

## Quelques expériences pour se familiariser avec les problèmes de la C.E.M.

par Michel LAMARCHE  
Lycée Jean Perrin - 13000 Marseille

### RÉSUMÉ

*Ces expériences réalisables avec du matériel simple : une pince ampèremétrique, un générateur BF jusqu'à 2 MHz et un oscilloscope 20 MHz. N'hésitez pas à « monter » jusqu'à 2 MHz, n'hésitez pas à court-circuiter le GBF pour le transformer en générateur de courant : le constructeur a ajouté une résistance de 50  $\Omega$  en sortie pour des raisons d'adaptation, accessoirement elle limite le courant dans les transistors de sortie et protège donc l'appareil. Ce GBF représentera notre source de parasites. Dans les expériences 1.6. à 2.4., nous verrons comment ces parasites peuvent apparaître dans un autre circuit « victime ».*

### 1. TOUT SE COMPLIQUE !

#### 1.1. Harmoniques du secteur et parasites conduits

Il faut rappeler aux élèves qu'une « prise de courant » est un générateur de tension et que le courant qui en sort dépend de ce qu'on y branche. Au moyen d'une pince ampèremétrique, on peut visualiser sans danger le courant consommé par une lampe, un tube fluorescent, un sèche-cheveux à demi-puissance, le téléviseur ou l'ordinateur : seule la lampe consomme un courant sinusoïdal (figure 1). Trois autres appareils identiques branchés sur les trois phases forment une installation triphasée équilibrée et pourtant le courant qui passe dans le neutre n'est pas nul.

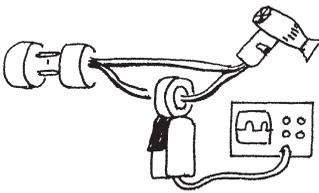


Figure 1

Étudions le courant consommé par le générateur BF, il n'est pas sinusoïdal. Court-circuitons le générateur, amplitude au maximum, fréquence de l'ordre de 500 Hz. Le courant consommé est perturbé au rythme du 500 Hz (en cas d'échec, essayer jusqu'à 2 MHz, le BF posé sur l'oscilloscope...).

Si l'on branche la pince ainsi (figure 1a), on observe le courant de **mode différentiel** : somme du courant 50 Hz qui apporte la puissance à l'appareil et du courant parasite créé par l'appareil et qui va se refermer dans le réseau EDF ; mais si l'on branche ainsi (figure 1b), les effets du courant différentiel se retranchent, on s'attendrait à un signal nul et nous constatons l'existence d'un courant parasite de **mode commun** qui parcourt les deux fils d'alimentation dans le même sens et vont revenir à l'appareil par le fil de terre, le sol et la capacité parasite entre le sol et l'appareil... Il doit diminuer quand on éloigne l'appareil du sol. Si bien que précédemment nous ne visualisions pas exactement le courant différentiel...

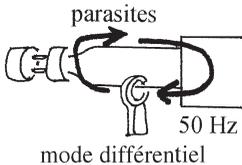


Figure 1a

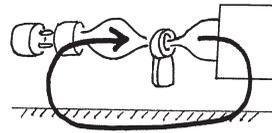


Figure 1b

## 1.2. Les normes habituelles concernent les parasites 30 MHz à 1 GHz

Dans ce domaine des hautes fréquences, les comportements sont inhabituels, il est difficile de mesurer sans matériel spécialisé. On peut penser au récepteur radio, toutefois pour celui-ci un signal sinusoïdal ne présente aucun message et ne correspond à aucun son (il faudrait donc un parasite modulé en amplitude ou en fréquence), d'autre part le contrôle automatique de gain ne permet pas une mesure de l'amplitude.

**L'entrée de l'oscilloscope est capacitive** (20 pF par exemple) si bien que son impédance d'entrée, grande (1 M $\Omega$ ) à basse fréquence, chute à 1 k $\Omega$  à 8 MHz, il peut perturber le système et conduire à des valeurs trop faibles. Observons la tension aux bornes d'un générateur BF : elle est constante, proche de sa f.é.m., mais si nous portons sa résistance interne à 10 k $\Omega$ , il n'en est plus de même à 100 kHz (figure 2).

