

CEM

P.J. VIVERGE, G. GRANGE

Introduction

CEM

La compatibilité électromagnétique (CEM) d'un appareil ou d'un système électrique caractérise son aptitude à fonctionner dans l'environnement électromagnétique pour lequel il est prévu, sans y occasionner lui-même des perturbations gênantes. Cette caractéristique constitue un facteur important de la qualité de beaucoup de produits. Dans de nombreux secteurs techniques, ainsi que dans bien d'autres domaines, les produits autrefois mécaniques sont de plus en plus remplacés par des produits électroniques.

Pour assurer la CEM d'un produit, il est donc important de tenir compte, au stade déjà de sa conception, des mesures qu'il est nécessaire d'envisager, afin de résoudre les problèmes de CEM lors du développement. Ainsi, le constructeur peut éviter bien des ennuis ultérieurs, tout en ayant l'avantage de pouvoir trouver une solution optimale au coût le plus favorable.



Le sigle de conformité institué par la Communauté Européenne se compose des lettres C et E suivies du nombre indiquant l'année de l'apposition du sigle, qui doit être éventuellement complété par le symbole d'identification de l'organisme agréé ayant délivré l'attestation d'agrément CE.

Lorsque des appareils tombent sous le coup d'autres directives prévoyant le sigle de conformité CE, l'utilisation de ce sigle indique aussi que le produit répond aux exigences des autres directives concernées.

EMI ou émissivité

Le sigle EMI (Electromagnetic Interference) caractérise les émissions parasites qu'un appareil électrique ou électronique produit dans son voisinage et qui peuvent par exemple perturber considérablement la réception d'émissions radio ou de télévision. Le seuil qui sépare le pur désagrément lié à une réception perturbée et le véritable danger est toutefois très rapidement franchi, dans le cas par exemple où les perturbations rendent impossible le trafic radio d'un service de sécurité. Cela peut très bien se produire dans les zones fortement urbanisées des grandes villes, où de fortes densités d'équipements informatiques sont installés dans des volumes réduits et génèrent de véritables «smogs électromagnétiques» dans lesquels se perdent les signaux radio utiles.

Pour empêcher de telles interférences et pour assurer simultanément le fonctionnement correct d'une multitude d'appareils très divers, il est important de fixer des limites pour les émissions parasites. On peut ainsi concevoir des marges de sécurité appropriées entre les émissions parasites et la valeur de seuil de la susceptibilité ou de l'immunité aux perturbations des équipements concernés.

La solution est-elle un blindage total? Evidemment non. Une solution raisonnable consiste à imiter la nature : là aussi, certains processus atmosphériques et l'influence du soleil sur les voies de propagation des ondes radio provoquent des perturbations qui déterminent le niveau minimal

nécessaire des signaux à utiliser pour assurer un trafic radio satisfaisant. Il est donc plus économique de tenter de fixer des valeurs maximales pour les émissions parasites des sources techniques de manière telle qu'elles produisent, à une distance déterminée, un niveau parasite qui se rapproche du niveau des perturbations naturelles. L'antiparasitage est une mesure de protection de l'environnement électromagnétique!

La mesure d'émissions parasites implique différentes conditions de mesure, en fonction de la norme à appliquer et de la classe de valeurs limites exigée. Selon les cas, les mesures s'effectuent dans des halls blindés ou en espace libre. Il est souhaitable que les techniques et les équipements de mesure utilisés ne perturbent en aucune façon le résultat de mesure. Cette exigence, qui semble évidente, est cependant difficile à satisfaire et ne s'applique que rarement en pratique à l'ensemble des parties d'un montage de mesure.

L'émissivité (ou émissions parasites) peut être conduite ou rayonnée.

EMS ou susceptibilité ou immunité

Ce sigle caractérise la susceptibilité électromagnétique d'un appareil, c'est à dire son immunité aux parasites. On désigne ainsi la possibilité qu'a un appareil de pouvoir fonctionner correctement malgré l'influence de perturbations électromagnétiques. Cette possibilité ne peut jamais être trop surestimée : il suffit pour s'en convaincre de penser aux conséquences possibles du déclenchement involontaire d'un «airbag» dans une automobile roulant à vitesse élevée.

