

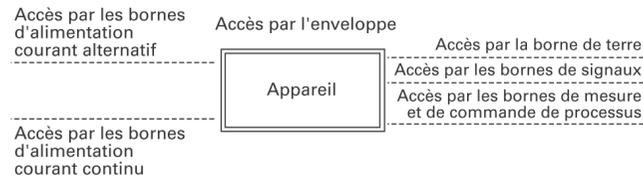
CEM : notions fondamentales

I. Introduction

A de rares exceptions près, **un système électrique et/ou électronique (système E/E) ne travaille pas de manière isolée.**

De l'énergie électromagnétique franchit intentionnellement ou non ses frontières, soit pour y pénétrer, soit pour s'en échapper. **Cette énergie peut causer des troubles de fonctionnement** du système considéré quand elle est entrante ou perturber celui de systèmes voisins lorsqu'elle est sortante. On parle alors d'**interférence électromagnétique (IEM ou EMI en anglais).**

Les **agressions électromagnétiques** peuvent avoir lieu aussi bien sur un appareil que sur un système contenant des composants électriques et/ou électroniques.



L'**énergie électromagnétique** qui est captée non intentionnellement par un système électrique et/ou électronique peut entraîner une **perturbation dans le fonctionnement** de celui-ci. Cette perturbation (ou interférence électromagnétique IEM) peut aller du **simple désagrément**, comme le crépitement dans un récepteur radio ou l'image rayée sur un écran de télévision, à la **perte de fonctionnalité momentanée ou permanente d'un système.**

Dans sa directive 89/336/EEC concernant la compatibilité électromagnétique, le Conseil européen définit une perturbation électromagnétique comme : « **tout phénomène électromagnétique susceptible de dégrader les performances d'un dispositif, unité d'équipement ou système. Une perturbation électromagnétique peut être un bruit électromagnétique, un signal non désiré, ou une modification du milieu de propagation lui-même** ».

Cette définition inclut donc **toute la gamme des fréquences électromagnétiques** et tous les phénomènes électroniques.

Quatre grandes catégories sont à distinguer :

- **phénomènes conduits à basse fréquence ;**
- **phénomènes rayonnés à basse fréquence ;**
- **phénomènes conduits à haute fréquence ;**
- **phénomènes rayonnés à haute fréquence.**

Le phénomène des perturbations a attiré l'attention depuis plusieurs décennies. Ces perturbations ne sont pas apparues avec l'ère de l'électronique et des courants faibles. Des chercheurs s'y sont intéressés dès **1930**, date des **débuts du développement des transmissions radiophoniques.**

La **nécessité** se fait alors sentir **d'assurer l'immunité des signaux de faible amplitude contre des champs électromagnétiques parasites.** Mais ces préoccupations ne concernent encore que les phénomènes rayonnés à haute fréquence.

Les **années 1960** marquent un palier. Plusieurs évolutions technologiques concourent simultanément à augmenter l'impact des perturbations et leur enjeu économique :

- on assiste tout d'abord à un rapide **développement des applications de l'électricité** dans tous les domaines ; le nombre d'appareils utilisant l'énergie électrique augmente rapidement et, par voie de conséquence, le nombre de sources de perturbations ;
- **l'électronique fait son entrée à grande échelle dans tous les secteurs de l'activité économique** ; l'utilisation des appareils de commande et de contrôle électroniques se répand. Plus généralement, les systèmes électroniques voient leurs champs d'application s'étendre à la plupart des domaines de l'industrie et du tertiaire ; alimentés par des **signaux de faible amplitude** et **placés dans l'environnement des machines alimentées en courant fort**, ils sont particulièrement sensibles aux phénomènes perturbateurs ;
- **l'information** enfin connaît une véritable explosion, ses fonctions se multiplient, depuis les activités de gestion et de traitement de texte jusqu'à la gestion des process.

Ces tendances se sont toutes accentuées depuis 1960 :

- **les équipements ont vu leur sensibilité électromagnétique augmentée** ; les **composants** électroniques, dont l'utilisation est devenue quasi générale, travaillent à des **niveaux de tension de plus en plus bas**. Ils peuvent être perturbés dès que la tension s'écarte de plus de 3 % de sa valeur nominale en régime établi ; intégrés aux matériels les plus divers, les composants électroniques sont largement décentralisés et interconnectés, augmentant ainsi les effets négatifs des perturbations ;
- **les causes de perturbations sont devenues plus nombreuses.**

Augmentation du nombre de sources de perturbations, augmentation du nombre de matériels sensibles et de leurs domaines fonctionnels, augmentation enfin de la vulnérabilité des matériels, tel est le nouveau paysage technologique qui sert de cadre au problème des perturbations.

S'ajoute à ces nouvelles données l'importance, devenue vitale aujourd'hui, des transferts d'information et de la qualité de leur acheminement (contrôles, transfert de données, informatique, régulation, sécurité).

Les interférences électromagnétiques ont provoqué par le passé de nombreux accidents. Parmi les plus spectaculaires, on peut citer la destruction du porte-avions Forrestal en 1967 lors de la guerre du Vietnam. Un radar de bord a éclairé l'un des chasseurs prêt à décoller, perturbant le système de mise à feu des roquettes accrochées sous l'avion, l'une d'elles a été mise à feu, percutant un deuxième avion qui, lors de son explosion, à embrasé tous les autres avions se trouvant sur le pont. Le feu s'est propagé aux soutes à munitions et le porte-avions, ou plutôt ce qui en restait a été remorqué jusqu'aux États-Unis pour refonte complète. On peut aussi citer la mise hors service du destroyer britannique HMS Sheffield par un missile Exocet, en 1982, durant le conflit entre la Grande-Bretagne et l'Argentine à propos des îles Falkland. À cause de phénomènes d'interférences électromagnétiques, le système de détection antimissile du navire et son système de communication par satellite avec la Grande-Bretagne ne pouvaient opérer en même temps ; c'est au cours d'une de ces communications que l'Argentine a lancé le missile Exocet qui mit le navire hors combat. On peut de même citer les accidents survenus aux hélicoptères Sikorsky de la série UH-60 Black Hawk, alors qu'ils volaient à

proximité d'émetteurs micro-ondes de forte puissance tels que les radars des navires de guerre. Un autre exemple est le « calage » des moteurs des premières voitures à allumage transistorisé au feu rouge lorsqu'un agent de la circulation, appelant son collègue pour réguler la circulation à l'aide de son talkie-walkie, créait ainsi un champ électromagnétique suffisant pour bloquer ledit allumage.

