

# Rayonnement électromagnétique dans les câbles en faisceaux à basse tension

B. Benazza<sup>1</sup>, A. Bendaoud<sup>1</sup>, H. Slimani<sup>1</sup>, F. Benhamida<sup>1</sup>, H. Miloudi<sup>1</sup>, A. Tilmatine<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire IRECOM, Université Djilali Liabès  
Sidi Bel Abbès 22000, Algeria

[heureuxboss123@yahoo.fr](mailto:heureuxboss123@yahoo.fr), [babdelber22@yahoo.fr](mailto:babdelber22@yahoo.fr)

**Résumé**— Pour décider d'un schéma de câblage, le concepteur doit avoir à sa disposition des outils de prédiction fiables, rapides et souples d'utilisation. Les questions auxquelles doit répondre l'ingénieur de conception sont :

- Où placer le câblage ?

- Comment le faire cheminer ?

Des réponses à ces questions dépendent les couplages électromagnétiques. Et de ces questions simples découle alors une autre question importante:

- Comment caractériser un fil en fonction de son emplacement ?

Il est possible de caractériser le fil par les dimensions et la forme de sa section, par son matériau et sa longueur. L'emplacement est, quant à lui, caractérisé par l'écartement vis-à-vis des autres fils, une hauteur par rapport à la masse, ainsi que la manière dont le fil y est fixé. Nous verrons que les faisceaux peuvent regrouper un grand nombre de signaux différents. Les moyens de propagation d'une perturbation d'un fil à l'autre sont multiples et les risques qui en découlent sont nombreux. Il devient alors primordial de bien maîtriser les couplages entre fils quels que soient la topologie et l'emplacement du faisceau. Ce présent travail traite le comportement électromagnétique pour ce type de câble.

**Mots clés** – Compatibilité Electromagnétique, Modélisation, câbles en faisceaux, couplage électromagnétique.

## I. INTRODUCTION

Cette étude se porte essentiellement sur le comportement électromagnétique d'un ou deux fils au-dessus d'un plan de masse. Le résultat attendu est l'établissement d'un schéma équivalent des câbles et du plan de masse. Nous devons donc avoir les moyens d'effectuer des simulations de ce type de faisceau. L'outil de simulation utilisé doit permettre de s'interfacer avec des logiciels de simulation électrique afin de se connecter aux modèles existants [1].

Enfin, il s'agit de pouvoir estimer rapidement les conséquences d'un changement de topologie du faisceau de câble. Une simulation très rapide doit pouvoir nous permettre d'essayer de nombreux cas différents, ce qui permettra d'en déduire des règles de conception des câblages. La grande diversité des fils constituant le bus barre en termes de forme et de disposition fait l'objet de nombreuses discussions.

La hauteur, l'écartement et la forme des fils sont autant de sujets qui demanderaient la réalisation d'un prototype pour en tester l'impact.

## II. CÂBLES UTILISÉS ET ARCHITECTURE

### A. Section

Dans le domaine de la basse tension nous avons fréquemment affaire à des sections de câble compris entre 0,15 mm<sup>2</sup> à 200 mm<sup>2</sup>. Mais la diversité des consommateurs impose toute la gamme de tailles entre les deux extrêmes précédemment cités. Afin de faire une étude aussi exhaustive que possible nous allons considérer des tailles de câble d'une section allant de 0,2mm<sup>2</sup> et 176mm<sup>2</sup> (respectivement de 0,5mm à 15mm de diamètre). L'épaisseur de l'isolant utilisé pour le câblage est variable selon le courant maximum et la section du fil [1]. Les contraintes de cet isolant sont multiples, telles que la résistance au feu, à la torsion, au frottement et bien sur diélectrique.

### B. Distance vis-à-vis de la masse

Les fils sont assemblés en faisceaux à l'aide de différentes techniques, comme un recouvrement par un tissu ou par un revêtement autocollant ou encore l'utilisation d'un tube en PVC annelé ouvert. Ces faisceaux sont attachés à la masse à l'aide de clips plastiques ou métalliques. Ces méthodes de mise en faisceaux augmentent la distance minimale d'un fil vis-à-vis de la masse. Cette distance vis-à-vis de la masse doit être encore augmentée pour les fils de grosse section qui nécessitent généralement une fixation plus robuste et généralement plus épaisse [1].

