

Chapitre.7. Compatibilité Electromagnétique CEM

1. Introduction

La **compatibilité électromagnétique (CEM)** est le domaine du génie électrique où l'on étudie et caractérise les interactions mettant en jeu les équipements électriques, leur environnement (réseau, charge, dispositif de contrôle) et les phénomènes électriques naturels afin de respecter l'intégrité de fonctionnement de tous. Le concept est apparu dans les années 1920 lors du développement des radiocommunications, lorsque l'on s'aperçu que la diffusion croissante des appareils électriques provoquait des perturbations de réception de plus en plus gênantes. Les premières normes virent le jour durant ces années.

Actuellement ce domaine est particulièrement important car les dispositifs électriques et électroniques sont de plus en plus nombreux, complexes et stratégiques (électronique de bord d'un avion par exemple) donc vulnérables à la pollution électromagnétique avec des conséquences très importantes.

Lors de la conception et de la réalisation d'un système, il convient de tenir compte de l'existence de ces perturbations, et de prévoir des méthodes permettant de réduire suffisamment leur influence, de manière à assurer un fonctionnement sûr dans tous les cas d'utilisation. De même, il faut éviter que le système développé ne produise trop de perturbations dans son environnement. Enfin à l'intérieur même de l'équipement, les mêmes phénomènes se produisent, une partie du système peut perturber d'autres parties plus sensibles. Si, à l'évidence, il est possible de supprimer toute perturbation, il faut distinguer une perturbation sans conséquence sur la fonction d'équipement et une perturbation provoquant des erreurs, momentanées ou une panne du système.

On peut toutefois délimiter trois principaux centres d'étude : les sources de perturbation, leur mode de couplage et de propagation, et les effets des perturbations sur les "victimes", qui correspond au concept de susceptibilité électromagnétique. Des normes existent concernant chacun des ces trois points.

Les études CEM ont pour but d'améliorer la cohabitation entre les éléments susceptibles d'émettre des perturbations électromagnétiques et/ou d'y être sensibles. Ainsi nous allons dans un premier temps définir ce qu'est exactement la **CEM** avec des exemples concrets.

Ensuite nous verrons leurs aspects fondamentaux et l'origine des perturbations électromagnétiques ainsi que la normalisation officielle mise en place dans l'industrie. Enfin nous présenterons les dispositifs de mesure des perturbations.

2. Définitions de la Compatibilité Electromagnétique CEM

La **Compatibilité Electromagnétique CEM** ou **EMC electromagnetic compatibility** (en appellation anglaise) est la faculté qu'a un dispositif, un appareil ou un système à fonctionner de façon satisfaisante dans son environnement électromagnétique, sans produire lui-même des perturbations électromagnétiques intolérables pour quoi que ce soit dans cet environnement. La compatibilité électromagnétique prend ainsi un triple aspect :

- 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.
- Ne pas interférer avec lui-même (**auto-compatibilité**). La définition de la **CEM** met donc en lumière les trois notions fondamentales (Fig.1) :
 - 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

