

Chapitre 2

Type et Mode de couplage

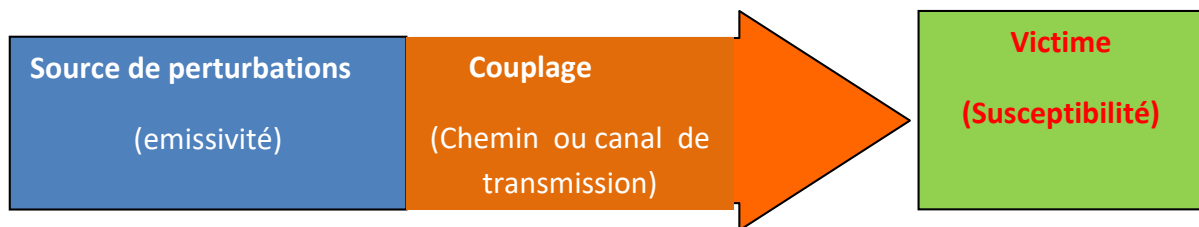
2.1 NATURE DES SOURCES DE PERTURBATION

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 :

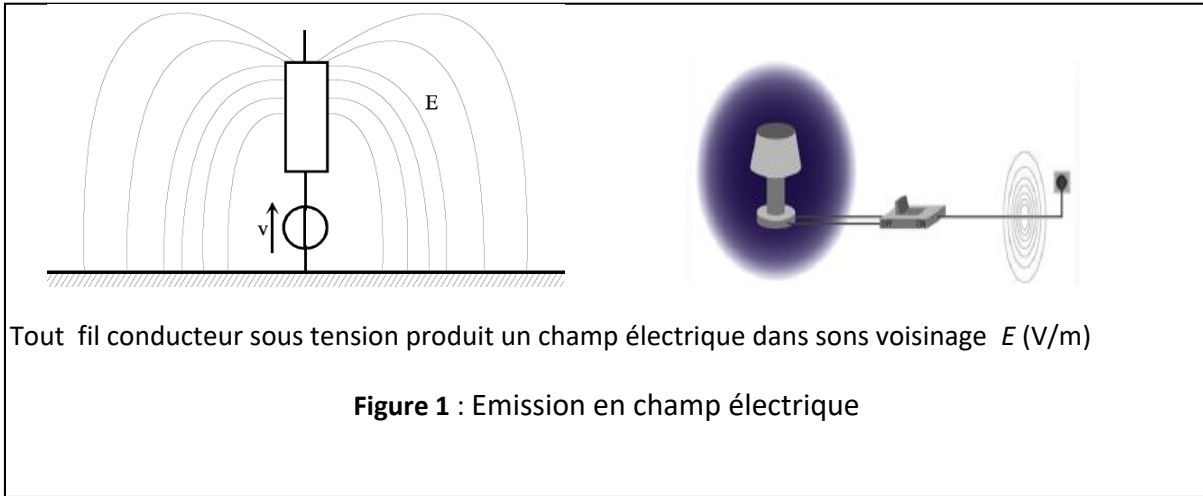
- si la source et la victime sont voisins avec ou sans liaison galvanique, le couplage est dit proche et il peut être de nature capacitive, inductive ou résistive. Les outils d'analyse font appel à des modèles de types réseau électrique où les couplages sont représentés par des capacités, des mutuelles 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).



