rayonnements électromagnétiques pour le matériel (mil.)

HERP: hazards of electromagnetic radiations to personnel  
dangers des rayonnements électromagnétiques pour le personnel

RADHAZ: radiations hazards  
risques liés aux radiations

## **1.6 Les grandeurs et unités utilisées en CEM**

**Tension** : V en volt [V]

**Courant** : I en ampère [A]

**Densité de charge d'espace**  $\rho$  [C/m<sup>3</sup>]

**densité de courant**: J [A/m<sup>2</sup>]

**Induction magnétique** : B en tesla [T]

**Champ magnétique : H** en ampère par mètre [A/m] ( $B = \mu_0 \mu_r H$ )

$\mu_r$ : Perméabilité magnétique relative du milieu

$\mu_r = 1$  dans l'air ;  $\mu_r = 1000$  dans le fer

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  [H/m] (**henrys par mètre**), Perméabilité magnétique du vide

**Champ électrique : E** en Volt / mètre [V/m]

Pour couvrir de grandes étendues de valeurs, on utilise les décibels  $20 \log (V / V_{ref})$

Pour une tension :  $20 \log (V)$       dBV       $0 \text{ dB} \Leftrightarrow 1 \text{ V}$

$20 \log (V/10^{-6})$       dB  $\mu$ V       $0 \text{ dB} \Leftrightarrow 1 \mu\text{V}$

Pour un champ :  $20 \log (E)$       dB V/m       $0 \text{ dB} \Leftrightarrow 1 \text{ V/m}$

$20 \log (E/10^{-3})$  dBmV/m  $0 \text{ dB} \Leftrightarrow 1 \text{ mV/m}$

## 2 NATURE DES SOURCES DE PERTURBATION

Les perturbations électromagnétiques peuvent prendre deux formes distinctes : les perturbations dites conduites et celles dites rayonnées. Les gammes de fréquences correspondant à chacune d'elles sont différentes et complémentaires (150kHz-30MHz et 30MHz-1GHz dans notre exemple).

Les signaux parasites émis par la source (par exemple dans un convertisseur statique, la ou les cellules de commutations) sont propagés vers la source d'énergie (ou vers la charge) qui est désignée par le terme de "victime", de plusieurs façons, liées à leur environnement respectif.

Deux cas peuvent alors se présenter :

- si la source et la victime sont voisins avec ou sans liaison galvanique, le couplage est dit proche et il peut être de nature capacitive, inductive ou résistive. Les outils d'analyse font appel à des modèles de types réseau électrique où les couplages sont représentés par des capacités, des mutuelles ou des résistances (dans le cas de liaisons galvaniques directes). Les phénomènes perturbateurs sont dans ce cas les variations rapides de courant ou de tension ( $\frac{di}{dt}$ ,  $\frac{dv}{dt}$ ).

Ce type de perturbations est appelé **perturbations conduites** et elles se développent dans les câbles ou conducteurs de liaisons aux réseaux, sources d'énergie ou charges.

- Si source et victime sont éloignées et sans liaison galvanique, la perturbation est transmise par une onde électromagnétique, on parle de **perturbations rayonnées** ou propagées. Les phénomènes sont décrits avec les outils théoriques et expérimentaux propres à ce domaine (équation de Maxwell et utilisation d'antennes de mesure).

### 2.1 Perturbations rayonnées

Les circuits électriques, lorsqu'ils sont soumis à des différences de potentiel et ou parcourus par des courants, produisent des champs électromagnétiques dans l'espace. Leurs intensités dépendent de la nature, la fréquence et la distance par rapport à la source.

- Le champ électrique s'exprime en V/m. Son émission est produite par un circuit électrique à haute impédance soumis à une différence de potentiel élevée  $v$  (Figure 1).

- Le champ magnétique s'exprime en A/m. Son émission est engendré par un circuit basse impédance parcouru par un courant  $i$  (Figure 2).

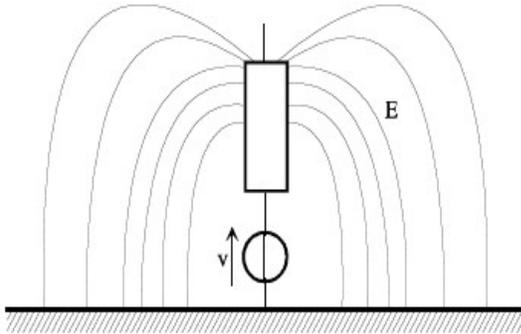


Figure 1 : Emission en champ électrique

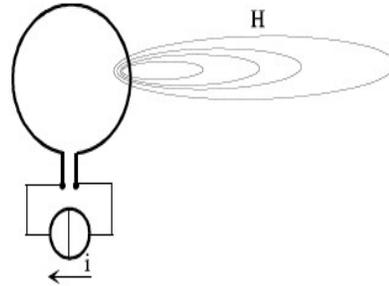


Figure 2 : Emission en champ magnétique

### Rappels :

L'impédance de l'onde électromagnétique représente le rapport de l'intensité du champ électrique sur l'intensité du champ magnétique :  $Z = \frac{E}{H}$

La longueur d'onde peut être calculée en effectuant le rapport de la vitesse de propagation de l'onde (soit la vitesse de la lumière pour le vide et en première approximation pour l'air) sur la fréquence des signaux constituant cette onde électromagnétique :  $\lambda = \frac{c}{f} = 3 \cdot 10^8 \cdot \frac{1}{f}$  (f en m).

soit 1m pour  $f=300\text{MHz}$ .

### Notations :

Pour des distances à la source inférieures à  $\lambda/2\pi$  nous considérerons que nous sommes en champs proches.

Pour des distances à la source supérieures à  $\lambda/2\pi$  nous considérerons que nous sommes en champs lointains.