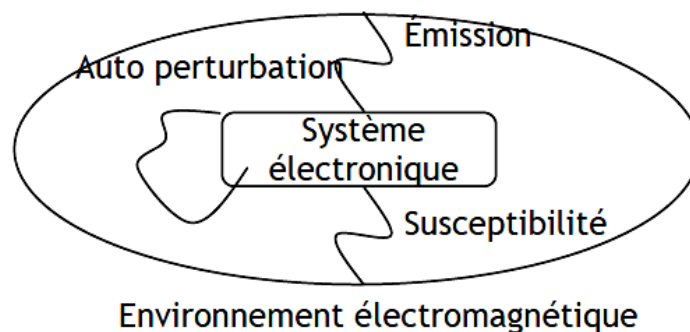


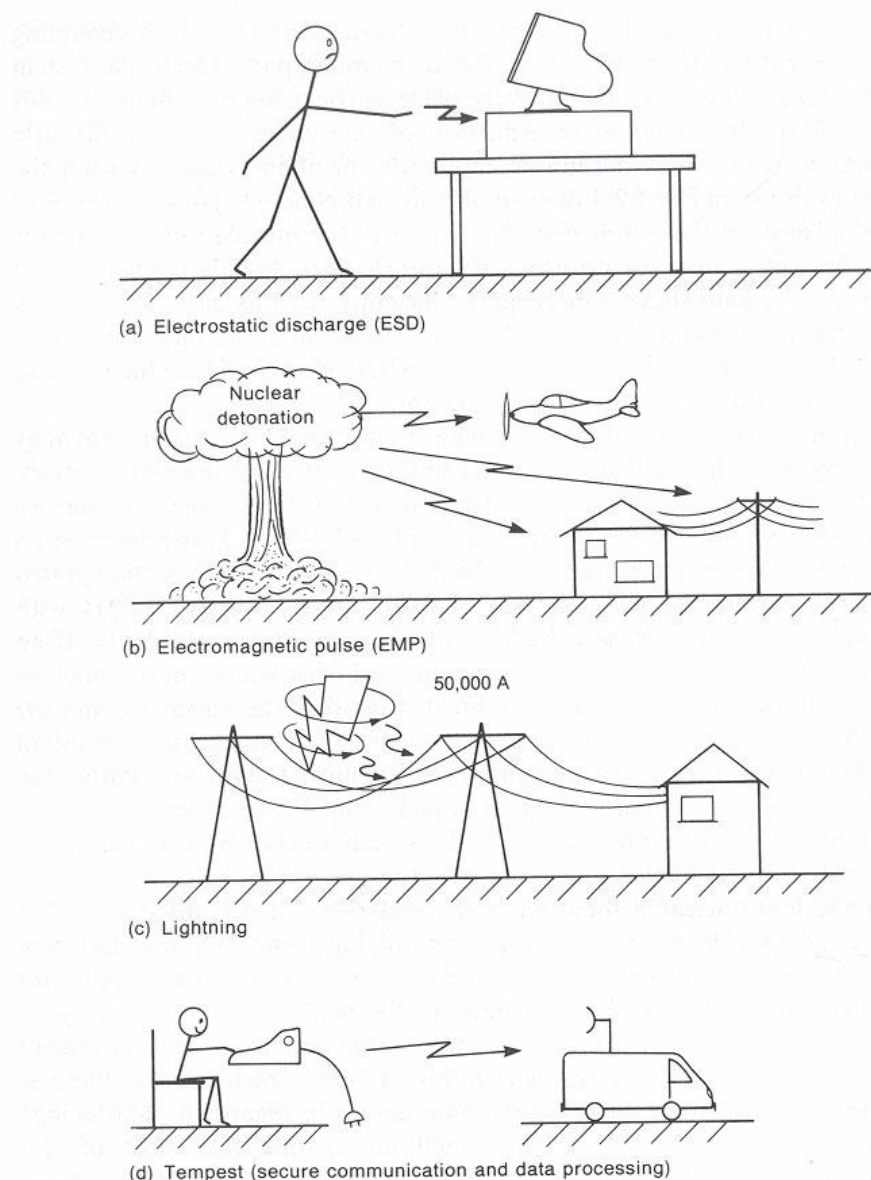
Figure.1. Représentation des trois composantes CEM

3. Exemples de problèmes CEM

a- L'usage du téléphone portable peut nuire au bon fonctionnement de certains appareils, c'est pourquoi il est strictement interdit (en France par exemple) dans les hôpitaux, les stations-service, les avions.

b- Une automobile moderne contient plus d'un kilomètre de fils électriques, elle se comporte comme une antenne qui émet et capte des ondes E.M. Le phénomène s'est amplifié avec l'augmentation vertigineuse du nombre de composants électroniques embarqués et le multiplexage.

3.1. Autres exemples de la CEM



4. Exemples de dysfonctionnement graves dus à la CEM

- en 1967 Destruction du porte avion Forrestal : un radar provoque la mise à feu d'une roquette qui détruit un avion et par effet boule de neige tout le porte avion.
- en 1980 Les premiers allumages électroniques d'automobile sont perturbés par les talky walky de la police.
- en 1982 Destruction du croiseur Sheffield par un missile: le système de contre-mesures était brouillé par les communications satellitaires.
- en 1990 Déclenchement de l'airbag lors de l'actionnement du klaxon (célèbres berlines allemandes)... sans compter tous les plus petits dysfonctionnements dans tous les systèmes électriques qui se traduisent par des pertes de données, de temps et d'argent.

