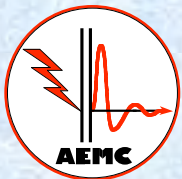


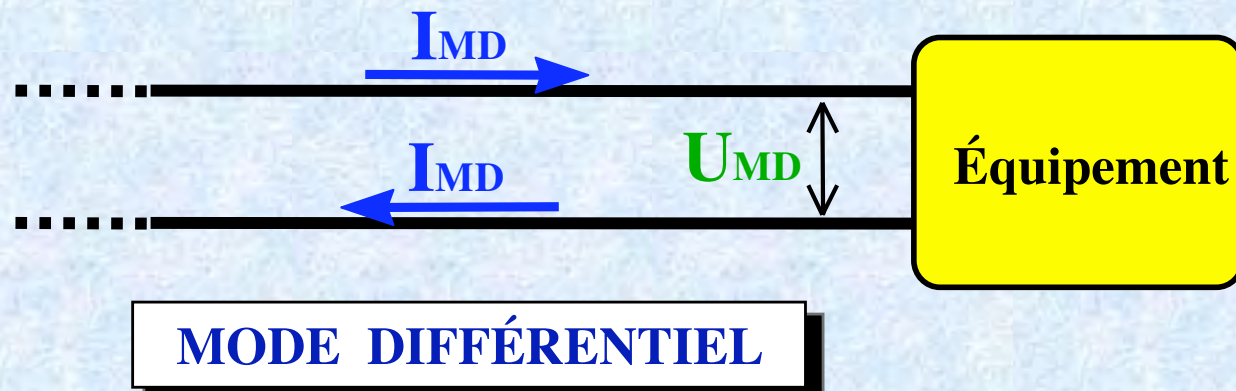
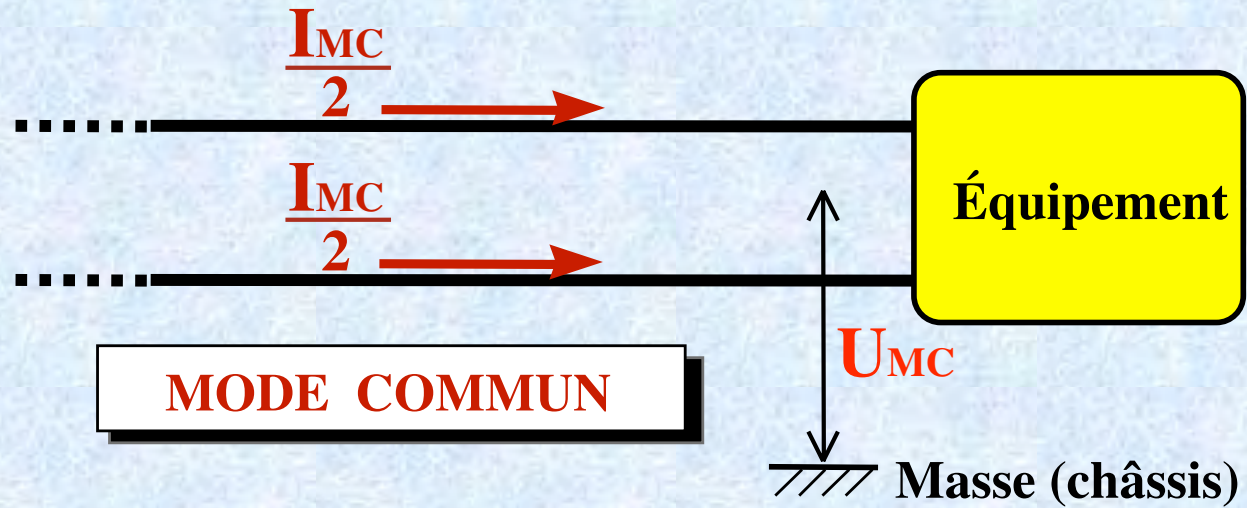
**PARIS - Mercredi 23 Mars 2005 - Alain CHAROY**

**AEMC** - Hyper & RF 2005 - CNIT La Défense - [a.charoy@aemc.fr](mailto:a.charoy@aemc.fr)

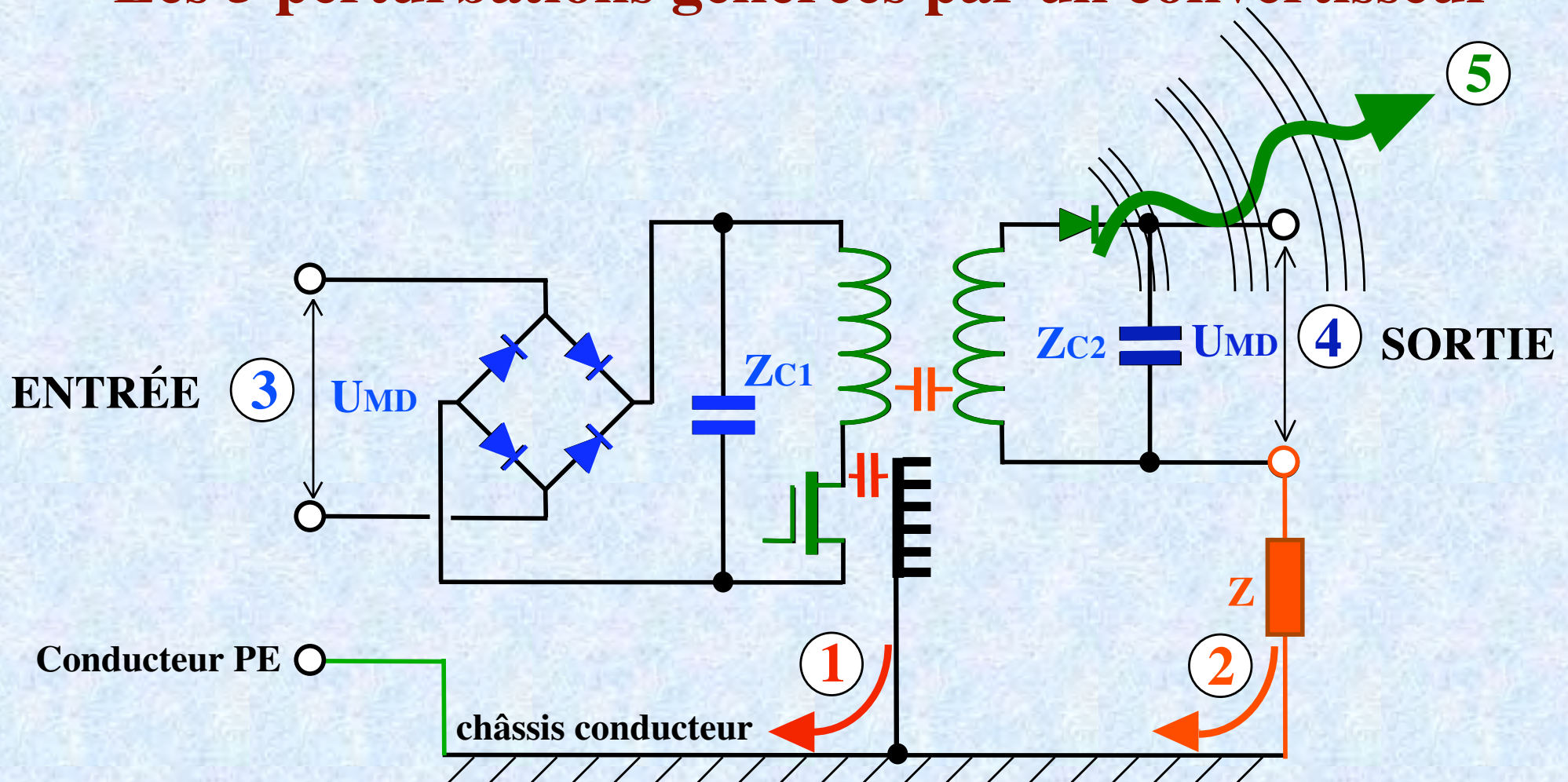
- **Introduction**
- **Immunité en mode différentiel**
- **Émission en mode différentiel**
- **Émissions en mode commun**
- **Champs électromagnétiques**



# Mode Commun & Mode Différentiel

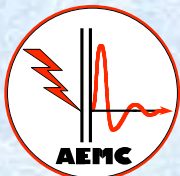
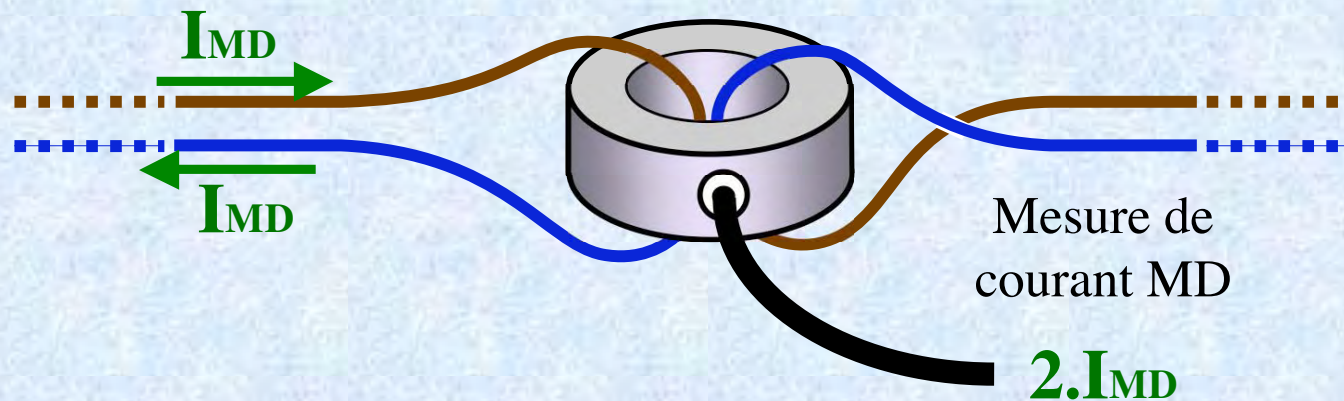
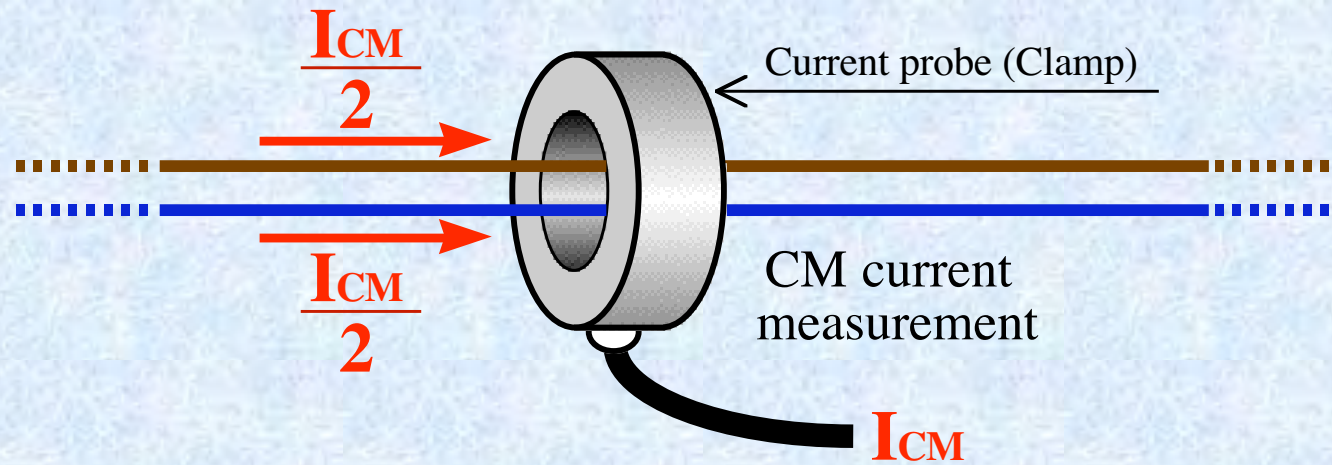


