

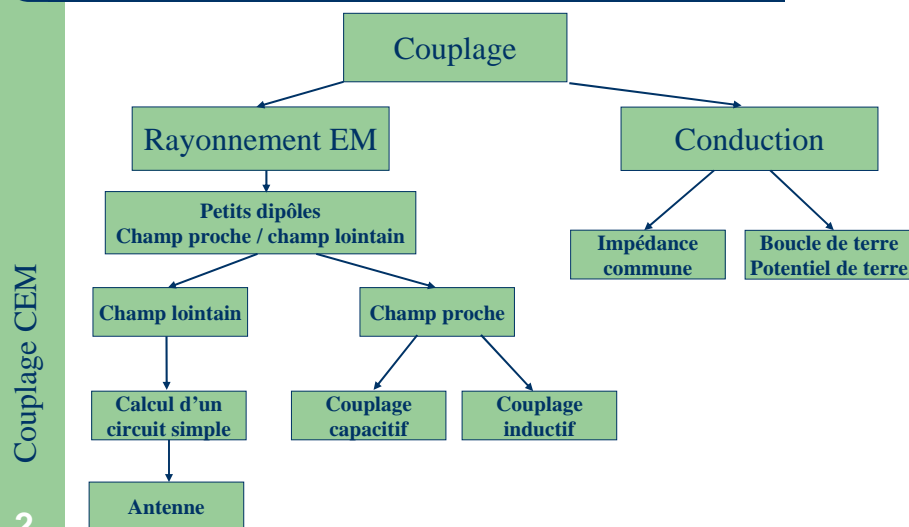
Introduction à la compatibilité électromagnétique (CEM)

3: Couplage des perturbations

J. Unger – heig-vd - 2006

1

Couplages – vision générale



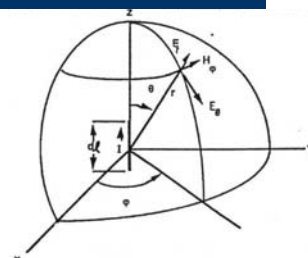
2

Rayonnement - définitions

- Longueur d'onde : $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3E8}{f} \text{ [m]}$
- Impédance d'onde: $Z_w = \frac{E}{H} \text{ [} \Omega \text{]}$
- Impédance du vide: $\eta_o = \sqrt{\frac{\mu_o}{\epsilon_o}} = 120\pi = 377 \text{ [}\Omega\text{]}$
- Constante de phase: $\beta_o = \frac{2\pi}{\lambda}$
- Distance à la source: $r \text{ [m]}$

Dipôle Hertzien (dipôle électrique)

- **Champ lointain** $r \gg \lambda/2\pi$
 - E & H orthogonaux à r ($E_r=0$)
 - Max dans (X-Y) nuls sur Z
 - Proportionnels à f
 - Proportionnels à $1/r$
 - $Z_w = 377\Omega = \eta_o$
- **Champ proche** $r \ll \lambda/2\pi$
 - E non perpendiculaire à r
 - E prop. à $1/r^3$
 - H prop. à $1/r^2$
 - Z_w variable $\gg 377\Omega = \eta_o$
 - Champ Haute Impédance



Spherical Coordinates

$$H_\phi = \frac{I dl}{4\pi} \beta_o^2 \sin \theta \left(j \frac{1}{\beta_o r} + \frac{1}{\beta_o^2 r^2} \right) e^{-j\beta_o r}$$

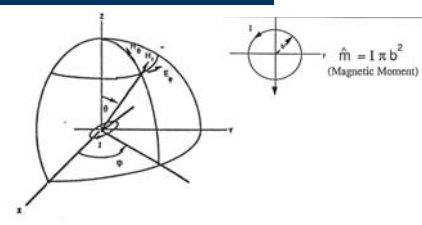
$$E_r = 2 \frac{I dl}{4\pi} \eta_o \beta_o^2 \cos \theta \left(\frac{1}{\beta_o^2 r^2} - j \frac{1}{\beta_o^3 r^3} \right) e^{-j\beta_o r}$$

$$E_\theta = \frac{I dl}{4\pi} \eta_o \beta_o^2 \sin \theta \left(j \frac{1}{\beta_o r} + \frac{1}{\beta_o^2 r^2} - j \frac{1}{\beta_o^3 r^3} \right) e^{-j\beta_o r}$$

$$H_r = H_\theta = E_\phi = 0$$

Boucle de courant (dipôle magnétique)