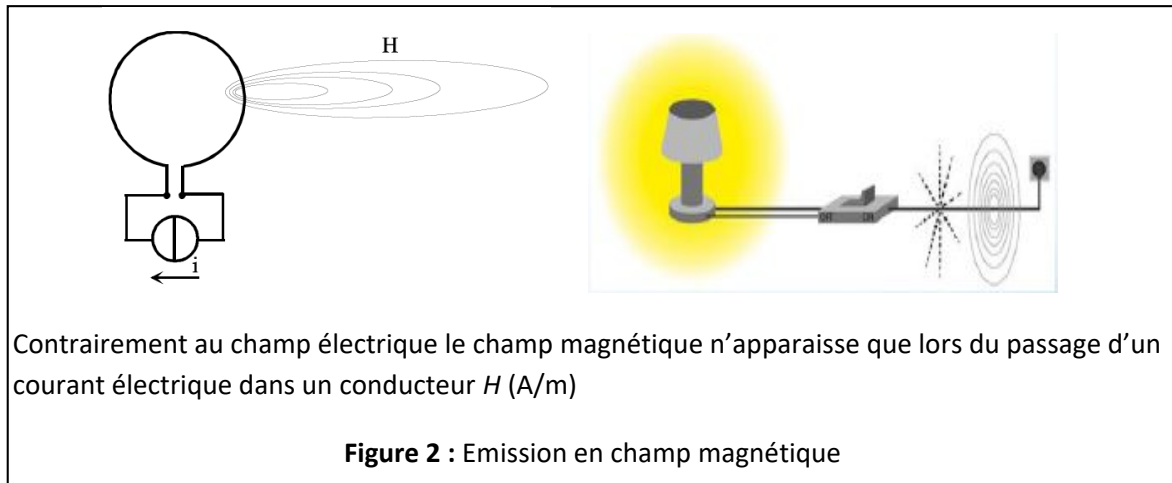
2.1.1 Perturbations rayonnées

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 engendrée par un circuit à basse impédance parcouru par un courant i (Figure 2).



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 : $\lambda = \frac{c}{f} = 3 \cdot 10^7 + 1$ (λ en m).

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

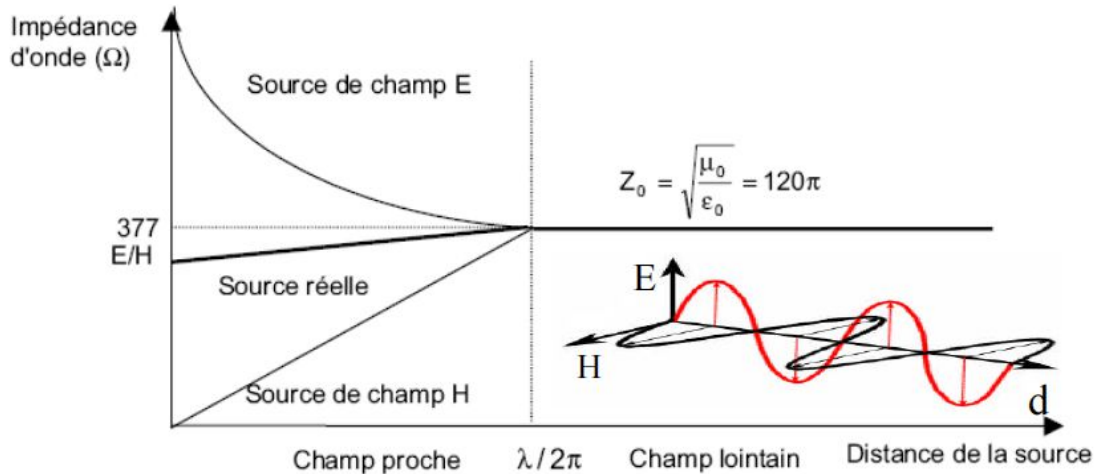


Figure 3 : Impédance d'onde Z_w en fonction de la distance r et de la longueur d'onde λ

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 $1/r$, $Z = \text{Cte} = 377 \Omega$ (impédance du vide)

Le champ électromagnétique a les caractéristiques d'une onde plane

Calcul du champ E

Le champ E créé par une antenne boucle d'aire S , 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

$$E = 1,32 \cdot 10^{-14} \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda}{2\pi r}\right)^2} \frac{f^2 S}{r} \text{ [V/m]}$$

$$\text{En champ proche : } \frac{\lambda}{2\pi} \gg r \rightarrow \frac{\lambda}{2\pi r} \gg 1 \rightarrow E = 1,32 \cdot 10^{-14} S I \frac{\lambda f^2}{2\pi r^2} \text{ [V/m]}$$

$$\text{En champ lointain : } r \gg \frac{\lambda}{2\pi} \rightarrow 1 \gg \frac{\lambda}{2\pi r} \rightarrow E = 1,32 \cdot 10^{-14} S I \frac{f^2}{r} \text{ [V/m]}$$