Les mesures EMS sont prévues pour tester le fonctionnement d'un module, d'un appareil ou d'un système sous l'influence de grandeurs perturbatrices propagées par conduction ou par rayonnement. Elles doivent s'effectuer dans un hall blindé ou une cabine blindée. Le revêtement de l'enceinte de mesure, constitué par des absorbeurs à haute fréquence, évite toute perturbation des mesures et simule les conditions d'espace libre aux fréquences élevées.

La susceptibilité (ou immunité) peut être conduite ou rayonnée.

Perturbations conduites et rayonnées

Une perturbation est dite conduite lorsqu'elle se trouve véhiculée par l'intermédiaire des conducteurs (fils, câbles, pistes de circuits imprimés...). Dans leur environnement, les conducteurs peuvent se comporter comme des selfs ou des capacités. On dit alors qu'il y a couplage ou diaphonie.

Une perturbation est dite rayonnée lorsqu'elle se propage dans l'espace environnant par un champ électromagnétique. Les fils, les câbles ou les pistes de circuits imprimés se comportent alors comme des antennes.

Certains phénomènes sont propagés par les deux modes précédents. Ceci est généralement dû au large spectre qu'ils génèrent.

MANIPULATIONS

Le TP sera axé autour :

- d'une manipulation sur quelques phénomènes de base importants en CEM (CEM1).
 - de la prise en main d'un matériel très évolué pour la préqualification CEM d'équipements grâce à une approche CEM pour les convertisseurs statiques (CEM2).
 - une méthode de mesures normative pour les perturbations conduites par les convertisseurs statiques et la prise en compte des filtrages de mode commun et de mode différentiel sur les perturbation réinjectées sur le réseau (CEM3).
-

CEM 1 : Quelques phénomènes de base

PRESENTATION THEORIQUE RAPIDE

La diaphonie représente le couplage entre deux circuits indépendants cheminant à proximité l'un de l'autre. Nous donnerons une explication très sommaire du phénomène de diaphonie. Après en avoir présenté le principe, nous donnerons les ordres de grandeurs des coefficients de couplage sur un circuit imprimé ainsi que les règles de protection.

Diaphonie inductive

Lorsqu'un courant circule dans un conducteur, il génère un champ magnétique. Un conducteur voisin forme avec son conducteur de retour une boucle qui va intercepter une partie du champ magnétique généré par le conducteur coupable. La variation du flux magnétique va engendrer une d.d.p. dans la boucle victime.

Ce couplage est mis en équation grâce à l'introduction de la mutuelle inductance, notée M. Elle représente le coefficient de couplage inductif entre le circuit coupable et le circuit victime.

$$U = 2\pi FMI$$

avec U : d.d.p. induite dans la boucle victime (V)

F : fréquence du courant perturbateur (Hz)

M : mutuelle inductance entre les circuits coupable et victime (H)

I : courant perturbateur (A)

Diaphonie capacitive

Une d.d.p. entre deux conducteurs génère un champ électrique. Lorsqu'un conducteur est soumis à une d.d.p., un conducteur voisin va intercepter une partie de ces lignes de champ et collecter ainsi un courant perturbateur.