- **Champ lointain** $r \gg \lambda/2\pi$
 - E & H orthogonaux à r
 - Proportionnels à f^2
 - Proportionnels à $1/r$
 - $Z_w = 377\Omega = \eta_0$
- **Champ proche** $r \ll \lambda/2\pi$
 - H non perpendiculaire à r
 - H prop. à $1/r^3$
 - E prop. à $1/r^2$
 - Z_w variable $\ll 377\Omega = \eta_0$
 - **Champ Basse Impédance**



Spherical Coordinates

$$E_\phi = -j \frac{\omega \mu_0 \hat{m} \beta_0^2}{4\pi} \sin \theta \left(j \frac{1}{\beta_0 r} + \frac{1}{\beta_0^2 r^2} \right) e^{-j\beta_0 r}$$

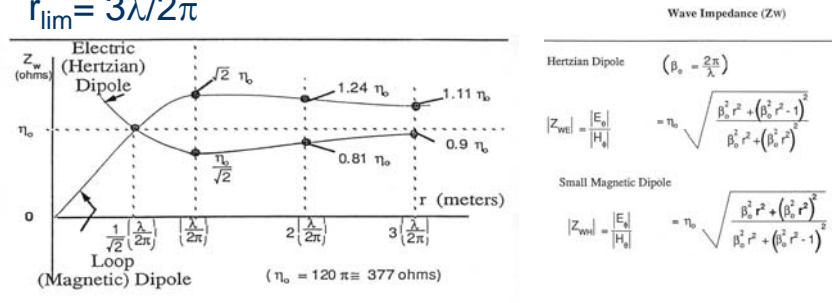
$$H_r = j 2 \frac{\omega \mu_0 \hat{m} \beta_0^2}{4\pi \eta_0} \cos \theta \left(\frac{1}{\beta_0^2 r^2} - j \frac{1}{\beta_0^3 r^3} \right) e^{-j\beta_0 r}$$

$$H_\theta = j \frac{\omega \mu_0 \hat{m} \beta_0^2}{4\pi \eta_0} \sin \theta \left(j \frac{1}{\beta_0 r} + \frac{1}{\beta_0^2 r^2} - j \frac{1}{\beta_0^3 r^3} \right) e^{-j\beta_0 r}$$

$$E_r = E_\theta = H_\phi = 0$$

Limite champ lointain – champ proche

- Critère math. $r_{lim} = \lambda/2\pi$
- Critère d'impédance d'onde $Z_w = \eta_0 \pm 10\%$
 $r_{lim} = 3\lambda/2\pi$



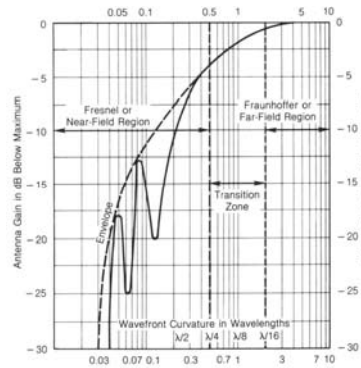
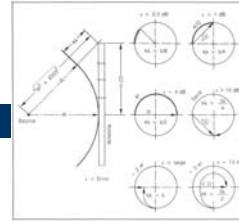
- Zone de Fraunhofer (courbure de champ)

Courbure de champ

- Soit D la dimension max de la source
- La différence de chemin entre les contributions du centre et des bords doit rester $< \lambda/16$ (calcul d'antenne), $< \lambda/8$ ou $< \lambda/4$ (CEM), pour considérer que l'on se trouve en zone de Fraunhofer (onde sphérique)