2.1.2 Perturbations conduites

Les perturbations électromagnétiques peuvent également être transmises en utilisant comme vecteur les connexions électriques entre différents équipements ou une connexion galvanique. 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 Modes de couplage

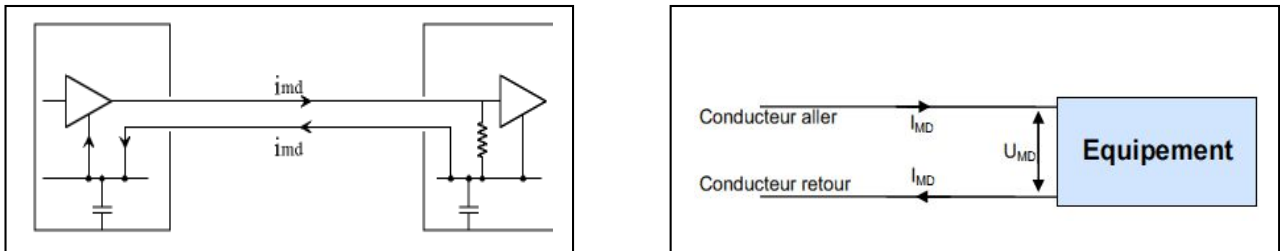
Nous allons définir la terminologie employée pour caractériser les perturbations. On peut définir un modèle électrique de liaison entre deux "boîtes". Ces deux boîtes symbolisent deux équipements électriques reliés par deux fils permettant le transfert d'information ou d'énergie. Ce modèle comporte également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

Dans ce modèle dit des "deux boîtes" on différencie deux modes de propagation de perturbations :

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

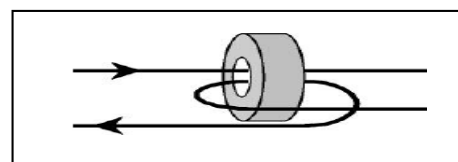
2.2.1 Mode différentiel (symétrique)

Les signaux utiles sont généralement transmis en mode **différentiel**, appelé aussi mode **série** ou mode **normal**. Le courant de mode **différentiel** se boucle sur les 2 fils de liaison. Il circule en sens opposé sur chacun des fils.



La circulation du courant en 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 tension de mode différentielle est mesurée entre les 2 fils, elle peut être mesurée avec une sonde différentielle.



2.2.2 Mode commun (asymétrique)

Le mode commun est très peu utilisé pour les signaux utiles, il correspond souvent à un mode parasite. Il est aussi appelé mode **parallèle** ou mode **longitudinal**.

La tension de mode commun est définie comme étant égale à la valeur moyenne de la ddp entre les différents fils et la masse.

Le courant de mode commun est égal au courant qui s'écoule à la masse. Ce courant se partage entre les différents fils de liaison, dans le même sens sur chacun des fils c'est le cas le plus fréquent de transmission des perturbations, car le fil de signal et le fil de retour sont proches et reçoivent la même perturbation