Plus généralement, des incidents de fonctionnement allant jusqu'à des détériorations de composants ou de systèmes http://csweb.cs.wfu.edu/~burg/CCLI/Templates/curriculum_index.php/, des pertes d'information (perte ou altération de données en informatique, erreurs de calcul) constituent des dysfonctionnements graves, aux conséquences parfois préjudiciables à la bonne marche des entreprises.

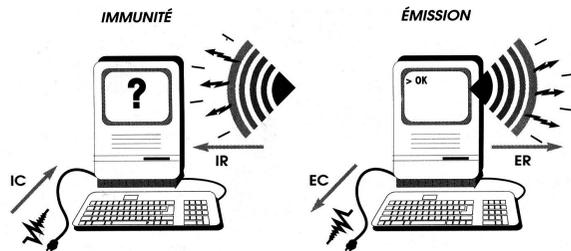
Ce contexte d'urgence a amené depuis quelques années l'ensemble des partenaires compétents à conduire un travail de clarification des concepts, à développer des méthodologies d'analyse et de mesure, et à mettre en place des normes

II. Objet de la CEM

La compatibilité électromagnétique est définie comme étant 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.

Elle revêt donc deux aspects :

- tout appareil fonctionne de façon satisfaisante dans son environnement électromagnétique. Cela signifie que chaque appareil résiste » aux agressions que constituent les perturbations provenant du milieu, et donc qu'il est « immunisé » contre celles-ci : son niveau d'immunité est suffisamment élevé ;
- aucun appareil ne doit produire lui-même de perturbations électromagnétiques intolérables pour tout ce qui se trouve dans son environnement. On comprend que son niveau d'émission de perturbations pour ledit environnement doit être suffisamment bas pour que tout ce qui figure dans cet environnement lui soit insensible.

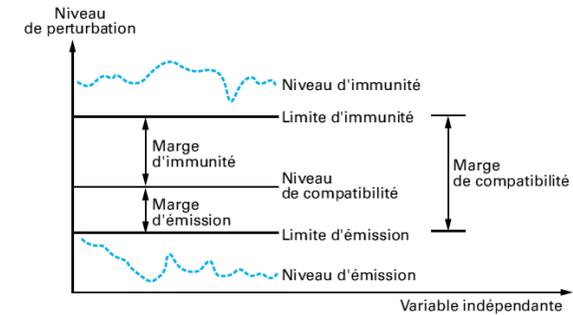


La définition de la CEM met donc en lumière les trois notions fondamentales ci-après :

- le niveau d'émission, caractérisant quantitativement la production de perturbations par l'appareil ;
- le niveau d'immunité, caractérisant la résistance de l'appareil aux agressions que constituent les perturbations en provenance de son environnement ;
- l'environnement électromagnétique.

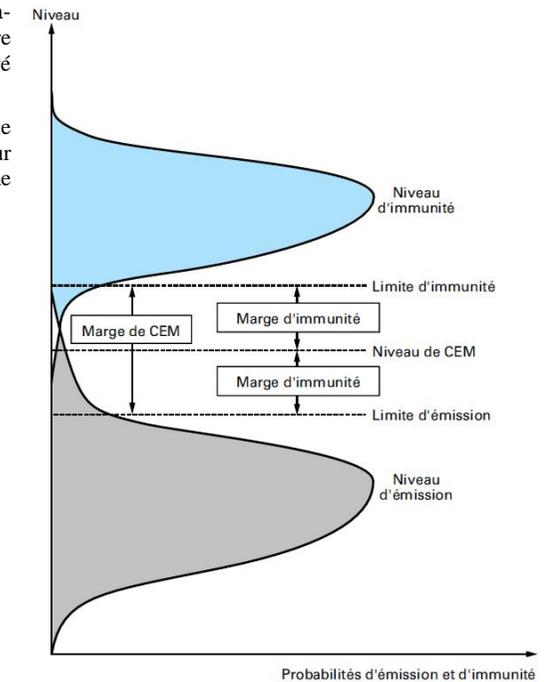
Niveau de perturbation et niveau d'immunité

On peut illustrer schématiquement la relation fondamentale qui existe entre niveau de perturbation et niveau d'immunité. Dans le même esprit, on définit conventionnellement un niveau de compatibilité comme la valeur maximale spécifiée du niveau de perturbation susceptible d'être appliqué à un appareil, équipement ou système opérant dans des conditions données.

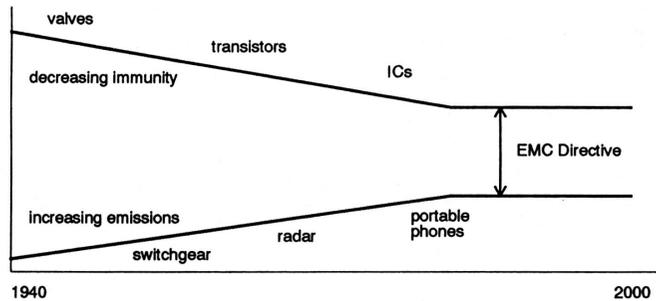


Le niveau de perturbation est sujet à distribution statistique. Dans la pratique, il est très difficile, voire impossible, de déterminer le niveau réel le plus élevé de perturbation, qui apparaît très rarement.

De même, il ne serait généralement pas économique de définir le niveau de compatibilité pour cette valeur la plus élevée à laquelle la plupart des dispositifs ne seraient pas exposés la plupart du temps.

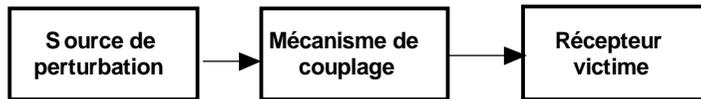


Le maintien d'un seuil artificiellement défini entre immunité et émission est le but de l'application des normes CEM.



III. Schématisation d'un problème d'IEM

Quelle que soit la complexité du système électrique et/ou électronique considéré, toute situation d'interférence électromagnétique (IEM) peut être schématisée de la façon suivante :



Elle fait donc intervenir trois éléments différents :

- une **source** d'émission de perturbations, qui se caractérise par sa **puissance**, sa **durée**, son **spectre de fréquences**, la **nature des champs** qu'elle génère ;
- un **mécanisme ou canal de couplage** par lequel la source agit sur le fonctionnement du récepteur ;
- un équipement **récepteur**, victime de la perturbation.

