

Propagation en mode commun dans les chemins de câbles

S. Bazzoli⁽¹⁾, A. Charoy⁽²⁾

(1) Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
Centre DAM Île de France – Bruyères-le-Châtel 91297 ARPAJON Cedex
sebastien.bazzoli@cea.fr

(2) Société AEMC
86, rue de la Liberté – 38180 SEYSSINS
a.charoy@aemc.fr

Résumé:

Les perturbations électromagnétiques à haute fréquence se couplent principalement en mode commun sur les câbles. Ces courants peuvent perturber des équipements distants. Ce papier présente des mesures de la transmission du courant de mode commun le long de câbles dans des chemins de câbles (CdC) métalliques ordinaires, capotés ou non. L'analyse du phénomène montre qu'un effet de guide d'onde permet à un CdC de propager des perturbations à grande distance. Quelques solutions sont proposées pour réduire cette propagation.

I Introduction

Dans les bâtiments industriels ou les installations scientifiques, des équipements génèrent un environnement sévère pour des équipements sensibles, tels certains systèmes de mesure ou de contrôle commande.

Pour limiter les problèmes de CEM, une solution classique consiste à éloigner les équipements vulnérables des équipements bruyants. Des câbles électriques peuvent néanmoins propager du bruit depuis les zones perturbées jusqu'aux zones calmes.

Ce papier traite de la propagation des perturbations de mode commun le long de câbles posés dans un CdC métallique.

La première partie rappelle les propriétés des modes de propagation en conduction.

La seconde partie présente le dispositif expérimental de mesure de l'atténuation des courants en mode commun le long de câbles posés dans un chemin de câble métallique, capoté ou non.

La troisième partie présente les résultats et décrit les phénomènes observés : résonances et l'effet de guide d'onde.

La quatrième partie propose quelques solutions pour limiter cet effet de guide d'onde.

II Modes de propagation

Un courant de mode commun circule dans le même sens sur les conducteurs d'un câble, ou à l'extérieur de son écran. Inversement, un courant de mode différentiel circule en sens inverse sur les fils d'une paire (cf. Figure 1).

Une tension de mode commun se mesure entre les fils du câble et la masse du système. Une tension de mode différentiel se mesure directement entre les deux fils d'une paire.

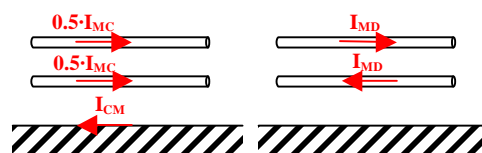


Figure 1 : Mode commun et mode différentiel

Ce papier n'étudie que la propagation de perturbations de mode commun (MC) le long des câbles. Les signaux différentiels - supposés utiles - se propagent de façon prévisible, par un effet de ligne.

III Configuration expérimentale

La configuration expérimentale consiste à injecter un courant à l'extrémité d'un câble et à le comparer à celui qui arrive à l'autre bout. Le courant est injecté, puis mesuré, par deux pinces de couplage identiques, type MDS, (Meyer de Stadelhofen, cf. Figures 2 et 3). Le

générateur de poursuite d'un analyseur de spectre est connecté à la première pince dite « pince d'injection »; son entrée est reliée à la seconde, dite « pince de mesure ».

Pour limiter le couplage par les câbles d'alimentation ou de mesure, la connexion entre la pince de mesure et l'analyseur de spectre utilise une fibre optique, avec des transmetteurs alimentés par batteries.

