



**HAL**  
open science

# Bruits en Électronique - Introduction à la CEM

Damien Prêle

► **To cite this version:**

Damien Prêle. Bruits en Électronique - Introduction à la CEM. École d'ingénieur. France. 2021.  
hal-03767384

**HAL Id: hal-03767384**

**<https://cel.hal.science/hal-03767384>**

Submitted on 1 Sep 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Bruits en Électronique

## *introduction à la CEM*

Damien PRÊLE

École d'Ingénieur Denis Diderot - 2<sup>e</sup> A - S2 - GP

30 mars 2021



# Plan

- 1 Introduction
  - Définition
  - Description
  - Classification
- 2 Câblage, blindage et mise à la masse
  - Couplage capacitif
  - Couplage inductif
- 3 Matériaux et blindage



# Bruit vs Parasite

## Bruit = Parasite

- Le bruit électronique a été **défini** comme une perturbation indésirable qui se **superpose au signal utile et qui n'apporte aucune information**.

Cette définition est compatible avec la description des parasites étudiées dans le cadre de la **compatibilité électromagnétique**.

## Bruit $\neq$ Parasite

Les fluctuations d'origine externe aux circuits électroniques ont souvent un caractère **périodique** (et/ou impulsionnel à grande échelle de temps) qui les différencie des autres bruits uniquement décrits par leurs propriétés statistiques: **Les parasites ne sont que rarement des fluctuations aléatoires de tension ou de courant**.



## Fluctuations d'origine **externe** au circuit électronique

### *parasites*

- "naturel" ⚡: perturbations atmosphériques, ☀ solaires, ~~~~~ cosmiques ...
- "artificiel" 🏠: les communications radiofréquences 📶, les alimentations à découpages, les circuits de commutation, les décharges électriques de haute tension, les moteurs électriques, les systèmes d'allumage des moteurs à explosion, les tubes fluorescents d'éclairage ...

spectre  $\pm$  prévisible (périodique  $\approx$ )  $\rightarrow$  **filtrage**  
impulsionnel  $\rightarrow$  **troncature temporelle**  
origine externe  $\rightarrow$  **blindage**

# Compatibilité Électro-Magnétique - CEM

## Normes et Réglementations

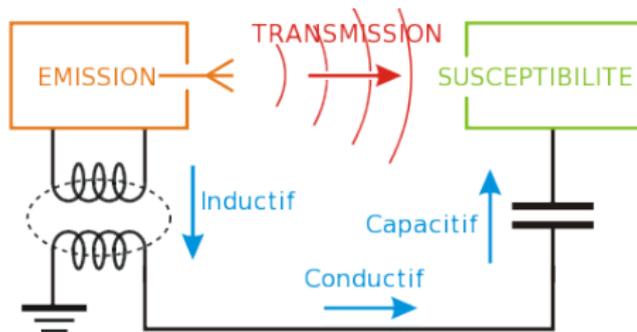
On parle souvent de **Compatibilité Électro-Magnétique**, car les perturbations électromagnétiques sont couramment étudiées pour vérifier le bon fonctionnement d'un appareil qui y est soumis - susceptibilité (ainsi que les perturbations qu'il rayonne - émission).

Du coup, on désigne abusivement les perturbations électromagnétiques :  
*EMI/EMC - ElectroMagnetic Interference / Compatibility*

# EMISSION/TRANSMISSION/SUSCEPTIBILITE

Les problèmes de perturbation EM n'existent que s'il existe :

- 1 une source de perturbation (**EMISSION**)
- 2 un canal de transmission de la perturbation
  - **TRANSMISSION** électro-magnétique radiofréquence
  - couplage **INDUCTIF**  $\vec{B}$ , **CONDUCTIF**  $R$  ou **CAPACITIF**  $\vec{E}$
- 3 une "**SUSCEPTIBILITE**" à cette perturbation



Il "suffit" de minimiser 1 seul de ces trois points pour réduire la perturbation !