Il faut donc commencer par identifier ces trois éléments, mais c'est là que se situe souvent le cœur du problème.

Ceci étant fait, la **meilleure façon de le résoudre** consiste à **éliminer ou à diminuer la source de de perturbations**. Cela n'est pas toujours possible, car la source est généralement soit inaccessible, soit éloignée.

Il n'y a que dans une IEM intra-système que le concepteur d'un produit a la possibilité d'agir sur les trois composants du problème. Le choix d'agir à tel ou tel niveau dépend de la commodité de mise en œuvre de la solution envisagée et/ou de son prix de revient.

Le **mécanisme de couplage** fait toujours intervenir un **champ électromagnétique**, mais suivant la **nature et le mode de propagation de ce champ**, ses **caractéristiques et la méthode d'étude** seront différentes.

Un **champ électrique E** est généré entre deux conducteurs portés à des potentiels différents. Il se mesure en **Volts par mètre (V/m)** et est **en gros proportionnel à la différence de potentiel divisé par la distance entre les conducteurs**.

Un **champ magnétique H** est généré autour d'un conducteur parcouru par un courant, il se mesure en **Ampère par mètre (A/m)** et est **en gros proportionnel à l'intensité du courant divisé par la distance entre le point d'observation et le conducteur**.

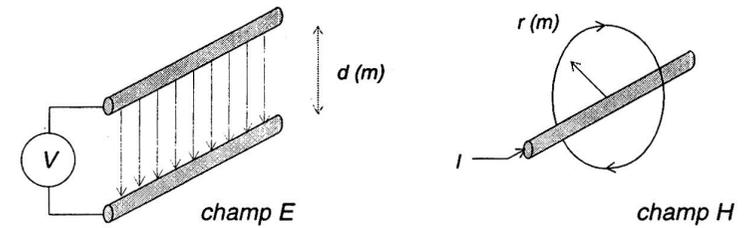


Fig. 3 : champs électrique et magnétique

Quand des tensions variables au cours du temps génèrent des courants variables dans un réseau de conducteurs (ce qui est le cas dans pratiquement n'importe quel circuit électronique), une **onde électromagnétique** est créée qui se propage à partir des sources sous la forme d'une **combinaison d'un champ électrique E et d'un champ magnétique H**.

Cependant, à proximité d'une source de champ électromagnétique, le **champ électromagnétique rayonné** dépend essentiellement de la nature de la source de radiations :

- pour une source de type "**haute impédance**", c'est-à-dire qui est le siège de **différences de potentiel** (mais dans laquelle les courants restent faibles), le **champ rayonné à proximité de la source est essentiellement un champ électrique** ;
- pour une source de type "**basse impédance**" (comme une **petite boucle de courant en court-circuit**), le **champ rayonné à proximité de la source est essentiellement un champ magnétique**.

Cette région de l'espace est appelée **zone de rayonnement en champ proche** ou **zone d'induction**. Dans cette région, les **champs E et H** peuvent être considérés séparément et les phénomènes de propagation peuvent être négligés ; le **couplage** peut ainsi être modélisé à l'aide de **circuits électriques à constantes localisées** (capacité pour le couplage par champ électrique et mutuelle inductance pour le couplage par champ magnétique).

Suivant la composante (électrique ou magnétique) du champ électromagnétique qui entraîne les effets les plus grands, (source de champ électrique ou source de champ magnétique, c'est à dire tension ou courant), on parle de **couplage par induction électrique (ou couplage capacitif)** ou de **couplage par induction magnétique (ou couplage inductif)**.

Le terme de **diaphonie (crosstalk)** dans la terminologie anglo-saxonne) est couramment utilisé pour désigner les couplages dans cette zone. On parle également de **couplage câble à câble**.

Au-delà de la zone de rayonnement en champ proche, s'étend la **zone de rayonnement dite en champ lointain** ; dans cette zone, les **caractéristiques du champ électromagnétique rayonné ne dépendent plus que du milieu dans lequel le champ se propage** :

- l'**impédance d'onde** $Z_c = \sqrt{\frac{E}{H}}$ est égale à l'**impédance caractéristique du milieu** dans lequel s'effectue la propagation (elle est égale à 120π , soit 377Ω dans le vide);

- les composantes \vec{E} et \vec{H} du champ électromagnétique sont en phase dans le temps, perpendiculaires entre elles dans l'espace et également perpendiculaires à la direction de propagation, le trièdre $(\vec{E}, \vec{H}, \vec{c})$ étant direct ; les amplitudes des champs varient en fonction de la distance à la source en $1/r$; **les deux champs sont indissociables** et véhiculent la même quantité d'énergie ; on dit que l'on a une **structure d'onde TEM** (transverse électromagnétique), onde qui très loin de la source **peut être localement assimilée à une onde plane**.

Dans cette zone, on dit que l'on a affaire à un **couplage par champ électromagnétique ou par onde plane** ; **il faut utiliser les équations de Maxwell pour calculer l'amplitude des perturbations**.

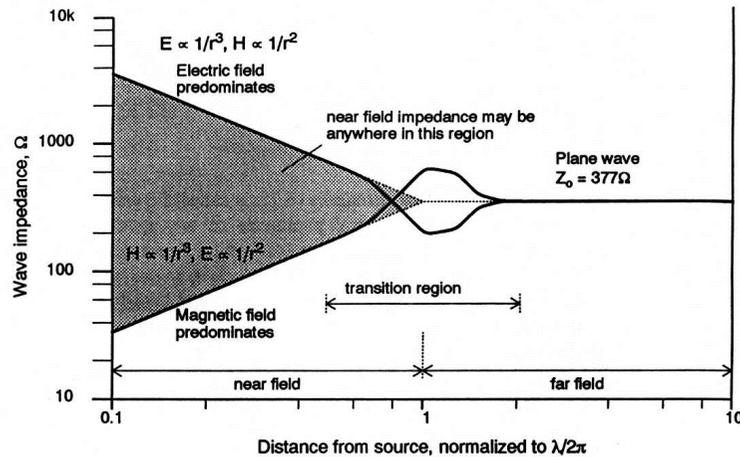


Fig. 4 : impédance d'onde en fonction de la distance à la source

Les trois types d'interférences les moins compliquées à étudier sont :

- couplage capacitif (par le champ électrique E) ;
- couplage inductif (par le champ magnétique H) ;
- couplage par conduction.