Ce couplage est mis en équation grâce à l'introduction de la capacité mutuelle, notée C_m . Elle représente le coefficient de 'couplage capacitif' entre le circuit coupable et le circuit victime.

$$I = 2\pi FC_m U$$

avec I : courant collecté (A)

F : fréquence de la d.d.p. coupable (Hz)

C_m : capacité mutuelle entre les circuits coupable et victime (F)
 U : d.d.p. perturbatrice (V)

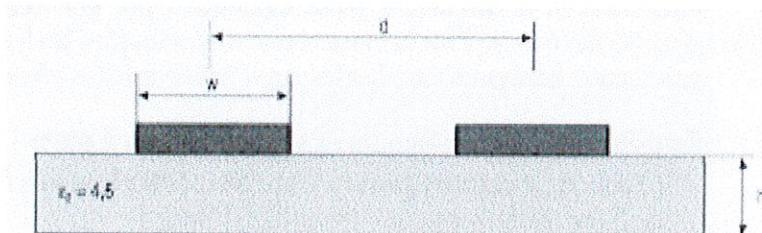
Aux fréquences élevées, il y a équivalence en énergie entre la diaphonie capacitive et la diaphonie inductive. Ceci est dû à l'effet de ligne qui fait qu'aux premiers instants, une ligne apparaît comme une résistance indépendante de la charge qui se trouve à son extrémité.

Les règles pour réduire la diaphonie sont, d'un point de vue géométrique, les mêmes en ce qui concerne la diaphonie inductive et la diaphonie capacitive. En B.F., les impédances de travail (quelques kilohms) sont habituellement plus élevées que l'impédance caractéristique des lignes (quelques 10Ω à 100Ω) qui se comportent alors comme des charges capacitatives. La diaphonie capacitive est donc prédominante. Les règles de protection et les méthodes de réduction des couplages seront donc abordées au moyen des capacités mutuelles entre pistes. Ces règles géométriques pourront s'adapter pour la réduction de la mutuelle inductance entre pistes.

Capacité mutuelle. Sans plan de masse

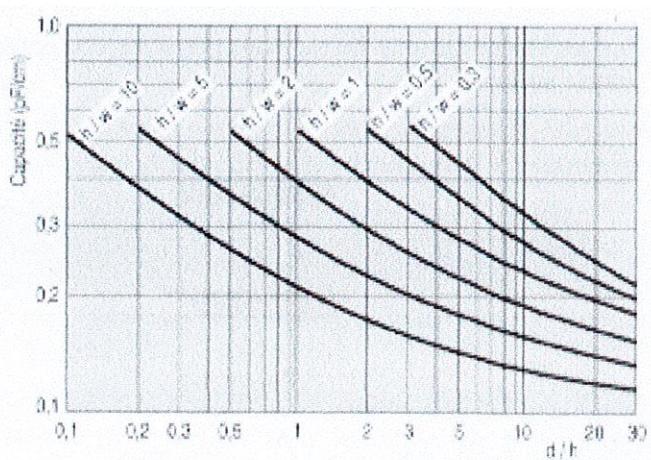
Nous traiterons ici du cas des circuits simple face sans plan de masse et des circuits double faces sans plan de masse.

Considérons la géométrie suivante :



Avec d : distance entre pistes (mm)
 W : largeur des pistes (mm)
 h : hauteur du substrat (mm)

La capacité mutuelle entre les deux pistes est donnée dans l'abaque suivant. Les réseaux de courbes ont été tracés en faisant varier les paramètres d , w et h . Le substrat utilisé pour les calculs est le verre époxy qui présente une permittivité diélectrique de 4,5. Une épaisseur des pistes a été choisie égale à 35 μm , mais ce paramètre a peu d'influence sur la capacité piste à piste.



On remarque sur le réseau de courbes que la capacité piste à piste décroît peu avec l'éloignement. Si l'on applique un coefficient 2 dans la géométrie de la figure 4.3, on voit que la diminution de la capacité parasite sera plus importante en raccourcissant la longueur commune d'un facteur deux qu'en éloignant les pistes d'un facteur deux. Ainsi, sans plan de masse, la réduction de la diaphonie passe également par une augmentation de la densité des cartes. Plus la carte sera compacte, plus les longueurs communes seront faibles, donc plus les capacités parasites seront faibles.

Piste écran

Afin de diminuer la diaphonie entre deux pistes, une piste écran placée entre ces deux conducteurs et raccordée au 0 V permet de réduire le couplage d'environ un facteur 5.