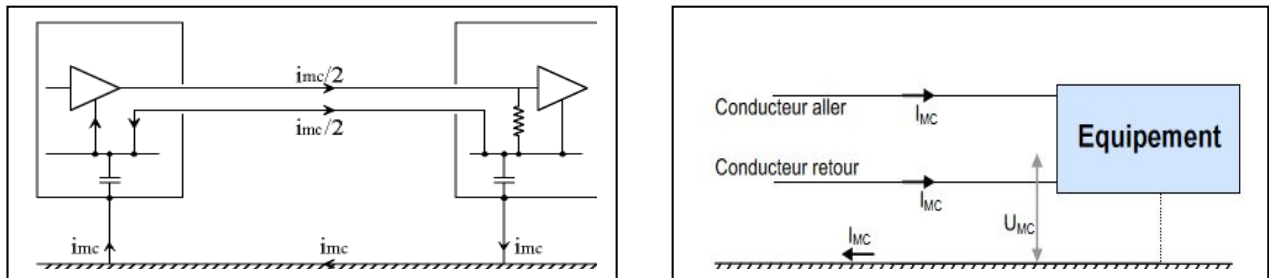
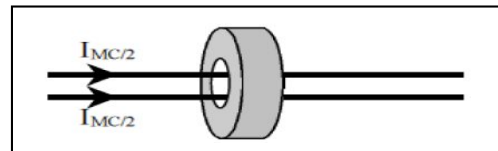


Figure 5 : Mode commun

Il peut être mesuré par une sonde de courant parcourue par les 2 fils dans le même sens.



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.

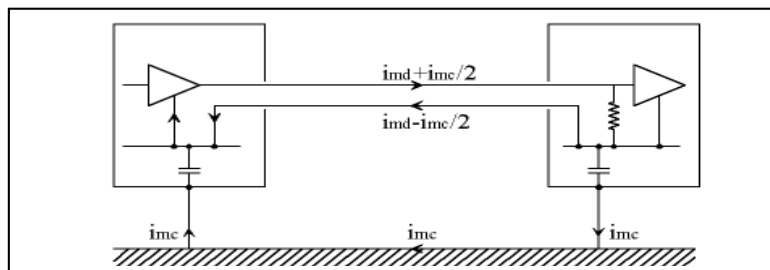


Figure 6: superposition du mode différentiel et du mode commun

2.3 Types de couplage

- **Couplage par Conduction (électrique)** qui se traduit par la circulation d'un courant perturbateur (liaison directe, à travers les câbles ou/et les composants reliant la source à la victime ou par impédance commune),
- **Couplage par Rayonnement (électromagnétique)** qui se transmet par le champ électrique E, ou magnétique B ou électromagnétique (E,B) dans la zone de champ proche ou lointain,
- **Couplage par Ionisation** qui se transmet à travers une décharge électrique. Ionisation d'un milieu diélectrique (souvent l'air) dû à la chaleur ou à l'humidité (foudre).

2.4. Mécanismes de transmission des perturbations conduites

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.

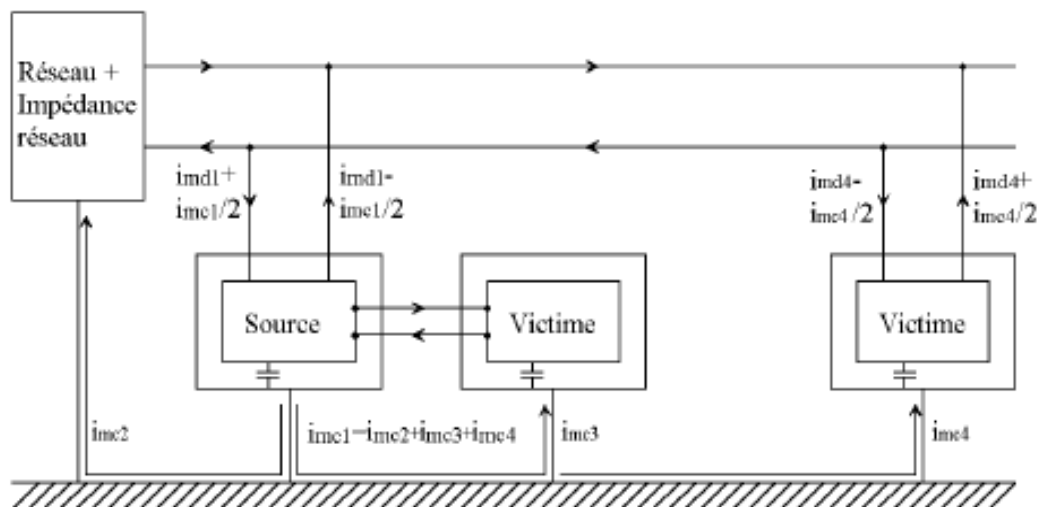


Figure7: mode de transmission des perturbations conduites

2.4.1 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).