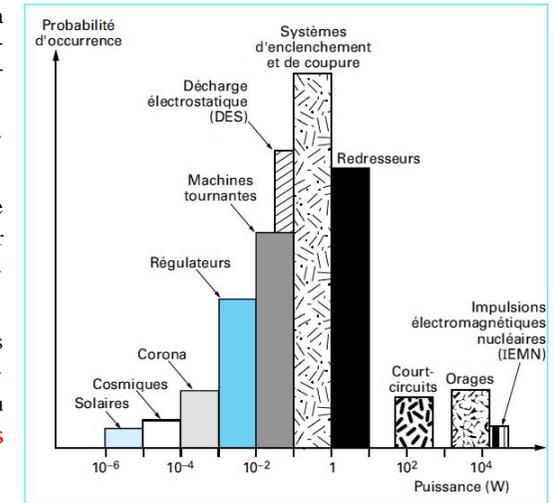
Le couplage par conduction correspond lui au cas où le champ électromagnétique correspondant à la perturbation se propage en mode guidé (c'est à dire le long des conducteurs du circuit électrique considéré). Il s'étudie donc à l'aide de la théorie des circuits électriques (qui est, rappelons le, une approximation de la théorie de l'électromagnétisme, ne s'appliquant que lorsque certaines conditions sont vérifiées).

IV. Sources de perturbations électromagnétiques

Outre le bruit de fond, phénomène aléatoire dû à la nature corpusculaire de l'électricité, on peut distinguer deux grandes catégories de sources de perturbations EM :

- les sources de perturbations d'origine naturelle
- les sources de perturbations provenant de l'activité humaine (qu'on peut aussi qualifier de sources industrielles ou technologiques).

Le spectre de ces fréquences électromagnétiques s'étale entre quelques KHz et plusieurs centaines de GHz alors que la puissance émise au niveau de la source est comprise entre quelques mW et plusieurs Giga Watts !



Malgré la décroissance du champ électrique en raison inverse de la distance, un champ de plusieurs centaines de V/m n'a rien d'exceptionnel.

IV.1. Sources naturelles

- phénomènes atmosphériques, dont la foudre au sens habituel du terme, qui correspondent à des décharges électrostatiques (D.E.S) entre nuages ou entre nuage et terre ;
- bruit galactique, bruit solaire ;
- effet des rayons ionisants ;
- bruit terrestre (bruit thermique) ;
- impulsions électromagnétiques dues aux désintégrations nucléaires.

IV.2. Les sources électrostatiques

Elles se constituent en particulier lors de la friction de matériaux en mouvement ou du corps humain sur des matériaux textiles et qui sont susceptibles de donner lieu à une décharge électrostatique (DES). Elles peuvent être naturelles (vent de sable sur un métal). Elles mettent en jeu des fréquences très élevées.

IV.3. Les sources technologiques

Ce sont tous les appareils dont l'activité électrique est de nature à se propager en partie à l'environnement.

Parmi les sources qui proviennent de l'activité humaine, on peut distinguer trois catégories :

- les sources de rayonnement volontairement créées par l'homme : émetteurs radioélectriques (radio, TV ou radar), fours micro-ondes, fours à induction, etc ...
- les sources de perturbations involontaires, qui proviennent de l'utilisation de l'électricité : lignes de transport d'énergie, éclairage fluorescent, soudure à l'arc, moteurs électriques, système d'allumage de moteur automobile, horloges des systèmes informatiques et, de manière générale, les ouvertures et fermetures de contacts électromécaniques ou statiques. Ainsi que nous allons le voir, celles-

ci génèrent des parasites d'autant plus importants que les vitesses de variation des courants (di/dt) ou des tensions (dv/dt) qu'elles entraînent sont élevées ;

- les **décharges électrostatiques** qui impliquent le corps humain ou des matériaux que l'homme a mis en mouvement.

Comme tout signal déterministe, une source de bruit EM peut être caractérisée soit dans le domaine temporel par sa forme d'onde, soit dans le domaine fréquentiel par son spectre de fréquences. On distingue alors :

- les **perturbations basse et moyenne fréquence** (dont la fréquence maximum du spectre est inférieure à 5 MHz) ; ces perturbations se propagent essentiellement sous **forme conduite par les câbles** ; elles sont souvent longues (quelques dizaines de ms), voire permanentes dans le cas d'harmoniques ; l'énergie conduite peut être importante, se traduisant en plus du dysfonctionnement par un **risque de destruction** du matériel ;
- les **perturbations haute fréquence** ($f > 30$ MHz) ; ces perturbations se propagent essentiellement dans l'air sous **forme rayonnée** ; elles sont caractérisées par un **front de montée très court** (<10ns) ; elles peuvent être permanentes dans le cas du redressement ou de signaux d'horloge ; l'énergie conduite est faible et se traduit par le **risque de dysfonctionnement** du matériel environnant.

IV.4. Ordre de grandeur du champ électromagnétique généré par les sources de perturbations

Les valeurs indiquées ci-dessous concernent indifféremment les perturbations de type BF, HF, impulsives et oscillatoires.

Emetteur	Fréquence (f)	Longueur d'onde (λ)	Champ
Secteur (1 kA, 1 ph.)	50 Hz	6000 km	20 A/m à 10 m
Foudre	30 kHz à 3 MHz	10 km	10 A/m à 500 m
Four de séchage	27 MHz	11 m	1,5 V/m à 10 m
Manœuvre inter 20 kV	75 MHz	4 m	5 kV/m à 1 m
FM	100 MHz	3 m	1 V/m à 500 m
Radio G.O.	200 kHz	1500 m	30 V/m à 500 m
Talkie-Walkie	450 MHz	66 cm	10 V/m à 1 m
Télévision UHF	600 MHz	50 cm	0,5 V/m à 500 m
Téléphone mobile	900 MHz	33 cm	20 V/m à 1 m
Radar	1 GHz	30 cm	40 V/m à 500 m
Four micro-ondes	2,45 GHz	12 cm	1,5 V/m à 1 m

Perturbations induites sur les câbles et les lignes d'alimentation :

Permanente : jusqu'à +/- 10 V

Impulsionnelle : 100 V à 2000 V

Courants de mode commun : 100mA à 100A (fils et câbles d'alimentation et de signaux)

V. Modes de couplage des perturbations électromagnétiques

Une **perturbation électromagnétique** est une **onde électromagnétique** qui peut, comme toute onde électromagnétique, se propager **soit en espace libre, soit en mode guidé**. Le mécanisme du couplage de cette perturbation avec un système victime (c'est à dire le phénomène d'interférence électromagnétique) dépend de son mode de propagation.