### C. Disposition

Le faisceau est le regroupement de tous les fils allant dans la même direction. Il n'y a aucune raison que tous ces fils aient la même fonction, ni la même section. Cependant les contraintes physiques obligent le faisceau à être le plus petit possible car il va réduire l'espace entre conducteurs au strict minimum. Dans le cas d'un faisceau de 7 fils de même taille, la configuration qui permet la plus petite section du faisceau est celle représentée à la Fig. 1

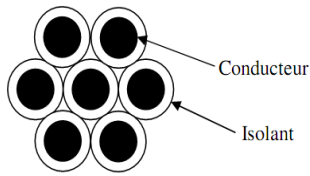


Fig. 1. Faisceau de 7 fils

### III. LIAISONS DE MASSE

La Fig. 2 montre une connexion d'un fil à la masse par goujon. Ce type de connexion est relativement courant dans les applications industrielles [1].

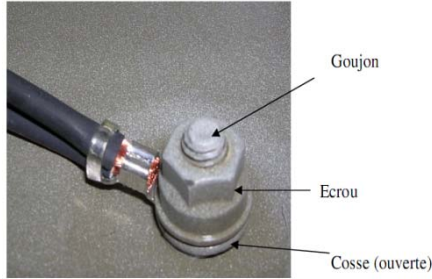


Fig. 2. Connexion de masse sur goujon

#### A. Liaison masse /goujon

Il peut exister plusieurs moyens de solidariser la masse avec le goujon. Les plus simples sont l'emboutissage et la soudure. L'emboutissage consiste à insérer de force un goujon dans une ouverture de plus petite dimension que sa propre taille. La soudure consiste à positionner le goujon à l'endroit souhaité, puis de faire passer un courant très élevé entre celui-ci et l'endroit où il doit être fixé. Ce courant traverse alors toutes les résistances de contact présentes entre le goujon et la masse. Comme ces résistances peuvent atteindre et dépasser le milliohm, elles génèrent suffisamment de puissance instantanée pour provoquer la fusion du point de contact. Ce point de contact en fusion présente une impédance supérieure aux points contacts alentours, ces derniers se voient traverser à leur tour par le courant très élevé [1].

#### B. Liaison goujon / cosse

Le goujon permet de plaquer, par l'action d'un écrou, une rondelle et une cosse ouverte ou fermée selon les besoins du montage. Cette cosse étamée est généralement en laiton ou en acier. L'étamage contribue à réduire la résistance de contact existant entre la cosse et le plan de masse [1,2]. Pour les fréquences plus élevées, le courant a tendance à rester à la surface et parcourt le chemin le plus simple comme le montre la Fig. 3.

#### C. Liaison cosse / fil

Deux cas de figure peuvent se présenter selon la puissance exigée par la liaison. Le cas le plus simple est un sertissage classique (Fig. 4). Cette liaison permet de véhiculer des courants faibles de quelques ampères au maximum.

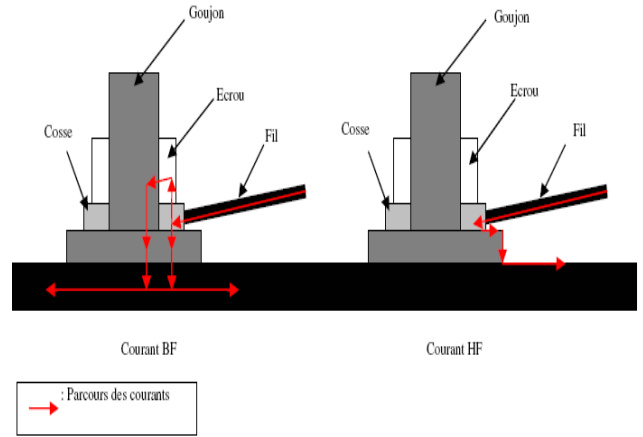


Fig. 3. Courant au niveau des goujons



Fig. 4. Position de la soudure sur cosse

### IV. LES COUPLAGES ENTRE FILS

#### A. Couplages capacitifs

Un faisceau présent est constitué d'un nombre plus ou moins important de fils parallèles. Dans le cas d'un couplage simple entre deux fils (Fig. 5), la valeur de la capacité linéique de couplage peut être exprimée à l'aide de l'équation (1)