5. La compatibilité électromagnétique en trois questions

5.1. Quel est l'objectif de la CEM ?

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

- D'étudier les transferts d'énergie non intentionnels entre systèmes électriques et/ou électroniques ;
- De mettre au point des procédés permettant de limiter les perturbations électromagnétiques émises et ainsi de satisfaire à la réglementation en vigueur ;
- De mettre au point des procédés permettant d'accroître l'immunité des systèmes aux parasites dans des limites faisant également l'objet de réglementations.

5.2. Qui est concerné ?

- Le fabricant ou / et l'importateur,
- La personne qui commercialise le produit,
- L'utilisateur.

Les fabricants de matériel ont été les premiers à être concernés par la **CEM**. Depuis

1996, seuls les produits conformes à la réglementation en vigueur sur la **CEM** et portant le marquage **CE** peuvent être commercialisés en France et dans l'Union Européenne par exemple

5.3. Pourquoi faut-il se préoccuper de la C.E.M. ?

L'utilisation d'équipements électroniques se multiplie dans tous les domaines d'activités, qu'ils soient grands publics, industriels ou militaire.

Les technologies employées dans la conception et le développement des matériels électroniques reposent sur les trois paramètres suivants :

- ☐ La rapidité de commutation (vitesse des microprocesseurs),
- ☐ Les faibles énergies mises en oeuvre pour basculer d'un état à un autre,
- ☐ Le haut niveau d'intégration des composants.

Quatre facteurs se conjuguent pour rendre sans cesse plus importants les problèmes de perturbations électromagnétiques :

- 1) Les dispositifs de contrôle-commande et de mesure comprennent désormais des composants électroniques travaillant à des niveaux de tension de plus en plus bas ; cela entraîne, si aucune précaution particulière n'est prise, une plus grande sensibilité de ces équipements aux perturbations auxquelles ils sont normalement soumis.
- 2) La multiplication des systèmes capables de couper brusquement des puissances importantes (thyristors, triacs) engendre une prolifération d'impulsions à front raide susceptibles d'influencer les matériels sensibles.
- 3) Les dispositifs perturbateurs et les matériels sensibles à ces perturbations sont de plus en plus intégrés aux mêmes ensembles. Les perturbations sont transmises par conduction ou par rayonnement avec une atténuation d'autant plus faible que les deux types d'éléments sont plus rapprochés.
- 4) Une insensibilité très grande est exigée notamment pour les dispositifs de traitement de l'information, en rapport avec les importantes conséquences économiques des défaillances de ces systèmes.

Pour toutes ces raisons, il devient de plus en plus nécessaire de ne pas se contenter de définir un cahier de charge plus ou moins efficace, mais plutôt de dégager, par une étude systématique, une philosophie générale pour la maîtrise de l'ensemble des phénomènes.

6. Historique

On pourrait faire remonter l'histoire de la compatibilité électromagnétique au tout début des transmissions radio (1901 : Marconi réalise la première transmission à travers l'Atlantique). Mais si l'on constatait déjà la présence d'interférences, il suffisait à cette époque de changer de fréquence d'émission pour résoudre le problème. Avec la multiplication des émetteurs, les problèmes sont devenus plus sensibles, et en 1933 la **Commission Electrotechnique Internationale C.E.I**) a recommandé la création d'un comité spécial sur les interférences radio **comité international spécial de perturbations radioélectriques (CISPR)**, Ce dernier a établi les méthodes de mesures et de recommandations sur les limites de niveaux d'émissions admissibles.

Avec l'avènement du transistor (1950), puis les circuits intégrés (1960), et la tendance à remplacer le traitement analogique des signaux par un traitement numérique (dès 1970), les vitesses et donc le domaine fréquentiel des perturbations n'ont fait que croître et les problèmes de compatibilité s'empirent. Avec la multiplication des ordinateurs personnels, et l'augmentation des vitesses d'horloge, le problème est devenu crucial, si bien que d'une base volontaire (recommandation), les pays en sont arrivés à imposer des normes (**CENELEC (Comité Européen de Normalisation electrotechnique)** en Europe, **FCC (Federal Communications Commission)** aux USA), toutes basées sur les recommandations **CEI**, à quelques variations spécifiques près. Ces normes sont destinées à limiter la « pollution » électromagnétique, et par conséquent, à concevoir des équipements et des composants capables de travailler correctement en présence de ces niveaux, mais seuls les essais d'émission sont exigés. Elles distinguent les applications à usage domestique (un PC interfère avec le récepteur TV voisin) où les niveaux admis et les distances entre émetteur et récepteur des perturbations sont les plus faibles, et les autres applications en milieu industriel.