V.1. Perturbations conduites

Dans le cas où la perturbation se propage en **mode guidé** (c'est à dire **le long de conducteurs**), on parlera de **perturbations conduites** et de **couplage par conduction**. Les conducteurs peuvent être des **fils**, des **câbles de transmission de données**, des **pistes de circuit imprimés**, des **câbles d'alimentation en énergie** ou des connexions entre des sous-ensembles ou encore les **liaisons de masse**.

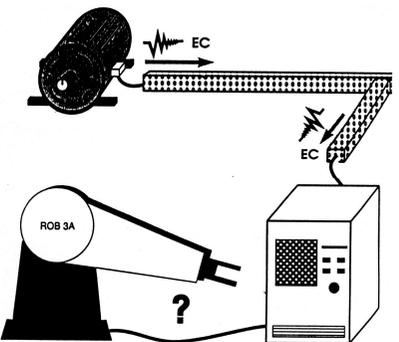
On peut alors caractériser ces perturbations par les **courants** et les **tensions** qui leur sont associés et utiliser les **lois classiques de l'analyse des circuits** pour étudier leurs effets. Ce couplage étant donc assez simple du point de vue phénoménologique, il sera relativement facile à éliminer lorsqu'il sera identifié ou si des précautions sont prises dès la conception du système.

On désigne souvent les perturbations conduites de la façon suivante :

E.C. pour **Émission Conduite**;

I.C. pour **Immunité Conduite**.

Dans l'exemple ci-contre, les harmoniques générés par le démarrage d'un moteur, sont conduites par les câbles d'alimentation jusqu'au système de commande du robot qui se trouve perturbé.



V.2. Perturbations rayonnées

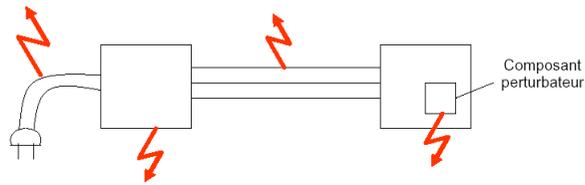
Dans le cas où la perturbation se propage en **espace libre** (c'est à dire dans le vide, en l'absence de support matériel), on parlera de **perturbation rayonnée** et de **couplage par rayonnement ou par champ**.

Elle se propage dans l'espace environnant sous la forme d'un **champ électromagnétique**, qu'il s'agisse d'**émissions volontaires** telles que celles des émetteurs de radiocommunications (radiodiffusion, télévision, radars, CB, radiotéléphone...) ou d'**émissions parasites** telles que celles créées par l'allumage des moteurs à explosion, alimentations à découpage, oscillateurs haute fréquence, micro-ordinateurs (qui contiennent les deux derniers dispositifs cités), jouets électroniques, etc.

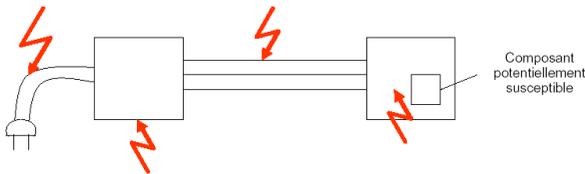
Les fils, câbles ou les pistes de circuits imprimés se comportent alors comme des **antennes réceptrices ou émettrices**.

On désigne souvent les perturbations rayonnées de la façon suivante :

- E.R. pour **Émission Rayonnée** ;



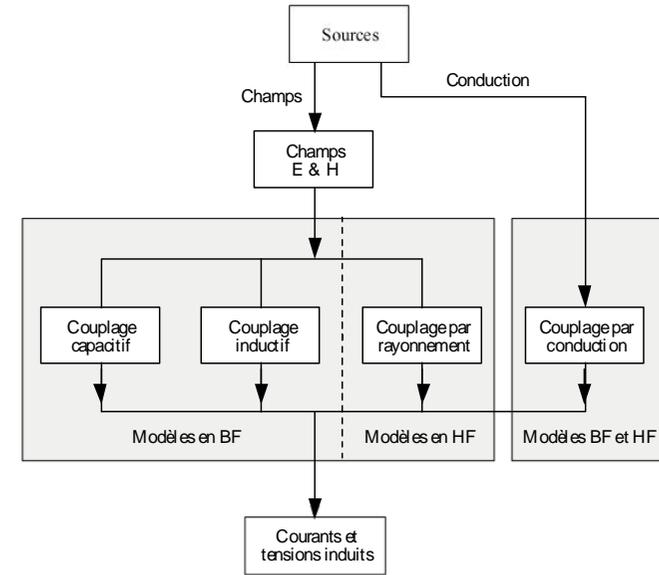
- I.R. pour **Immunité Rayonnée** ;



On caractérise ces perturbations par le champ électromagnétique (E, H) qui leur est associé. Ce champ électromagnétique pourra, en se propageant, atteindre une structure voisine et y induire à son tour des courants et des tensions.

Le couplage par rayonnement est l'un des points cruciaux de la compatibilité électromagnétique. Le premier réflexe pour s'en prémunir est d'éviter que le champ rayonné ne pénètre dans les câbles qui, s'ils sont d'une grande longueur, constituent un récepteur (antenne) privilégié; les perturbations se propageant ensuite par conduction le long des câbles peuvent pénétrer à l'intérieur des systèmes, tandis que, simultanément, le câble peut lui-même se comporter comme une source de perturbations rayonnées. L'utilisation de câbles blindés est donc très répandue.

On trouvera ci-dessous un résumé de ces modes de couplage, ainsi que des types de modèles à utiliser pour leur étude.