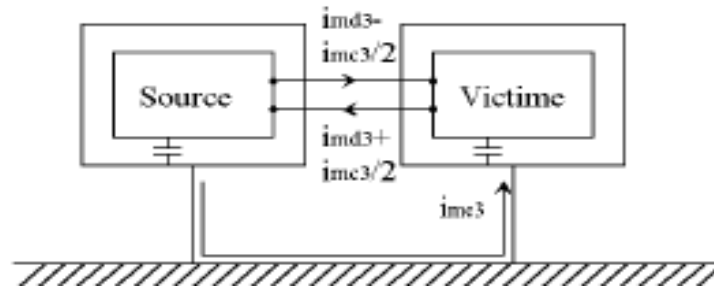


Figure 7+1 : couplage par liaison directe

Ces perturbations sont généralement générées par :

- **Variation rapide de tension** : elle est causée principalement par des défauts où la tension peut augmenter ou diminuer de quelques % dont la durée est de quelques ms.
- **Variation lente de tension** : causée principalement par la variation de la charge sur le réseau de distribution dont la durée peut atteindre plusieurs secondes.
- **Creux ou microcoupures de tension** : causées par des défauts sur les lignes d'alimentation, orage, vent (contact bref entre les lignes) pendant une durée comprise entre 1ms et 1s.
- **Surtension** : produite soit localement par une variation rapide du courant traversant un circuit bobiné ou par résonance du circuit LC, délestage du réseau, ...)

2.4.1.1 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 8).

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.

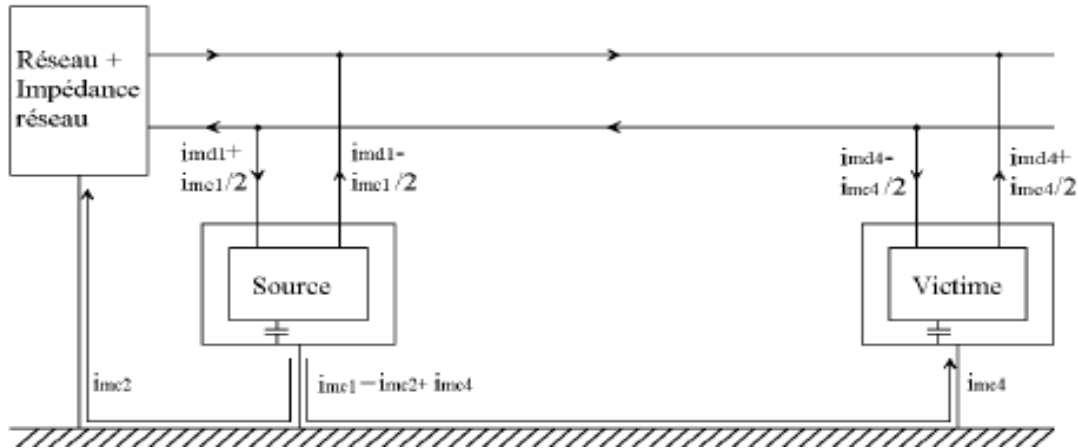


Figure 9: couplage par impédance commune

La perturbation est produite par la chute de tension ΔV dans l'impédance commune qui perturbe un ou les deux sous systèmes.

2.5 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.

2.5.1 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 10, Figure 11 et Figure 12).