# Les 5 perturbations générées par un convertisseur

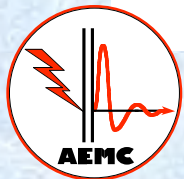
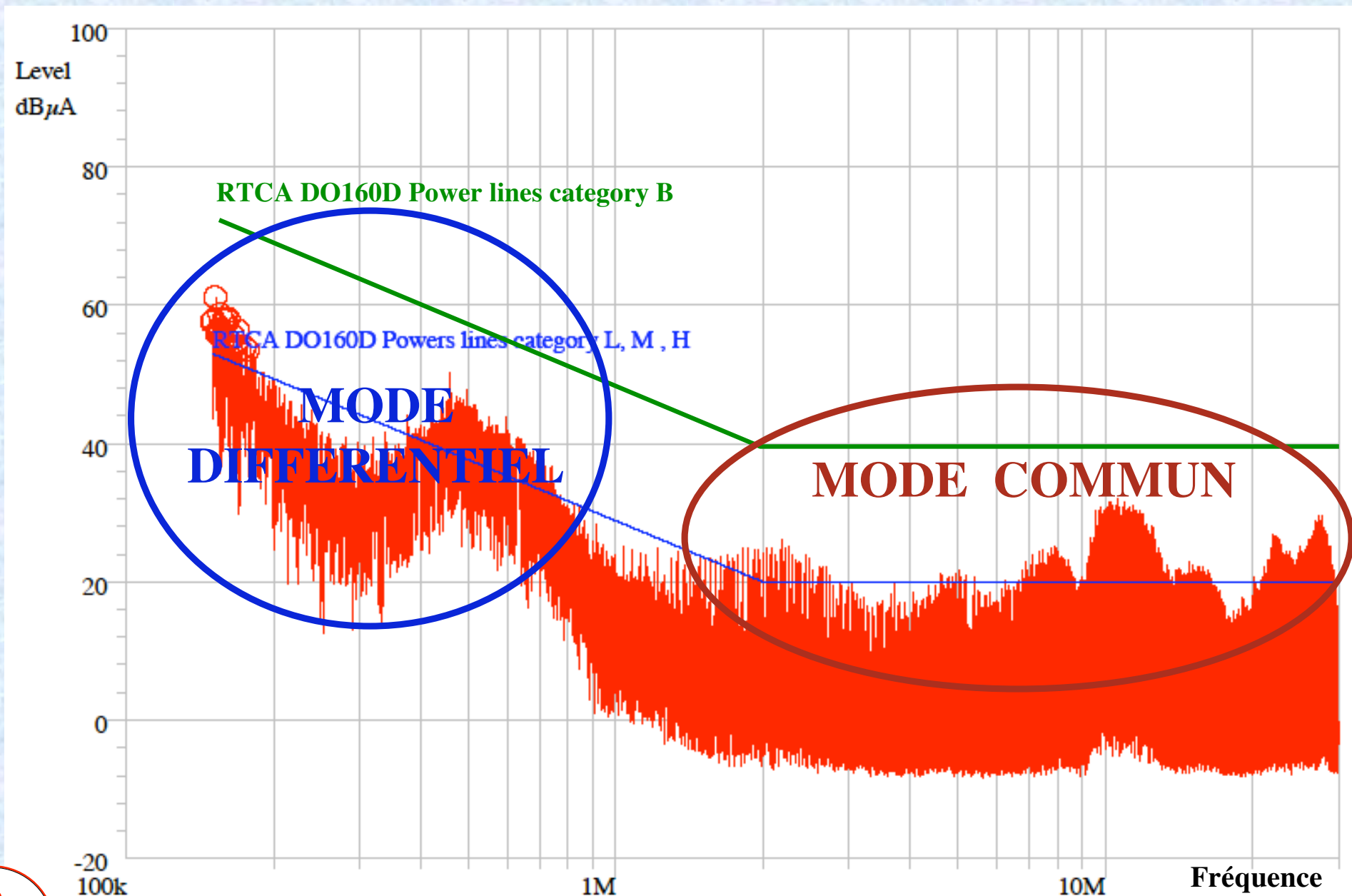


- 1** Mode Commun Entrée-à-Chassis
- 2** Mode Commun Entrée-à-Sortie
- 3** Mode Différentiel en Entrée
- 4** Mode Différentiel en Sortie
- 5** Rayonnements électromagnétiques (E & H)

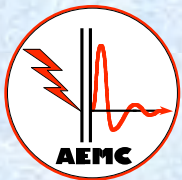
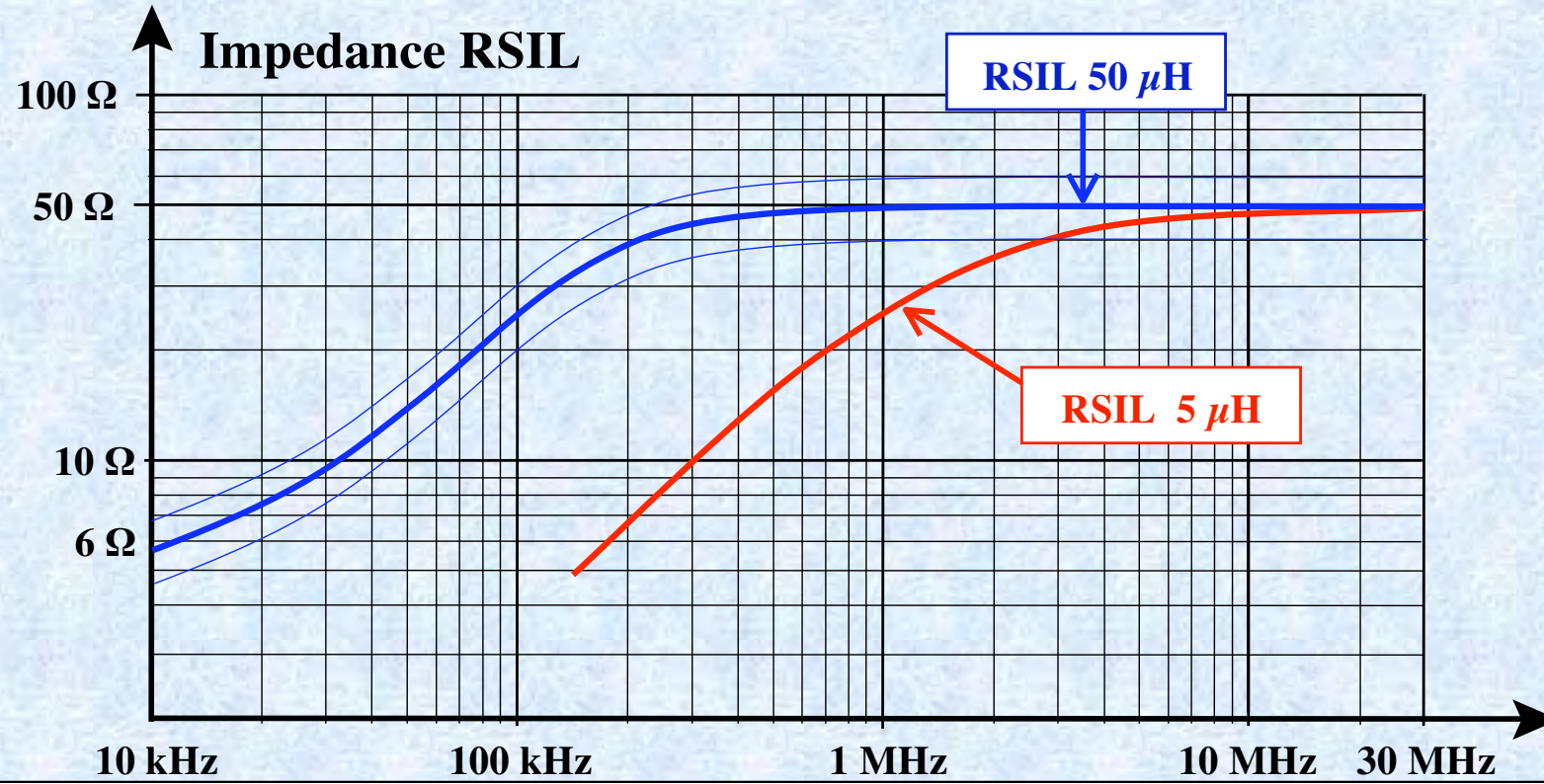
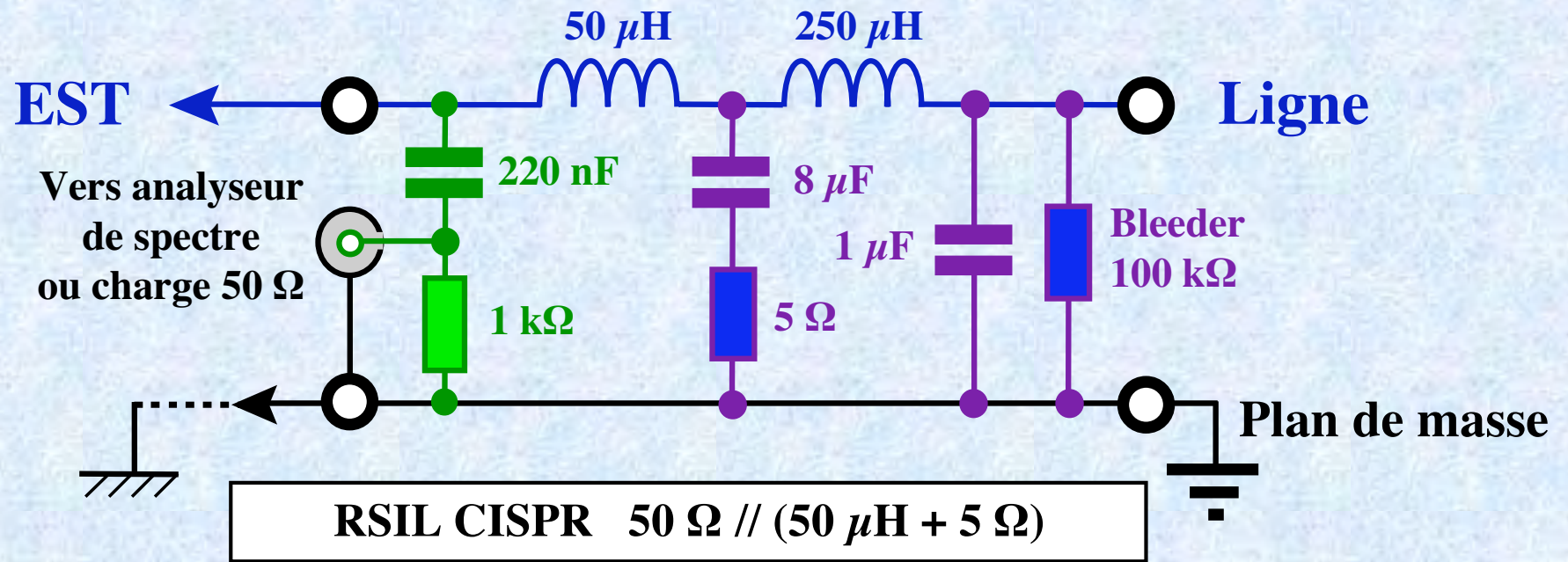
# Comment mesurer les courants de MC & MD ?



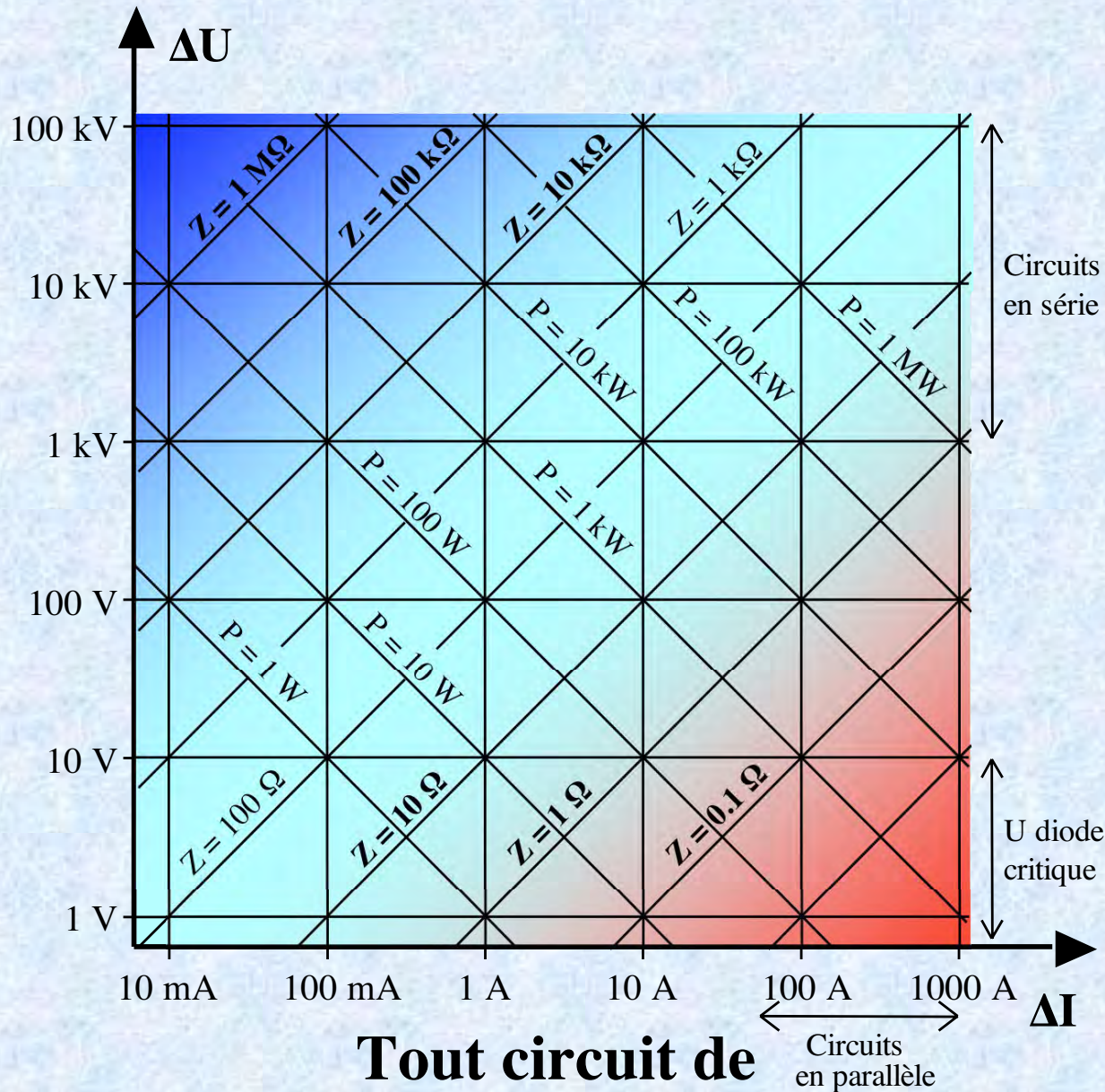
# Bruit typique d'un convertisseur de 5 kVA filtré



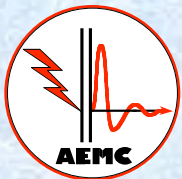
# Comment mesurer une tension perturbatrice ?