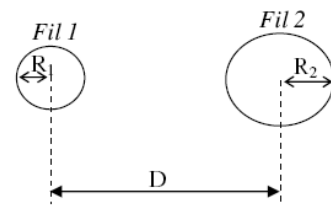


Fig. 5. Couplage capacitif entre deux fils

$$C / l = \frac{2\pi\epsilon}{\arg \cosh (A)} \quad [\text{F/m}] \quad (1)$$

$$\text{Avec : } A = \frac{D^2 - R_1^2 - R_2^2}{2R_1R_2} \quad (2)$$

$R_1$  : rayon du premier fil (en m)

$R_2$  : rayon du second fil (en m)

$D$  : Entraxe des fils (en m)

$\epsilon$  : Permittivité du milieu (en F/m)

Dans le cas de fils de même dimension ( $R_1=R_2=R$ ), l'expression (1) se simplifie et devient celle présentée à l'équation (3).

$$C/l = \frac{\pi\epsilon}{\arg \cosh \left( \frac{D}{2R} \right)} \quad [\text{F/m}] \quad (3)$$

De plus, si  $D \gg 2R$  :

$$C/l = \frac{\pi\epsilon}{\ln \left( \frac{D}{2R} \right)} \quad [\text{F/m}] \quad (4)$$

Ces formules ne sont valables que dans le cas de deux fils simples isolés. En pratique, dans le cas des faisceaux, nous sommes généralement face à un ensemble de fils isolés au-dessus d'un plan de masse [1]. Les formules analytiques se compliquent alors rapidement et ne permettent pas d'effectuer le calcul pour toutes les topologies. Dans le cas de deux fils de même dimension, parallèles et placés au-dessus d'un plan de masse, la capacité linéique entre fils est calculée en utilisant l'expression de l'équation (5) [12]

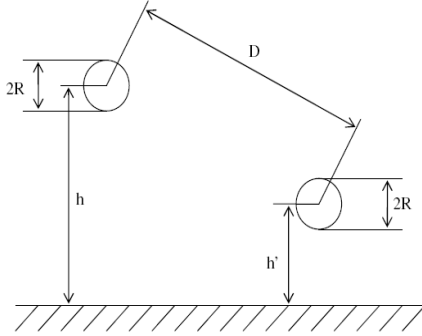


Fig. 6. Présentation de deux fils au-dessus d'un plan de masse

$$C = \pi\epsilon / \ln \left( \frac{D}{R \sqrt{1 + \frac{D^2}{4hh'}}}} \right) \quad [\text{F/m}] \quad (5)$$

Malheureusement, cette formule donne le couplage capacitif entre les fils en intégrant les capacités de fuite à la masse. Si nous supposons les deux fils totalement indépendants, nous avons besoin de connaître la capacité de chaque fil vis-à-vis de la masse ainsi que la capacité de couplage entre ces fils. Nous présentons ici un exemple d'utilisation du logiciel Matlab pour déterminer les couplages entre 7 fils disposés au-dessus d'un plan de masse.

Cette topologie nous permet d'étudier le comportement des capacités entre fils et vis-à-vis du plan de masse. Chacun des 7 conducteurs est de 1 mm de diamètre, le plan de masse est représenté par un trait. La distance minimale entre les fils et le plan de masse est de 9 mm.

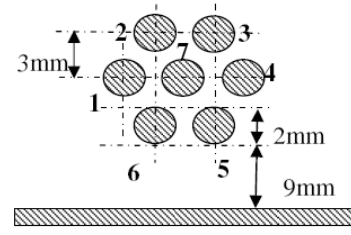


Fig. 7. Simulation d'un groupe de 7 fils

Les valeurs des capacités parasites dans les faisceaux sont généralement comprises entre quelques pF/m et 50 pF/m. La Fig. 8 montre un montage de test simple pour visualiser l'effet d'un couplage capacitif.  $C_1$  tient le rôle du couplage proprement dit.