### Champs proches :

- dipôle électrique: E varie en  $1/r^3$ , H varie en  $1/r^2$ , Z varie alors en  $1/r$ .

A faible distance le doublet rayonne essentiellement en champ E.

- Dipôle magnétique: E varie en  $1/r^2$ , H en  $1/r^3$ , Z varie en r

A faible distance la boucle rayonne essentiellement en champ H.

### Champs lointains :

E et H décroissent en  $1/r$ ,  $Z=Cte=377\Omega$  (impédance du vide)

Le champ électromagnétique a les caractéristiques d'une onde plane

### Exemple :

Le champ E créé par une antenne boucle d'aire A, parcourue par un courant sinusoïdal d'amplitude I et de fréquence F, dans le plan de la boucle à une distance r, a pour expression en champ lointain :  $F = 1.32 \cdot 10^{-14} \cdot A \cdot I \cdot \frac{F^2}{r}$

## 2.1.1 Exemples de perturbations rayonnées

### a - Perturbations à basses fréquences rayonnées transitoires :

- les courts circuits ;
- l'enclenchement des lignes aériennes ;
- les flashes électroniques ;
- la foudre.

**b- rayonnées entretenues**

- Les machines ISM The industrial, scientific and medical (ISM) ;
- les émetteurs hertziens

**c- rayonnées transitoires**

- les décharges électrostatiques ;
- les manœuvres en hautes tensions ;
- les arcs électriques

**d - Perturbations à basses fréquences rayonnées entretenues :**

- le champ de fuite des transformateurs ;
- rayonnement des lignes aériennes d'énergie ;
- des courants de fuite à la terre ;
- les fours à induction

## 2.2 Perturbations conduites

Les perturbations électromagnétiques peuvent également être transmises en utilisant comme vecteur les connexions électriques entre différents équipements. Ces perturbations sont alors nommées perturbations conduites.

Bien évidemment ces courants et tensions parasites circulant dans les câbles ou fils interconnectant des équipements entre eux vont eux-mêmes rayonner. De même des perturbations rayonnées vont pouvoir induire des courants et tensions parasites dans les différentes interconnexions. Les perturbations conduites et rayonnées sont donc intimement couplées.

### 2.2.1 Exemples de Perturbations conduites

**a - Perturbations à basses fréquences conduites entretenues :**

- *flicker* -fréquentes baisses légères de tension du réseau provoquées par des à-coups de courant - Démarrage de gros moteurs ;
  - chaudières électriques ;
  - fours à arc électrique.

*Les variations de fréquences du réseau électrique :-* les groupes électrogènes dont la charge varie ;

- *Les harmoniques ;*
- *Les inter-harmoniques générées par* - certains convertisseurs de fréquence ;
  - Les cyclo-convertisseurs,
  - les moteurs asynchrones à rotor non lisse ;
  - convertisseur de puissance ;
  - certains hacheurs ;
  - variateurs de vitesses.

### b - Perturbations à basses fréquences conduites transitoires

- Fluctuation de la tension ;
- les creux et les microcoupures ;
- Les surtensions lentes ;
- la foudre ;
- les courants transitoires (enclenchement des charges).

### c- Perturbations à hautes fréquences Conduites entretenues

- le bruit de commutation des moteurs à collecteur
- horloge des systèmes informatiques

### d- Perturbations à hautes fréquences Conduites transitoires

- la coupure de courant dans les bobines : après la coupure de courant dans la bobine, l'énergie inductive charge la capacité entre les conducteurs, une surtension ;
- les décharges électrostatiques ;
- les manœuvres en hautes tensions

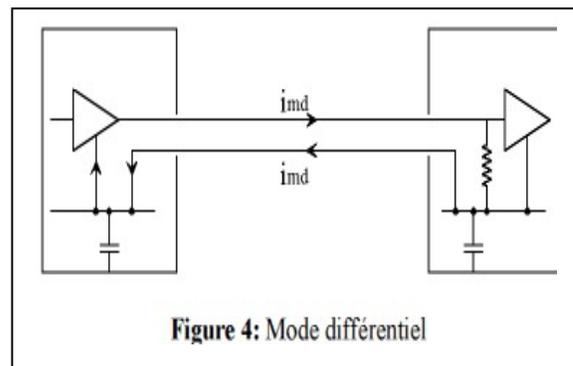
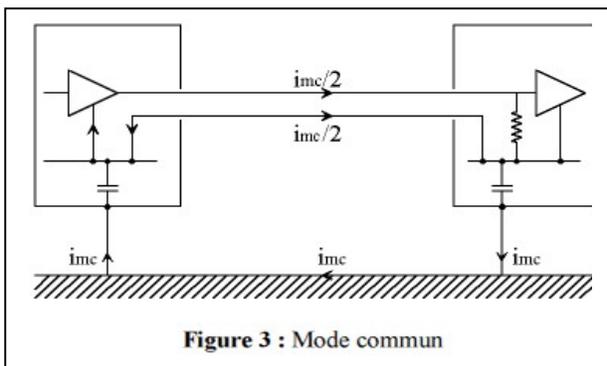
## 3 TERMINOLOGIE EMPLOYEE

Nous allons définir la terminologie employée pour caractériser les perturbations. On peut définir un modèle électrique de liaison entre deux "boîtes". Ces deux boîtes symbolisent deux équipements électriques reliés par deux fils permettant le transfert d'information ou d'énergie. Ce modèle comporte également une liaison équipotentielle (plan de masse, châssis de l'appareil, terre, etc.).