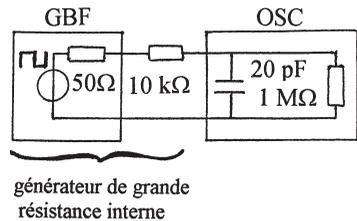


Figure 2

Souvent on utilise un câble blindé «50  $\Omega$ » pour amener le signal à l'oscilloscope, le fait que celui-ci ne présente pas une résistance de 50  $\Omega$  entraîne une réflexion du signal, des ondes stationnaires, mais le phénomène est négligeable en sinusoïdal si on se limite à 20 MHz et à 1 m de câble.

Quant à la paire de fils, son impédance caractéristique est mal définie mais on a l'avantage de pouvoir les prendre très courts.

### 1.3. Un fil n'est pas un court-circuit

Branchons un fil de 50 cm aux bornes du générateur et observons la tension aux bornes du fil (figure 3). Elle est nulle à basse fréquence mais augmente à haute fréquence. Le fil présente en effet une inductance donc une impédance qui fait diviseur de tension avec la résistance interne du générateur. Cette inductance dépend de la longueur du fil, de la forme de la boucle (environ  $0,6 \mu\text{H}$  soit  $7 \Omega$  à 2 MHz). Quand la fréquence devient trop grande, la capacité d'entrée de l'oscilloscope intervient et complique l'étude. **Pour réaliser l'égalité entre les potentiels de deux points, il faut les joindre par un fil le plus court possible.**

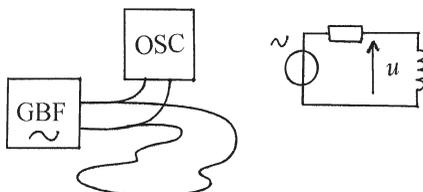


Figure 3

### 1.4. Un condensateur n'est pas parfait

Réalisons le montage de la figure 4 avec un condensateur électrochimique en aluminium. Le générateur délivre un signal décalé pour que le condensateur soit convenablement polarisé, l'oscilloscope est en AC. Lorsque la fréquence augmente, la tension diminue comme prévu, puis augmente, ceci s'explique par le fait que le condensateur est équivalent à une capacité en série avec une petite inductance. Pour filtrer les parasites HF, il faut des condensateurs de bonne qualité.

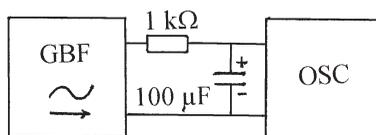


Figure 4

### 1.5. Une diode n'est pas parfaite

Dans le montage de la figure 5, le générateur délivre une tension  $u_e$  carrée  $-5 \text{ V}$ ,  $+5 \text{ V}$ , 10 kHz. Quand elle est en inverse, la zone de jonction de la diode vide de porteurs de charge, se comporte comme un condensateur. Quand  $u_e$  devient positive, cette capacité chargée fait que  $u_r$  est supérieure à  $u_e$ . Quand  $u_e$  devient négative, la zone de jonction diode qui était conductrice

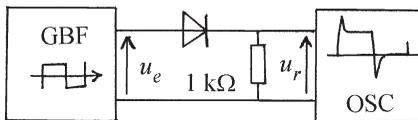


Figure 5

contient des porteurs de charge et la diode restera conductrice tant que ces porteurs de charge ne seront pas éliminés, d'où l'existence d'un courant inverse. Les pointes de tension  $u_r$  peuvent doubler l'amplitude des harmoniques HF de  $u_r$ . Des oscillations peuvent également apparaître lors du blocage.

### 1.6. Un signal basse fréquence peut créer des parasites haute fréquence

Un signal carré est très riche en harmoniques, ainsi un générateur BF délivrant un carré 100 Hz peut-il être détecté par un récepteur radio réglé sur ondes moyennes (1 MHz), ou un carré 10 kHz sur la bande MF (100 MHz) (figure 6). A défaut de générateur modulable en fréquence par une tension extérieure, utiliser un wobulateur avec un balayage interne, de faible amplitude mais de vitesse la plus élevée possible.