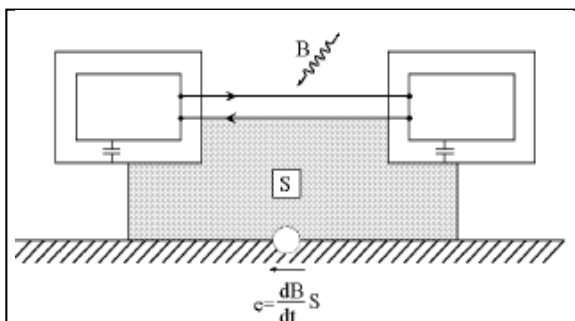


Figure 10 : couplage champ magnétique a câble en mode commun

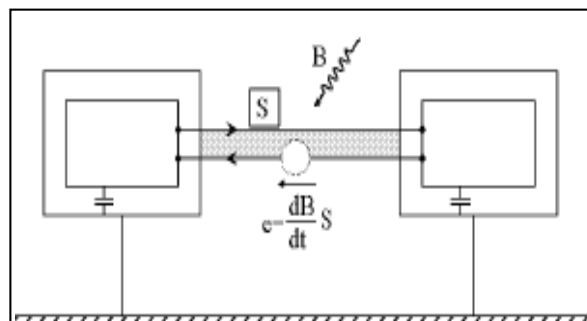
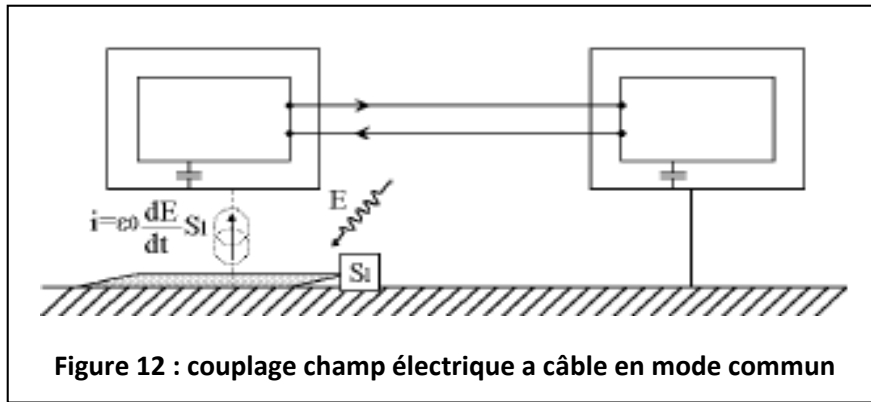
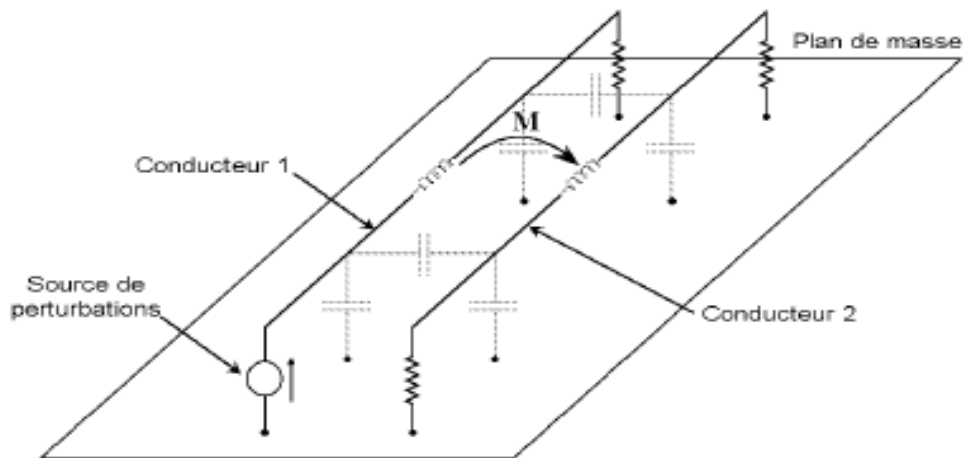