Pour la réduction de la diaphonie capacitive, cette piste doit se comporter comme un parapluie en champ électrique et intercepter les lignes de champ en imposant un potentiel. Il faut en B.F raccorder la piste écran au 0 V au moins à une extrémité.

Pour la diaphonie inductive, le circuit victime est une boucle. La piste écran doit donc présenter, avec la masse, une surface de boucle capable d'intercepter le champ magnétique. Elle doit donc être raccordée à la masse aux deux extrémités.

En résumé, pour les signaux basse fréquence où la diaphonie capacitive est prédominante, on pourra se contenter de ne raccorder la piste écran à la masse qu'à une seule extrémité. Pour les signaux haute fréquence, et notamment en numérique, la piste écran doit impérativement être raccordée à la masse aux deux extrémités.

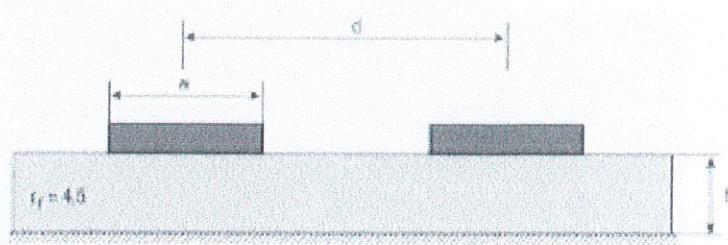
Cartes numériques

L'évolution des technologies et l'augmentation de la vitesse font que les cartes numériques rencontrent de plus en plus des problèmes de diaphonie. Un des cas les plus significatifs est celui des câbles en nappe et dans une moindre mesure celui des bus sur les cartes numériques.

Sur un circuit sans plan de masse, lorsqu'on ne trouve que très peu de pistes retour (0 V), la diaphonie, pour deux pistes éloignées d'une piste de 0 V, peut atteindre 80 %, c'est-à-dire que la piste victime voit un signal parasite égale à 0,8 fois le signal coupable. Lorsqu'on ne dispose pas de plan de masse pour réduire la diaphonie, on devra placer de nombreuses pistes écran dans les bus d'adresses et de données. L'idéal est de placer une piste sur deux au 0 V. Afin de ne pas trop pénaliser le tracé, on placera une piste de masse de part et d'autre du bus.

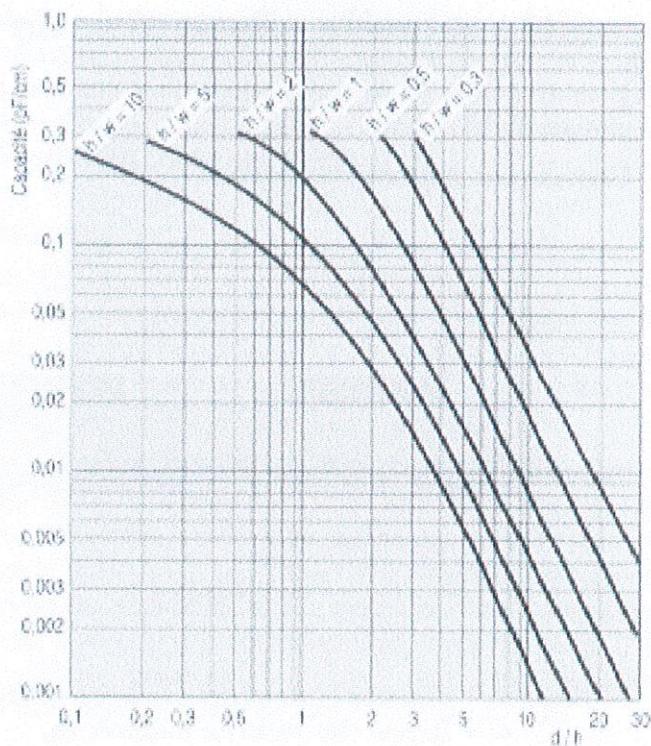
Capacité mutuelle. Avec plan de masse

Considérons la géométrie suivante :



Avec d : distance entre pistes (mm)
 W : largeur des pistes (mm)
 h : hauteur du substrat (mm)

La capacité mutuelle entre les deux pistes est donnée dans l'abaque suivant. Les réseaux de courbes ont été tracés en faisant varier les paramètres d , w et h . Le substrat utilisé pour les calculs est le verre époxy et présente donc une permittivité diélectrique de 4,5. L'épaisseur des pistes a été prise égale à 35 μm et les pistes sont de largeurs égales.