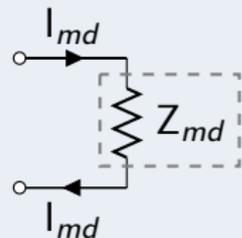
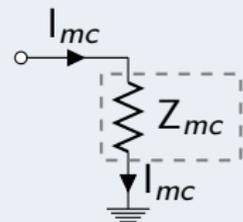
# Mode de propagation

- **Mode commun :**

Le courant perturbateur ressort *via* une référence de tension (vdd, gnd, ...)

- **Mode différentiel :**

Le courant perturbateur rentre et sort par deux câbles découplés d'une référence de potentiel par une impédance non-nulle



*Un courant perturbateur doit nécessairement circuler dans une boucle !*

# EMISSION

- **Domaine Fréquentiel :**

- $\lesssim MHz$  : essentiellement des perturbations de mode différentiel  
(il est difficile de découpler correctement les alimentations à basse fréquence)

Impédance commune, couplage capacitif ou inductif.

- $\gtrsim MHz$  : essentiellement des perturbations de mode commun :  
rayonnement EM et apparition de directivité.

- **Domaine Temporel :**

- Perturbations "continues" (bruits externes, harmoniques, secteur...)
- Impulsions (commutations électriques, particules ionisantes...)

# TRANSMISSION/Couplage

- **Induction** mutuelle entre l'émission et la "susceptibilité" (couplage par champ magnétique  $\vec{B}$ )
- **Conduction** *via* l'alimentation, la masse ou un autre conducteur dont le potentiel est mal fixé (potentiel commun à l'émission et à la susceptibilité liés par une résistances faible  $R$ )
- **Capacité** entre l'émission et la "susceptibilité" (couplage par champ électrique  $\vec{E}$ )
- **Transmission radio.** (couplage par champ électro-magnétique) : à grande distance et/ou à haute fréquence, une émission d'un champ électrique ou magnétique se transforme en onde électro-magnétique

# SUSCEPTIBILITE

- Lien électrique direct
- Boucles (de masse ou non)
- Antenne

Plus insidieusement, les perturbations peuvent être transposées en fréquence par modulation ou redressement.

## Démodulation

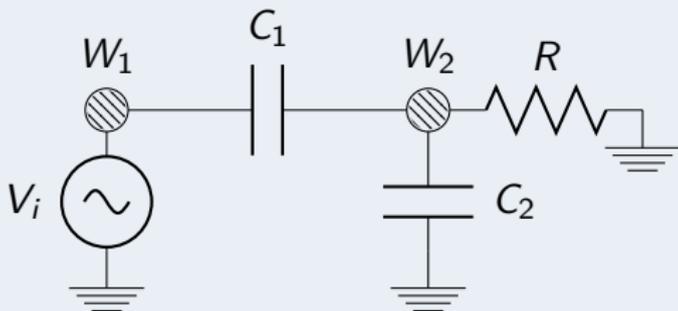
Un GSM à 900MHz et 1,8GHz perturbe une installation audio < 20 kHz

## Plan : 2 - Câblage, blindage et mise à la masse

- 1 Introduction
  - Définition
  - Description
  - Classification
- 2 Câblage, blindage et mise à la masse
  - Couplage capacitif
  - Couplage inductif
- 3 Matériaux et blindage

## Couplage capacitif entre deux conducteurs

Soit deux conducteurs  $W_1$  et  $W_2$



Le "signal parasite" créé par  $W_1$  sur  $W_2$  est  $V_{n_2} = \frac{jRC_1\omega}{1+jR(C_1+C_2)\omega} V_i$

$$R \ll \frac{1}{j(C_1+C_2)\omega} \rightarrow \boxed{V_{n_2} \approx jRC_1\omega V_i}$$

$$R \gg \frac{1}{j(C_1+C_2)\omega} \rightarrow \boxed{V_{n_2} \approx \frac{C_1}{C_1 + C_2} V_i}$$