Figure 11 : couplage champ magnétique a câble en mode différentiel



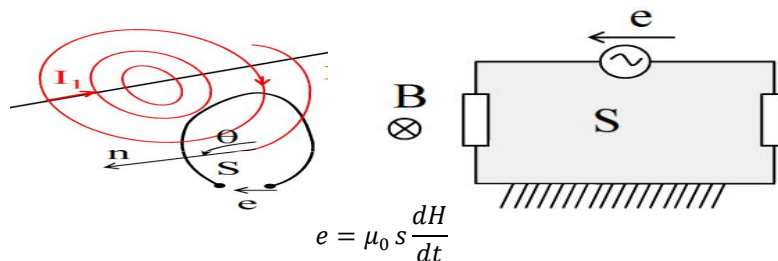
2.5.2 Le couplage en champ proche

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 13).



2.5.2.1 Couplage inductif

Une variation de courant dans un conducteur crée un champ magnétique qui rayonne autour de ce conducteur. Un circuit voisin peut alors voir apparaître une tension induite perturbatrice si la variation de courant est importante.



La tension e pourra apparaître sous forme différentielle ou sous forme de mode commun.

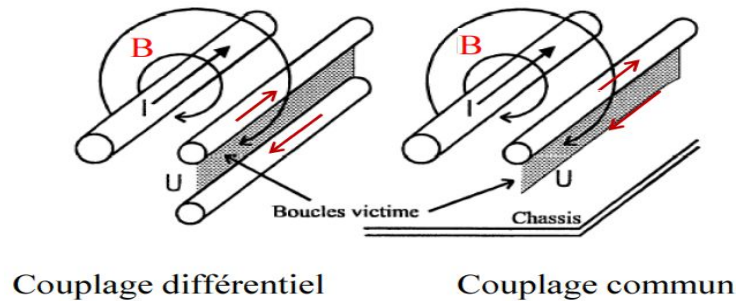


Figure 14 : couplage inductif en mode différentiel et en mode commun

2.5.2.2 Couplage capacitif

a-Effet d'une tension variable d'un conducteur sur un conducteur voisin

La tension entre un conducteur et son environnement génère un champ électrique autour de ce conducteur. Ce champ crée à son tour un courant dans les conducteurs proches, phénomène appelé couplage à diaphonie capacitive. Il existe une capacité entre ce circuit perturbateur et l'autre circuit victime. Par cette capacité, de l'énergie électrique perturbatrice atteint le circuit victime.

Courant induit sur le conducteur victime :

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

Avec : $V = \int Edl = Ed$

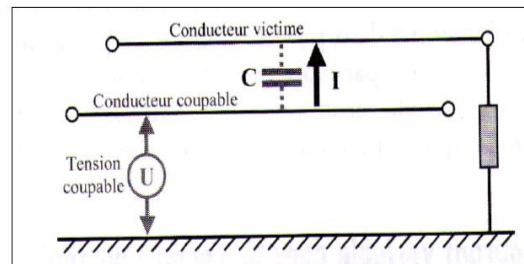


Figure 15 : couplage capacitif

2.6 Mesure des perturbations

- Décomposition en série de Fourier
- un signal périodique de forme quelconque peut être décomposé mathématiquement en une somme de signaux sinusoïdaux ayant différentes amplitudes et phases, dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence fondamentale
- principe de superposition (pour un système linéaire) : l'effet d'un signal périodique de forme quelconque est identique à la somme des effets des signaux sinusoïdaux de sa décomposition en série de Fourier

2.6.1 Dispositif de mesure de perturbations

On distingue deux catégories de dispositifs de mesure utilisés en CEM. La première concerne la mesure des perturbations conduites à haute fréquence, elle comprend le Réseau Stabilisé d'Impédance de Ligne (RSIL) et les capteurs de courant passif basés sur le principe du transformateur de courant. Dans la seconde catégorie, on trouve divers types d'antennes destinées aux mesures en champ proche ou lointain. Dans tous les cas, le signal issu du capteur est analysé dans le domaine temporel (oscilloscope) et plus généralement dans le domaine fréquentiel grâce à l'analyseur de spectre hétérodyne.