# Un point clé: l'impédance dynamique de commutation



Tout circuit de commutation devrait être analysé ainsi...



**Zone à haute impédance**

**Le Champ E domine:**

- Réduire les **capacités** parasites
- Limier longueurs à fort  $\Delta U/\Delta t$
- Choisir de faibles  $\epsilon_r$  (air !)
- Mettre des circuits en série



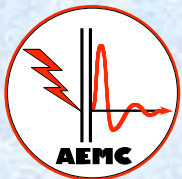
**Zone à basse impédance**

**Le Champ H domine:**

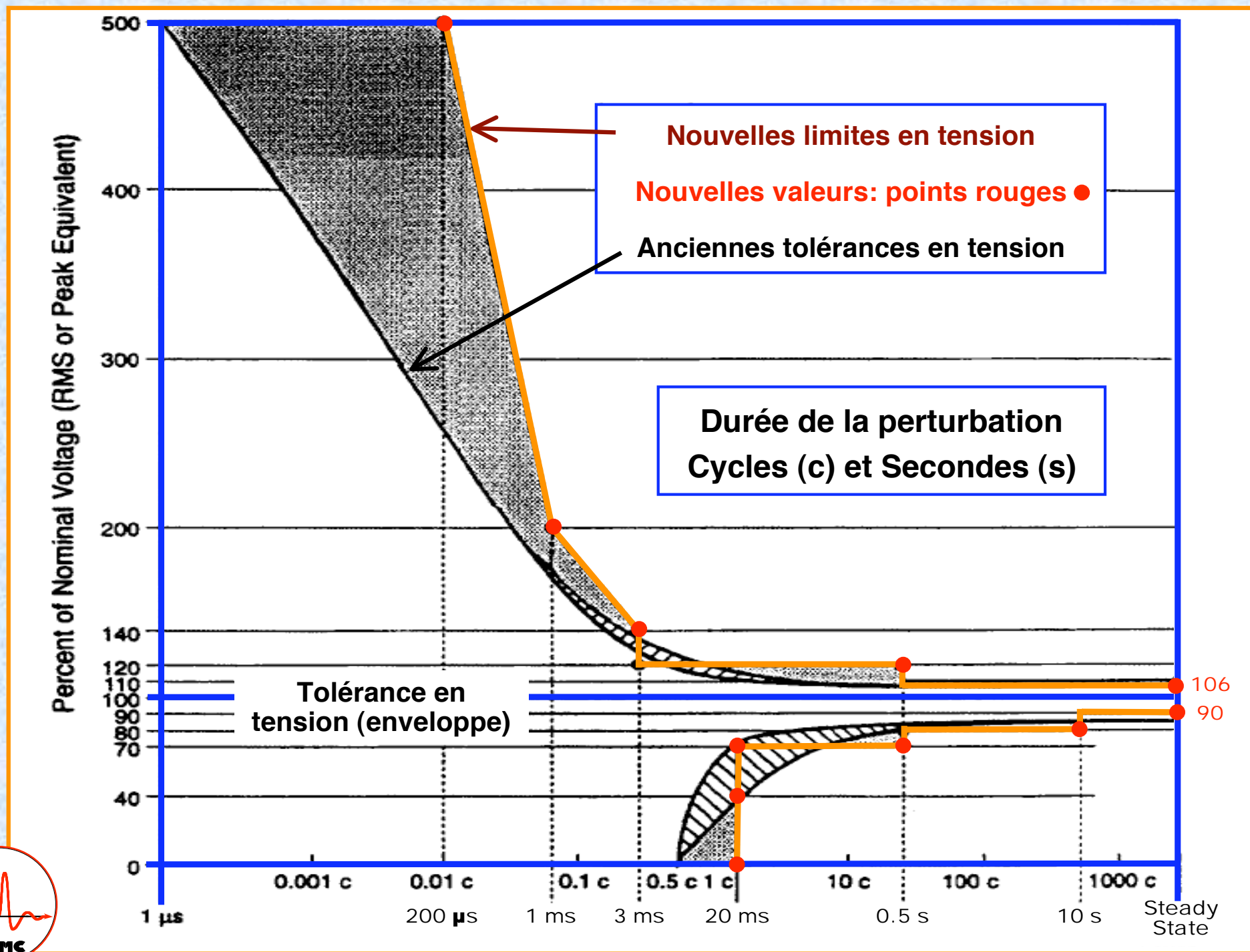
- Réduire **ESR** et **ESL**
- Limiter boucles à fort  $\Delta I/\Delta t$
- Choisir structures « sandwich »
- Mettre des circuits en parallèle



- **Introduction**
- **Immunité en mode différentiel**
- **Émission en mode différentiel**
- **Émissions en mode commun**
- **Champs électromagnétiques**



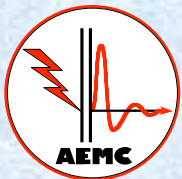
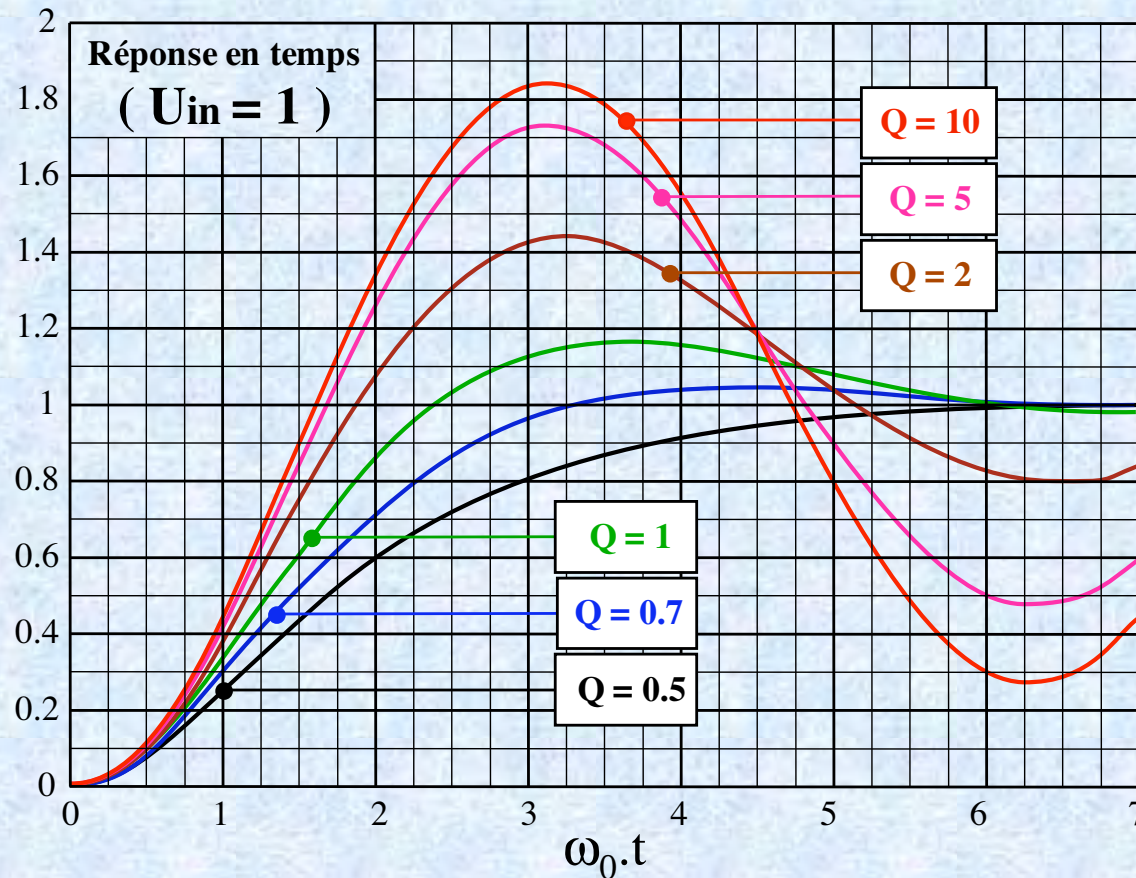
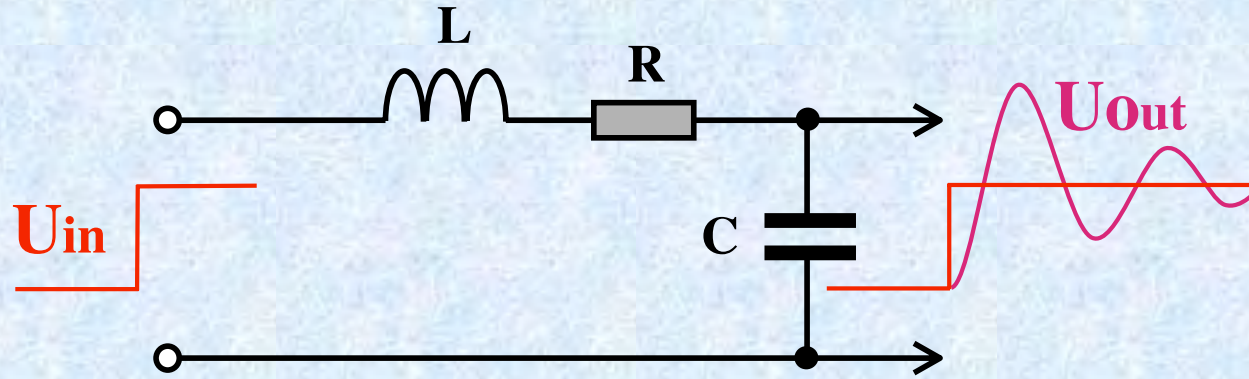
# L'immunité à la tension d'alimentation



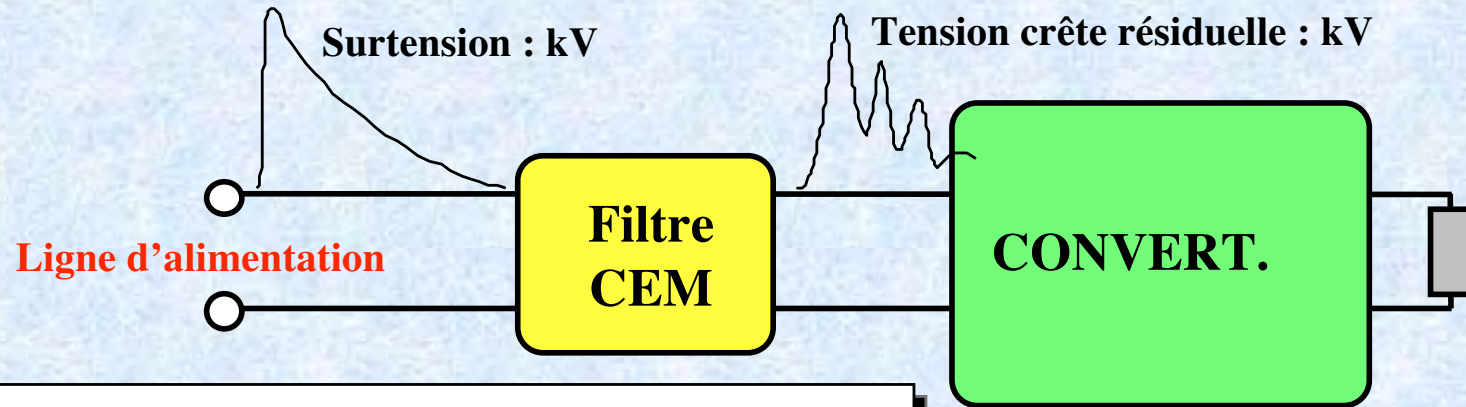
# Sur-tension à l'enclenchement

Pulsation propre :  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L.C}}$

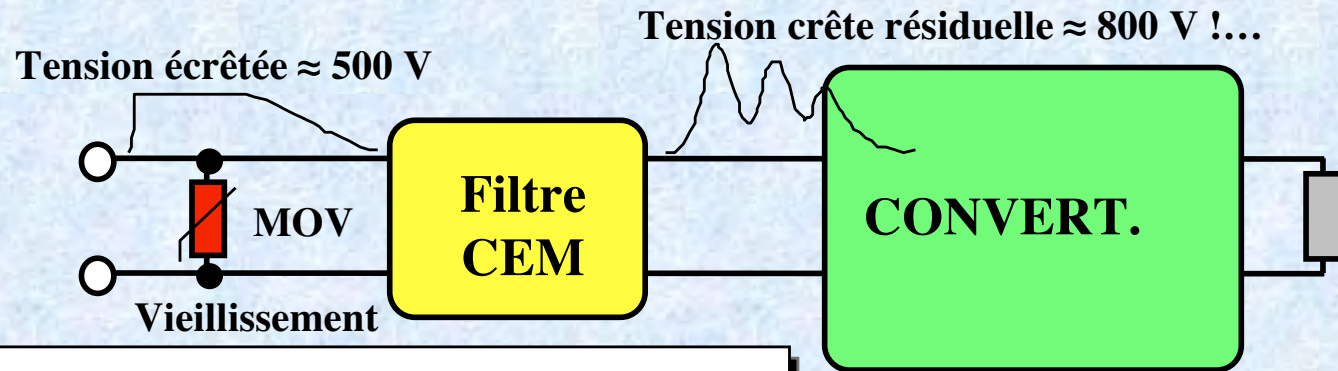
Facteur de Qualité :  $Q = \frac{L.\omega_0}{R}$



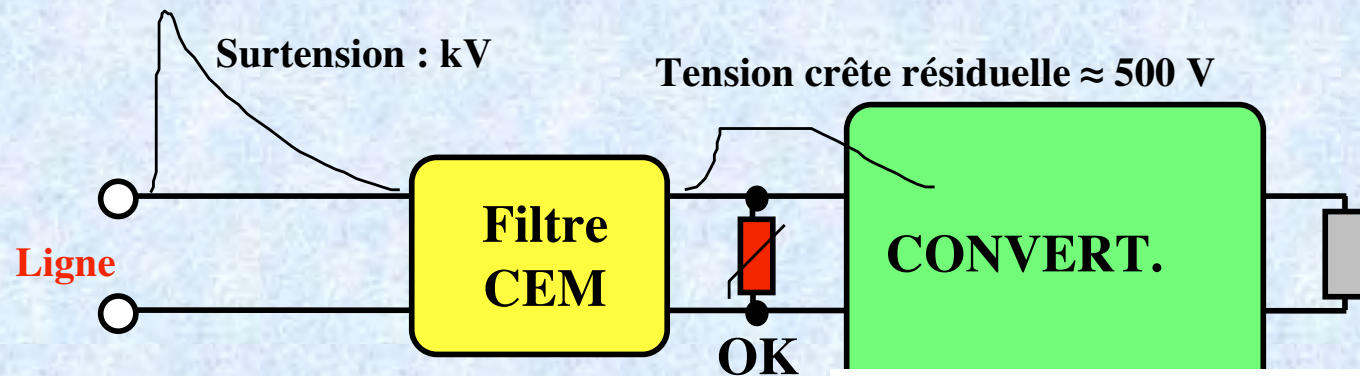
# Où installer un limiteur de surtensions en M. D. ?