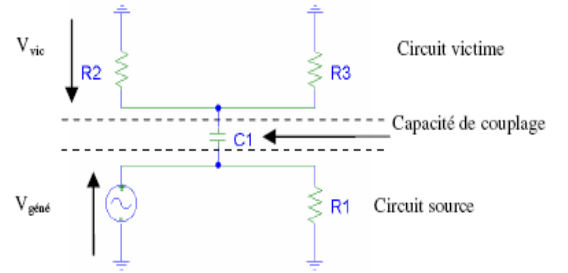


Fig. 8. Couplage capacitif

Dans ce cas, le couplage est donné par le rapport entre la tension du circuit source  $V_{\text{géné}}$  et la tension  $V_{\text{vic}}$  aux bornes de  $R_2$ . En supposant  $R_2=R_3=R$ , le couplage  $G_c$  sera de la forme suivante :

$$G_c = \frac{jRC\omega}{2 + jRC\omega} \quad (6)$$

Cette fonction de transfert est celle d'un passe-haut caractérisé par une fréquence de coupure  $f$  donnée par :

$$f = \frac{1}{\pi RC} \quad (7)$$

Les courbes de la Fig. 9 nous présente le couplage capacitif entre deux fils de 1 mm de diamètre ( $0,75 \text{ mm}^2$ ) en fonction de leur distance et leur hauteur par rapport à la masse.

Le couplage capacitif au sein d'un faisceau est relativement faible et ne représente que quelques centaines de picofarads dans le cas de plusieurs mètres de faisceau. La valeur du couplage est d'autant plus faible que les fils sont éloignés à l'intérieur du faisceau, à la condition que les fils intermédiaires soient de faible impédance de terminaison. Il est très intéressant de profiter des fils de faibles impédances, comme les alimentations, en les dispersant le plus possible dans le faisceau pour qu'ils profitent au maximum de fils. Il reste les perturbations transitoires de forte tension. Celles-ci sont généralement causées par l'ouverture de circuits inductifs, elles sont normalement limitées pour tous les appareils présents dans l'industrie.

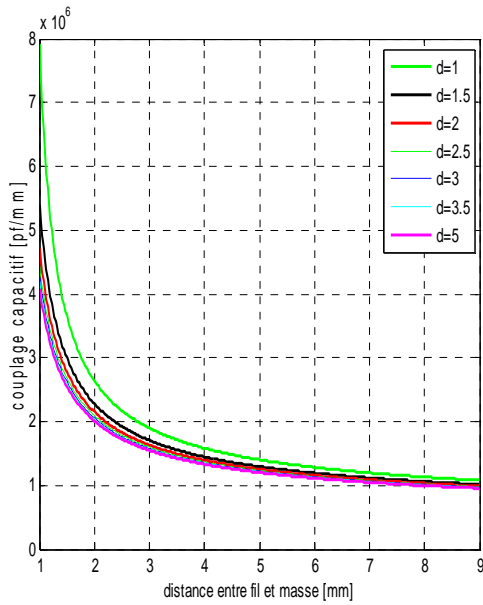


Fig. 9. Couplage capacitif en fonction de la distance entre fils

### B. Couplages inductifs

Le couplage inductif intervient lorsque le champ magnétique engendré par un courant circulant dans une boucle génère, dans une autre boucle qu'il traverse, une tension.

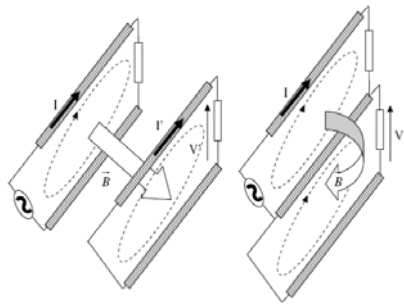


Fig. 10. Couplage inductif

Ces boucles peuvent être produites par des paires de câbles (Fig. 10 à gauche) ou par des câbles et leurs retours par le plan de masse (Fig. 10 à droite). Dans ce dernier cas il est assez difficile de faire la part des choses entre le couplage inductif et le couplage par impédance commune, puisque l'un des conducteurs servant à faire les boucles est commun aux deux circuits.