7. Aspects fondamentaux de la CEM

Lors de l'analyse d'une perturbation électromagnétique on constate que le problème englobe trois éléments : **une source de perturbation** qui émet de l'énergie électromagnétique, **un canal de couplage** au travers duquel l'énergie de ces perturbations se propage et enfin **un**

récepteur qui capte cette énergie, la traite et la superpose à sa fonction normale (Fig.2). Si les perturbations reçues par ce dernier sont trop élevées et provoquent des interférences, on parle alors de victime de ces perturbations.

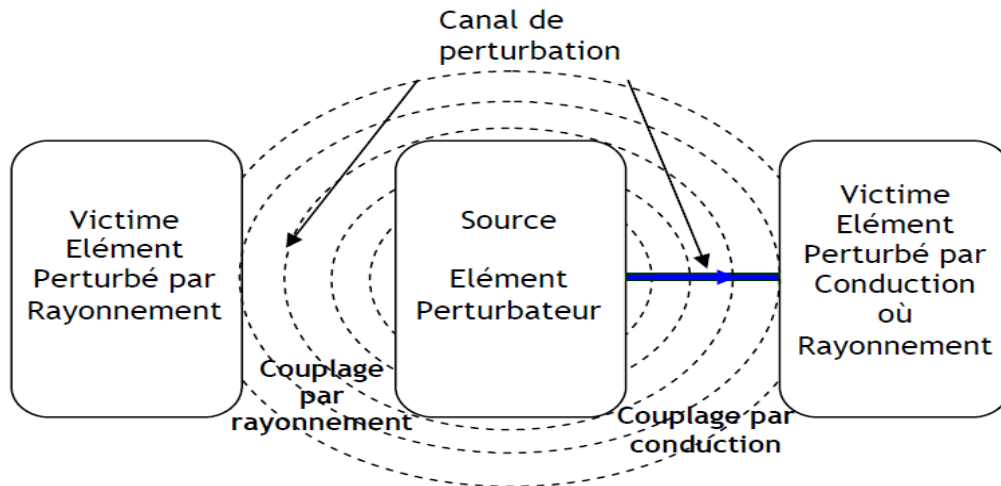


Figure. 2. Transmission des perturbations

L'amélioration de la **CEM** est obtenue par différents types d'actions :

1. Diminution des sources externes :

Par exemple, nous pouvons réduire les perturbations dues aux décharges électrostatiques en augmentant l'humidité des locaux, en utilisant un sol antistatique, etc...

2. Augmentation de la susceptibilité :

Un système électronique peut être **durci** en choisissant les composants les moins sensibles aux perturbations (différentes familles technologiques : TTL, CMOS etc...).

3. Réduction des couplages :

Pour une source externe déterminée, le niveau de perturbations reçues par un appareillage dépend des couplages, c'est à dire du chemin de propagation entre la source et la victime.

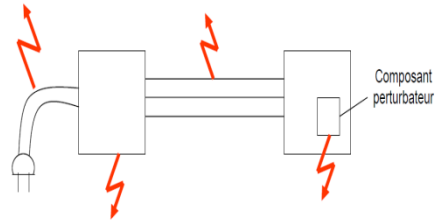
8. Mode de transmission des perturbations

La constatation que le couplage des perturbations peut se faire tant directement par rayonnement que par conduction dans les connectiques, et d'autre part que tout équipement peut être, selon les circonstances, émetteur ou récepteur (**victime**) de perturbations, conduit à

décomposer les essais et analyses en quatre catégories, que l'on retrouve dans les normes de compatibilité.