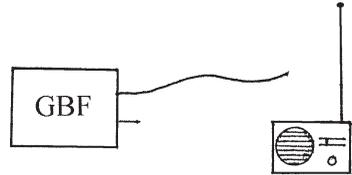


Figure 6

## 2. LES COUPLAGES

### 2.1. Couplage par rayonnement

C'est l'expérience précédente. Près de l'antenne, sa forme intervient, près d'un fil on aura surtout du champ électrique, près d'une boucle : du champ magnétique. Mais à une distance de l'ordre du cinquième de la longueur d'onde, on ne peut plus faire la distinction : on observe une onde électromagnétique et on peut faire quelques calculs simples.

La puissance émise se disperse, deux fois plus loin, elle est répartie sur une surface quatre fois plus grande (figure 7). La puissance reçue par mètre carré étant proportionnelle au carré du champ électrique, deux fois plus loin le champ est deux fois plus petit, soit un affaiblissement de  $20 \cdot \log(2) = 6$  dB.

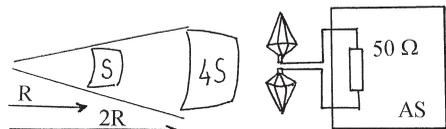


Figure 7

L'enregistrement en rayonné (figures 1 et 4 de l'article «CEM» concernant l'émission de parasites engendrés par un oscilloscope numérique) montre un champ électrique de  $40 \text{ dB}\mu\text{V/m}$  vers 35 MHz. La mesure a été faite à 3 m de l'appareil, donc à une distance telle que l'onde électromagnétique s'est organisée ( $\lambda = c/f = 10 \text{ m}$ ,  $\lambda/5 = 2 \text{ m}$ ).

$40 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m} = 20 \log (E/1 \mu\text{V}/\text{m})$ , la valeur efficace du champ est donc de  $100 \mu\text{V}/\text{m}$ , celle du champ magnétique est donnée par  $E/H = 377 \Omega$ . Si l'antenne réceptrice avait été placée deux fois plus loin de l'appareil source de champ, on aurait mesuré  $40 - 6 = 34 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$ .

Si la suite de l'histoire vous intéresse, sachez qu'à cette fréquence, le constructeur indique que son antenne, chargée par  $50 \Omega$ , a un facteur de 15 dB. Donc  $40 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$  reçus correspondent à  $40 - 15 = 25 \text{ dB}\mu\text{V}$  soit  $18 \mu\text{V}$  à la sortie de l'antenne, les  $50 \Omega$  sont réalisés par la résistance d'entrée de l'analyseur de spectre. L'antenne et l'analyseur sont reliés par un câble « $50 \Omega$ » afin d'éviter des réflexions parasites, l'analyseur qui a en mémoire les caractéristiques de l'antenne a converti au niveau de l'affichage les  $18 \mu\text{V}$  en valeur de champ électrique. Sachez enfin que la bande passante du filtre sélectif de l'analyseur est de 120 kHz, donc toutes ces valeurs sont attribuées à une fréquence qui serait unique entre  $35 \text{ MHz} - 60 \text{ kHz}$  et  $35 \text{ MHz} + 60 \text{ kHz}$ .

Pour interrompre le couplage par rayonnement, il faut blinder. Rappelons qu'**une paroi isolante laisse passer l'onde, qu'une paroi conductrice l'arrête** (la réfléchit).

*Exemple* : votre poste de radio en MF (100 MHz) fonctionne normalement derrière la vitre de la fenêtre ; enfermez-le dans une boîte de biscuits métallique il ne reçoit plus rien. Toutefois en ondes longues (200 kHz) vous l'entendez encore à travers la boîte, l'épaisseur de peau est comparable à l'épaisseur du métal, nous retiendrons qu'il est difficile de se protéger du champ magnétique basse fréquence.

## 2.2. Couplage capacitif

C'est encore la même expérience qu'au § 1.6. mais cette fois nous nous plaçons tout à côté de l'antenne, et comme il n'y a que du champ électrique, au lieu de voir une antenne émettrice et une réceptrice côte à côte, nous voyons un condensateur (figure 8).