Dans ce modèle dit des "deux boîtes" on différencie deux modes de circulation des courants :

- *Le mode différentiel ou symétrique*
- *Le mode commun ou asymétrique*

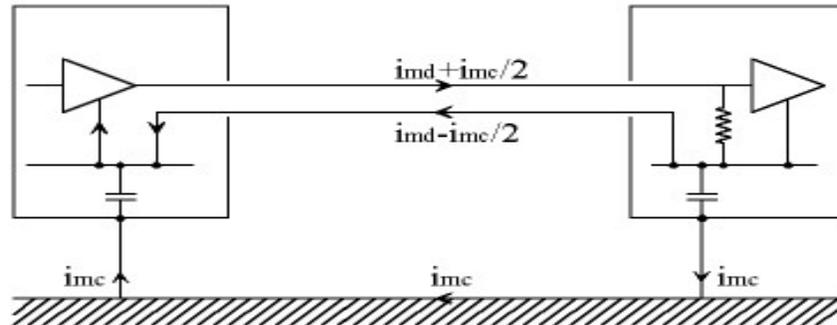
La représentation de ces deux modes est donnée aux figures 3 et 4.



La circulation du mode différentiel ne fait intervenir que la liaison bifilaire entre les deux équipements. Dans ce cas, le courant dans le conducteur "aller" est égal au courant dans le conducteur "retour".

La circulation du courant de mode commun fait intervenir la liaison bifilaire et la liaison équipotentielle. Par définition, nous appelons courant de mode commun, le courant qui circule dans la connexion équipotentielle.

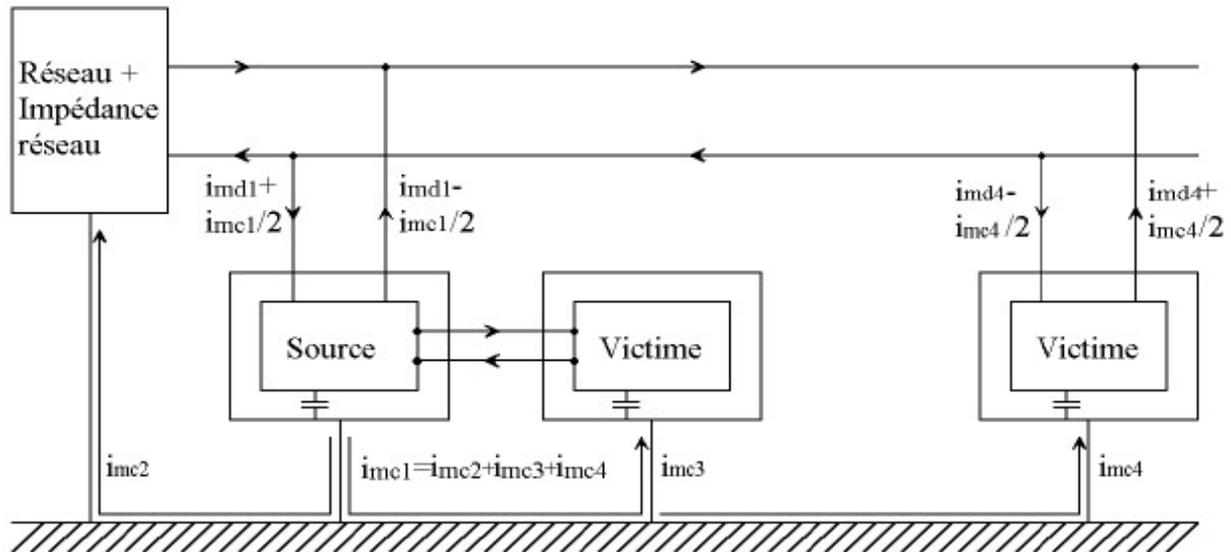
Dans le cas général, il y a superposition de ces deux modes. Les définitions précédentes restent exactes, si nous définissons les courants dans le système de la façon indiquée à la Figure 5.



**Figure 5:** Superposition du mode différentiel et du mode commun

## 4 MECANISMES DE TRANSMISSION DES PERTURBATIONS

La Figure 6 donne un aperçu des différents modes de transmission des perturbations en mode conduit. Nous allons expliciter chacun de ces modes. Dans cette figure nous différencions trois types d'éléments, l'équipement perturbateur dit "source", les équipements susceptibles d'être perturbés ("victimes") et le réseau.



**Figure 6 :** Modes de transmission des perturbations conduites

### 4.1 Les couplages par liaison directe

Les couplages par liaison directe permettent la propagation des perturbations de la "source" à la "victime" par l'intermédiaire d'un canal de transmission d'information ou d'énergie. Ces

perturbations passent de la "source" à la "victime" en mode commun et en mode différentiel (Figure 7).

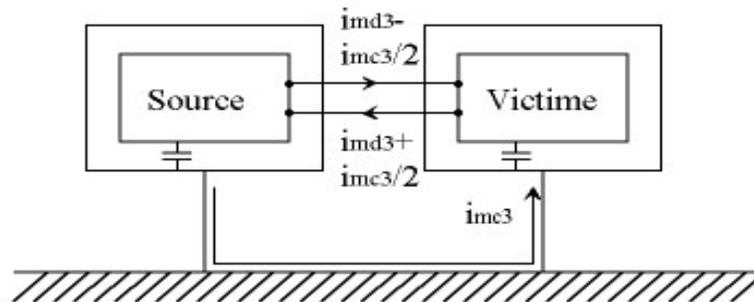


Figure 7 : Couplage par liaison directe

#### 4.2 Les couplages par impédance commune

Ce mode de transmission des perturbations est bien plus difficile à identifier que celui présenté précédemment. Les éléments "source" et "victime" ne sont pas liés entre eux pour des raisons fonctionnelles, c'est à dire qu'ils n'échangent théoriquement pas d'information ou d'énergie. La connexion qui les lie est une liaison indirecte, comme par exemple une connexion à un même réseau (figure suivante)