Capacité :  $C = \epsilon \frac{S}{d}$  où  $\epsilon$  est la permittivité du diélectrique

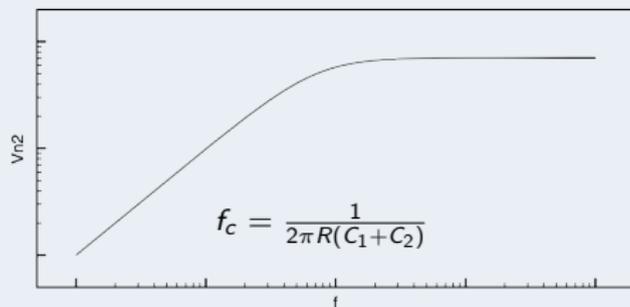
# Dépendance en fréquence

## Couplage capacitif entre deux conducteurs

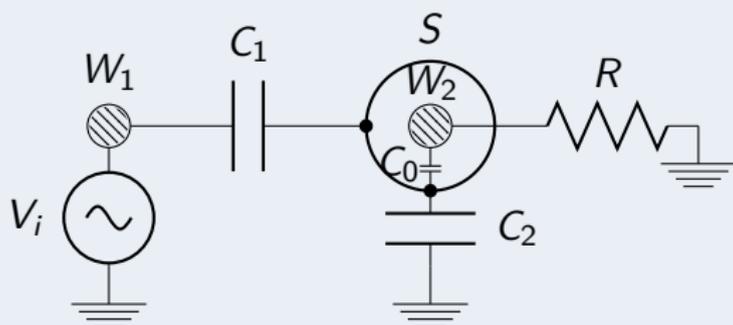
Le "signal parasite" créé par  $W_1$  sur  $W_2$  est  $V_{n2} = \frac{jRC_1\omega}{1+jR(C_1+C_2)\omega} V_i$

BF  $\rightarrow$   $V_{n2} \approx jRC_1\omega V_i$

HF  $\rightarrow$   $V_{n2} \approx \frac{C_1}{C_1 + C_2} V_i$



# Effet du blindage électrique sur le couplage capacitif



$$V_{n_2} = \frac{C_1}{C_0 + C_1 + C_2} \frac{jRC_0\omega}{1 + jRC_0 \frac{C_1 + C_2}{C_0 + C_1 + C_2} \omega} V_i$$

$$R \ll \frac{1}{jC_0 \frac{C_1 + C_2}{C_0 + C_1 + C_2} \omega} \rightarrow$$

$$V_{n_2} \approx jRC_1 \frac{C_0}{C_0 + C_1 + C_2} \omega V_i \approx jRC_1 \omega V_i$$