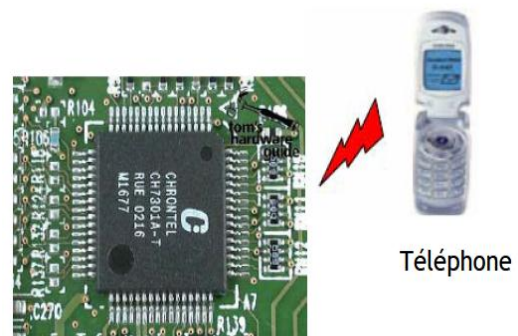
- ❖ **Emission rayonnée** : Mesure des champs E.M rayonnés par l'équipement sous test.

Ce type de perturbation est principalement généré par la commutation simultanée des portes élémentaires du composant (activité interne).



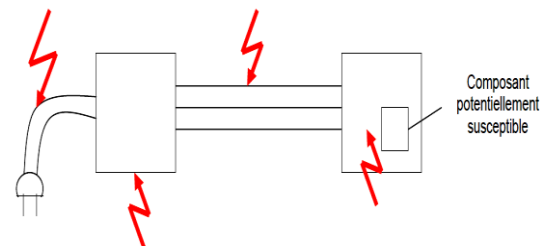
- ❖ **Susceptibilité aux rayonnements** : Capacité de fonctionner en présence de champs E.M donnés.

Les circuits électroniques sont très sensibles aux interférences RF



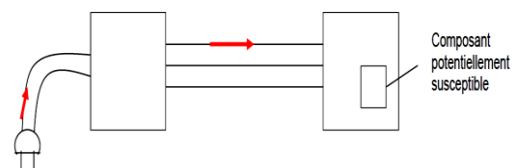
- ❖ **Emissions conduites par l'équipement** : Mesure des perturbations injectées dans le réseau.

L'émission conduite sera d'autant plus élevée que la tension et la fréquence sont élevées. Elles sont dues essentiellement au couplage des broches d'alimentation.



- ❖ **Susceptibilité à la conduction** : Capacité de fonctionnement en présence de perturbations conduites.

Les composants sont susceptibles aux boucles de courant parasite générées par couplage électromagnétique



9. Niveaux de compatibilité

Pour assurer la **CEM**, différents niveaux et différentes marges ont été définis (Fig.3)

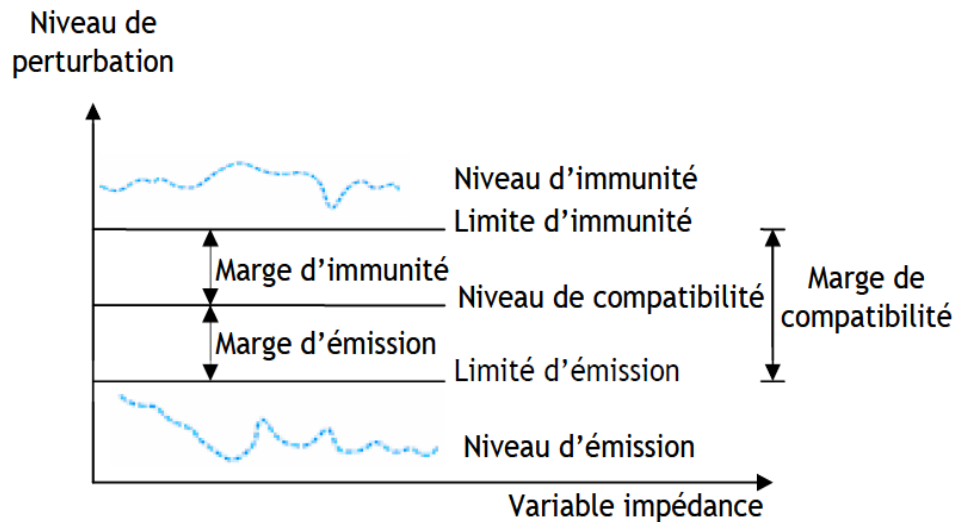


Figure.3. Niveaux de perturbation en CEM

- **Niveau d'immunité** : Il s'agit du niveau à partir duquel il y a dysfonctionnement d'un matériel ou d'un système.
- **Niveau de compatibilité** : C'est le niveau maximal de perturbation auquel on peut s'attendre dans un environnement donné.
- **Niveau d'émission** : C'est le niveau maximal d'émission de perturbation que ne doit pas dépasser un matériel.
- **Marge d'immunité** : C'est la marge qui existe entre le niveau de compatibilité et le niveau de limite d'immunité.
- **Marge d'émission** : C'est la marge qui existe entre le niveau de compatibilité et le niveau de limite d'émission.