**Sans limiteur : fort risque de destruction**

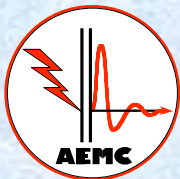


**MOV sur la ligne : un risque demeure**

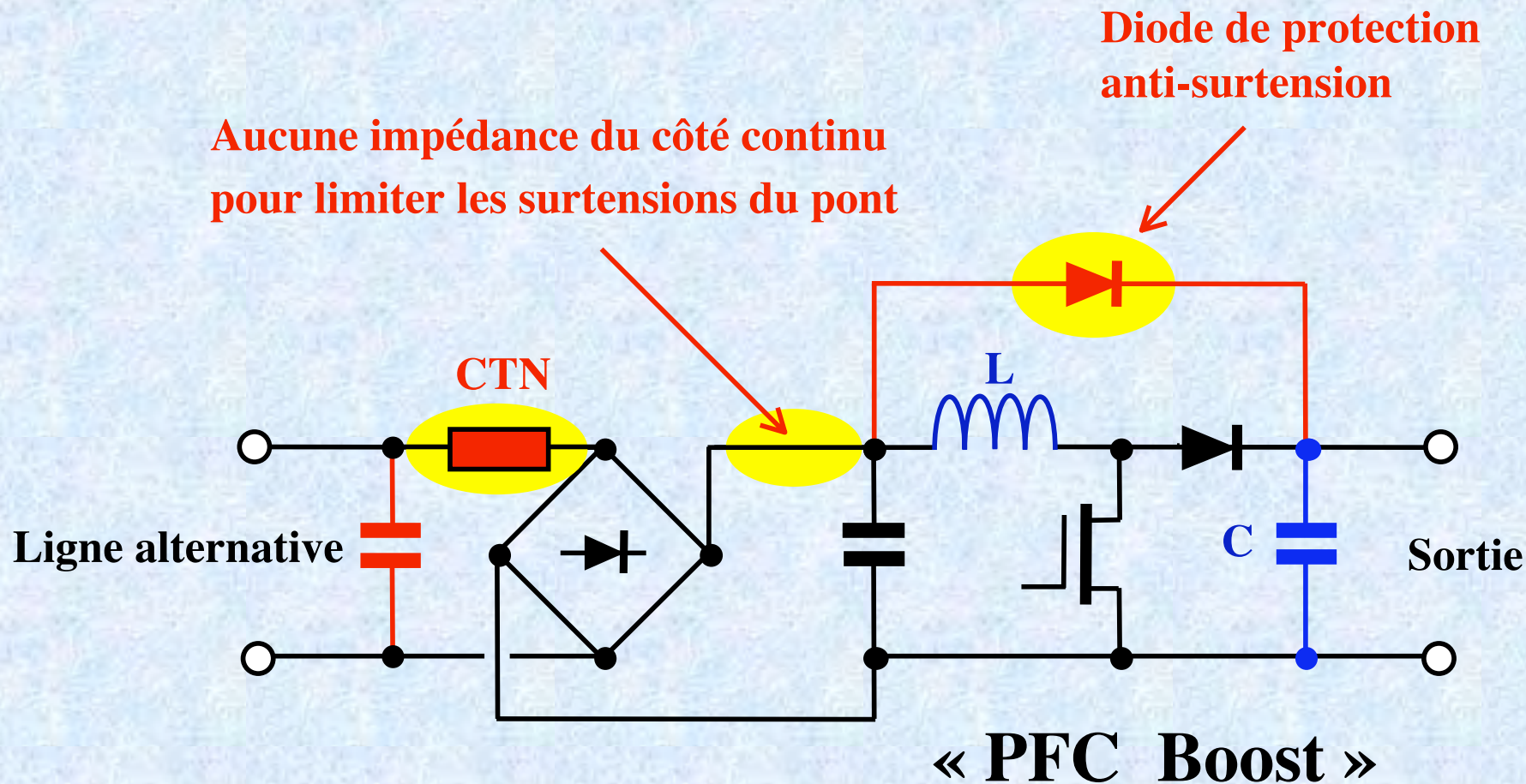


**MOV à l'entrée du convert : le mieux !**

**& l'inductance du filtre limite le courant et le vieillissement**

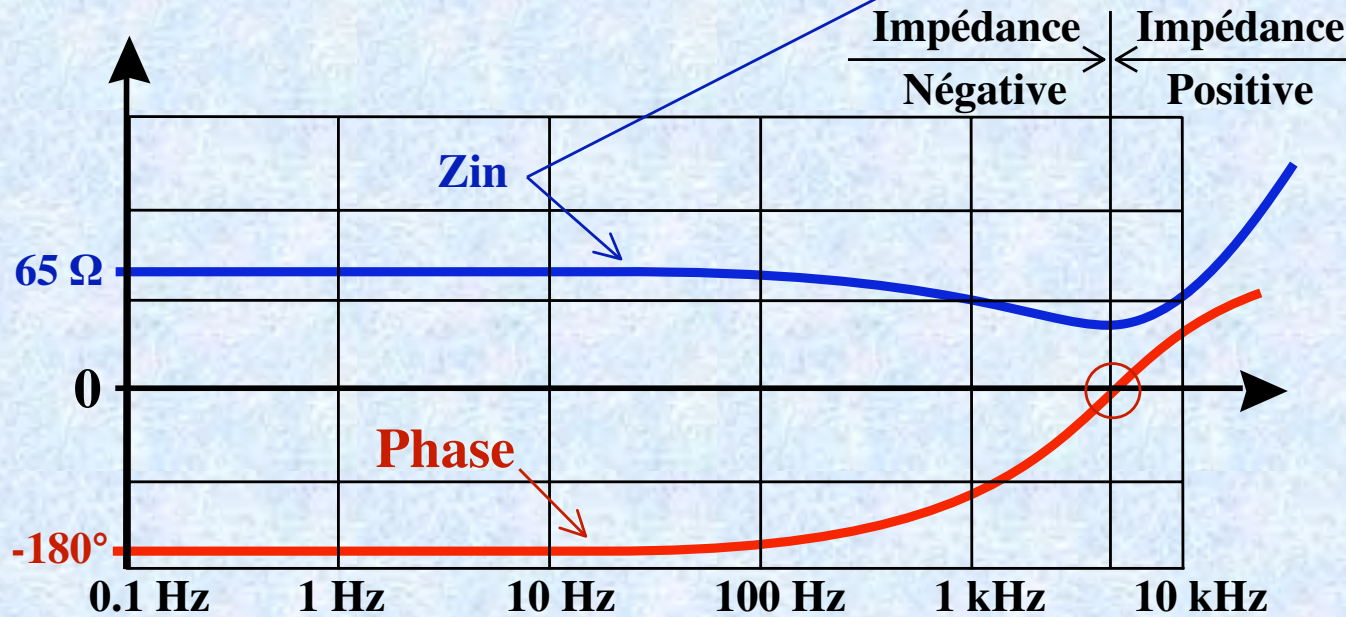
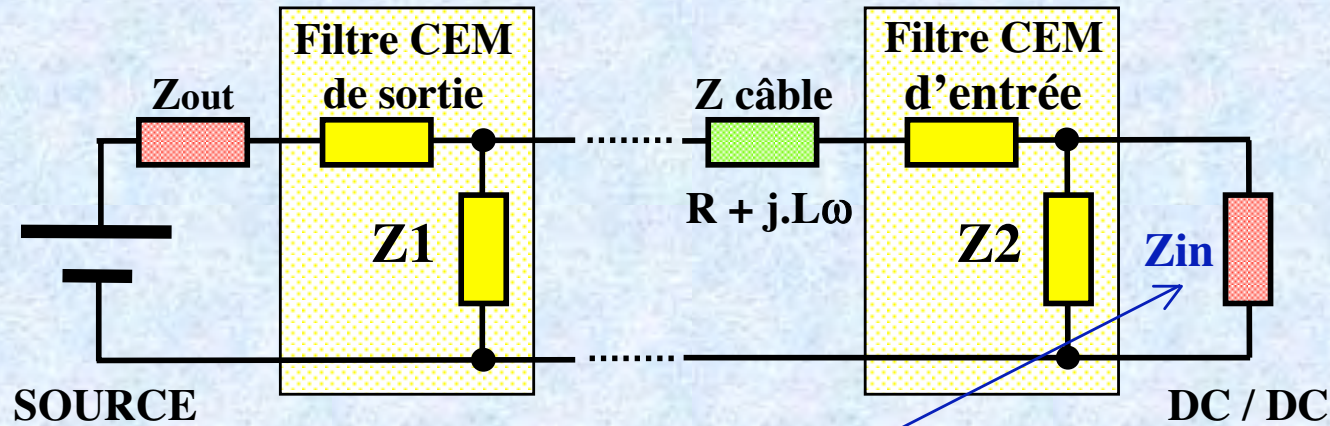


# Où ajouter des composants de protection ?



La **diode** écrête toutes les surtensions  
La **CTN** réduit le courant d'appel

# L'impédance négative d'un convertisseur DC / DC

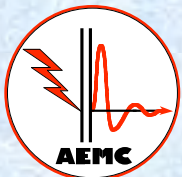


## RISQUES :

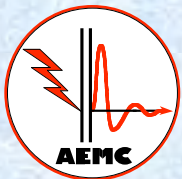
- Refus de démarrer
- Instabilité de la tension de sortie
- Destruction du convertisseur !

## SOLUTIONS :

- Ajouter un gros condensateur en entrée
- Réduire l'inductance du câble (paires en //)
- Réduire la largeur de bande de régulation



- Introduction
- Immunité en mode différentiel
- **Émission en mode différentiel**
- Émissions en mode commun
- Champs électromagnétiques



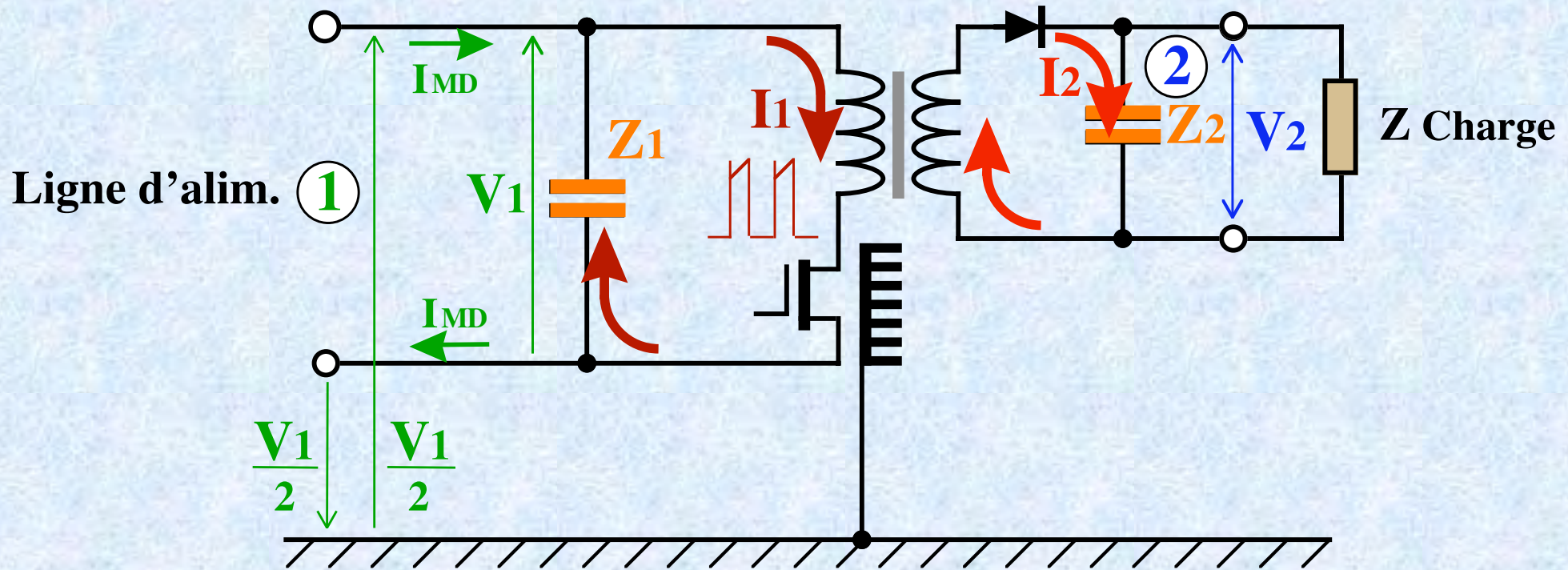
# Quelques problèmes d'harmoniques

- Les harmoniques sont générés par des courants non sinus. Pour un réseau électrique, les harmoniques constituent un problème BF fréquent ( $< 2$  kHz et MD seulement).
- Généralement, les harmoniques pairs sont faibles (car les demi alternances + et – se ressemblent). En général, un convertisseur AC / DC sans PFC dépasse les limites.
- Les harmoniques impairs peuvent être sévères ( $> 50$  % @ H3 ;  $> 30$  % @ H5 ).
- Pour les convertisseurs monophasés sans PFC sur un réseau triphasé, le 3<sup>ème</sup> harmonique (150 Hz) est un courant homopolaire ; et  $I_{\text{neutre}}$  peut dépasser  $I_{\text{phase}}$ .
- Des filtres actifs ou anti-harmoniques sont utiles sur un réseau à faible  $I_{cc}$  (GE).
- Pour un réseau de forte puissance, le problème n'est pas la distorsion de la tension mais la maîtrise du schéma de protection (des câbles & des disjoncteurs).