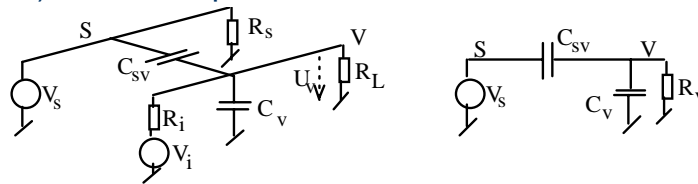
• R_{lim} :

erreur	$k\lambda$	r limite
0.1dB	$\lambda/16$	$2D^2/\lambda$
0.3 dB	$\lambda/8$	D^2/λ
1 dB	$\lambda/4$	$D^2/2\lambda$

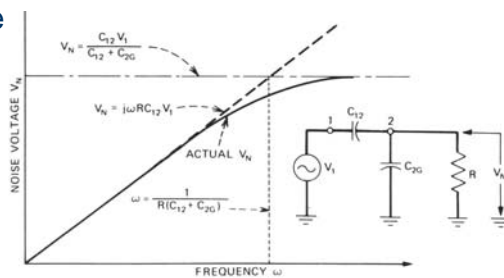


Couplage Capacitif – champ proche haute impédance

- A) Schéma équivalent



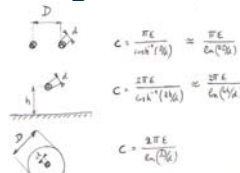
- B) Bode d'amplitude



Up = . Vs

Couplage Capacitif - protection

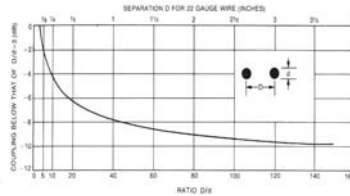
- C) Eloigner – Orienter: *peu efficace*



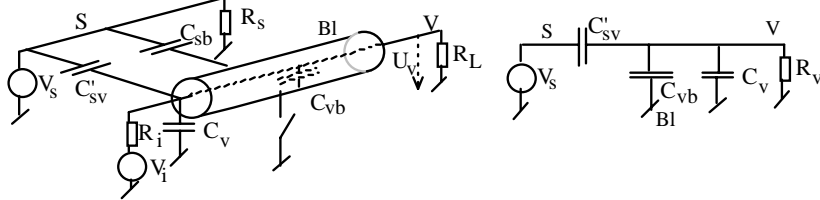
$$C = \frac{\pi \epsilon}{\ln(2D/r)} \approx \frac{\pi \epsilon}{\ln(2D/r)} \quad [F/m]$$

$$C = \frac{2\pi \epsilon}{\ln(2s/r)} \approx \frac{\pi \epsilon}{\ln(4s/r)} \quad [F/m]$$

$$C = \frac{3\pi \epsilon}{\ln(4s/r)} \quad [F/m]$$



- D) Blindage mis à terre

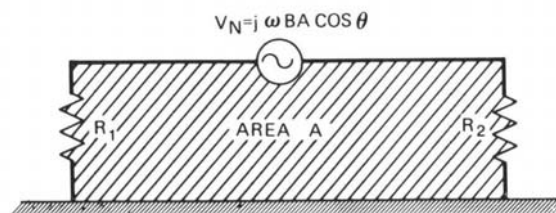
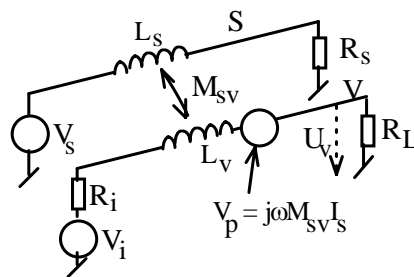


Couplage CEM

9

Couplage inductif – Champ proche basse impédance

- Dépend de la surface (et de l'orientation) de la boucle signal (aller-retour)
- $V_n = j\omega M_{sv} I_s$