Remarquons que les masses des deux appareils sont reliées par la prise de terre. Le fil relié au GBF a 50 cm de long, il est placé contre le fil du circuit récepteur, la capacité «parasite»  $C$  entre les deux fils est de l'ordre de 0,6 pF. L'expérience en sinusoïdal montre que la tension  $u$

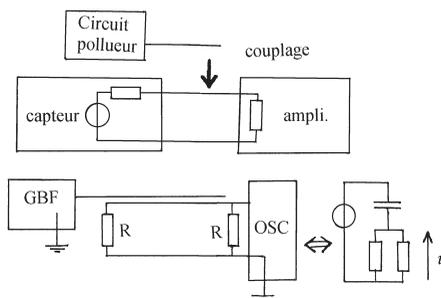


Figure 8

entre les deux fils est de l'ordre de 0,6 pF. L'expérience en sinusoïdal montre que la tension  $u$

aux bornes de R augmente avec la fréquence et avec la valeur de R ( $R = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $10 \text{ k}\Omega$ ,  $100 \text{ k}\Omega$ ). L'étude en triangles montre qu'à basse fréquence le système dérive (filtre CR, en fait  $R/2$ ) et qu'à haute fréquence, il recopie (diviseur de tension entre C et la capacité d'entrée de l'oscilloscope).

Le GBF peut être interprété comme un circuit aux tensions importantes et riches en harmoniques haute fréquence, l'autre circuit comme un circuit sensible, la résistance R de gauche représentant par exemple la résistance interne d'un capteur et la résistance R de droite celle de l'appareil de mesure. Quand la f.é.m. du capteur est nulle (c'est le cas de notre montage), on imagine recevoir une tension  $u$  nulle mais il y a les parasites...

### 2.3. Couplage inductif (figure 9)

Même expérience, mais ici le BF impose le courant dans une boucle. Celle-ci crée un champ B (au centre  $= \mu_0 \cdot i / \text{longueur de la boucle}$ ). Il naît une f.é.m.  $e = -d\phi/dt$  dans l'autre boucle. En régime sinusoïdal on constate que  $u$  augmente avec la fréquence mais ne dépend pas de R (maintenez l'égalité des résistances). L'étude en triangles montre que le système dérive bien jusqu'à 1 MHz.

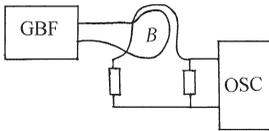


Figure 9

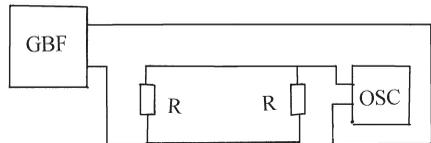


Figure 10

### 2.4. Couplage par impédance commune (figure 10)

La résistance mais surtout l'inductance du grand fil commun aux deux circuits fait qu'une partie du signal perturbateur créé par le GBF se retrouve en  $u$  aux bornes de l'oscilloscope, d'autant plus grande que la fréquence est grande.

## 3. QUELQUES CONSEILS

De façon générale, il faut éviter les boucles de grande surface et les fils qui n'aboutissent à rien : ce sont des antennes qui émettent des parasites ou les recueillent. C'est ainsi qu'il est maladroit d'amener un signal à l'oscilloscope par deux longs fils séparés.

### 3.1. Utilisation d'une porte logique CMOS

Les fils ou les pistes doivent être proches pour éviter les boucles. Une entrée de porte «en l'air» est une antenne prête à capter des parasites, l'impédance d'entrée est très grande et il suffit de très peu de puissance ( $p = u^2/R$ ) pour la faire basculer.

Au moment de son basculement, une porte consomme du courant et va faire légèrement chuter la tension d'alimentation, ceci peut perturber les autres portes.

Ceci est mis en évidence par ce montage «d'école» (figure 11). R est réglé juste en-dessous de la valeur correspondant au basculement de la porte, si les entrées de porte de droite sont en l'air, elles captent des parasites 50 Hz et font basculer ces portes, la faible chute de la tension d'alimentation qui en résulte fait basculer la porte de droite car sa tension d'entrée est maintenue constante par le condensateur (oscilloscope synchronisé sur *line*).