# Perturbations de Mode Différentiel

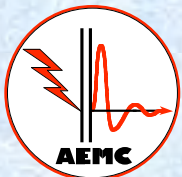


①  $V_1 \approx Z_1 \cdot I_1$  ( Si  $Z_{RSIL} \gg Z_1$  - En général :  $V_1 = f(F)$  )

$V_1$  n'est pas vu au secondaire, donc ne perturbe pas la charge.

②  $V_2 \approx Z_2 \cdot I_2$  ( Si  $Z_{Charge} \gg Z_2$  - En général :  $V_2 = f(t)$  )

$V_2$  peut perturber ( typiquement si  $V_2$  crête à crête  $\geq 1$  V )

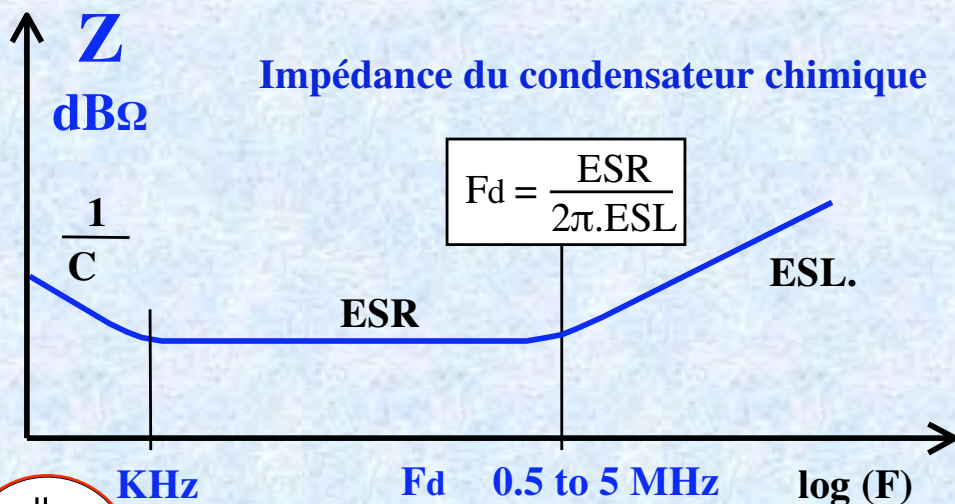
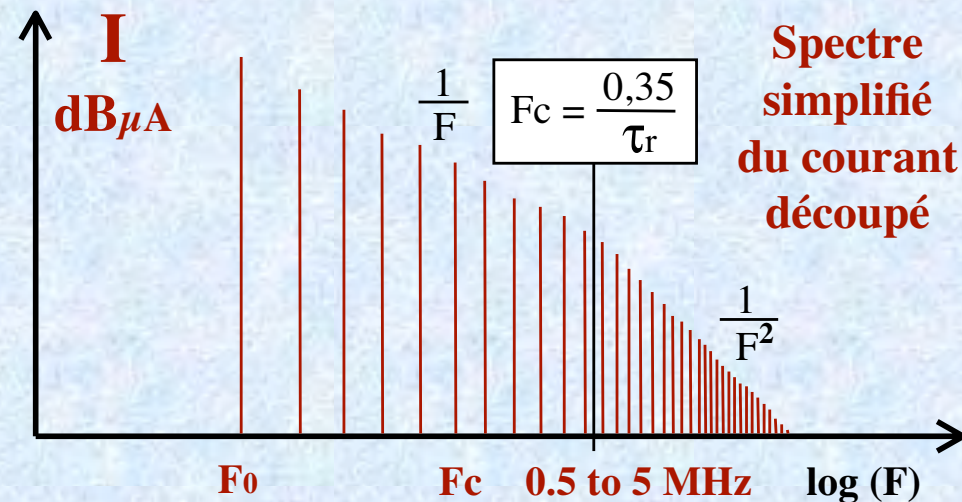
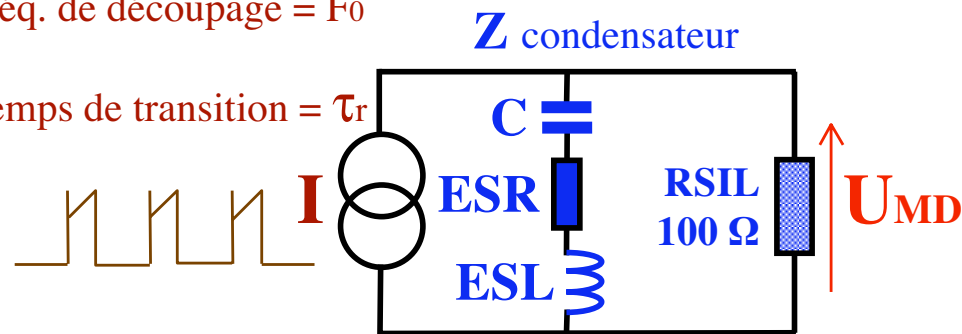


# Spectre émis avant filtrage en Mode Différentiel

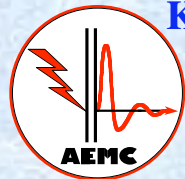
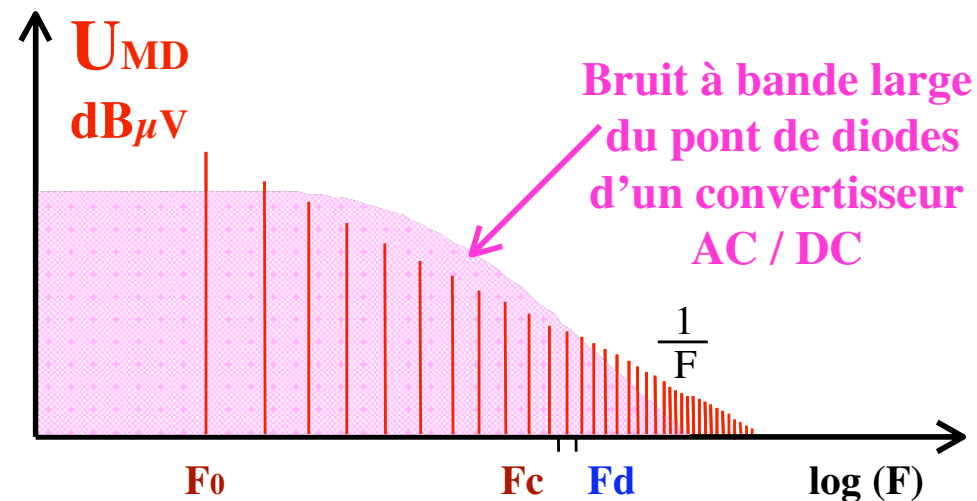
## Schéma équivalent en mode différentiel

Fréq. de découpage =  $F_0$

Temps de transition =  $\tau_r$



## Résultat de la convolution



# Perte d'insertion d'un filtre CEM en Mode Différentiel

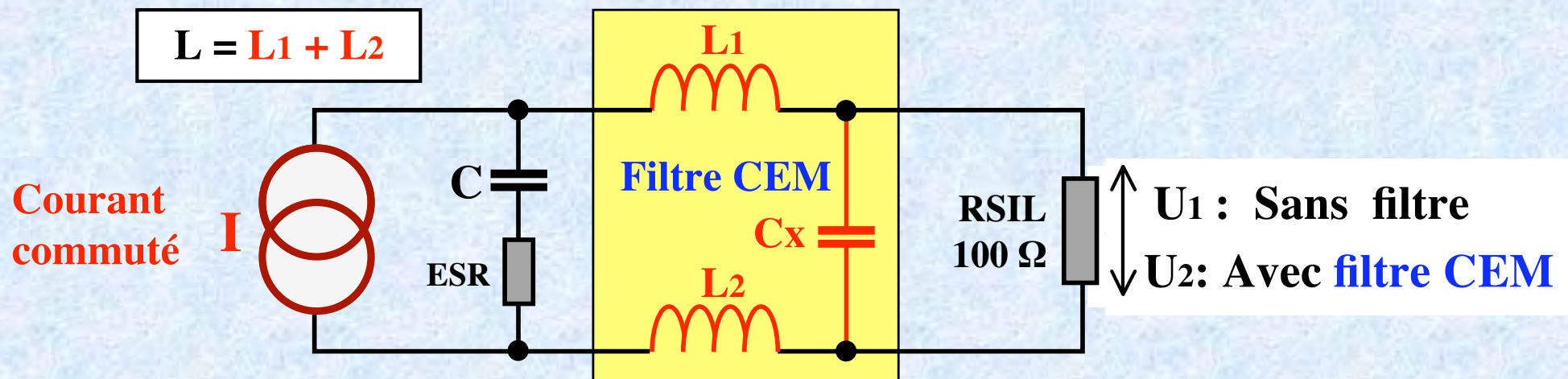
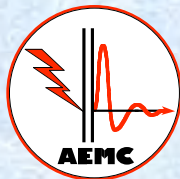
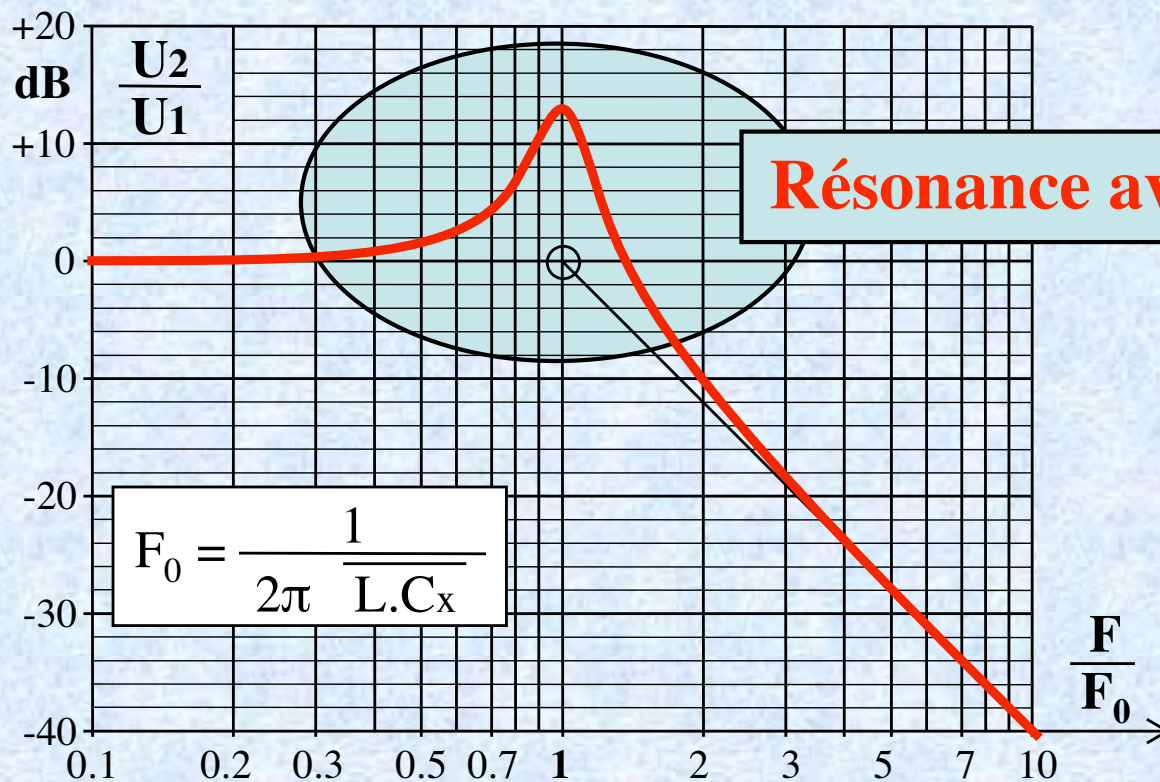
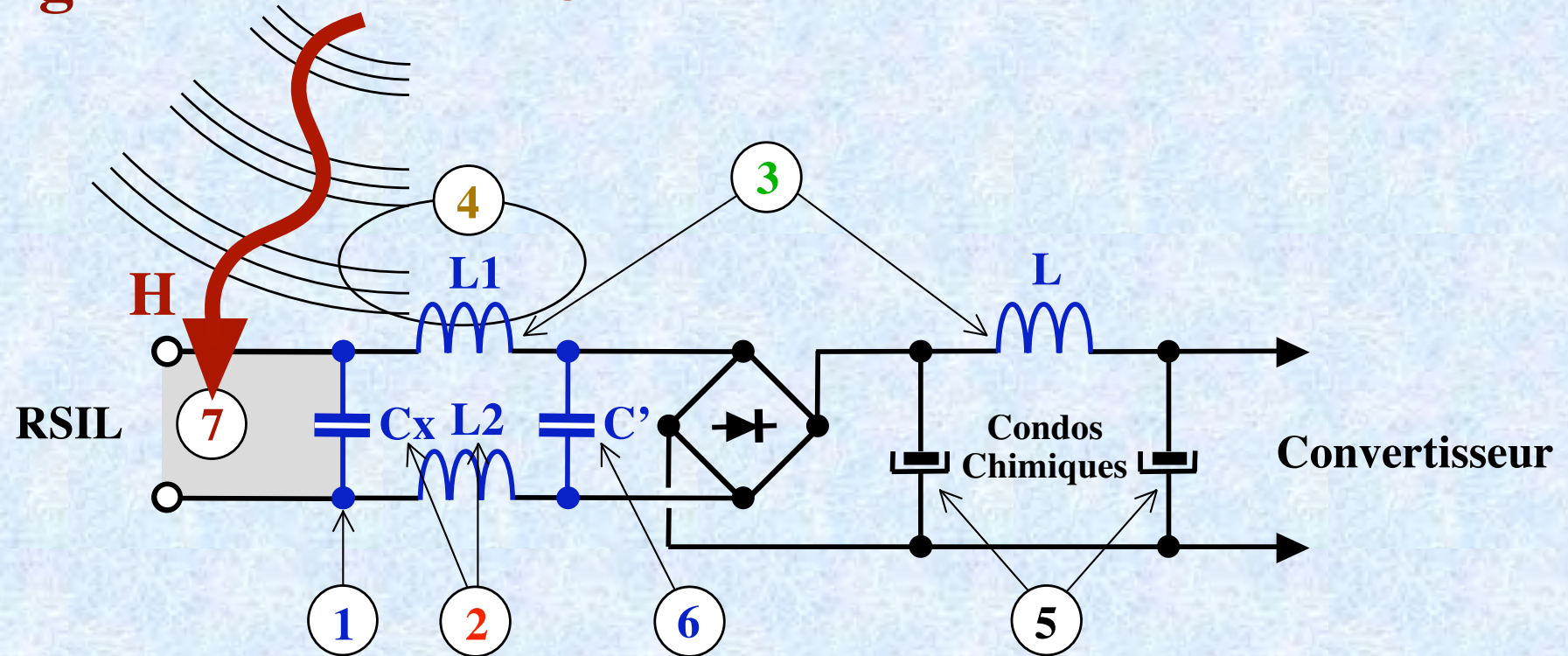