La formule analytique la plus connue (8) considère que le fil est de très petite dimension devant sa hauteur (Fig. 11). Malheureusement dans le cas d'un faisceau directement posé sur le plan de masse cette hypothèse est rarement valable.

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{4h}{d}\right) \quad [\text{H/m}] \quad (8)$$

Une expression plus générale permet d'obtenir l'inductance d'un fil quelconque selon la répartition du courant dans sa section [4] :

- Courant uniforme :

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \operatorname{argcosh}\left(\frac{2h}{d}\right) \quad [\text{H/m}] \quad (9)$$

- Courant non uniforme :

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \log \left[ \frac{2h}{d} + \sqrt{\left(\frac{2h}{d}\right)^2 - 1} - \left(\frac{d}{4h}\right)^2 + (\dots)^4 \right] \quad [\text{H/m}] \quad (10)$$

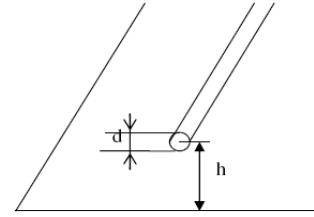


Fig. 11. Inductance d'un fil au dessus d'un plan de masse

Sur la Fig. 12 nous présentons l'évolution de l'inductance linéique d'un fil au-dessus d'un plan de masse en fonction de son diamètre et de sa hauteur vis-à-vis du plan de masse. Nous utilisons la formule de l'équation (9) en considérant un courant uniforme, ce qui explique la limite de la hauteur qui évolue selon le diamètre du fil.

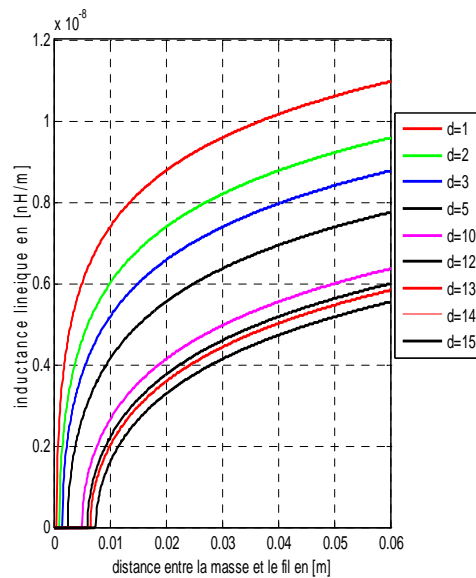


Fig. 12. Couplage inductif en fonction de la distance entre fils

Pour tenir compte de l'inductance mutuelle, nous allons étudier le cas où le couplage inductif semble être le plus élevé. Il s'agit de deux fils présents dans le même faisceau.

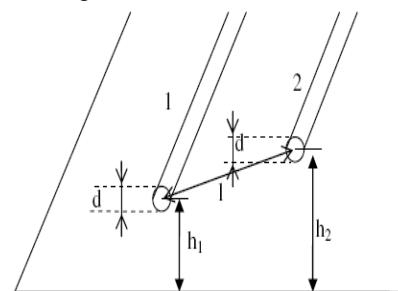


Fig. 13. Disposition de deux fils

$$L_1 = \frac{\mu_o}{2\pi} \ln \left( \frac{4h_1}{d} \right) \quad [\text{H/m}] \quad (11)$$

$$L_2 = \frac{\mu_o}{2\pi} \ln \left( \frac{4h_2}{d} \right) \quad [\text{H/m}] \quad (12)$$

$$L = \frac{\mu_o}{\pi} \ln \left[ \frac{2l}{d \sqrt{1 + \frac{l^2}{4h_1h_2}}} \right] \quad [\text{H/m}] \quad (13)$$

La Fig. 13 permet de comprendre les paramètres utilisés dans les formules de l'équation (11) (12) (13).  $L_1$  et  $L_2$  sont les inductances des fils seuls,  $L$  est l'inductance linéique d'un circuit constitué des fils 1, 2, 3 et 4 en considérant les fils 1 et 2 de grande longueur devant les fils 3 et 4.  $L$  est également appelée inductance de mode différentiel.