C'est une bonne habitude que de placer un condensateur de 100 nF contre le circuit intégré pour le protéger des parasites extérieurs et court-circuiter ceux qu'il crée.

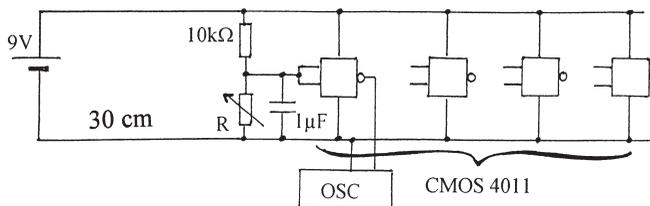


Figure 11

### 3.2. Alimenter plusieurs circuits

Le montage s'effectuera en étoile (figure 12) de façon à ce que les courants parasites créés par un circuit ne pénètrent pas dans l'autre.

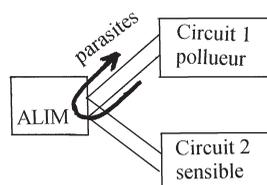


Figure 12

### 3.3. Transmettre un signal d'un appareil à l'autre

La figure 13 montre l'existence d'une petite boucle où naissent les courants parasites de mode différentiel (iPMD) et d'une grande boucle où naissent les parasites de mode commun (iPMC) dus au couplage par rayonnement avec un champ, par impédance commune avec un courant circulant dans le sol...

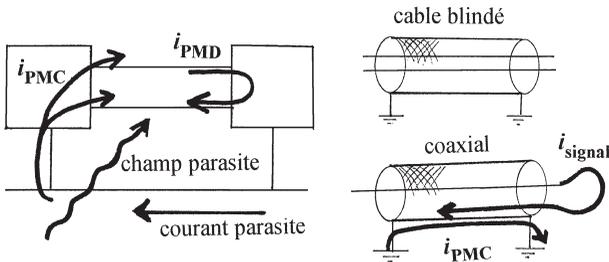


Figure 13

Le blindage de la liaison (tube métallique enfermant les deux fils de la liaison) résout théoriquement le problème :  $i_{PMD}$  n'existe plus,  $i_{PMC}$  circule sur la paroi extérieure du tube.

Un champ parasite basse fréquence pénètre toutefois dans l'épaisseur du blindage. Dans le cas d'une liaison par câble coaxial où le courant «signal» passe sur la face interne de la gaine et  $i_{PMC}$  sur la face externe de cette paroi très ténue, la protection sera donc médiocre en basse fréquence. A propos de ce coaxial, il est important que chaque extrémité de la gaine soit reliée à la masse : quand on branche un oscilloscope sur un circuit alimenté par un GBF, utiliser seulement le fil central du coaxial sous prétexte que les masses du GBF et de l'oscilloscope sont reliées par la prise de terre est une mauvaise habitude car elle fait naître une gigantesque boucle de mode commun.

La boucle de mode commun peut être réduite en plaquant la liaison sur le sol, sur des goulottes métalliques reliées au sol, on peut la couper avec un transformateur, un amplificateur de différence, un photocoupleur ou mieux une fibre optique.

L'influence du champ sur la boucle de mode différentiel peut être considérablement réduite en torsadant les fils de liaison, les f.é.m. induites dans deux spires voisines s'annulent (figure 14). Il faut un nombre pair de boucles dans chaque région où le champ est uniforme. Le procédé est économique et efficace pour se protéger du champ magnétique 50 Hz.

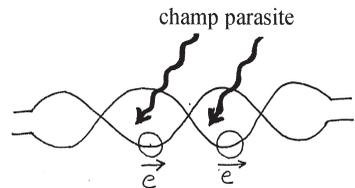


Figure 14

Les résultats de ces expériences dépendent du matériel, de la disposition des objets et de l'environnement. J'espère qu'elles ont été concluantes et qu'elles vous ont aidé à comprendre certaines précautions mises en œuvre dans l'industrie.