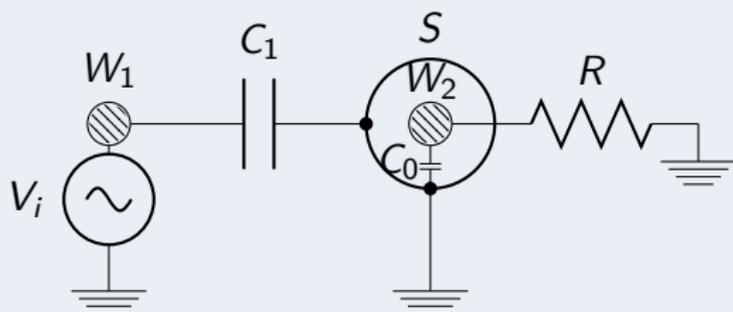
$C_0 \gg C_1 \text{ et } C_2$

$$R \gg \frac{1}{jC_0 \frac{C_1 + C_2}{C_0 + C_1 + C_2} \omega} \rightarrow$$

$$V_{n_2} \approx \frac{C_1}{C_1 + C_2} V_i$$

Rq:  $C_0 \gg C_1 \text{ et } C_2 \rightarrow$  le blindage ne change rien

## Effet du blindage relié à une référence de tension



$$\frac{V_{n2}}{V_i} = 0$$

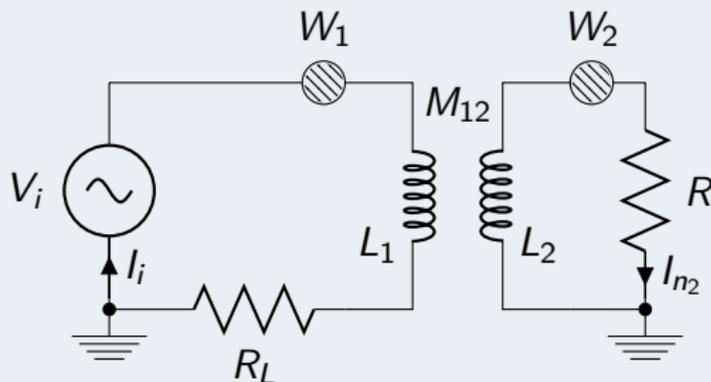
*Le blindage annule le couplage capacitif si la reprise de masse est faiblement résistive.*

# Plan : Câblage, blindage et mise à la masse - Couplage inductif

- 1 Introduction
  - Définition
  - Description
  - Classification
- 2 Câblage, blindage et mise à la masse
  - Couplage capacitif
  - Couplage inductif
- 3 Matériaux et blindage

## Couplage inductif entre deux conducteurs

Soit deux conducteurs  $W_1$  et  $W_2$

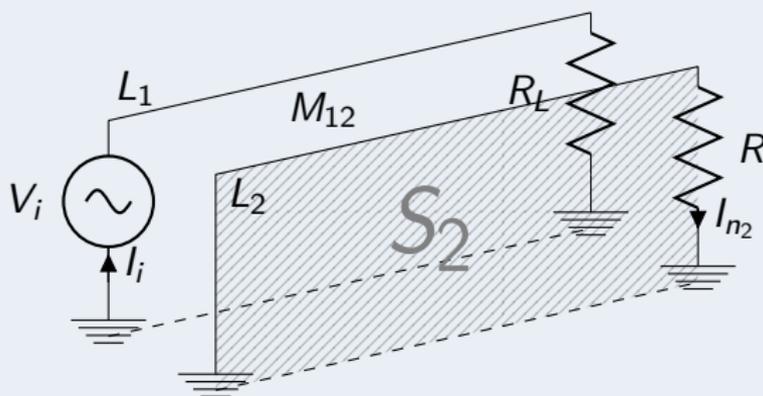


$$\begin{cases} v_i = R_L i_i + L_1 \frac{di_i}{dt} + M_{12} \frac{di_{n_2}}{dt} \rightarrow V_i = R_L I_i + jL_1 \omega I_i + jM_{12} \omega I_{n_2} \\ -R i_{n_2} = L_2 \frac{di_{n_2}}{dt} + M_{12} \frac{di_i}{dt} \rightarrow -R I_{n_2} = jL_2 \omega I_{n_2} + jM_{12} \omega I_i \end{cases}$$

$L_1$ ,  $L_2$  et  $M_{12}$  dépendent de la forme (surfaces) des circuits primaire et secondaire