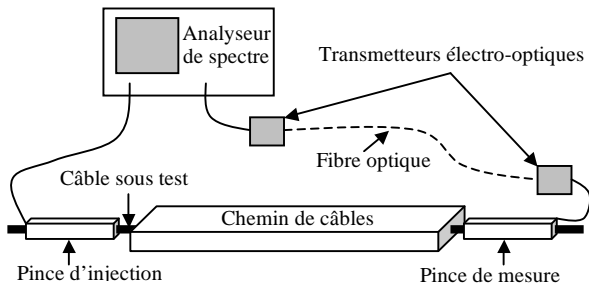


Figure 2 : Configuration de mesure

Le calibrage de l'expérience consiste à normaliser la transmission avec les 2 pinces en contact (cf. Figure 3). Cette mesure donne la référence 0 dB (coefficient de transmission = 1) de la mesure d'atténuation.



Figure 3 : Pinces MDS en position de calibrage

Pour toutes les mesures de ce rapport, la distance entre les pinces est de 10 m. Tous les câbles ayant servi aux mesures sont blindés par une tresse externe.

Afin d'évaluer l'effet du diamètre des câbles sur la transmission, 3 diamètres de câbles furent utilisés, un par un : 5,5 ; 11 et 17,5 mm. Dans la configuration de base, chaque câble est tiré, seul, dans un CdC fermé par un capot. Le CdC et son couvercle sont métalliques.

IV Résultats et analyses

Les figures 4a à 4c montrent le coefficient de transmission, mesuré entre 30 MHz et 2 GHz, pour les 3 diamètres de câbles.

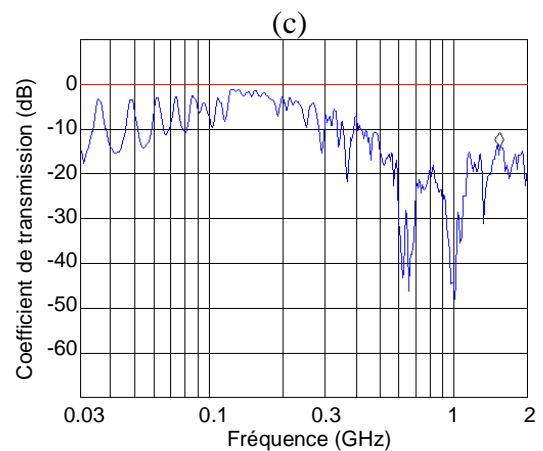
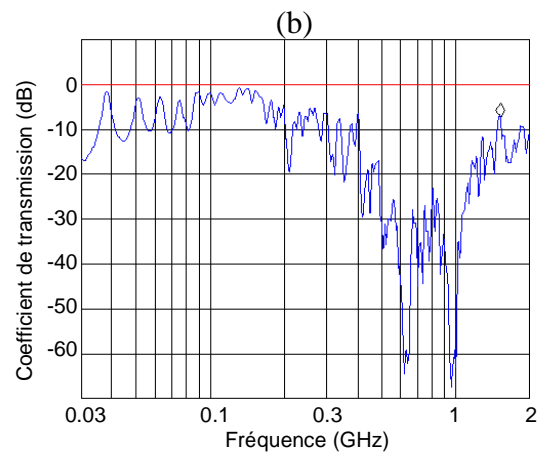
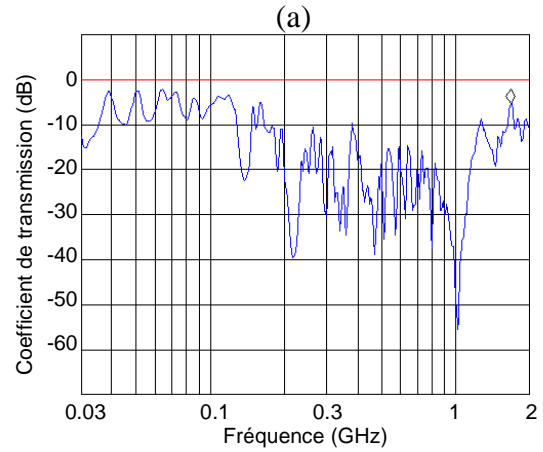


Figure 4: Coefficient de transmission de câbles longs de 10 m de $\varnothing=5.5\text{mm}$ (a), $\varnothing=11\text{mm}$ (b) ou $\varnothing=17,5\text{mm}$ (c).