Schéma équivalent en M. D. pour un filtre à simple cellule



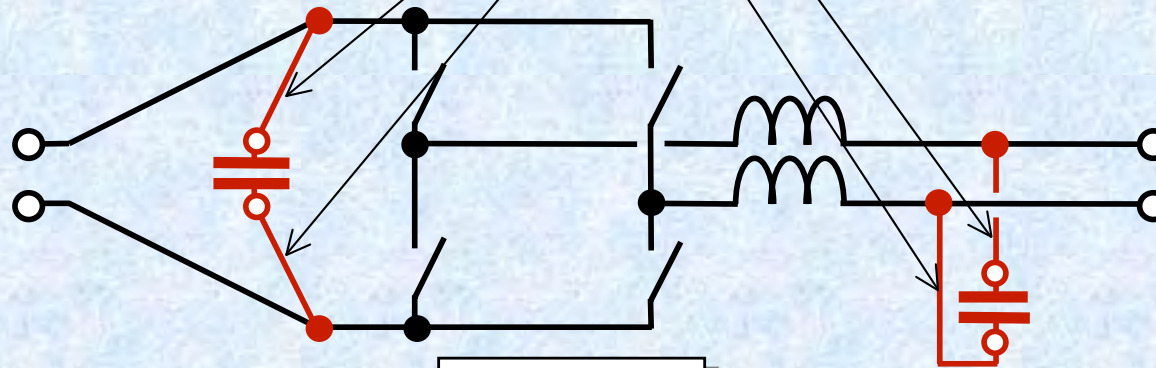
# Pièges d'un filtre CEM en Mode Différentiel



- 1 - Choisir la bonne structure (qui désadapte le mieux les impédances)
- 2 - Choisir  $(L1+L2) \times C_x$  pour  $F_{\text{résonance}} < \text{plus faible fréquence à filtrer}$
- 3 - Vérifier qu'aucune inductance ne sature (à Max P & à Min U)
- 4 - Limiter l'inductance de fuite (dans l'air) de L1 & L2
- 5 - Une marge est nécessaire compte tenu de la dispersion des ESR
- 6 - Ajouter  $C'$  pour réduire le bruit à bande large du pont de diodes
- 7 - Limiter le couplage champ H à boucle du côté "propre" du filtre.

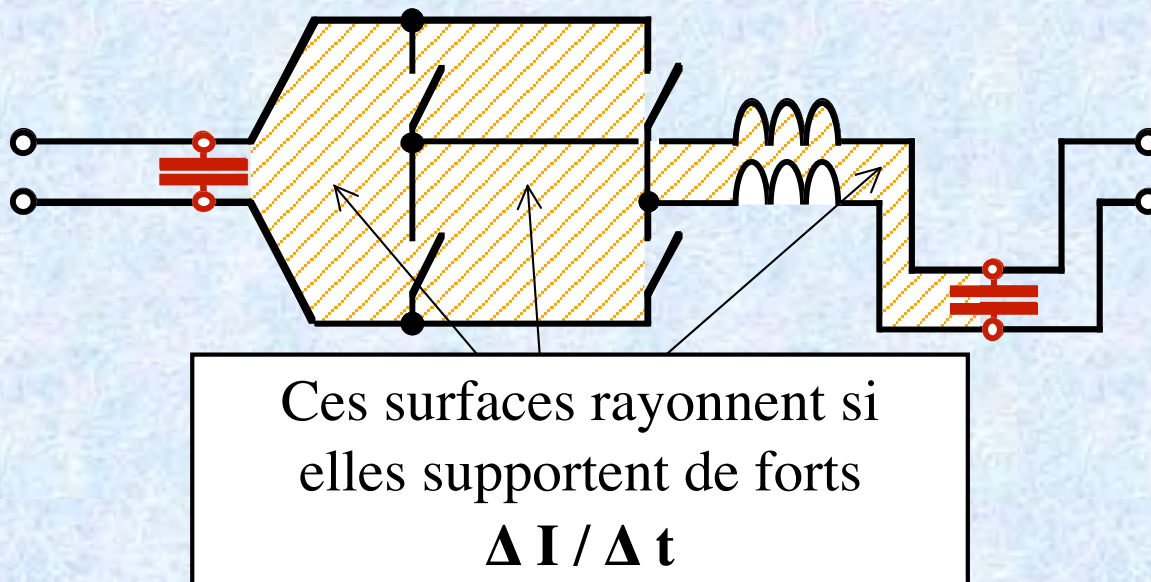
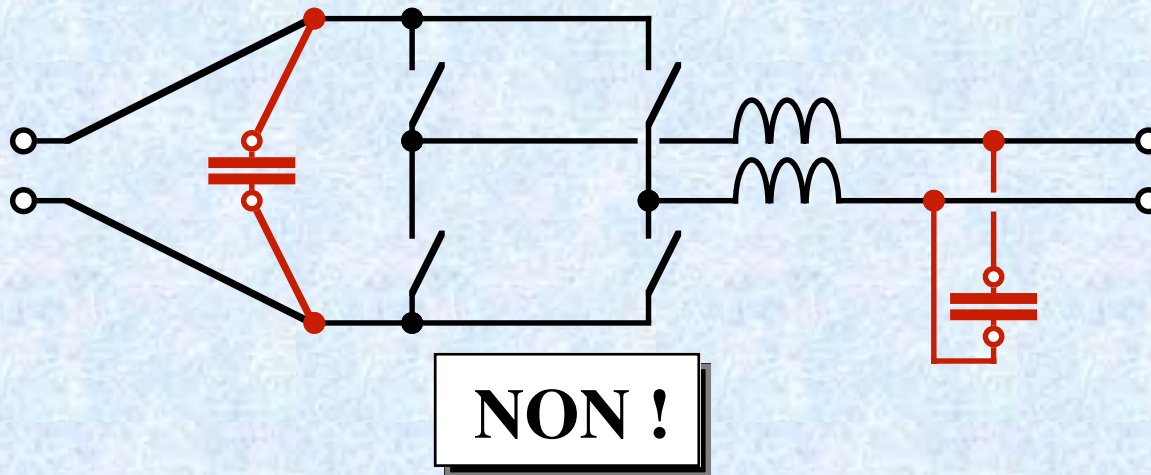
# Attention au câblage en Mode Différentiel !...

Ces inductances de câblage réduisent l'efficacité du filtre

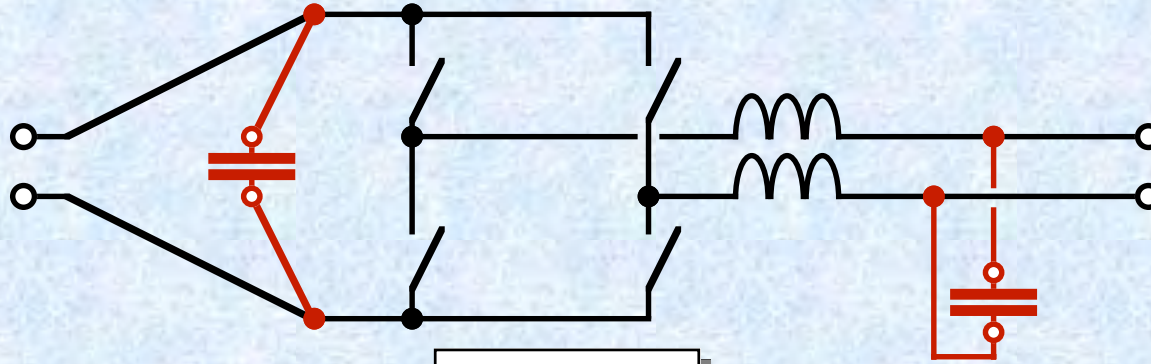


**NON !**

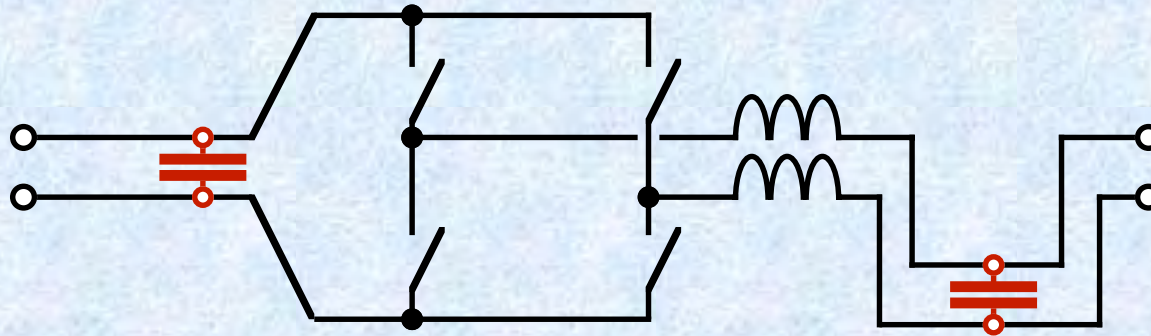
# Attention au câblage en Mode Différentiel !...



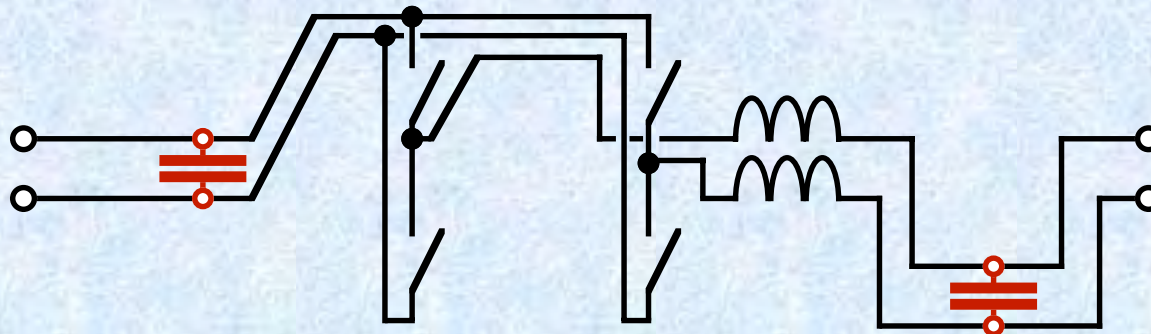
# Attention au câblage en Mode Différentiel !...