# Surface des circuits primaire et secondaire

Induction mutuelle : M



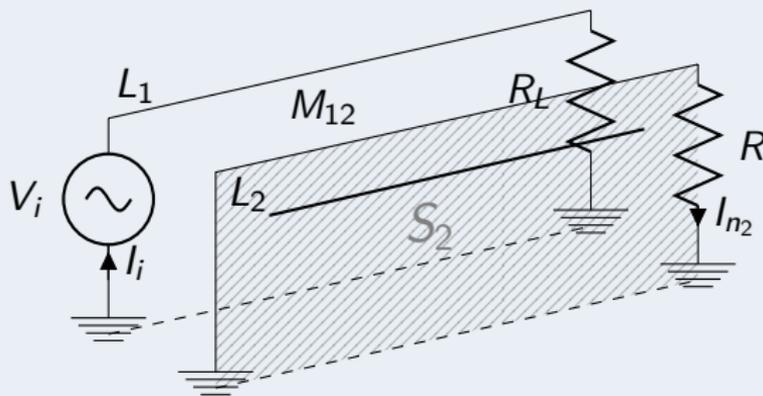
$M_{12} = k\sqrt{L_1 L_2}$  avec  $k$  l'efficacité de couplage compris entre 0 et 1

$M_{12} \approx \frac{\mu_0}{4\pi} \oint \oint \frac{dS_1 \cdot dS_2}{d}$  avec  $d$  la distance entre  $S_1$  et  $S_2$

## Effet du blindage sur le couplage inductif

Le blindage électrique n'est pas nécessairement un blindage magnétique (nécessité de matériaux à forte perméabilité magnétique): le champ magnétique traverse le blindage.

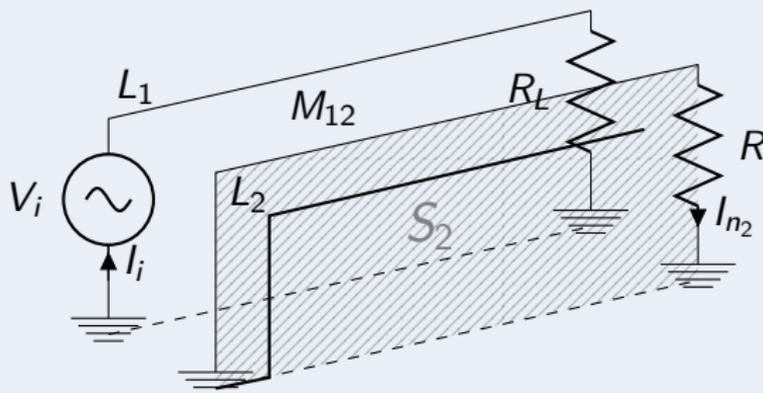
### blindage flottant



*le blindage ne change rien*

## Effet du blindage sur le couplage inductif

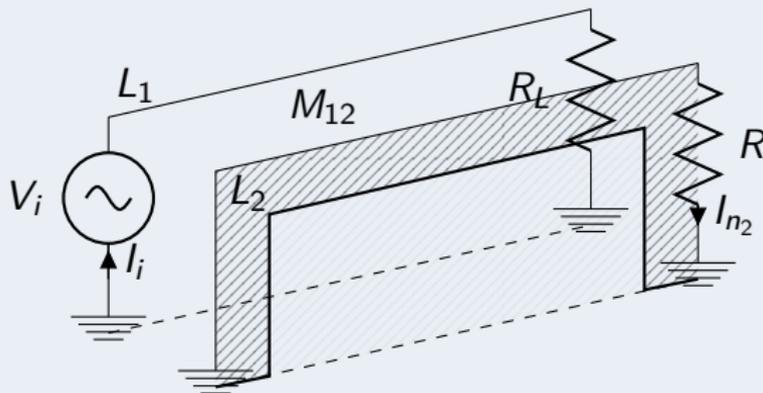
### blindage relié à la masse



*le blindage ne change rien car les lignes de courant se referment toujours via la masse.*