L'enveloppe globale de l'atténuation linéique, exprimée en dB/m, varie sensiblement en $\frac{1}{\sqrt{F}}$

jusqu'à 1 GHz. Mais, d'autres phénomènes apparaissent : des résonances au-dessous de 100 MHz et un effet de guide d'onde.

IV.1 Résonances

Au-dessous de 100 MHz, des résonances apparaissent à des fréquences multiples de 12 MHz. Cette fréquence correspond à une résonance en $n \times$ demi-longueur d'onde d'un câble de 10 m, avec une vitesse du courant de mode commun de $2,4 \cdot 10^8$ m/s.

Pour les câbles d'un diamètre de 11 et de 17,5 mm, un creux de transmission apparaît vers 630 MHz. La profondeur du creux dépend de l'éloignement entre les pinces, mais la fréquence du creux ne dépend que du câble.

La cause de ce phénomène inattendu est un défaut périodique répétitif au pas de torsade des conducteurs internes, ce qui provoque un creux de propagation en MC. Aucun défaut visuel n'est apparent, mais la mesure du pas des torsades révèle une longueur de 20 cm, ce qui prédit un trou de transmission à 600 MHz. Pour valider cette hypothèse, le nombre de torsades a été réduit de 10%. La Figure 5 montre que la nouvelle fréquence de résonance, environ 580 MHz, est réduite de 10%. Inversement, si le nombre de torsades est augmenté de 10%, la fréquence de résonance augmente alors de 10%.

Ceci démontre que la torsade des conducteurs du câble blindé atténue la propagation du courant de MC à certaines fréquences.

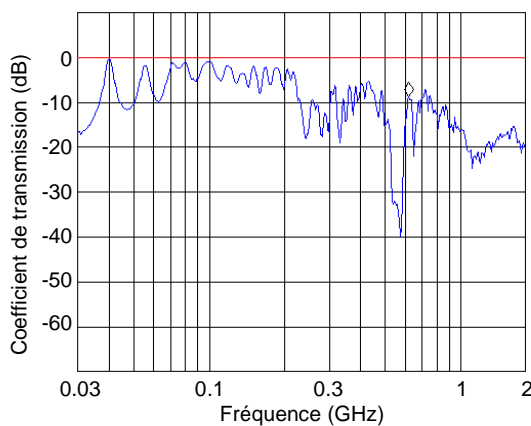


Figure 5: Coefficient de transmission d'un câble de 10 m $\varnothing=17.5$ mm, avec torsades 10 % plus longues.

IV.2 Effet de guide d'onde

Au-dessus de 1 GHz, pour chaque câble, le coefficient de transmission augmente, alors que les pertes du câble, augmentant avec la fréquence, devraient au contraire réduire la transmission à très hautes fréquences.

Comment expliquer l'observation inverse ? Par son enveloppe métallique, un CdC agit comme un guide d'onde au-delà de sa fréquence de coupure (soit à 1 GHz pour une largeur – ici – de 15 cm = $\lambda/2$ dans l'air).

Pour valider cette hypothèse, le câble fut sectionné au milieu du CdC. Le coefficient de transmission mesuré dans cette configuration est donné en Figure 6. On observe que la transmission augmente brusquement à partir de 1 GHz, avec de faibles pertes (0,5 dB/m), malgré la coupure électrique du câble.