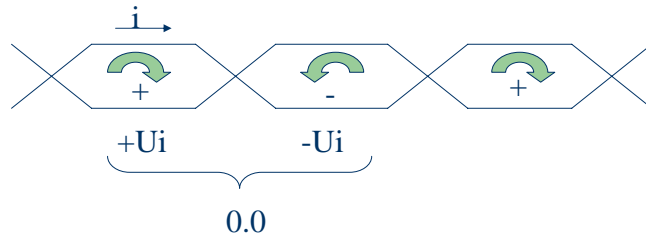


Couplage CEM

10

Couplage Inductif - Réduction

- Connaître et maîtriser le chemin de retour
- Torsader les paires aller-retour (réduire les surfaces et rotation de 180° des surfaces voisines d'ou annulation des tensions induites)



Couplage CEM

11

Couplage inductif

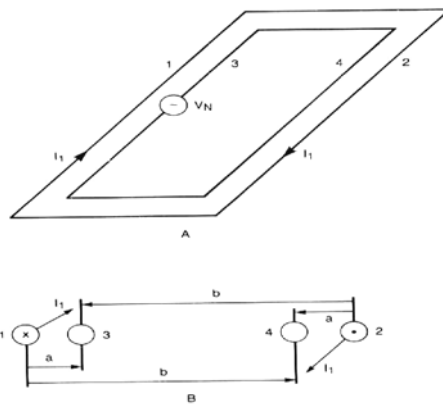
- Estimation de la mutuelle

$$B = \frac{\mu I}{2\pi r}$$

$$\Phi = \int_a^b \frac{\mu I}{2\pi r} dr = \frac{\mu I}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right)$$

$$M_{13} = \frac{\mu \ell}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right)$$

$$M_{tot} = \frac{\mu I}{\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right)$$



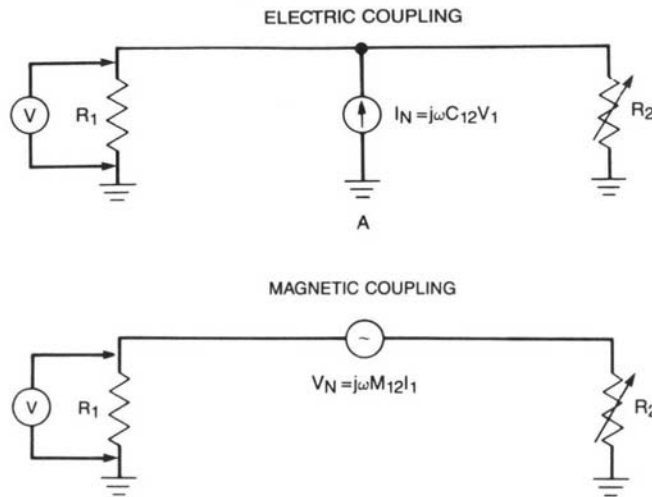
Couplage CEM

12

Comparaison couplage C et L

Couplage CEM

13

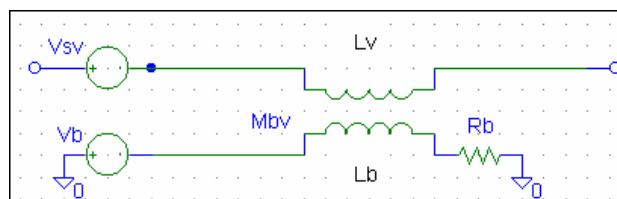


Influence du blindage sur le couplage L

Couplage CEM

14

- Blindage mis à terre en un seul point : pas d'effet
- Blindage mis à terre aux deux bouts:
 - Quasi-mêmes tensions dans le blindage (V_b) et le conducteur central (V_{sv})
 - V_b fait circuler un courant dans le blindage
 - Couplage 1:1 du blindage sur le conducteur central