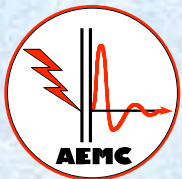
**NON !**



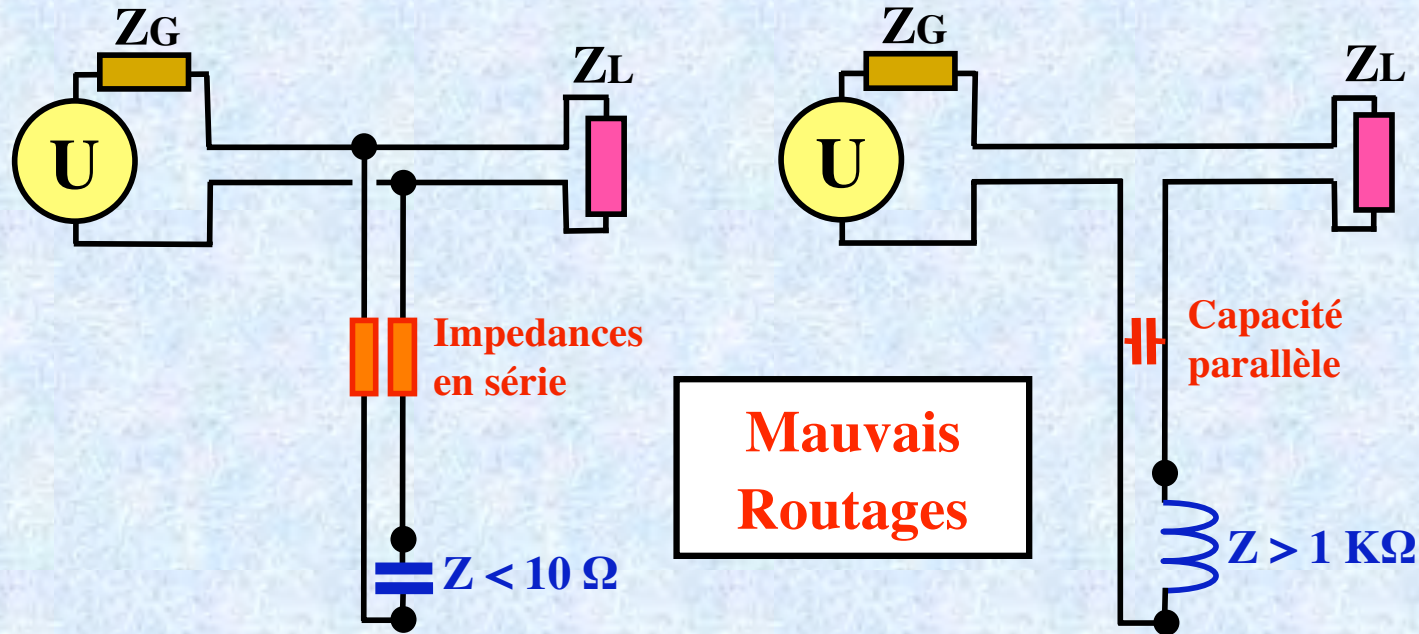
**Mieux !**



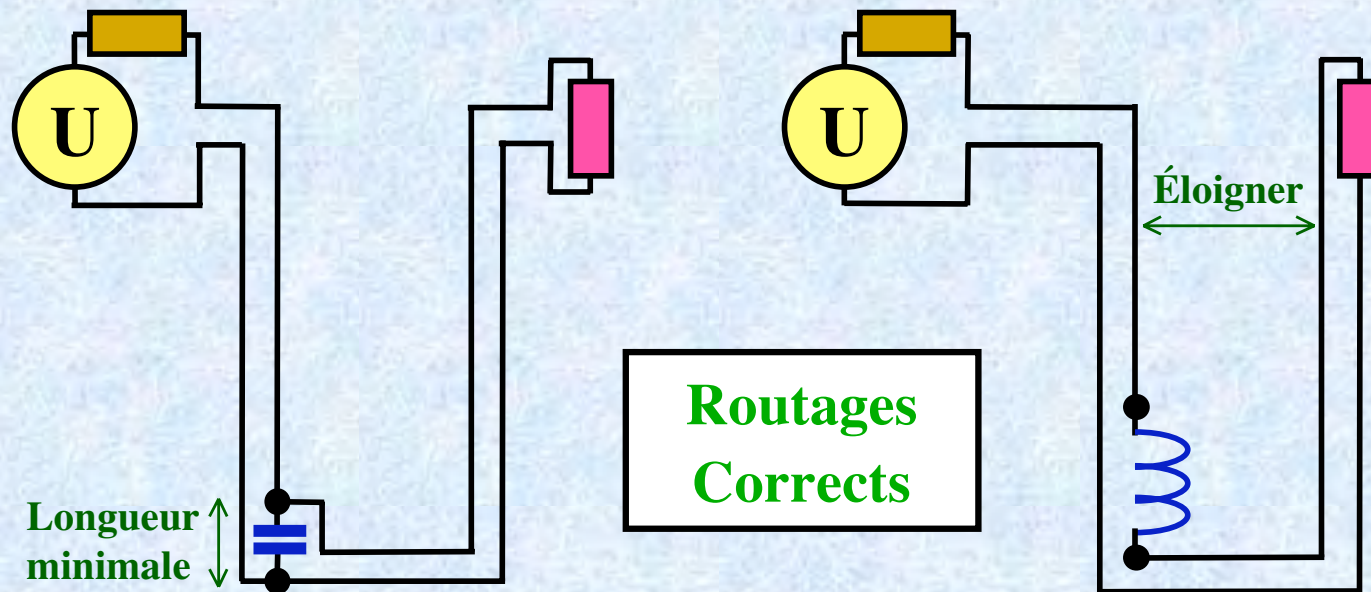
**BON !**



# Comment réduire les éléments parasites...



Réduire les surfaces, c'est nécessaire, mais insuffisant

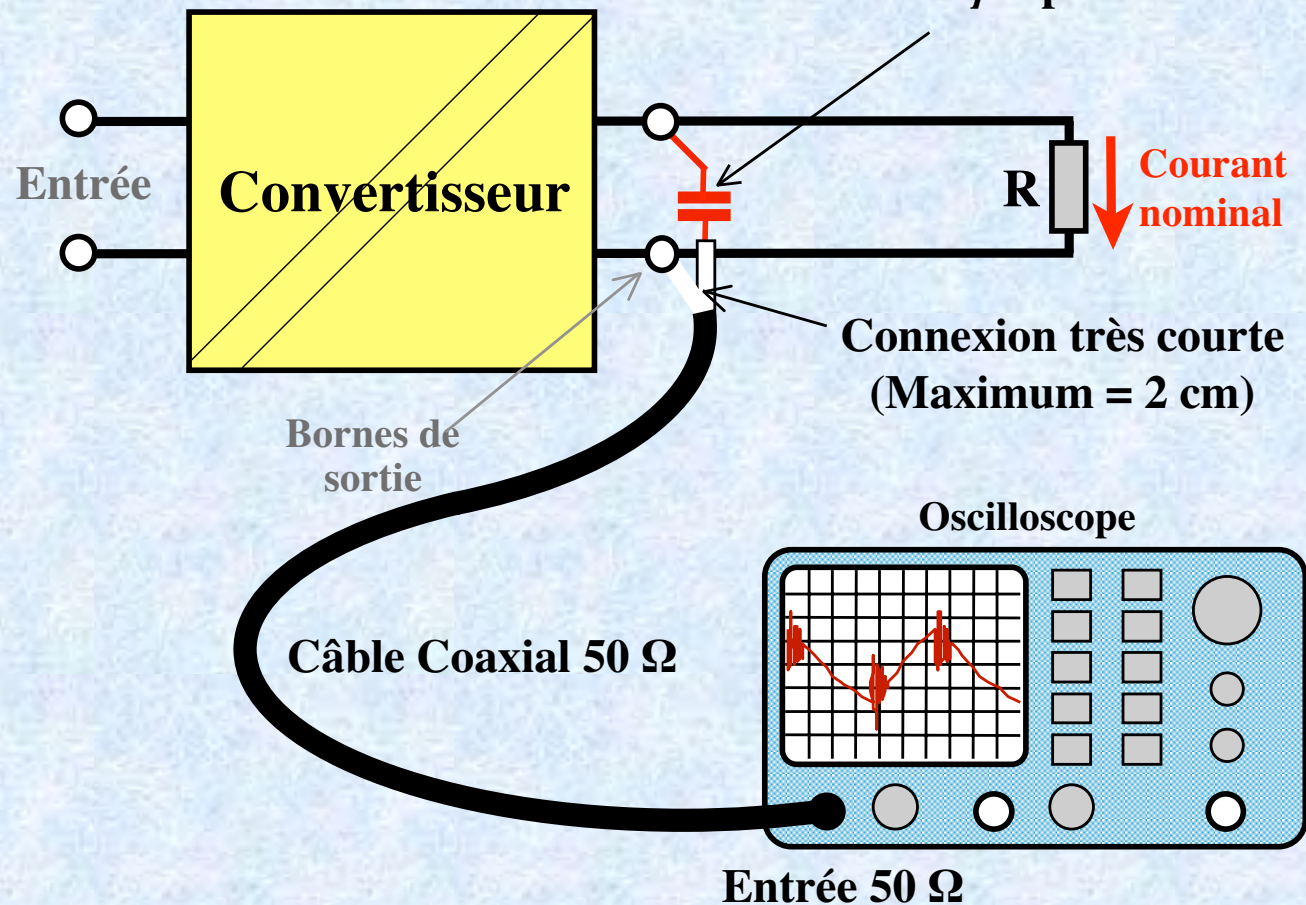




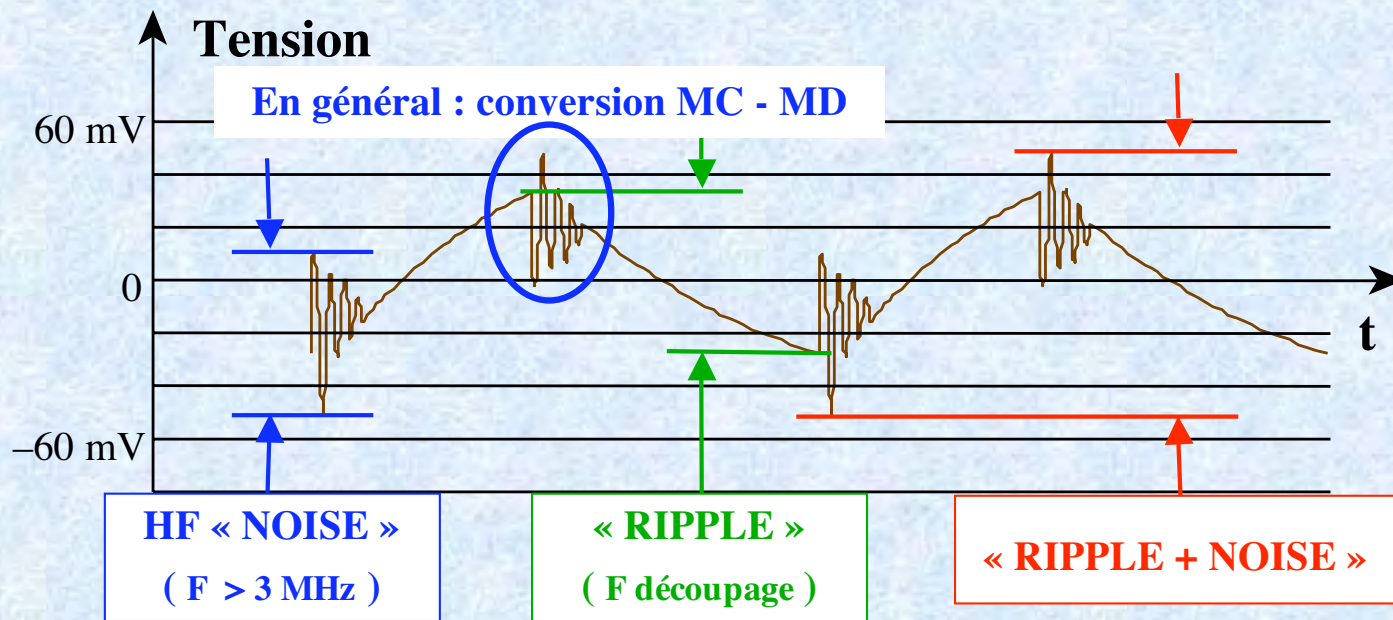
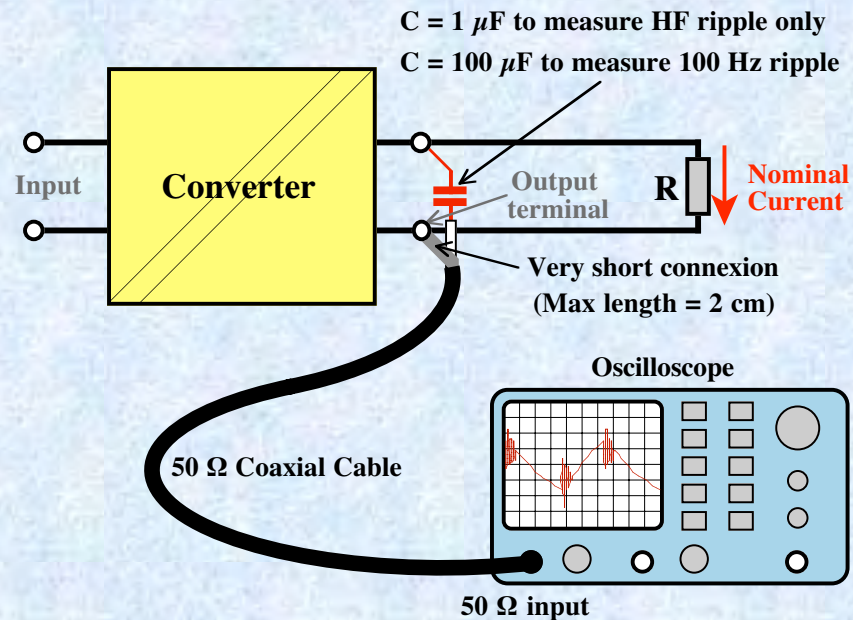
# Comment mesurer l'ondulation de sortie...