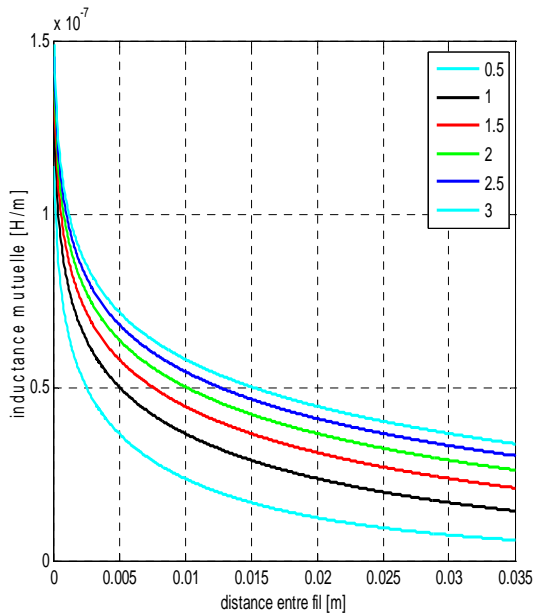
Ainsi  $L = L_1 + L_2 - 2M$

$M$  étant l'inductance mutuelle entre les deux fils.

Nous obtenons donc :

$$M = \frac{\mu_o}{4\pi} \ln \left( \frac{4h_1h_2}{l^2} + 1 \right) \quad [\text{H/m}] \quad (14)$$

Le nombre de paramètres à étudier est trop élevé pour une présentation simple. Nous allons nous placer dans le cas où  $h_1 = h_2$ . Le graphe de la Fig. 14 nous présente le coefficient de couplage entre deux fils de 1 mm de diamètre ( $0,75 \text{ mm}^2$ ) en fonction de leur hauteur et de leur distance.



**Fig. 14 : Couplage inductif (dû à la mutualité) en fonction de la distance entre fils.**

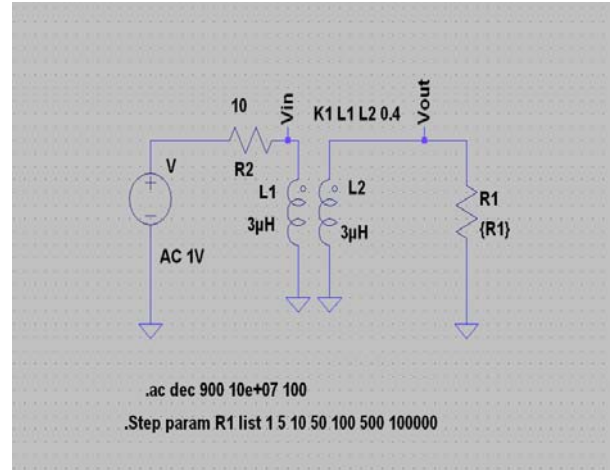
En règle générale, les fils sont placés les uns à côté des autres dans les faisceaux. Nous sommes donc souvent à des distances de l'ordre de 3 mm.

Dans le cas de deux fils identiques, un coefficient de couplage de 100% signifie qu'une différence de potentiel aux

bornes d'un fil se retrouve intégralement sur l'autre fil lorsque celui-ci est en circuit ouvert. L'impédance de terminaison de chaque fil intervient au niveau de ces couplages.

Contrairement aux couplages capacitifs, le couplage inductif est généralement très fort dans les faisceaux. Le coefficient de couplage entre deux fils du même faisceau est généralement proche de 30%. Nous devons donc tenir compte de ce couplage, en déterminer sa valeur et évaluer ses variations en fonction des modifications géométriques du faisceau.