Effet du blindage mis à terre aux deux bouts

Couplage CEM

15

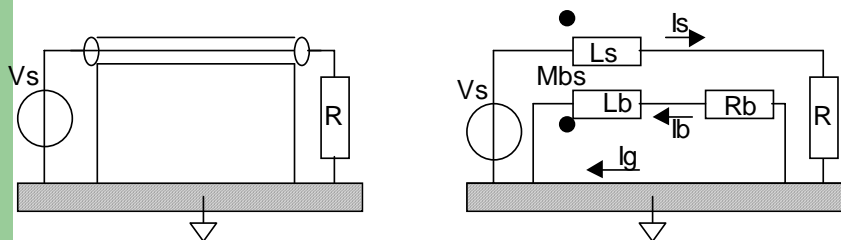
- Pulsation de coupure du blindage: $\omega_c = R_b/L_b$
 - De l'ordre du kHz
 - En dessus de ω_c la tension induite $V_{bv} \approx V_b$ mais de signe opposé -> tend à annuler le couplage
 - En dessous : $V_{bv} < V_b$ peu d'effet favorable
- Cet effet peut être utilisé tant pour diminuer le rayonnement (émissions) que pour se protéger d'un couplage externe

Diminution du rayonnement

Couplage CEM

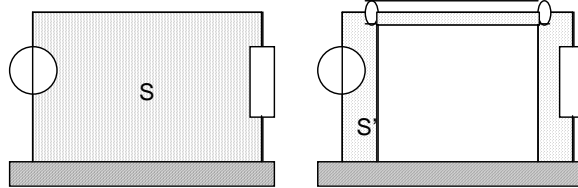
16

- Pour des sources de fréquence $\gg \omega_c$ le blindage relié aux deux bouts tend à forcer le chemin de retour dans le blindage plutôt que dans la terre, d'où une compensation des champs rayonnés par le conducteur et son blindage.



Blindage comme protection contre le couplage inductif

- En dessus de ω_c , le blindage a pour effet de diminuer la surface de couplage



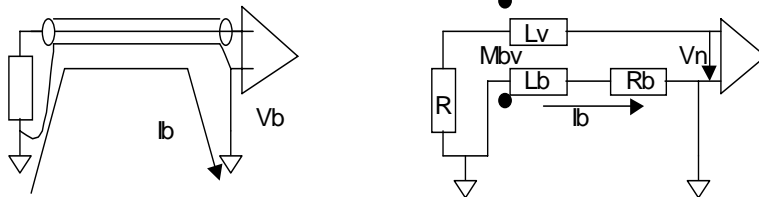
- Pour des signaux logiques cette solution est *recommandée* (les fréquences sont $\gg \omega_c$)

Couplage CEM

17

Effet défavorable:

- Pour des signaux analogiques (BF), non seulement il n'y a quasi pas d'amélioration, mais tout courant externe (= dû à d'autres sources) pouvant circuler dans le blindage, va provoquer une tension induite parasite dans le conducteur central. *A éviter*

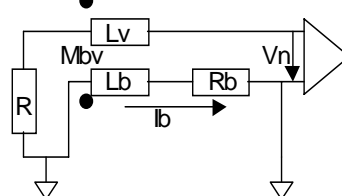
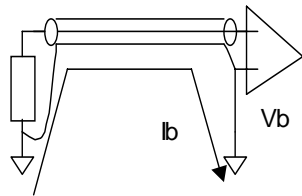


Couplage CEM

18

Impédance de transfert d'un câble blindé

- C'est le rapport entre la tension induite dans le conducteur central ($U_i = V_n$) et le courant (I_b) dans le blindage provoquant cette tension
- $Z_t = U_i / I_b$
 - Se spécifie graphiquement en fonction de la fréquence : en dc : R_b , puis diminue avec f
 - Les blindages tressés voient Z_t ré-augmenter avec f