## Effet du blindage sur le couplage inductif

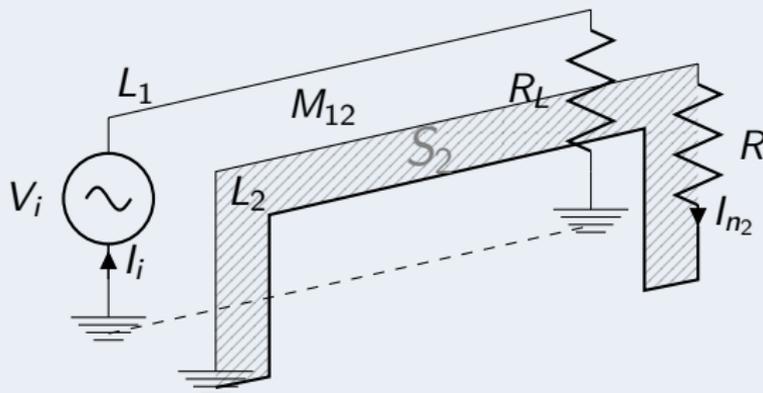
Le retour de courant ne se fait pas uniquement *via* le blindage



☞ Création d'une boucle de masse.

## Effet du blindage sur le couplage inductif

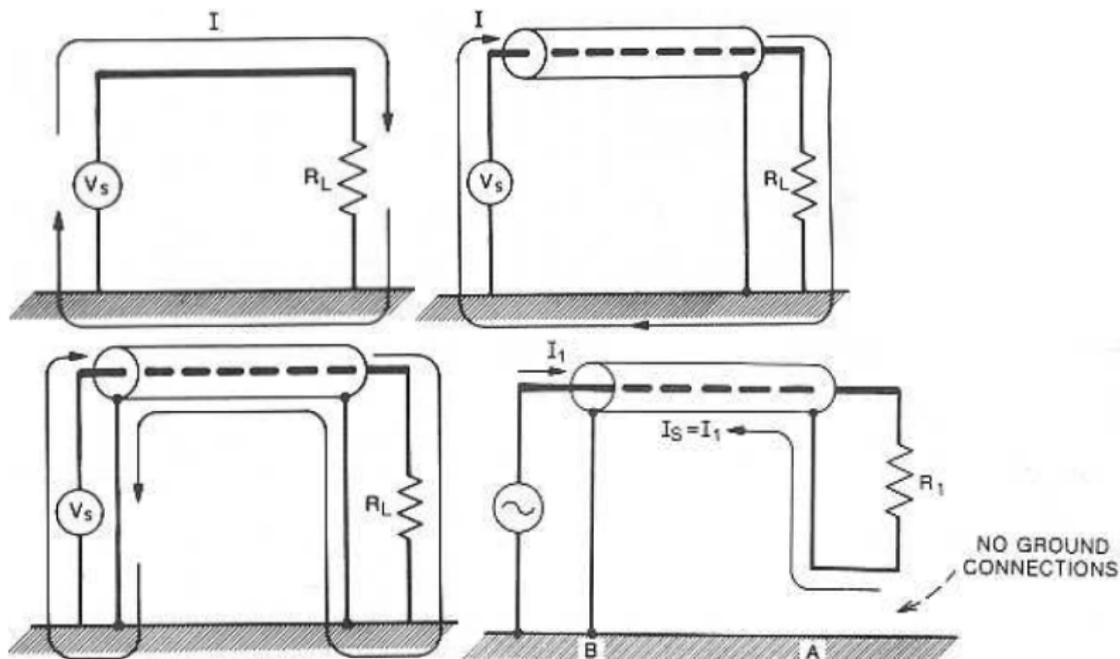
Retour du courant *via* le blindage avec un seul point de connection à la masse



☞ La surface  $S_2$  est réduite: le couplage inductif l'est d'autant.