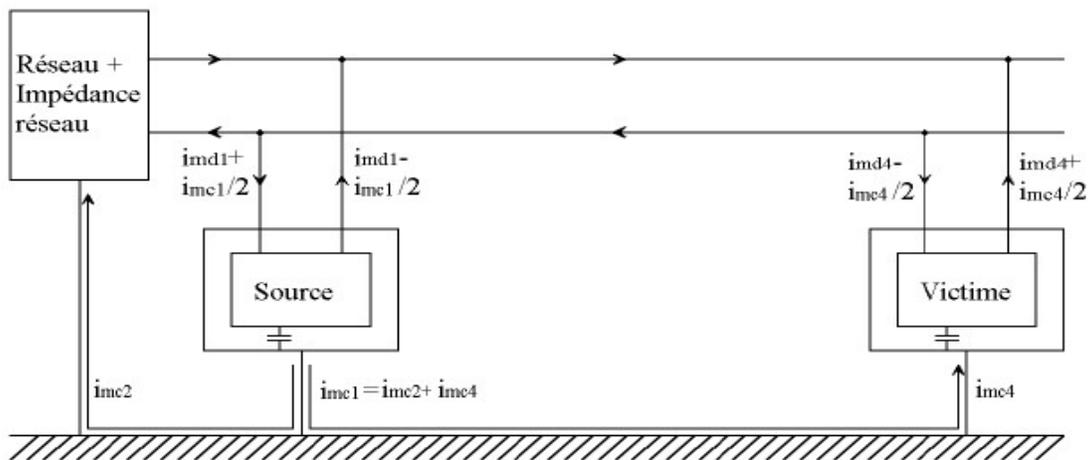


Figure 8 : Couplage par impédance commune

On retrouve ce couplage dans les deux modes, en mode commun et en mode différentiel. Les courants perturbateurs absorbés par la "source", c'est à dire des courants dont la fréquence est telle que l'impédance réseau n'est plus négligeable vis à vis de l'impédance d'entrée de la "victime", vont se partager entre le réseau et la "victime" dans des proportions dépendant de leurs impédances respectives. Ces courants provoquent des chutes de tension sur le réseau.

#### 5.1 Transmission par rayonnement

Les perturbations électromagnétiques peuvent également se propager sans qu'il existe de conducteurs communs entre la "source" et la "victime". On peut distinguer deux types de couplage dans ce mode le couplage en champ lointain et le couplage en champ proche.

### 5.1.1 Le couplage en champ lointain

Dans ce cas nous supposons que les courants et tensions induits dans la "victime" ne provoquent pas de modification dans les caractéristiques d'émission de l'élément perturbateur. Ceci est vérifié si le couplage entre les deux éléments est faible. Ce couplage n'a donc, dans la majorité des cas une importance significative que si les longueurs et surfaces mises en jeu sont grandes. C'est pourquoi ils interviennent de façon significative dans les connexions. Nous parlons alors dans ce cas de couplage champ à câble. Ce couplage est soit un couplage en champ électrique ou un couplage en champ magnétique et peut s'effectuer en mode commun ou en mode différentiel (Figure 9, Figure 10 et Figure 11).

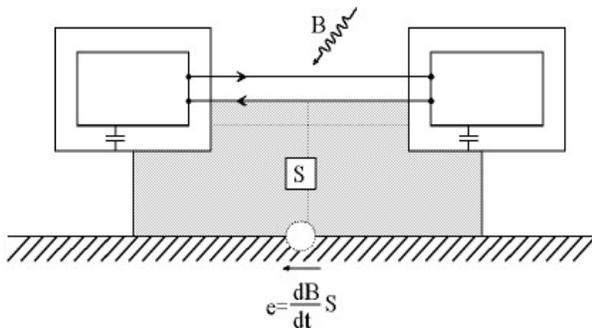


Figure 9 : Couplage champ magnétique à câble en mode commun

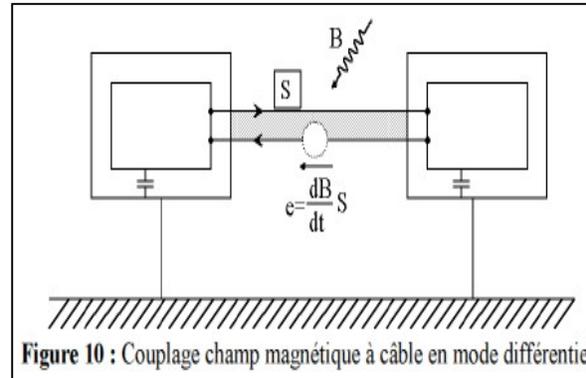


Figure 10 : Couplage champ magnétique à câble en mode différentiel

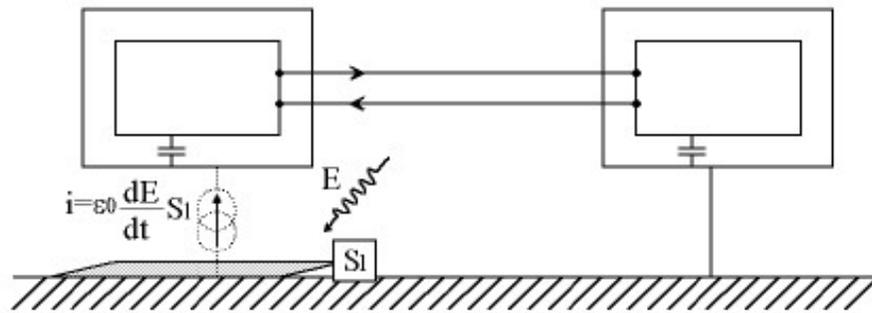


Figure 11 : Couplage champ électrique à câble en mode commun

### 5.1.2. Le couplage en champ proche

Ces couplages en champ électrique ou magnétique peuvent être représentés respectivement par des liaisons capacitives ou des mutuelles inductances. Quand ces couplages interviennent sur des connexions électriques, on parle alors de couplages câble à câble ou de phénomènes de diaphonie capacitive ou inductive (Figure 12).