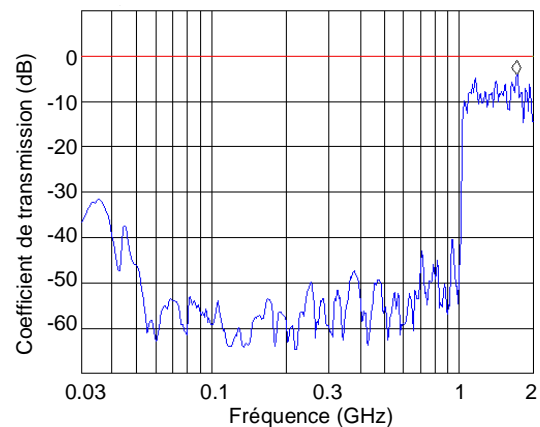


Figure 6 : Coefficient de transmission du câble de 17.5 mm sectionné au milieu du chemin de câble.

Ce résultat montre qu'un chemin de câble presque vide améliore la propagation des perturbations de mode commun au-dessus de sa fréquence de coupure (largeur = $\lambda/2$).

Pour compléter cette observation sur l'effet de guide d'onde et le taux de remplissage du CdC, les mesures montrent qu'il suffit qu'un chemin de câbles soit rempli à 20% pour que son effet de guide d'onde disparaisse.

De même, si le capot du CdC est enlevé (cf. Figure 6), le coefficient de transmission est réduit dès les fréquences basses, sans doute à cause des pertes par rayonnement. Au-dessus de 1 GHz, l'effet de guide d'onde disparaît, et le coefficient de transmission en dB/m diminue au moins comme F à cause du rayonnement et des pertes diélectriques.

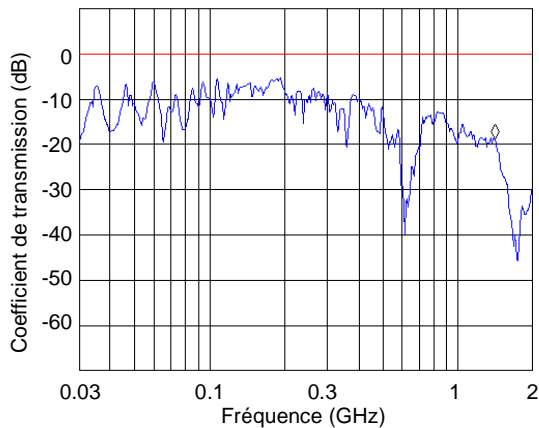


Figure 6: Coefficient de transmission du câble de 17.5 mm dans un CdC métallique sans couvercle.

Si le câble est posé directement sur un sol en béton, sans CdC, les pertes au-delà de 100 MHz deviennent très importantes (cf. Figure). Ces pertes sont dues à celles du béton (amortissement par proximité), ainsi qu'à l'effet d'antenne (pertes par rayonnement).

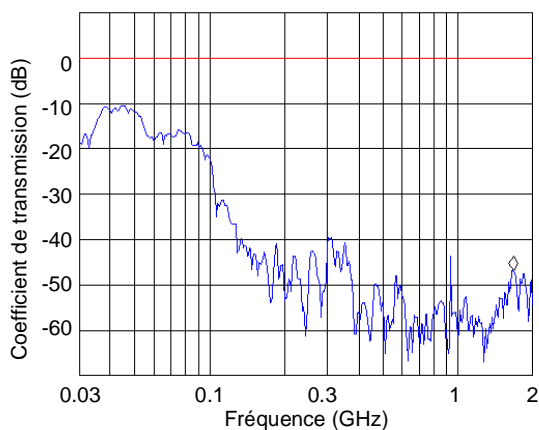


Figure 8 : Coefficient de transmission du câble de 17,5 mm posé directement au sol, sans CdC.

Ainsi, les CdC favorisent la propagation des perturbations de mode commun au-dessus de 100 MHz. Pourtant les chemins de câbles sont utiles par leur effet d'écran électromagnétique et par leur protection efficace contre les effets de la foudre. Des techniques d'atténuation doivent être envisagées afin de réduire l'effet de guides d'onde des CdC presque vides.

V Atténuation de l'effet de guide

Pour réduire l'effet de guide d'onde, plusieurs techniques sont possibles: augmenter les pertes ou réfléchir l'énergie qui se propage dans le chemin de câble.