Influence d'une fente dans un plan de masse

La présence d'un plan de masse réduit la diaphonie de façon très significative. Ceci ne reste vrai que si le plan de masse reste un vrai plan de masse. Une fente dans un plan de masse va dégrader considérablement son efficacité.

En effet, les courants H.F. reviennent au plus près du conducteur aller, lorsqu'ils le peuvent. Supposons deux pistes voisines au dessus d'un plan de masse fendu. Lorsqu'un courant va circuler sur la piste 1, le retour se fait par le plan de masse au-dessous de la piste. Au niveau de la fente, le courant est dévié et contourne la fente. Il génère ainsi un champ magnétique dans la fente qui se couple sur la piste voisine.

MANIPULATION

Partie I : Diaphonie piste à piste

A/ Influence d'une piste écran et de ses connexions à la masse.

- Matériel utilisé :
- circuit imprimé CEM1/I/1
 - générateur sinusoïdal 0-20MHz
 - oscilloscope
 - câbles BNC de liaison

1/ Dans un premier temps, connecter uniquement le générateur sinusoïdal sur "sa" piste et, avec un T, visualiser à l'oscilloscope le signal envoyé. On vérifiera que la valeur crête à crête de la sinusoïde reste constante avec la fréquence (*pour un réglage d'amplitude du générateur, donné*).

Remarque : On adaptera l'entrée de l'oscilloscope à 50Ω .

2/ En gardant le réglage précédent de l'amplitude du générateur, connecter l'oscilloscope sur sa piste. Entre quelques kHz et 20MHz, tracer la courbe donnant le rapport $\frac{U_{\text{oscillo}}(\text{victime})}{U_{\text{géné}}(\text{agresseur})}$ en fonction de la fréquence. U : valeur crête à crête mesurée.

Attention : la piste écran ne sera pas connectée.

3/ Connecter la piste écran à une seule extrémité et refaire les mesures précédentes.
Conclusion.

4/ Connecter la piste écran aux deux extrémités et refaire les mesures précédentes.
Conclusion.

5/ Quels conclusions générales pouvez tirer des manipulation précédentes. S'appuyer sur le support théorique du début (champs magnétiques induits, phénomènes inductifs...)?

B/ Influence d'un plan de masse fendu ou non.

- Matériel utilisé :
- circuit imprimé CEM1/I/2
 - générateur sinusoïdal 0-20MHz
 - oscilloscope

Le circuit imprimé utilisé a les mêmes connexions au générateur et à l'oscilloscope que dans la partie précédente mais il dispose d'un plan de masse conducteur et la piste écran n'existe plus.

1/ Réaliser les mêmes mesures que celles de la partie 1. Comparaison avec les mesures de la partie 1.

2/ Combler électriquement la fente en fixant une petite plaque en cuivre et refaire les mesures précédentes et en déduire l'influence de la fente dans le plan de masse.

3/ Faire réapparaître la fente puis déplacer une barrette en cuivre perpendiculairement à l'axe de la fente pour réaliser un contact électrique entre les deux demi-plans de masse. Visualisez-vous à l'oscilloscope une position remarquable de cette barrette?

4/ Quels conclusions générales pouvez tirer des manipulation précédentes? S'appuyer sur le support théorique du début et travailler par analogie avec la conclusion de la manipulation précédente.