Récapitulatif des modes de couplage

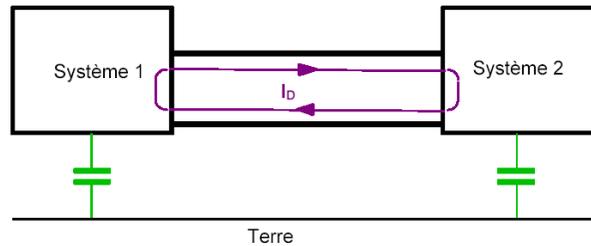
	Hypothèses	Remarques
Régime quasistatique	Dimensions du système $\ll \lambda_{min}$	- éléments localisés - modèle de Kirchhoff - absence de toute espace géométrique (dimension, distance) - résolution analytique souvent possible
Théorie des lignes de transmission	Dimensions transversales $\ll \lambda_{min}$	- propagation longitudinale - éléments distribués - résolution analytique possible dans certains cas seulement
Équations de Maxwell		- résolution numérique souvent nécessaire - nécessite souvent des temps de calcul et de place mémoire importants

Méthodes d'analyse

VI. Différents types de signaux d'interférence électromagnétique : mode différentiel et mode commun

VI.1. Signaux de mode différentiel et signaux de mode commun

VI.1.a. Mode différentiel



C'est la façon 'normale' de transmettre les signaux. On l'appelle aussi mode symétrique.

Considérons deux équipements interconnectés par un câble. Le câble véhicule des courants correspondant au signal transmis entre l'émetteur et le récepteur; ces courants sont de mode différentiel, c'est à dire qu'ils sont égaux et circulent en sens inverse l'un de l'autre dans deux conducteurs voisins.

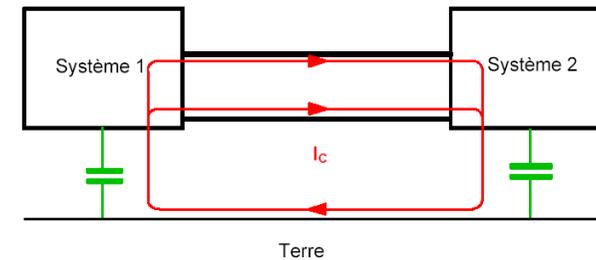
Un champ électromagnétique extérieur peut se coupler au système par l'intermédiaire de la boucle constituée par les conducteurs aller et retour et induire une perturbation de mode différentiel entre les deux fils. La tension induite correspondante va se superposer entièrement au signal utile, lui aussi de mode différentiel, c'est à dire qu'elle va être amplifiée de la même façon par le récepteur. On parle alors de couplage en mode différentiel.

Cependant, si les conducteurs aller et retour sont proches l'un de l'autre, l'aire de la boucle est faible et les perturbations de mode différentiel ne sont pas en général le problème principal. On peut s'en protéger en réduisant la surface de la boucle formée par les deux conducteurs véhiculant le signal utile et en torsadant éventuellement les conducteurs.

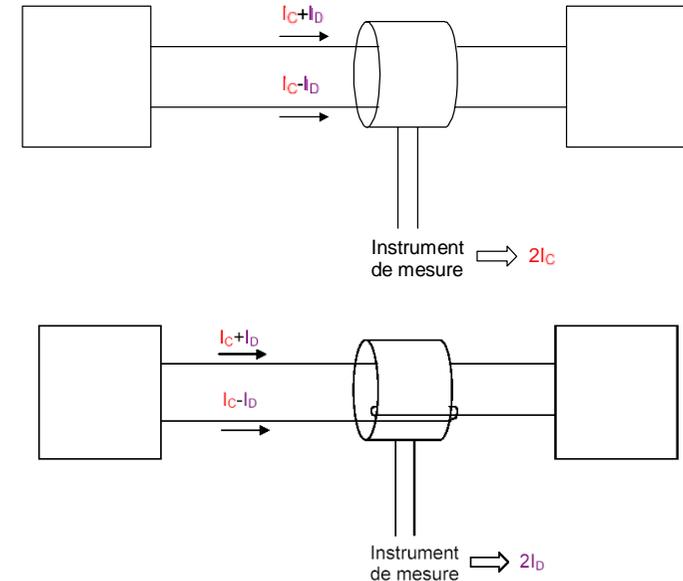
Réciproquement, le courant de mode différentiel correspondant au signal utile crée son propre champ électromagnétique qui va se propager dans l'espace libre ; néanmoins, compte tenu de la faible surface de la boucle rayonnante, le champ rayonné sera en général de faible intensité.

Le plan de masse de référence (qui peut être extérieur à l'équipement ou constitué par la structure qui le supporte) ne joue aucun rôle dans le couplage.

VI.1.b. Mode commun



Le câble véhicule aussi des courants en mode commun, c'est à dire circulant dans le même sens sur chaque fil. Ces courants n'ont rien à voir avec les courants des signaux, ne sont d'aucune utilité quant à la transmission du signal et n'ont que des effets négatifs. Ils peuvent être induits par un champ électromagnétique extérieur se couplant à la boucle formée par le câble, le plan de masse et les impédances diverses reliant les équipements à la masse. Ils peuvent aussi être créés par des tensions de bruit entre les masses de équipements connectés ; ils peuvent alors être responsables d'émissions rayonnées. On peut mesurer le courant de mode commun en encerclant l'ensemble des deux conducteurs avec une pince ampèremétrique. On parle de couplage en mode commun.

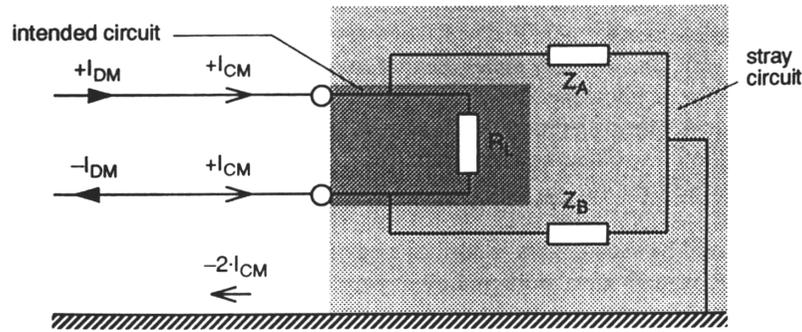


Notons que les capacités et les inductances réparties inévitablement associées aux connexions et au coffret de chaque équipement constituent une part intégrante du circuit de couplage en mode commun et jouent un grand rôle dans la détermination de l'amplitude et du spectre des courants de

mode commun. Ces impédances réparties sont **créées de façon plutôt aléatoires par le câblage** et sont **plus difficiles à prédire et à contrôler** que celles, comme l'espacement des fils et le filtrage, qui déterminent le couplage de mode différentiel.