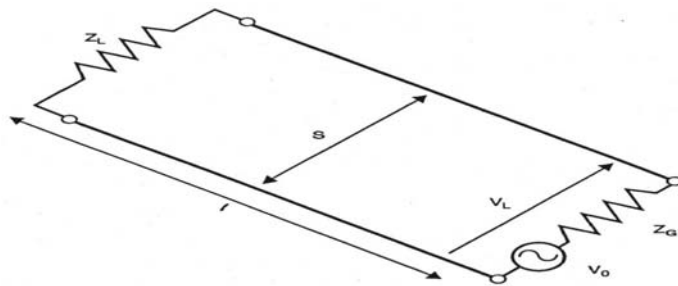


Résumé des couplages C et L

- Toujours blinder les câbles soumis à perturbation, et les mettre correctement à terre (connexion 360°, sans fil)
- Utiliser des paires torsadées pour le signal et son retour, maîtriser ce chemin de retour !
- Pour des signaux contenant de la HF ou digitaux, lier le blindage à la terre aux deux bouts

Rayonnement en champ lointain

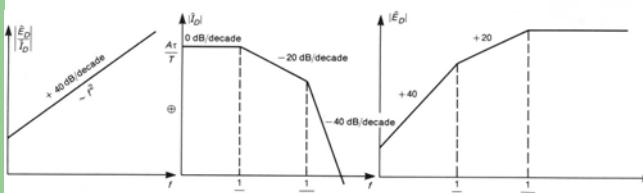
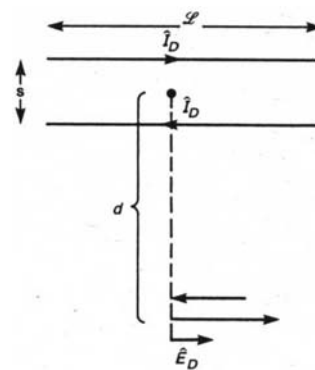
- Circuit simple :
 - Deux dipôles électriques de longueur l et de courant opposé Ou
 - Un dipôle magnétique de surface $s \cdot l$?



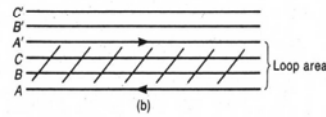
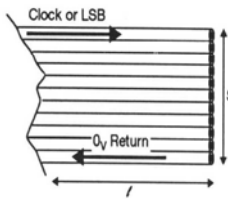
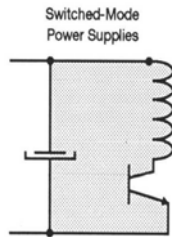
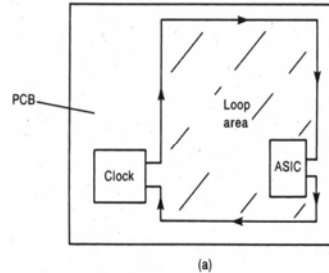
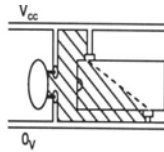
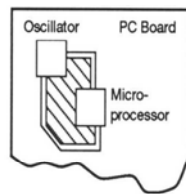
Rayonnement en mode différentiel