Partie II : Phénomène d'effet de peau – Impédance d'un conducteur vis-à-vis de la fréquence du signal appliquée

Matériel utilisé :

- générateur sinusoïdal 0-20MHz
- oscilloscope
- adaptateur BNC-double banane noir/rouge
- 1 câble banane-BNC
- 1 câble court banane-banane (mise à la masse du câble précédent)

1/ Etablir la liaison générateur sinusoïdal-oscilloscope à l'aide de tous les éléments précédents (l'adaptateur BNC-double banane noir/rouge sera connecté à la sortie du générateur sinusoïdal 0-20MHz).

Visualiser à l'oscilloscope une sinusoïde de 1V cac à 20kHz puis à 20MHz.

2/ Desserrer les cosses noires et rouges de l' adaptateur BNC-double banane et insérer une tresse de longueur 15cm.

Quelle est la visualisation à l'oscilloscope dans le cas de la sinusoïde précédente de 20kHz?

Pourquoi?

Quelle est la visualisation à l'oscilloscope dans le cas de la sinusoïde précédente de 20MHz?

Pourquoi? Justifier le résultat obtenu à partir d'un phénomène électrique connu et détailler les justifications physiques.

Valider les explications précédentes en remplaçant la tresse de 15cm par une tresse de 5cm.

Partie III : Influence du blindage et du raccordement à la masse dans la perturbation de la transmission d'informations

Cette manipulation a été conçue à l'origine par M. ISCHIA du Centre de Contrôle Technique de France Télécom.

Les phénomènes observés sont de même nature que ceux vu lors de la première partie de la manipulation mais le système est plus complexe et les transmissions sont filaires.

DESCRIPTION

La maquette utilisée comprend deux ensembles électroniques proches mais totalement indépendants :

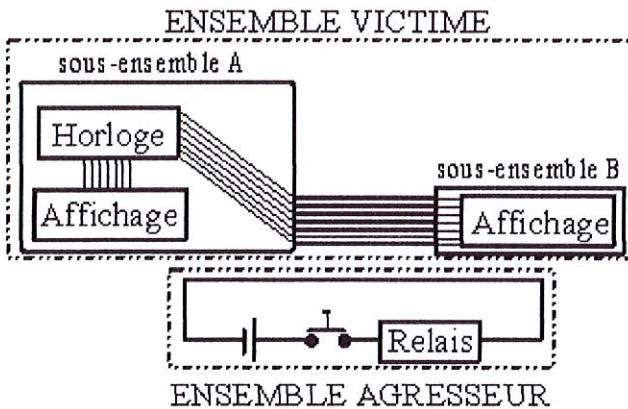
- Le premier ensemble est constitué de deux sous-ensembles électroniques A et B.

Le sous ensemble A comporte une horloge reliée à un afficheur.

Le sous-ensemble B est éloigné de A et y est relié par une liaison multifilaire. Il comporte aussi un afficheur incrémenté de façon identique à celui de A par la même horloge. Un bouton poussoir permet la remise à zéro.

Ce premier ensemble (A+B) est l'**ensemble victime**.

- Le second ensemble est constitué par un relais commandé par un bouton poussoir. Il est l'**ensemble agresseur** et est totalement indépendant du premier ensemble.



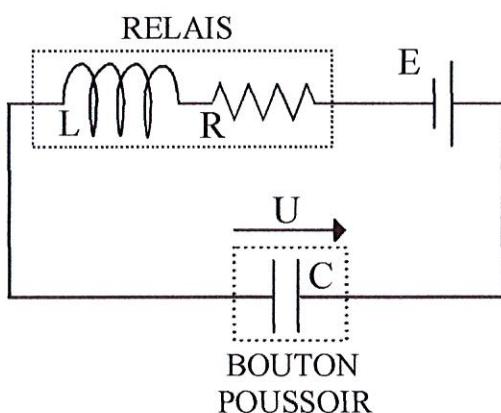
Les deux ensembles sont situés à proximité l'un de l'autre. Lors de l'excitation du relais par le bouton poussoir, le circuit numérique est perturbé (**victime**).