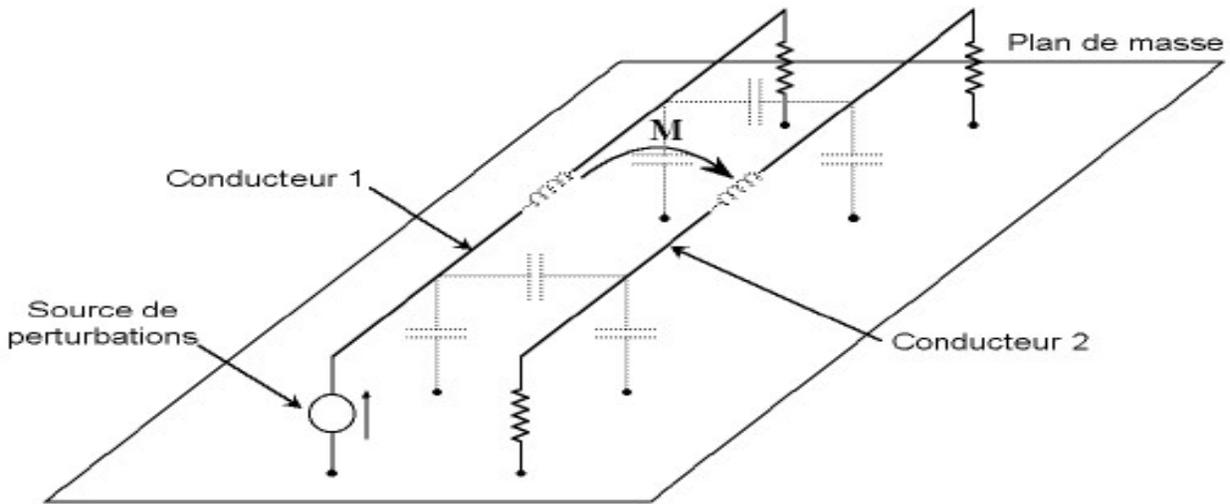
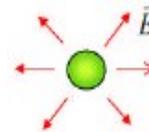


Figure 12 : Couplage en champ proche

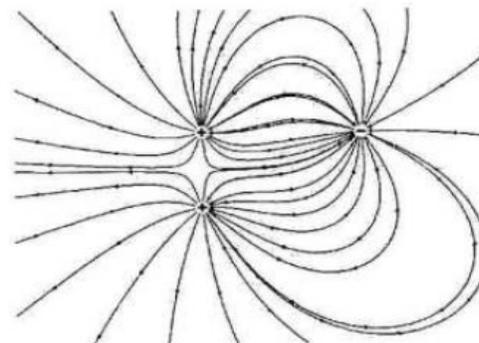
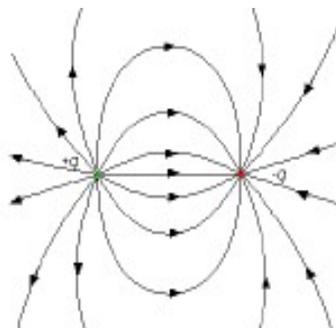
## 6 Champ électrostatique



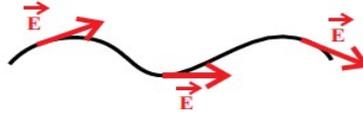
### 6.1 Les lignes de champ électrostatiques

- Le champ électrique est créé par les charges électriques, Il est bien connu que deux charges de même signe se repoussent, par contre deux charges de signe opposé s'attirent. La force électrostatiques entres ces deux charges est donnée par la loi de Coulomb et se généralisent à un nombre quelconque de charges. La force d'interaction entre deux charge  $q_1$  et  $q_2$  s'écrit :  $F_{12} = -F_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} u_r$

Les lignes de champs débutent par les charges positives et finisses par les charges négatives. La représentation par ligne de champ ne donne pas d'information directe sur l'intensité du champ. L'intensité du champ est proportionnelle à la densité des lignes du champ.



Une ligne de champ d'un champ de vecteur est une courbe C définie dans l'espace telle que, en chacun de ses points le vecteur v soit tangent. Le fait que le champ électrique  $\vec{E}$  soit en tout point de C parallèle à  $d\vec{l}$  ;  $\vec{E} \wedge d\vec{l} = \vec{0}$

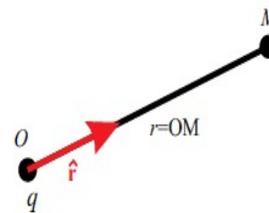


### Champ électrostatique créé par une charge ponctuelle

Une particule de charge q située en O crée en tout point M de

l'espace un champ vectoriel :  $\vec{E}(M) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{r}$

avec  $\hat{r} = \frac{\vec{OM}}{OM}$



## 6.2 Caractéristiques du champ électrostatique

Le champ électrostatique est caractérisé par deux propriétés importantes; la circulation conservatrice et la seconde propriété est liée à la structures des lignes de champ qui fait appel à la notion de flux.