9. Sources des perturbations

Un certain nombre de bruits et perturbations prennent leur origine dans des sources naturelles (foudre, décharge électrostatique (**ESD**), activité solaire, source cosmique, etc...) ; cependant, la majorité des sources est d'origine humaine. Elles sont appelées également bruit industriel, (Fig. 4), résultant du fonctionnement des équipements construits.

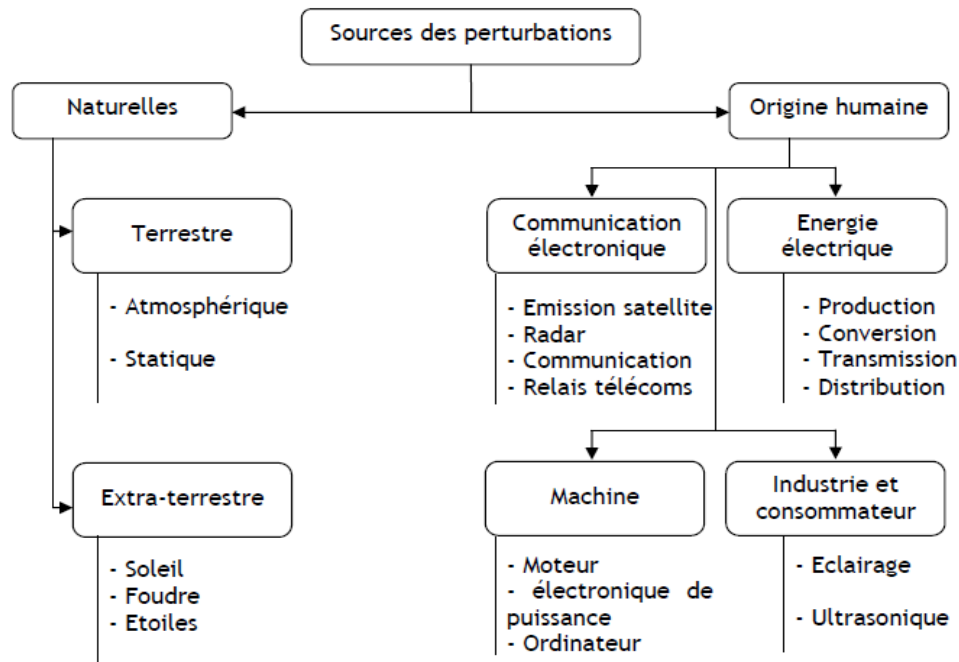


Figure.4. Sources de bruits

10. La CEM au niveau industriel

Actuellement un produit ne peut pas se vendre s'il est susceptible d'être perturbé par des **interférences électromagnétiques**. Qui serait intéressé par un ordinateur qui **plante** intempestivement à cause de la proximité d'une source de perturbation ? Et c'est surtout dans le domaine de l'industrie où l'on fait attention à ce genre de phénomène.

Les industriels doivent donc procéder à deux grandes étapes dès le début du projet :

Une conception étudiée et une série de tests de compatibilité respectant les normes. Si les tests sont mauvais, on doit reprendre du départ, c'est à dire dès la conception, en tenant compte des problèmes rencontrés et analysés ; puis refaire les tests et ainsi de suite jusqu'à ce que le produit soit fiable. De plus, il faut distinguer les différents types de perturbations. Si celles-ci sont d'harmoniques de longues durées (**basses fréquences**), les solutions ne seront pas les mêmes que pour des harmoniques de courtes durées (**hautes fréquences**).

11. Intervention CEM

On peut se poser la question : ***pour quel produit et à quel moment faut-il tenir compte des problèmes de compatibilité ?***

☐ Pour tout produit :

- qui risque de se trouver dans un environnement perturbé ;
- qui est particulièrement sensible.

□ Au moment de la conception du produit ; cette approche donne de bons résultats :

- du point de vue technique
- du point de vue économique.