Le circuit de commande du relais ne peut donc qu'être le perturbateur (**agresseur**).

Lorsque le contact du bouton poussoir est fermé, la bobine du relais est traversée par un courant I . Elle emmagasine une énergie magnétique W proportionnelle à l'inductance L du bobinage et au carré du courant I suivant la formule :

$$W = \frac{1}{2} LI^2 \quad \text{avec } I = E/R \quad \text{d'où } W = \frac{1}{2} L \left(\frac{E^2}{R^2} \right)$$

A l'instant d'ouverture du contact du bouton poussoir, le circuit peut se représenter de la façon suivante :



Valeurs estimées :
 $L = 10 \text{ mH}$
 $R = 100 \Omega$
 $C = 100 \text{ pF}$

Le circuit entre en oscillations amorties. L'énergie magnétique de l'inductance $\frac{1}{2} L \left(\frac{E^2}{R^2} \right)$ est transmise au condensateur sous la forme $\frac{1}{2} CU^2$ et inversement.

Si le montage était parfait, il y aurait égalité entre les deux termes soit :

$$\frac{1}{2} L \left(\frac{E^2}{R^2} \right) = \frac{1}{2} CU^2 \quad (\text{U étant la tension aux bornes de C})$$

ce qui donne :

$$U = \frac{E}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$\text{D'autre part } f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Ce qui donne pour une tension $E = 12V$ et avec les valeurs estimées précédentes :

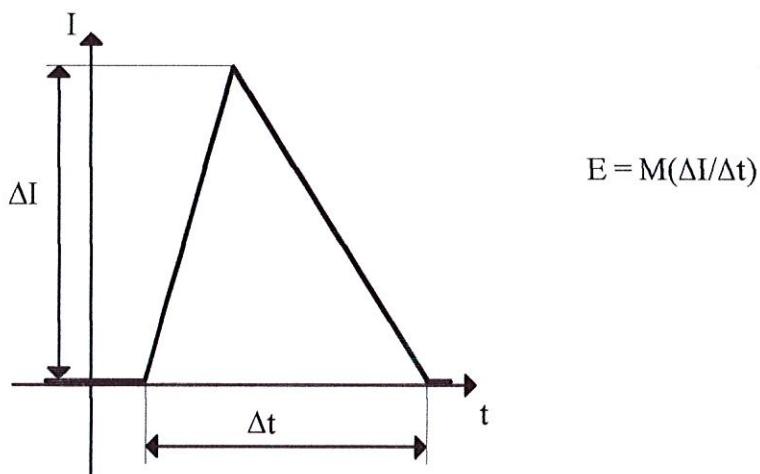
$$U = 1200 \text{ V} \quad \text{et} \quad f = 160 \text{ kHz environ}$$

L'application numérique donne une différence de potentiel de 1200V aux bornes du contact de bouton poussoir, ce qui justifie l'apparition d'un arc électrique. L'apparition de cet arc engendre une baisse de la tension d'où une extinction de l'arc. La tension augmente à nouveau et le processus recommence.

Ceci se traduit par des variations de courant et de tension très rapides (de l'ordre de quelques nanosecondes) qui engendrent un flux proportionnel à l'induction magnétique, (elle-même proportionnelle au courant circulant dans le circuit du relais) et à la surface engendrée par la liaison numérique.

Toute variation du courant dans le circuit du relais engendre une variation de l'induction magnétique donc une variation de la FEM induite dans la liaison numérique.

La FEM induite est aussi donné par la formule $E = M (\Delta I / \Delta t)$, M étant la mutuelle inductance entre les deux circuits.



Il suffit pour diminuer cette FEM, de diminuer la variation du courant ou d'augmenter le temps pour passer de la valeur 0 à la valeur maximum.

L'impédance des fils étant considérée comme nulle, cette FEM induite se répartit au niveau des afficheurs et perturbe leur fonctionnement. Pour diminuer son incidence, deux solutions se présentent :

- éloigner les deux liaisons (chose très difficile à réaliser dans un chemin de câbles).
- diminuer la surface en regard des lignes d'induction.