V.1 Augmentation des pertes

La méthode la plus simple pour augmenter les pertes est d'ajouter des câbles dans le CdC de façon à le remplir au moins à 20% (cf. Figure 7). Les pertes diélectriques augmentent, et le coefficient de transmission est réduit aux fréquences très élevées (cf. Figure 8).



Figure 7: CdC amorti par d'autres câbles

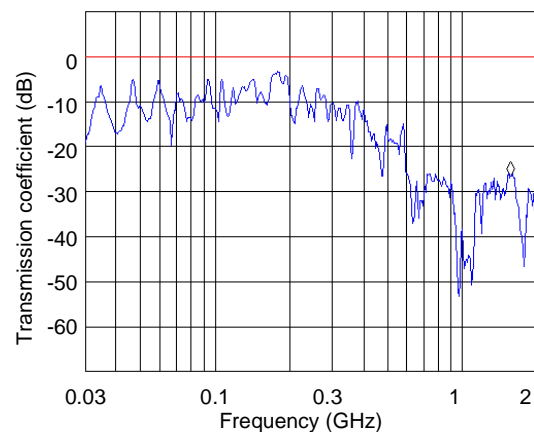


Figure 8: Coefficient de transmission du câble de 17,5 mm dans un CdC rempli à 20% par des câbles.

Si le nombre de câbles est insuffisant, il est possible d'ajouter des matériaux absorbants sur une petite longueur du chemin de câble.

V.2 Réduction de la propagation

En remplissant une petite longueur du CdC par des éléments métalliques, l'énergie électromagnétique sera réfléchi, donc se propagera moins. Cette méthode est simple et peu coûteuse. Il suffit d'ajouter du papier aluminium ou du joint conducteur.

La propagation est également réduite lorsque la direction du CdC change. L'efficacité de cette méthode dépend de la géométrie du chemin de câble, de la position des câbles, de la fréquence...

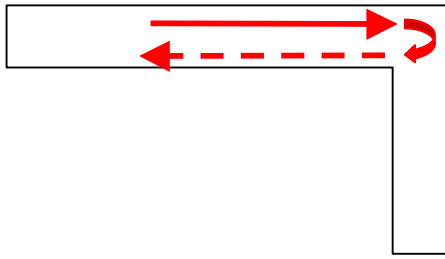


Figure 9: Réduction de l'effet de guide d'onde par un coude à angle droit du chemin de câble.

VI Conclusion

La transmission des perturbations en mode commun est fortement modifiée par un chemin de câble métallique.

À cause de son enveloppe conductrice, un chemin de câbles peut agir comme un guide d'onde, ce qui améliore la propagation des perturbations en mode commun aux très hautes fréquences, ce qui n'est pas souhaitable.

Pourtant les chemins de câbles bien reliés sont utiles par leur effet d'écran électromagnétique jusque vers 100 MHz, et par leur effet réducteur, très efficace contre les effets de la foudre.

C'est pourquoi l'effet de guide d'onde, observable à très hautes fréquences, lorsque le chemin de câble est trop peu rempli, doit être réduit par l'augmentation des pertes, par des réflexions localisées ou par la suppression de son couvercle (au prix d'une réduction de l'ordre de 6 dB de son efficacité de blindage).

Comme règle empirique approximative, la perte de transmission, en dB par mètre, $A_{dB/m}$, dans un chemin de câble métallique capoté - rempli à au moins 20% - peut être évalué, dans un pire cas (avec une petite marge), par :

- $A_{dB/m} = F^{0.5}$ jusque 1 GHz (avec F en GHz).

- $A_{dB/m} = F$ au-dessus de $F = 1$ GHz.

Ces relations empiriques en enveloppe ne dépendent ni du diamètre des câbles, ni de leur longueur, ni de leur nature, ni même du type de chemin de câble.