On estime que si la CEM est prise en considération :

- à la conception : coût majoré de 5%.
- après la construction du prototype : coût majoré de 50%.
- quand le produit est sur le marché : coût majoré de 100%.

Actuellement, beaucoup de produits n'ont pas été conçus en tenant compte de la Compatibilité électromagnétique, le schéma de la figure I-10 résume l'intervention CEM sur le développement de produit

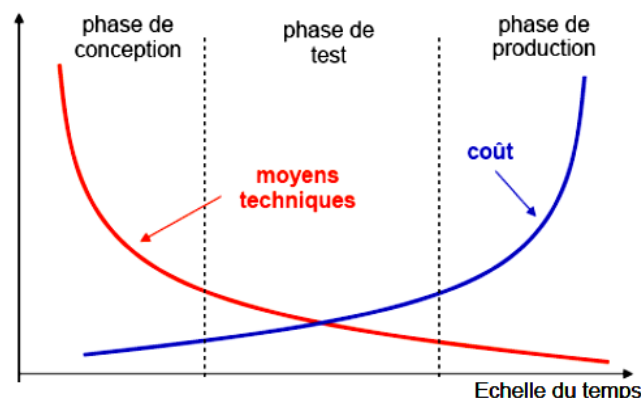


Figure.5. Développement du produit en fonction de l'échelle du temps

12. Instrumentation en compatibilité électromagnétique

12-1. Dispositifs de mesure des perturbations

Pour vérifier la **CEM** d'un dispositif, on procède en vérifiant que le dispositif fonctionne correctement en présence de perturbations. Dans les tests on injecte des perturbations (en mode conduit et en mode rayonné) sur un appareil et on vérifie qu'il fonctionne normalement. Pour les tests beaucoup de matériels sont nécessaires comme une chambre de mesure et de test, diverses antennes de mesure des pinces d'injection, un analyseur de spectre, un RSIL.

Ces relevés de normes relèvent de spécialistes et elles sont confiées à des entreprises spécialisées.

On vérifie d'autre part que l'appareil n'envoie pas trop de perturbations vers l'extérieur en mesurant les champs électriques et magnétiques à une certaine distance quand il s'agit de perturbations rayonnées. Quand il s'agit de perturbations conduites, on mesure les perturbations envoyées vers le secteur et on vérifie qu'elle n'excède pas une certaine norme.

13. Protection en CEM

13.1. Le blindage

Les blindages électromagnétiques ont pour but de protéger des installations électroniques (ou électriques) contre les effets redoutables de certains couplages électromagnétiques.

13.2. Classification

Le blindage est constitué d'une enveloppe conductrice que l'on met en place autour de composants électriques pour constituer une barrière vis à vis des influences électrostatiques, magnétiques, ou électromagnétiques. On distingue : le *blindage magnétique* et le blindage amagnétique.

1. **Le blindage magnétique** est constitué d'un matériau capable d'offrir un chemin de réluctance relativement faible aux *lignes de forces* issues d'une source de champ magnétique (champ H), et d'en préserver les zones à protéger. Cette technique peut par exemple protéger le tube d'un oscilloscope de l'influence d'un transformateur d'alimentation. En basse fréquence, la protection requiert parfois un matériau noble et coûteux comme le Mu-métal.
2. **Le blindage amagnétique** est constitué d'un matériau bon conducteur, cuivre ou aluminium. Il agit de plusieurs manières :
 - Vis à vis des champs électriques (champs E) à la manière d'une cage de Faraday. Il se comporte comme un écran électrostatique et évite le couplage capacitif entre les conducteurs situés de part et d'autre

14. Conclusion

Le problème de la **Compatibilité électromagnétique CEM** était un phénomène très courant, et même parfois très gênant dans certains cas.

Références Bibliographiques

- [1] F. Rachidi Compatibilité électromagnétique Notes de cours " Introduction à la CEM " École Polytechnique Fédérale de Lausanne EPFL-DE-LRE CH-1015 Lausanne, Eté 2003.**

- [2] MILOUDI HOUCINE " Modélisation C.E.M d'un onduleur triphasé alimentant un moteur asynchrone ", MAGISTER en Électrotechnique, UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES, 2007.**

- [3] P. Degauque, J. Hamelin, "Compatibilité électromagnétique" édition Dunod 1990.**