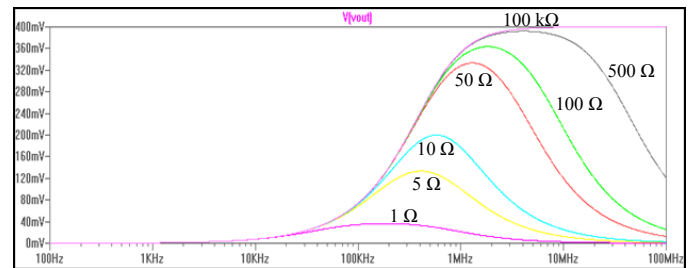
Afin de visualiser l'évolution du couplage entre deux fils en fonction de l'impédance du fil victime nous simulons à l'aide de LTSpice le circuit présenté à la figure 15.



**Fig. 15. Couplage entre deux fils**

Les figures 16 et 17 présentent le résultat du couplage en fonction de la fréquence selon la résistance de la victime pour un coefficient de couplage de  $k=0,4$  ensuite pour  $k=0,2$ . Dans ces figures, on a représenté le rapport entre la tension aux bornes de la victime par rapport à la source de tension pour différentes résistances ( $R_1 = 1 ; 5 ; 10 ; 50 ; 100 ; 500 ; 100000 \Omega$ ).

Le facteur de couplage influe considérablement malgré qu'il ait une valeur limite à des fréquences différentes. Nous nous apercevons que sur la figure 17 correspondant à un coefficient de couplage de  $k=0,2$ , les courbes ont des comportements très semblables à un facteur près mais le rapport a diminué par rapport à celles pour  $k=0,4$  (Fig. 16).



**Fig. 16. Couplage entre perturbateur et victime : coefficient  $k=0,4$**



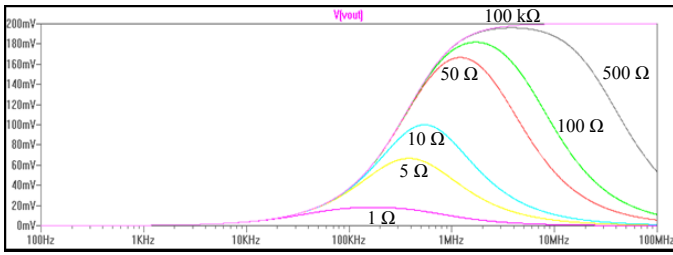


Fig. 17. Couplage entre perturbateur et victime : coefficient  $k=0,2$

### C. Couplages par impédance commune

Le couplage par impédance commune est très courant dans le domaine de basse tension. Comme évoqué précédemment, dans ces conditions, le couplage inductif se superpose obligatoirement au couplage par impédance commune [1].

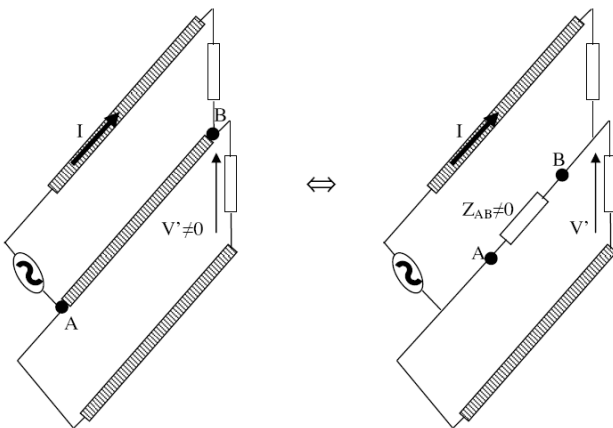


Fig. 18. Impédance commune

La Fig. 18. présente de manière simplifiée le couplage par impédance commune où un circuit génère un courant perturbateur  $I$  dans une impédance commune  $Z_{AB}$  non nulle. La tension  $V'$  aux bornes de la victime est proportionnelle à ces deux valeurs.

Les constructeurs ont déjà réalisé en interne un certain nombre d'études sur les résistances constituant les connexions de masse. Il s'avère que les plus fortes valeurs se situent au niveau des contacts entre les différents éléments. Les résistances des contacts sont généralement de l'ordre du milliohm et que leur réduction passe par la modification des surfaces mises en contact, de la force d'écrasement ainsi que de la dureté et de la conductivité des matériaux.