VI.2. Conversion entre mode commun et mode différentiel

La conversion entre des signaux de mode différentiel en signaux de mode commun peut se produire lorsque **les deux fils "signal" présente des impédances différentes par rapport à leur environnement**, représenté par la masse externe. Ces impédances sont principalement déterminés en hautes fréquences par les capacités et les inductances réparties liées au câblage et ne peuvent être contrôlés par le concepteur du circuit que si celui-ci est aussi responsable de la conception du plan de câblage.



Dans le schéma ci-dessus, le courant de mode différentiel I_{DM} crée la tension signal désirée aux bornes de la charge R_L . **Le courant de mode commun I_{CM} ne circule pas directement à travers R_L mais à travers les impédances Z_A et Z_B et repart par le plan de masse.** Z_A et Z_B ne sont pas des composants du circuit mais des impédances réparties, typiquement capacitives, et sont déterminées par des facteurs comme la surface des pistes de circuit imprimé et des composants et à leur proximité au châssis métallique ou à d'autres parties de l'équipement. **Si ces impédances étaient égales, aucune tension ne serait créée aux bornes de R_L par le courant de mode commun I_{CM} .** En pratique, c'est rarement le cas et il en résulte la création aux bornes de R_L de la tension de mode différentiel :

$$V_{load(CM)} = I_{CM} \cdot (Z_A - Z_B)$$

Il y a donc **conversion (partielle !) d'une perturbation de mode commun en perturbation de mode différentiel.**

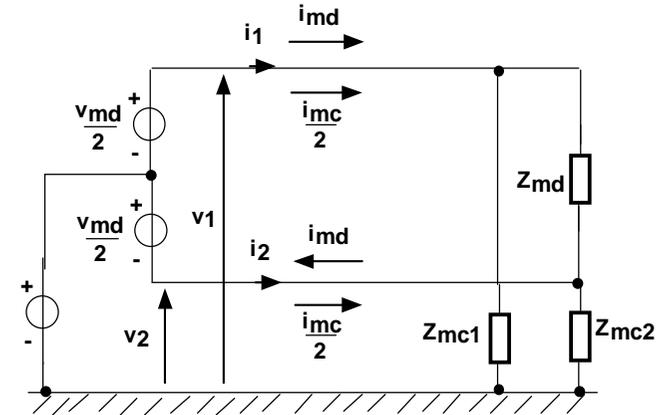
Pour cette raison, les **circuits qui véhiculent des signaux haute fréquence** (comme les signaux vidéo ou des signaux logiques rapides) ou qui sont susceptibles d'être soumis à des perturbations H.F **nécessitent des liaisons équilibrées** (balanced) utilisant des récepteurs différentiels. On peut aussi **filtrer les courants de mode commun.**

Le mode commun est le problème récurrent de la CEM.

On peut définir les tensions et courants de mode commun et de mode différentiel en posant les paires d'équations suivantes :

$$\begin{aligned} v_1 &= v_{mc} + \frac{v_{md}}{2} & i_1 &= \frac{i_{mc}}{2} + i_{md} & v_{mc} &= \frac{v_1 + v_2}{2} & i_{mc} &= i_1 + i_2 \\ v_2 &= v_{mc} - \frac{v_{md}}{2} & i_2 &= \frac{i_{mc}}{2} - i_{md} & v_{md} &= v_1 - v_2 & i_{md} &= \frac{i_1 - i_2}{2} \end{aligned}$$

La figure ci-dessous illustre cette décomposition mathématique, figure dans laquelle Z_{md} représente l'impédance d'entrée de mode différentiel et Z_{mc1} et Z_{mc2} les impédances d'entrée de mode commun :



VII. Conversion temps-fréquence

D'une manière générale, les perturbations rencontrées en CEM sont constituées de **signaux répétitifs et non sinusoïdaux** ; la connaissance de leur spectre en fréquence est essentielle car c'est celle qui est utilisée pour :

- caractériser les performances des filtres et des blindages ;
- étudier le rayonnement des câbles et des électroniques ;
- étudier les mécanismes de couplage ;
- prévoir le fonctionnement des lignes de transmission

D'autre part, en CEM, bon nombre de **calculs** sont **basés sur des estimations**, tandis que les **mesures** sont **souvent imprécises**. Il est donc plus judicieux de s'intéresser à l'**enveloppe du spectre** que de déterminer avec précision les amplitudes et les fréquences des raies : les **calculs** sont **grandement simplifiés** et on obtient un **majorant** de ces amplitudes, ce qui assure une **marge de sécurité**.

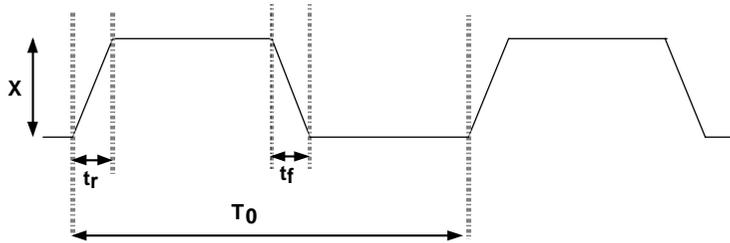
VII.1. Spectre d'un signal trapézoïdal périodique ; notion de fréquence équivalente

Le signal électrique de forme trapézoïdale est très largement rencontré en CEM. Avec une fréquence, un rapport cyclique, ou encore des temps de commutation différents, on le retrouve dans de nombreuses applications :

- Alimentations à découpage
- Variateurs de vitesse
- Bus numériques

• Horloges

Considérons le signal périodique $x(t)$ ci-dessous :



avec :

- X : amplitude crête à crête du signal;
- T_0 : période du signal;
- t_r : temps de montée;
- t_f : temps de descente.