- Le champ électrostatique est à circulation conservatrice. La circulation du champ e le long d'un chemin C est définie comme :

$$dc = E(M).dOM$$

Si par exemple on réalise une circulation d'un point A à un point B, il suffit d'intégrer la

formule précédente le long du chemin, ce qui donne :  $C_{AB} = \int_M E(M).dOM$

Dans le cas d'un champ créé par une charge unique :

$$C_{AB} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r_A} - \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r_B}$$

On constate que la circulation du champ E le long du chemin entre A et B ne dépend que du point du départ et du point d'arrivée, ce qui permet d'introduire une quantité scalaire caractérisant localement l'influence du champ généré par les charges statiques : le potentiel électrostatique, qui traduit directement la variation des lignes de champ autour du point d'observation (M) qui s'écrit finalement comme un gradient :

$$dV = \frac{\partial V}{\partial x} dx + \frac{\partial V}{\partial y} dy + \frac{\partial V}{\partial z} dz = gradV.dOM$$

La relation entre le champ électrique et le potentiel électrique :  $\mathbf{E} = -\text{grad}V$

L'énergie nécessaire pour déplacer une charge ponctuelle  $q$  d'un point A à un point B est définie comme le produit scalaire entre la force et le vecteur de déplacement :

$$dw = \overrightarrow{F(M)} \cdot \overrightarrow{dOM}$$

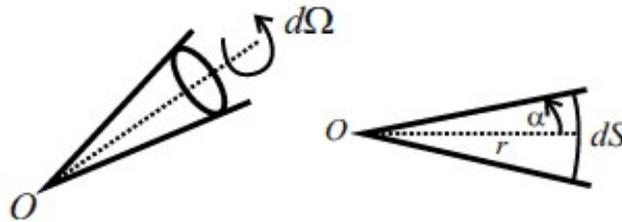
Et l'intégration sur le parcours donne :  $W_{AB} = q \cdot V_A - q \cdot V_B$

- La seconde propriété lie à la notion du flux, le flux vectoriel à travers une surface est la mesure du nombre de lignes du champ traversant cette surface. Si nous considérons la charge à l'origine du champ placée au centre d'un repère, le flux du champ à travers la surface  $dS$  supposée suffisamment petite pour que le champ pour que le champ la traversant soit constant. Ce flux est défini par le produit scalaire entre le champ et le vecteur normal  $dS$  à cette surface.

$$d\phi = \overrightarrow{E(M)} \cdot \overrightarrow{dS(M)}$$

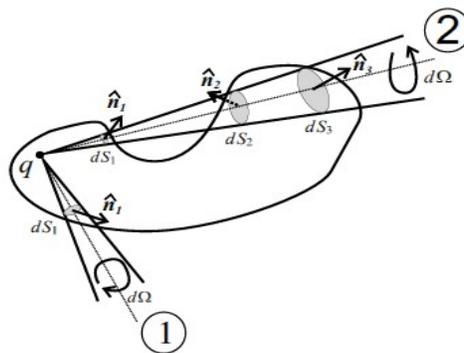
Pour une charge ponctuelle, on alors :  $d\phi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \overrightarrow{u_r} \cdot \overrightarrow{dS}$

L'angle solide  $d\Omega$  sous lequel est vue la surface à partir de la charge est :  $d\Omega = \frac{dS}{r^2} \cdot \overrightarrow{u_r}$



Le flux est défini à partir de l'angle solide par :  $d\phi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} d\Omega$

On considérant une surface fermée quelconque entourant la charge, après intégration de l'angle solide sur  $4\pi$  (sr) stéradians, on obtient :  $\phi = \frac{q}{\epsilon_0}$



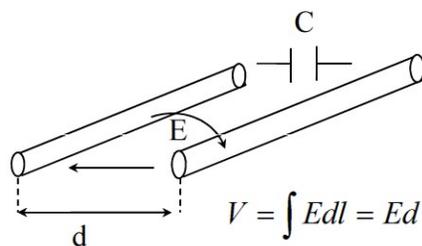
Cette propriété est à la base du théorème de Gauss qui stipule que le flux du champ électrique à travers une surface fermée est égal à la somme des charges internes de cette surface divisée par la permittivité du vide.  $\oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0}$

### 6.3. Application dans le cas de la compatibilité électromagnétique

#### 6.3.1 Couplage en champ proche

Considérons deux antennes de type dipôle électrique situées en champ proche ; il existe un couplage capacitif entre elles. Chaque extrémité des antennes est le siège d'accumulation de charges qui donne lieu à ces phénomènes de couplage, si comme on avait une capacité de couplage aux extrémités des différents conducteurs.

Si on applique un champ électrique  $E$  variable sur un circuit conducteur ouvert fait apparaître une tension  $V$ . Le couplage par champ électrique est équivalent au couplage par l'intermédiaire d'une capacité. Une différence de tension variable entre ces deux circuits va générer un courant électrique de l'un vers l'autre à travers la capacité parasite.