# Blindage contre l'induction

## Réduction de la surface des boucles de courant

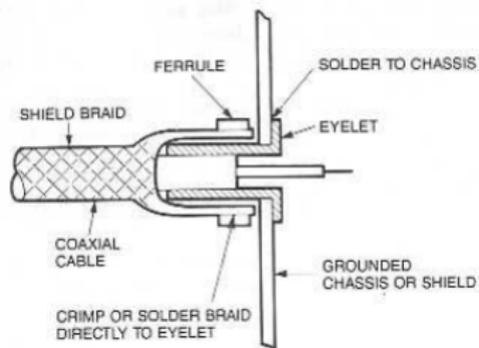
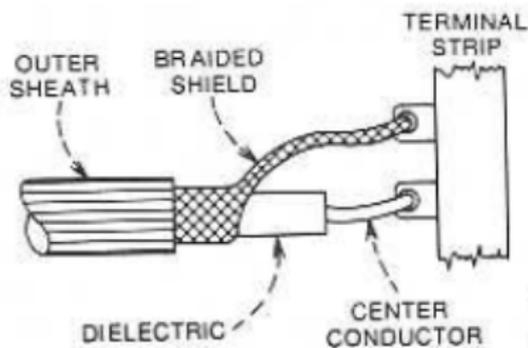


Noise Reduction Tech. In Elec. Sys. H. W. Ott



## Report d'un blindage coaxial

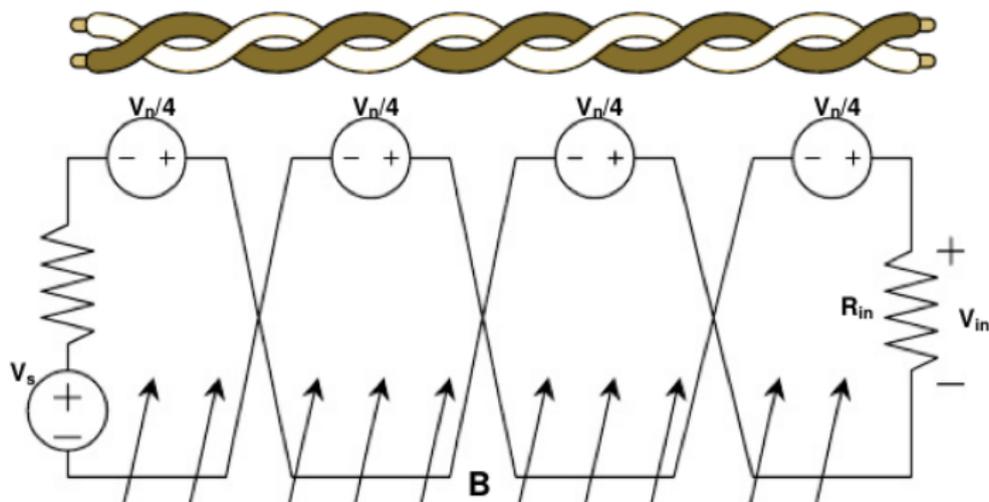
Le report du blindage doit minimiser les boucles de courant (inductif). Il doit aussi englober l'âme centrale afin d'éviter les couplages capacitifs.