- En champ lointain:
 - Champ maximum dans le plan des deux conducteurs

$$E_{D_{\max}} = 1.316 * 10^{-14} * \frac{I_D * f^2 * L * s}{d}$$



Exemples de circuits

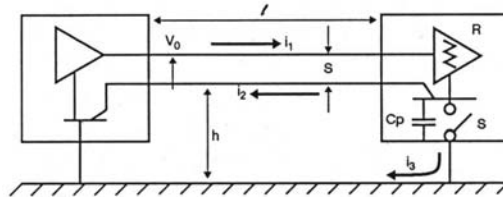


Couplage CEM

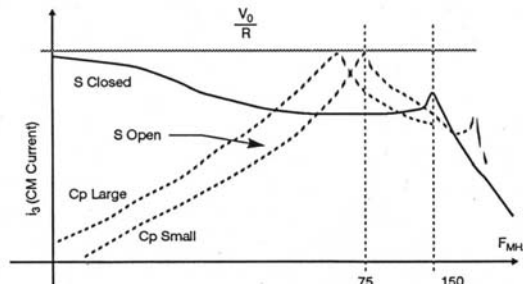
23

Rayonnement en mode commun

- Une partie du courant aller tend à revenir par un autre chemin



- Ce courant est difficile à estimer, il vaut mieux le mesurer

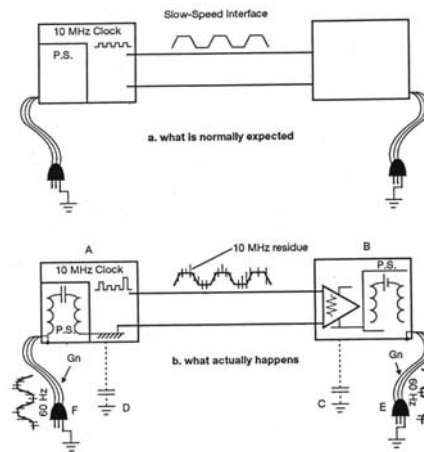


Couplage CEM

24

Mode commun

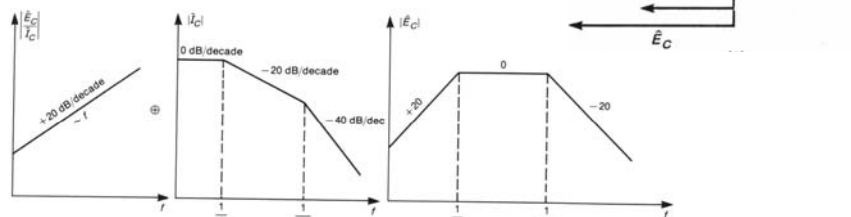
- Déconnecter l'un des circuits de la terre n'est efficace qu'en très basse fréquence
- La résonance (inductance du fil, capa de boîtier) amplifie certains parasites



Calcul en mode commun

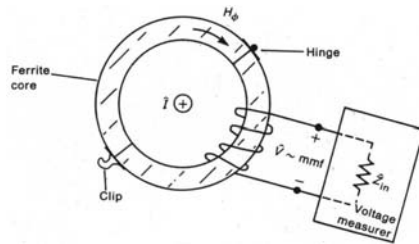
- Tout se passe comme si un courant $2 \cdot I_C$ circulait dans un fil placé au centre des deux conducteurs

$$E_{C_{\max}} = 1.257 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{I_C \cdot f \cdot L}{d}$$

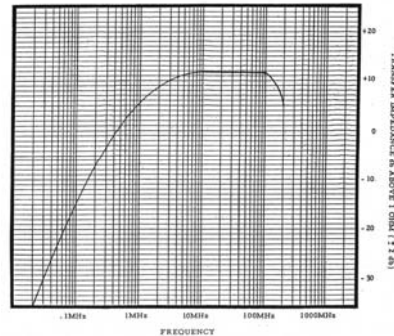


Mesure du courant:

Sonde de courant HF



Impédance de transfert



Couplage par conduction – 1

- Les perturbations captées par un fil sont conduites à l'intérieur de l'appareil ou dans le circuit imprimé.
- Protection : Placer un filtre antiparasite à l'entrée du circuit
 - Le filtre doit laisser passer les signaux normaux
 - Dc ou 50 Hz pour les alimentations
 - Domaine de fréquence spécifique pour les signaux
 - Le filtre doit atténuer les perturbations 150kHz-30MHz
 - Toute capacité parasite entrée-sortie dégrade l'effet du filtre : *Attention au montage*

Couplage par conduction - 2

- Les conducteurs ne sont pas des contacts idéaux – ils ont une impédance non-nulle
- Si le courant d'un autre utilisateur passe par les fils du circuit victime, une tension d'erreur est générée par l'Impédance Commune aux deux circuits
- Protection : séparer les circuits, prendre de grandes sections et utiliser des fils courts (diminuer l'impédance commune)

Couplage CEM

29