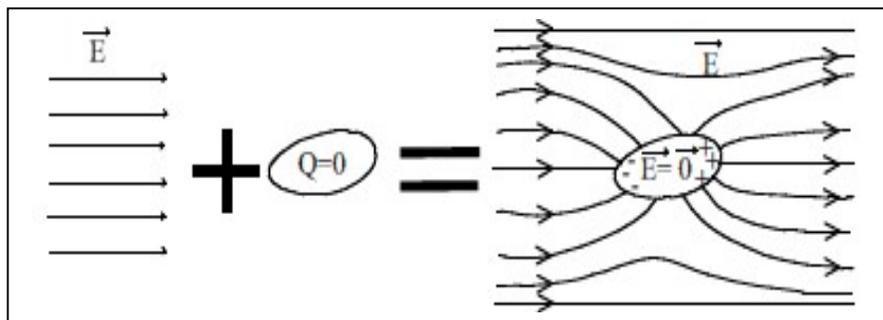


$$I = C \frac{dV}{dt} = Cj\omega V = j2\pi fCV$$

#### 6.3.2 Phénomène d'influence électrostatique

##### Influence partielle

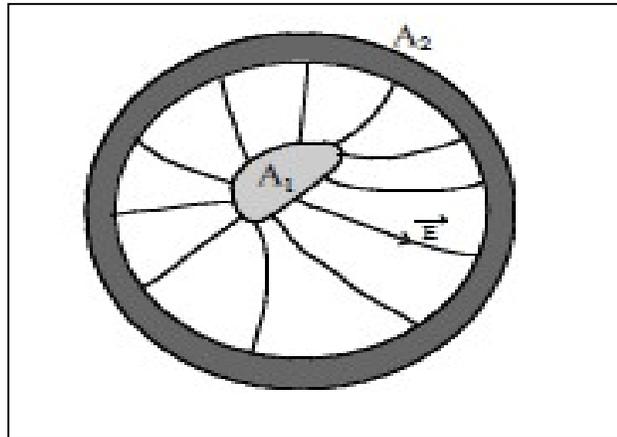
Considérons un conducteur ( $A_1$ ) de charge  $Q_1$  avec une densité surfacique  $\sigma_1$ , placé à proximité d'un conducteur neutre ( $A_2$ ). On voit apparaître une densité surfacique non uniforme sur ( $A_2$ ) due au champ électrostatique de ( $A_1$ ). Mais, en retour, l'apparition de charges sur ( $A_2$ ) modifie la distribution de charge  $\sigma_1$  de ( $A_1$ ). On appelle cette action réciproque d'influence partielle, car l'ensemble des lignes de champ électrostatiques issues du conducteur ( $A_1$ ) n'aboutissent pas sur ( $A_2$ ).



### ***Influence totale***

On peut créer des conditions d'influence électrostatique totale en plaçant le conducteur ( $A_1$ ) à l'intérieur de ( $A_2$ ). Puisque l'ensemble des lignes de champ issues de ( $A_1$ ) aboutissent sur ( $A_2$ )

On peut créer des conditions d'influence électrostatique et on voit apparaître une charge  $Q_2^{int} = -Q_1$  sur la face interne de ( $A_2$ ) ceci quelle que soit la position de ( $A_1$ ). La charge électrique totale sur ( $A_2$ ) est  $Q_2 = Q_2^{int} + Q_2^{ext} = -Q_1 + Q_2^{ext}$

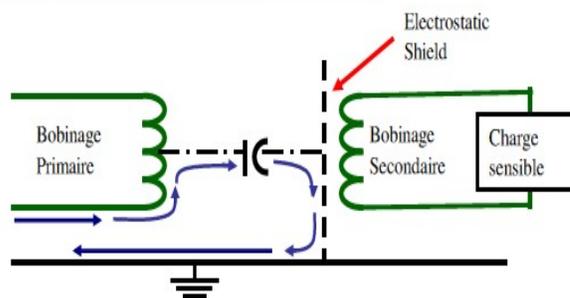


### **6.3.3 Notion d'écran électrostatique ou blindage électrostatique**

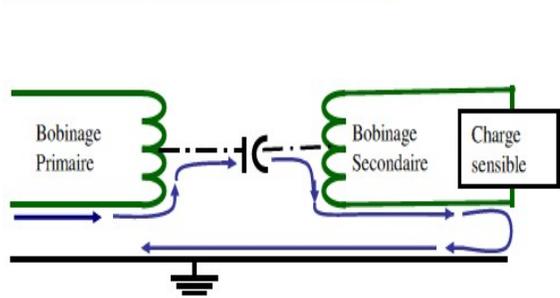
#### ***Barrière électrostatique***

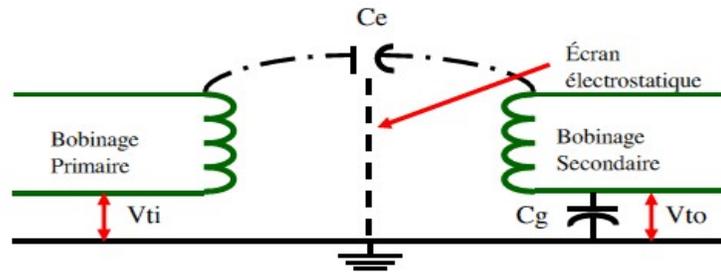
On définit par écran électrostatique tout conducteur creux ou se forme d'une barrière maintenu à un potentiel constant ou mis à la terre. Dans les transformateurs d'isolation on trouve ce type d'écran électrostatique sous forme d'une barrière métallique, mise à la terre, installée entre les bobinages primaires et secondaires

**Transformateur avec écran**



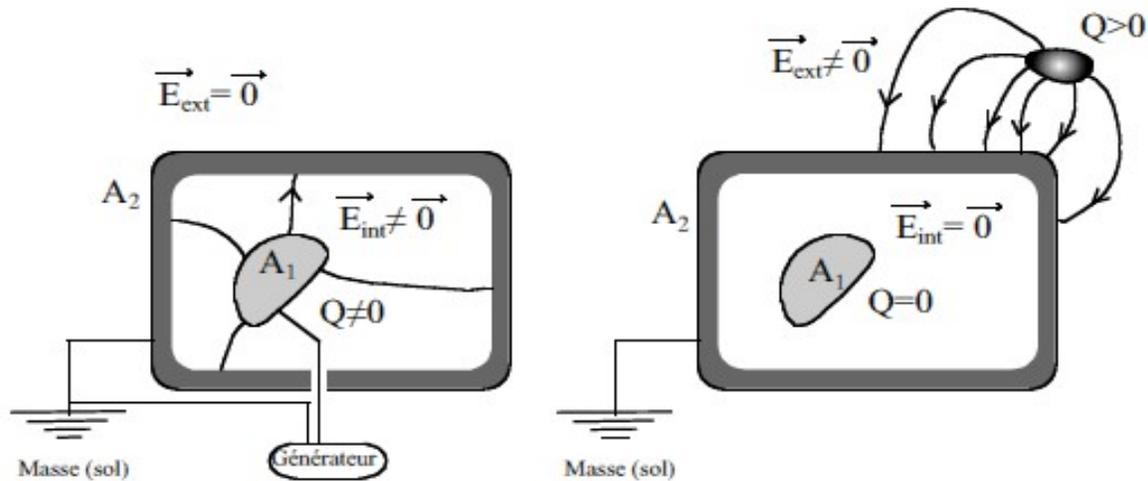
**Transformateur sans écran**





**Blindage électrostatique (cage de Faraday)**

Un conducteur à l'équilibre a un champ nul : de ce fait, s'il possède une cavité, celle-ci se trouve automatiquement isolée (du point de vue électrostatique) du monde extérieur. On définit par écran électrostatique parfait, dans les deux sens, tout conducteur creux maintenu à un potentiel constant. Un tel dispositif est appelé cage de Faraday.