Noise Reduction Tech. In Elec. Sys. H. W. Ott

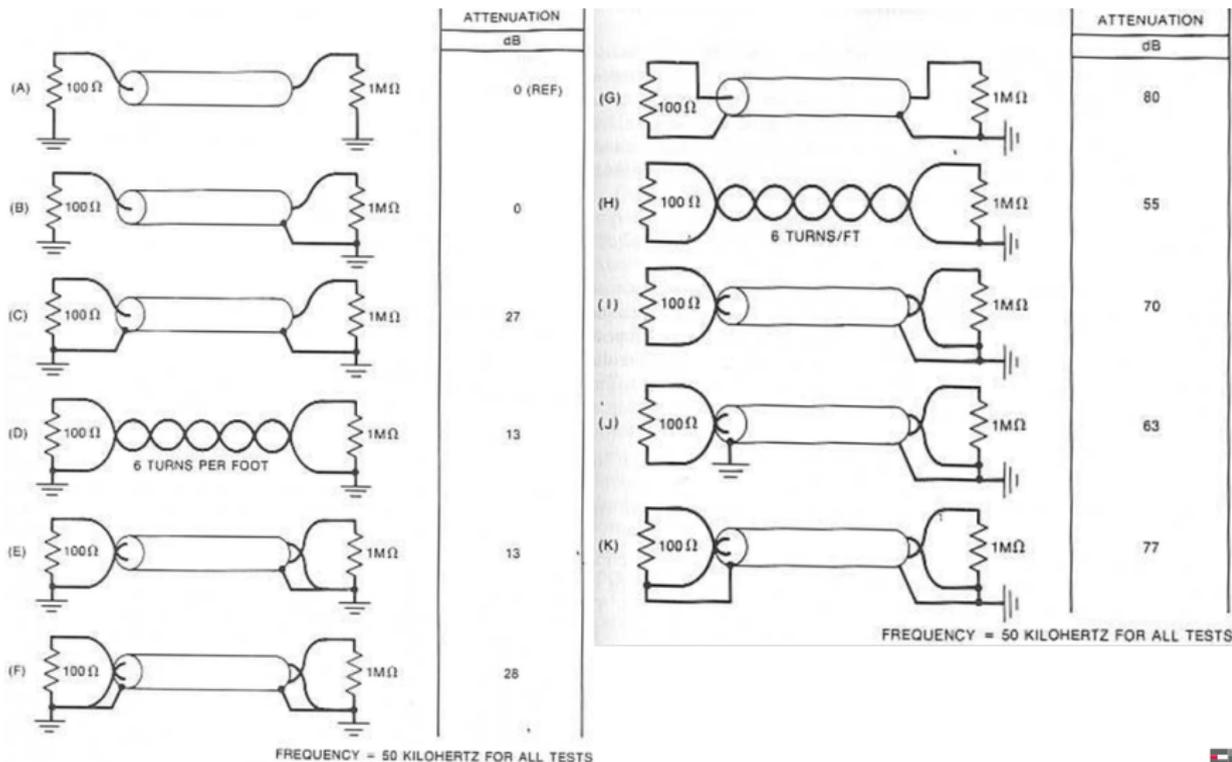
## Paire torsadée

La paire torsadée présente successivement une aire "positive" puis "négative" au champ magnétique parasite



☞ la lecture différentielle sur une paire torsadée n'est donc pas sensible au couplage inductif

# Exemple d'atténuation du couplage inductif



Noise Reduction Tech. In Elec. Sys. H. W. Ott



# Plan : Matériaux et blindage - Couplage inductif

- 1 Introduction
  - Définition
  - Description
  - Classification
- 2 Câblage, blindage et mise à la masse
  - Couplage capacitif
  - Couplage inductif
- 3 Matériaux et blindage

# Résistivité, épaisseur de peau, et perméabilité magnétique

$$\text{Epaisseur de peau : } \delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}}$$

Métaux ( $\sigma_r, \mu_r$ )	50Hz	1kHz	10kHz	100kHz	1MHz	10MHz	100MHz	1GHz
<b>Cuivre</b> (1 ; 1)	9.33mm	2.09mm	660 $\mu$ m	209 $\mu$ m	66 $\mu$ m	20.9 $\mu$ m	6.6 $\mu$ m	2.09 $\mu$ m
<b>Aluminium</b> (0.65 ; 1)	11.6mm	2.59mm	818 $\mu$ m	259 $\mu$ m	81.8 $\mu$ m	25.9 $\mu$ m	8.18 $\mu$ m	2.59 $\mu$ m
<b>Acier</b> (0.10 ; 1000)	933 $\mu$ m	209 $\mu$ m	66 $\mu$ m	20.9 $\mu$ m	6.6 $\mu$ m	2.09 $\mu$ m	0.66 $\mu$ m	0.21 $\mu$ m
<b>Acier inox</b> (0.02 ; 500)	2.95mm	660 $\mu$ m	209 $\mu$ m	66 $\mu$ m	20.9 $\mu$ m	6.6 $\mu$ m	2.09 $\mu$ m	0.66 $\mu$ m

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} H/m \quad \epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} F/m \quad \sigma_{Cu} = 5.82 10^7 S/m$$

"intro à la CEM" C. Arcambal