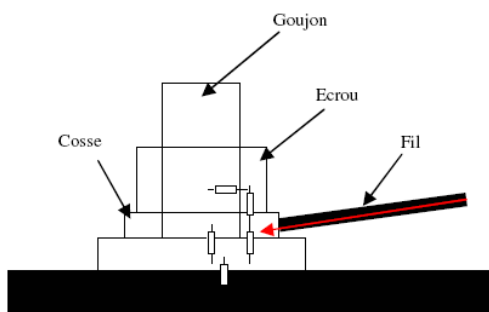


Fig. 19. Exemple de connexion

Dans l'exemple de la Fig. 19, nous voyons que la résistance entre le fil et le plan de masse est constituée d'un ensemble de résistances de contact en série. Ce qui n'était qu'un couplage inductif (parfois fort) devient un couplage par impédance commune. Nous retrouvons la nécessité de calculer dans tous les cas les inductances des fils au-dessus du plan de masse. Donc, l'impédance de ce couplage est en majorité constituée des inductances dont nous avons déjà parlé précédemment. L'ajout des résistances de contact présentes au niveau des goujons peut permettre d'améliorer le modèle.

## V. CONCLUSION

Nous avons étudié les différents types de couplages existants. Nous constatons que le couplage capacitif nous provoque des capacités de faibles valeurs (quelques pF/m) dans la plage de petites fréquences.

En ce qui concerne les inductances, nous voyons que leurs influences sont multiples, autant sur les couplages entre fils que sur les valeurs des impédances communes. La connaissance des différentes valeurs d'inductances propre et mutuelle est prépondérante pour répondre à la demande qui est la connaissance de la transmission des parasites basses fréquences.

## VI. REFERENCES

- [1] F. DUVAL : « gestion du câblage des masses électriques dans un véhicule automobile application c.e.m » 2007.
- [2] J.D. LAVERS, R.S. TIMSIT, « Constriction resistance at high signal frequency » IEEE Transactions on Packaging Technologies, Volume 25, Issue 3, Sep 2002 Page(s): 446 – 452
- [3] E.DURAND, Electrostatique et magnétostatique Ed. Masson & Cie
- [4] F.B.J. LEFERINK, « Inductance calculations; methods and equations » IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1995. Symposium Record. 1995 Issue , 14-18 Aug 195 Page(s):16 – 22
- [5] M. NAKHLA et R. ACHAR : « Fundamentals of Multiconductor Transmission Line Analysis » (ISBN 0-9731047-2-4; First Edition: May 1, 2002; Omniz Global Knowledge Corporation)
- [6] N.Idir. R.Bausière, J.J.Franchand « identification des chemins de propagation des courants perturbateurs dans un variateur électronique de vitesse » CEM 2004
- [7] G. Gay .A. Riboulot .A. guignabel « les perturbations électromagnétique basse et haute fréquence ».Intersections documentation.le magazine Schneider électrique de l'enseignement Technologique et professionnel.Juin 2000
- [8] [3] V. Costa, S. Caniggia, L. Catello, "On the Computation of Electromagnetic Field Components From a Transmission Line: Theory and Application", IEEE, 1990.
- [9] C. Gary, "Approche Complète de la propagation Multifilaire en Haute Fréquence par Utilisation des Matrices Complexes", EDF Bulletin de la Direction des Etudes et Recherches, série BN° ¾, pp. 5-20, 1976.
- [10] R. S. Shi, "Rayonnement Electromagnétique des Réseaux Electriques à Topologie Complexe", Thèse de Doctorat de l'INPG. Grenoble 1992.
- [11] F. Issa, M. Rick, M. Senesi and E. Marthe, "Power line communication using medium voltage networks", Proc. GCC
- [12] J. Newbury and J. Yazdani, "From narrow to broadband communications using the low voltage power distribution network", International Symposium on PLC and its applications, pp. 120-124, Kyoto, Japan, 2003.
- [13] J. A. Brandão Faria, "Multiconductor transmission-line structures", Wiley Interscience, 1993.
- [14] C. R. Paul, "Analysis of multiconductor transmission lines", Wiley Interscience, 1994.