Lorsqu'on relie (A2) à la terre, on a  $Q_2^{ext} = 0$ , (Les charges s'écoulent vers la Terre ou proviennent de celle-ci). Dans ce cas, le champ électrostatique mesuré à l'extérieur de (A2) est nul, malgré la présence de (A1) chargé à l'intérieur de (A2). Ainsi, l'espace extérieur à (A2) est protégé de toute influence électrostatique provenant de la cavité. L'inverse est également vrai.

## 7 Magnétostatique

### 7.1 Au niveau des charges

La force électromagnétique créée par des charges ponctuelles en mouvement, et exerçant sur une particule chargée  $q$  et de vitesse  $v$ , appelée la **force de Lorentz**, c'est la force que subit une particule lorsque elle rentre dans un champ électromagnétique s'écrit sous la forme :

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Considérons un élément de courant soumis a un champ magnétique, la force subie par cet élément de courant suit la loi de Laplace donnée par :

$$d\vec{F} = i d\vec{l} \times \vec{B}$$

La force de Laplace est la résultante de toutes les **forces de Lorentz** sur les charges mobiles. Inversement, un élément de courant est source d'un champ magnétique donnée par la loi de Biot et Savart :

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} i d\vec{l} \times \frac{\vec{u}_r}{r^2}$$

A partir de la loi de Biot et Savart, on retrouve le champ magnétique généré par plusieurs configurations simples. La divergence du champ magnétique est nulle, il découle donc que le B est un rotationnel. On écrit alors  $B = \text{rot}(A)$  ; ou A est le potentiel vecteur :

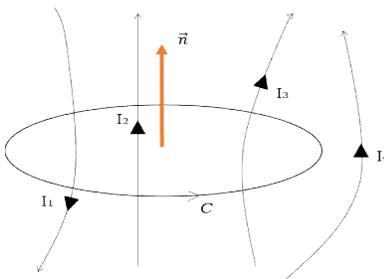
$$A = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint_V \frac{J}{r} dv, \text{ avec } J \text{ le vecteur densité de courant.}$$

Ainsi, le potentiel vecteur vérifie la relation :  $\Delta \vec{A} + \mu_0 \vec{J} = 0$

Et, on déduit :  $\text{rot}(\vec{B}) = \mu_0 \vec{J}$

Cette relation permet de réaliser le calcul du champ magnétique rayonne a travers une surface reposant sur une surface fermée. La circulation du champ d'induction magnétique  $\vec{B}$  le long d'un contour  $C$  orienté et fermé, que l'on appelle contour d'Ampère, est égale au produit de  $\mu_0$  par la somme algébrique des courants qui traversent la surface délimitée par  $C$ .

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum I_{\text{enlacés}}$$



$$\sum I_{\text{enlacés}} = I_1 + I_2 + I_3$$

## 7.2 Au niveau d'un circuit simple

La force électromotrice induite dans un bobinage fermé, placé dans un champ magnétique est proportionnelle à la variation au cours du temps du flux du champ magnétique qui entre dans le circuit. Cela s'exprime par la loi de Faraday ( $e = - d\Phi / dt$ ).

Si un courant variable parcourant un circuit génère un champ magnétique. Dans ce cas la spire

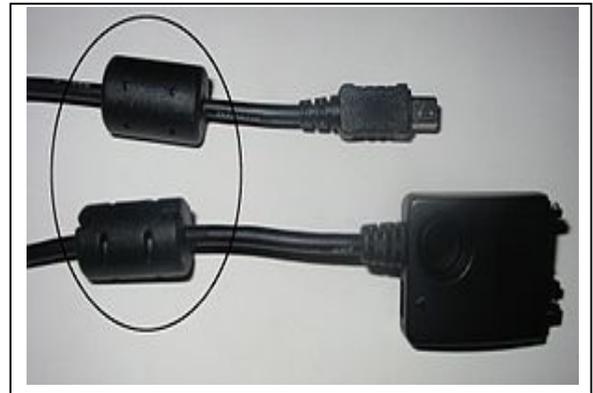
peut être assimilée à une self-inductance et on aura :  $e = -\frac{d\phi}{dt} = -L \frac{di}{dt}$

En effet le flux traversant une spire est donné par :  $\phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = Li$

## 7.3 Application dans le cas de la compatibilité électromagnétique

### 7.3.1 Filtres à ferrites

Les matériaux électromagnétiques sont utilisés dans le domaine de la compatibilité électromagnétique notamment pour les problèmes de filtrage. Les filtres utilisant des ferrites sont généralement des bagues situées autour des câbles permettant ainsi d'éliminer le courant parasite induit de mode commun. Ces matériaux utilisent les propriétés de fortes pertes magnétiques dans certaines bandes de fréquences.



### 7.3.2 Les courants de Foucault

Les courants de Foucault sont la conséquence de l'induction magnétique, ils sont créés dans les éléments métalliques se traduisant généralement par un échauffement par effet Joule. Les courants de Foucault provoquent un échauffement de la structure métallique et génèrent un champ magnétique qui vient s'opposer à la cause qui lui a donné naissance.

Les applications des courants de Foucault sont très nombreuses, nous allons citer ici celles qui font partie de la vie quotidienne à savoir :

- Les compteurs à gaz ;
- Les compteurs de vitesse à aiguille ;
- Le chauffage par induction ;
- Les systèmes de freinage dans le domaine ferroviaire