Nous noterons d le rapport cyclique et nous supposons que les temps de montée et de descente sont égaux. Le signal $x(t)$ admet une **décomposition en série de Fourier** et on montre que l'amplitude de l'harmonique n est donnée par :

$$X_n = \left| 2Xd \frac{\sin(n\pi d)}{n\pi d} \frac{\sin\left(\frac{n\pi t_r}{T_0}\right)}{\frac{n\pi t_r}{T_0}} \right|$$

Si, de plus, le rapport cyclique d est égal à $1/2$, on a :

$$X_n = X \cdot \left| \frac{\sin\left(\frac{n\pi}{2}\right)}{\frac{n\pi}{2}} \frac{\sin\left(\frac{n\pi t_r}{T_0}\right)}{\frac{n\pi t_r}{T_0}} \right|$$

- si n est pair, alors $\sin(n\pi/2) = 0$ et $X_n = 0$: il n'y a pas d'harmoniques pairs;

- si n est impair : $X_n = \frac{2X}{n\pi} \left| \frac{\sin(n\pi t_r/T_0)}{n\pi t_r/T_0} \right|$

Remarque : cas du signal rectangulaire idéal ($t_r = 0$)

Si $t_r / T_0 \rightarrow 0$, alors $X_n \rightarrow 2X / n\pi$: on retrouve l'amplitude des harmoniques d'un signal rectangulaire périodique idéal.

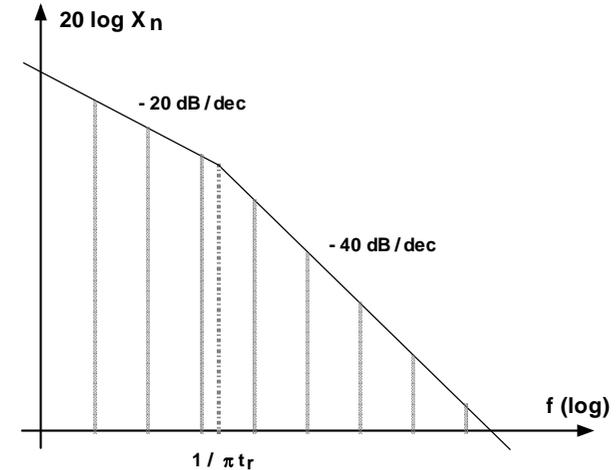
Enveloppe du spectre : $20 \log X_n = f$ [log (fréq.)]

- lorsque n est faible, on a : $X_n \approx 2X / n\pi$: l'enveloppe du spectre admet une **asymptote de pente -20 dB / dec.**;

- lorsque n est grand, on a : $X_n \leq \frac{2X}{n\pi} \frac{1}{n\pi t_r/T_0}$ (il y a égalité lorsque $\sin(n\pi t_r/T_0) = 1$) : l'enveloppe du spectre admet donc une **asymptote de pente -40 dB / dec.**;

- les deux asymptotes se coupent lorsque : $\frac{2X}{n\pi} = \frac{2X}{n\pi} \frac{1}{n\pi t_r/T_0} \Leftrightarrow n\pi t_r/T_0 = 1$; posons $f = n/T_0$; on a alors : $\pi t_r f = 1$ d'où $f = 1 / \pi t_r$.

La représentation asymptotique correspondante de l'enveloppe est donnée ci-après.



On peut considérer que l'énergie contenue dans les harmoniques de $x(t)$ de fréquences supérieures à la fréquence de cassure $1 / \pi t_r$ est négligeable. Cette fréquence est appelée **fréquence équivalente** (ou bande passante) d'un signal ou d'un système ou d'une famille logique.

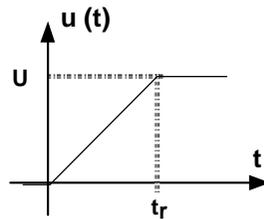
On trouvera ci-après les fréquences équivalentes des principales familles de circuits logiques. Cette fréquence est par exemple de 35 MHz pour la logique TTL-LS et de 100 MHz pour la logique HCMOS.

Famille de logique	Excursion en tension (V)	Temps de mont./desc. (ns)	Fréquence équivalente (MHz)	Marge de bruit bas/haut (V)
CMOS 5V	5	70 / 70	5	1,2 / 1,2
CMOS 12V	12	25 / 35	12	4 / 4
TTL-LS	3	10 / 4	50	0,4 / 0,7
TTL-ALS	3	4	80	
HCMOS	5	3,5 / 3,5	100	0,9 / 1,4
TTL FAST	3	3 / 2,5	125	0,3 / 0,5
TTL-AS	3	2	160	
ECL 10K	0,8	2 / 2	180	0,1 / 0,15
ECL 100 K	0,8	1 / 1	320	

VII.2. Cas d'un signal non périodique

Soit la tension $u(t)$ non périodique ci-contre. Lorsque cette tension est appliquée aux bornes d'une capacité C , celle-ci est parcourue, entre l'instant 0 et l'instant t_r par un courant $i(t) = C U / t_r$; la tension sinusoïdale d'amplitude crête $U / 2$ et de fréquence $f_e = 1 / \pi t_r$ produirait dans la capacité C un courant de valeur crête égale à celui produit par u entre 0 et t_r .

On parlera donc également, pour un signal non périodique impulsionnel, de fréquence et de sinusoïde équivalente, que l'on définira comme pour un signal périodique.



Exemple 1

Donner la fréquence équivalente d'une porte logique qui commute en 4ns (montée ou descente linéaire) ?

$$t_m = 4\text{ns}$$

$$F_{\text{equiv.}} = 0.32 / t_m = 80\text{MHz}$$

Exemple 2

Dans une self de 1uH (environ 1m de fil) un courant croît linéairement de 0 à 4A en 200ns. Quelle est la ddp aux bornes de cette self ?

Afin de démontrer la dualité des deux méthodes le résultat est donné selon l'analyse fréquentielle et temporelle :

1- Solution dans le domaine fréquentiel :

$$F_{\text{equiv.}} = 0.32 / t_m = 1.6\text{MHz}$$

$$U_{\text{crête}} = L \omega 0.5 I_{\text{crête}} = 20\text{V}$$

Rappel : Ne pas oublier qu'il faut diviser par deux l'amplitude crête de l'impulsion pour obtenir la valeur crête correcte de la sinusoïde équivalente.

2- Solution dans le domaine temporel :

$$U_{\text{crête}} = L \Delta I / \Delta t = 20\text{V}$$

Exemple 3

Une horloge système travaille à 10MHz avec des niveaux logiques 0 / 5 V, un rapport cyclique de 0.5 et des temps de commutation de 2ns.

Déterminez la fréquence équivalente, l'amplitude du fondamental et le nombre d'harmoniques à prendre en considération.