Au niveau de la maquette, il existe plusieurs possibilités d'établir la liaison entre les deux extrémités à afficheurs numériques.

MANIPULATION

On dispose d'une maquette sur laquelle on travaillera avec les précautions et le soin habituel...

Dans un premier temps, on vérifiera le fonctionnement de la maquette et particulièrement l'apparition des perturbations générées par les commutations du relais.

Chacun des 2 boîtiers en cuivre (contenant "l'électronique") sera relié par l'arrière au plan de masse du fond de valise par une tresse.

On détaillera le contenu des ensembles de liaison de la valise :

- une liaison non blindée.
- une liaison blindée avec liaison à la masse aux extrémités par tresse.
- une liaison blindée avec liaison à la masse à 360° à une extrémité (équivalent d'une tresse de longueur nulle).
- une liaison blindée avec liaison à la masse à 360° aux deux extrémités (équivalent de 2 tresses de longueur nulle).
- un fil d'accompagnement vert-jaune (blindage de proximité connecté à chaque extrémité sur les boîtiers en cuivre par vis ailette).
- Une goulotte métallique (avec couvercle amovible) pouvant être raccordée à la masse à ses extrémités par tresses et vis à ailette.
- Une goulotte métallique (avec couvercle amovible) raccordée à la masse à ses extrémités par plaque métallique assurant un contact parfait par le dessous des boîtiers en cuivre (équivalent de 2 tresses de longueur nulle).

BLINDAGE PAR ECRAN OU FIL D'ACCOMPAGNEMENT - LIAISONS A LA MASSE

On étudiera toutes les possibilités offertes :

- Raccordement de l'écran à une extrémité par tresse (sur le boîtier en cuivre considéré par vis ailette).
 - Raccordement de l'écran à une extrémité par contact 360° .
 - Proximité d'un fil d'accompagnement (fil jaune et vert à proximité de la liaison de transmission filaire non blindée).
 - Raccordement de l'écran aux deux extrémités par tresse (sur les boîtiers en cuivre par vis ailette).
 - Raccordement de l'écran aux deux extrémités par contact 360° .

Pour chaque essai, on jugera de l'influence de la distance entre 'victime' et 'agresseur' (par exemple, 3 distances différentes mesurées et notées).

BLINDAGE PAR GOULOTTE METALLIQUE - LIAISONS A LA MASSE

On étudiera toutes les possibilités offertes :

- Utilisation d'une goulotte non reliée à la masse.
- Utilisation d'une goulotte reliée à la masse à une extrémité avec différentes longueurs de tresse.
 - Utilisation d'une goulotte reliée à la masse aux deux extrémités avec différentes longueurs de tresse.

- Utilisation d'une goulotte avec couvercle reliée à un plan de masse aux deux extrémités.

Pour chaque essai, on jugera de l'influence de la distance entre 'victime' et 'agresseur' (par exemple, 3 distances différentes mesurées et notées).

CONCLUSION

Les résultats obtenus sont qualitatifs et à l'issue de la manipulation, on classera de manière qualitative l'efficacité du type de blindage sur la limitation des perturbations affectant la transmission numérique.

Au vu des manipulations précédentes, que peut-on dire de l'intérêt de liaisons courtes à la masse ? A quels phénomènes sont liés ces résultats ? Relier les conclusions aux résultats obtenus dans la partie II.

Cette première manipulation simple permet d'aborder la CEM du point de vue 'blindage' et précise l'importance essentielle à la fois de l'écran mais aussi de son raccordement à la masse vis-à-vis de la protection aux perturbations.

Elle permet de fixer les idées par des réalisations essentiellement pratiques et des résultats qualitatifs. La suite du TP (CEM2 – CEM3) s'oriente vers un aspect quantitatif et des mesures 'plus évoluées' et très proches du travail réalisé en milieu industriel.