$C = 1 \mu\text{F}$  pour mesurer l'ondulation HF seule

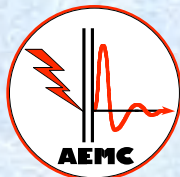
$C = 100 \mu\text{F}$  pour mesurer l'ondulation à 100 Hz



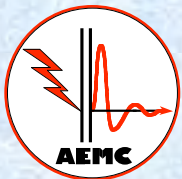
# Comment analyser l'ondulation de sortie



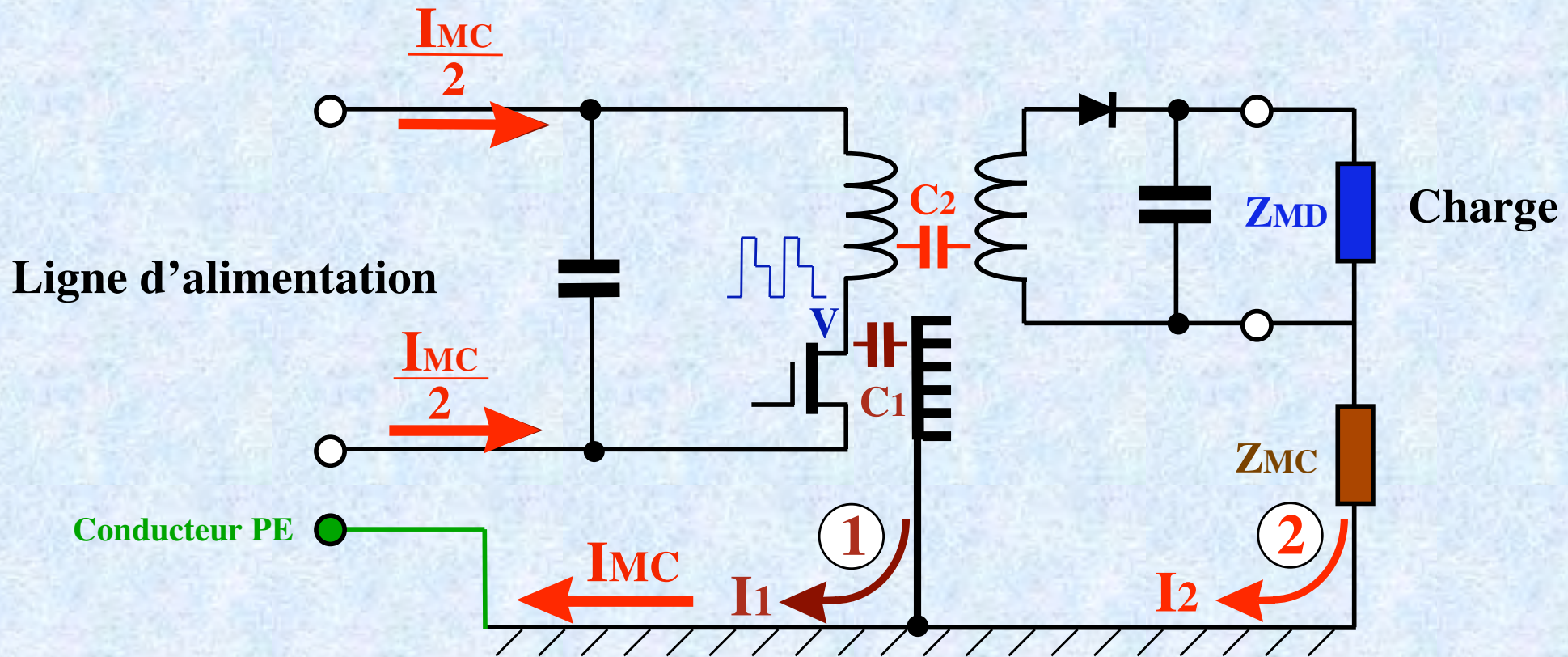
10 mV : Excellent — 100 mV : Moyen — 1 V : Excessif



- **Introduction**
- **Immunité en mode différentiel**
- **Émission en mode différentiel**
- **Émissions en mode commun**
- **Champs électromagnétiques**



# Perturbations de Mode Commun



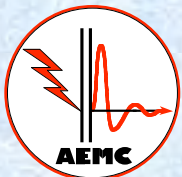
①  $I_1 = C_1 \cdot \Delta V / \Delta t$

$I_1$  ne circule pas dans la charge, donc le perturbe peu.

②  $I_2 \approx C_2 \cdot \Delta V / \Delta t$  (et peut être modifié par  $Z_{MC}$ )

$I_2$  peut circuler dans la charge, donc il peut la perturber.

**Courant total de Mode Commun :  $I_{MC} = I_1 + I_2$**

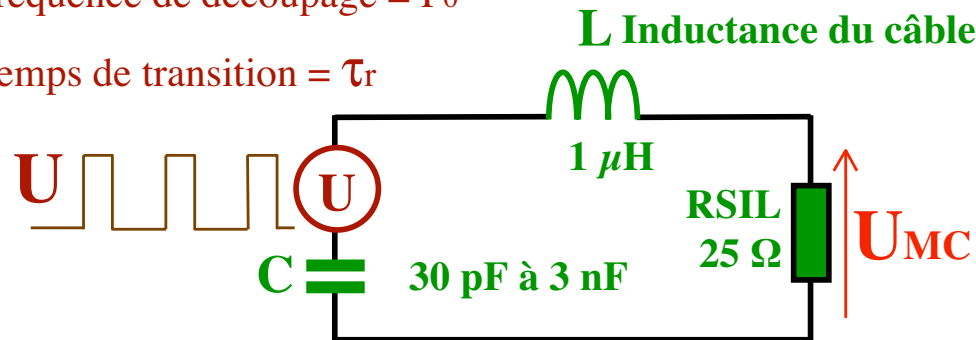


# Spectre émis avant filtrage en Mode Commun

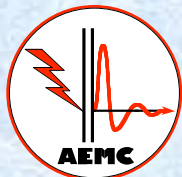
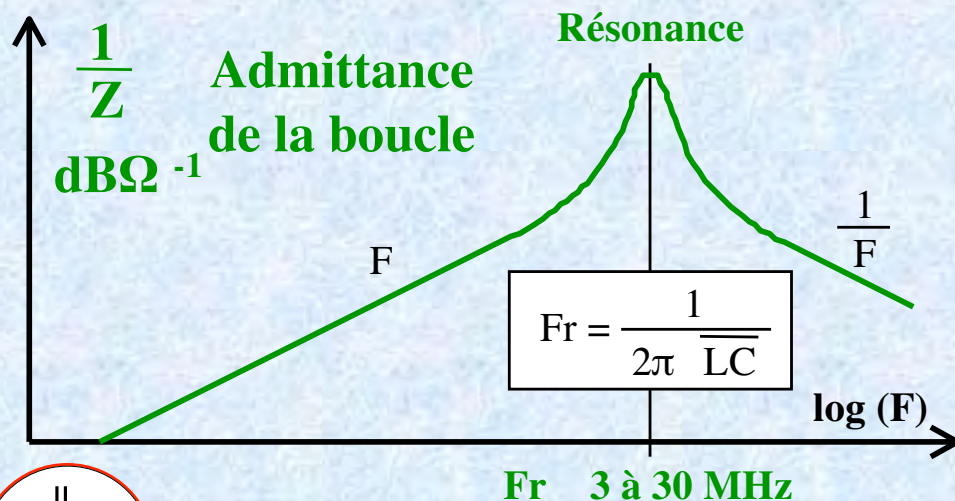
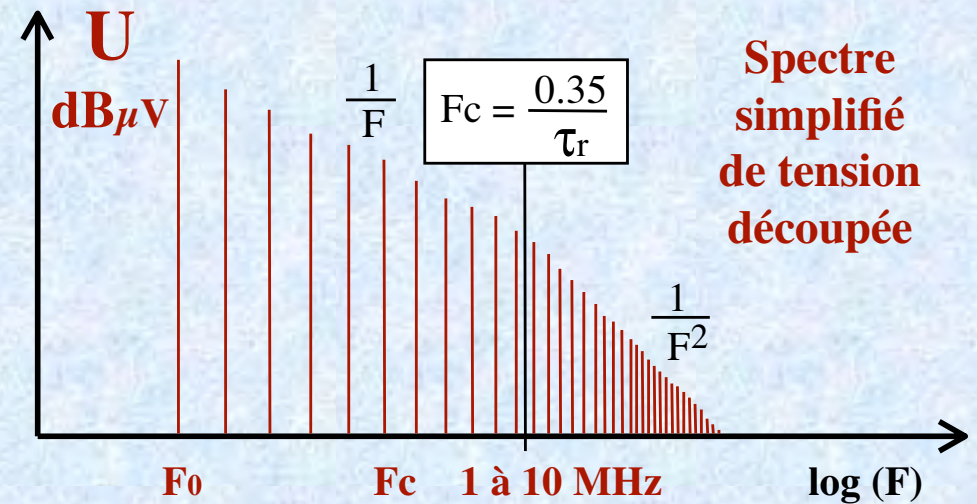
## Schéma équivalent en Mode Commun

Fréquence de découpage =  $F_0$

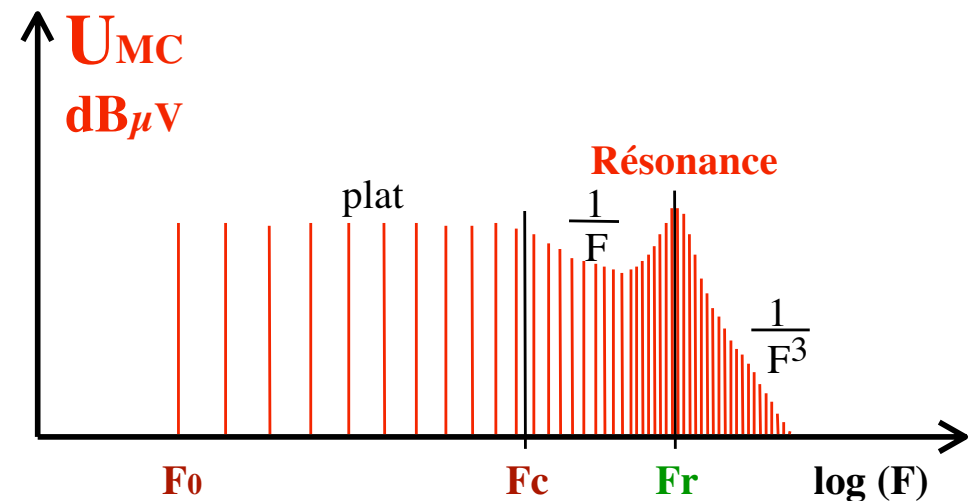
Temps de transition =  $\tau_r$



**C** : Capa parasite entre "conducteurs chauds" & masse



## Résultat de la convolution



# Perte d'insertion d'un filtre CEM en Mode Commun

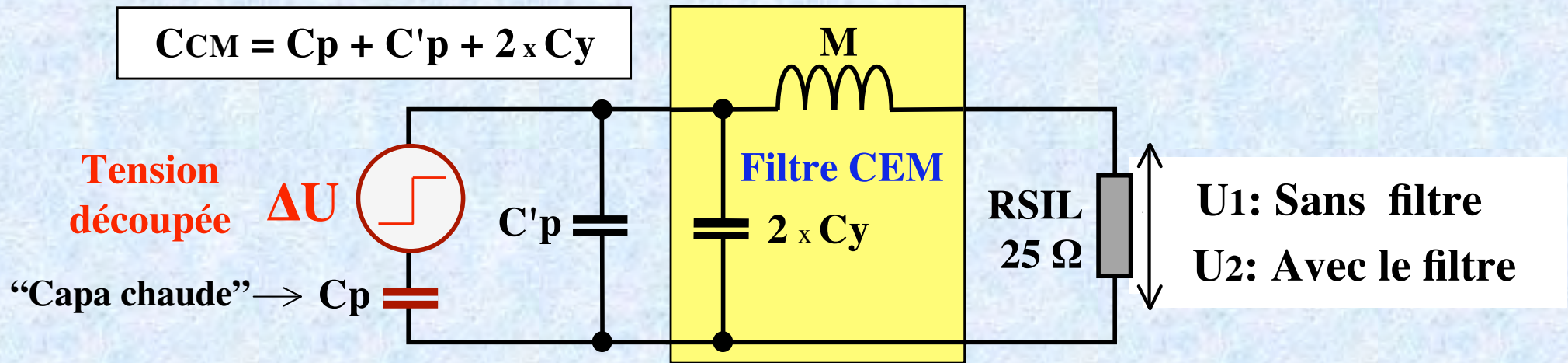
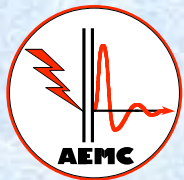
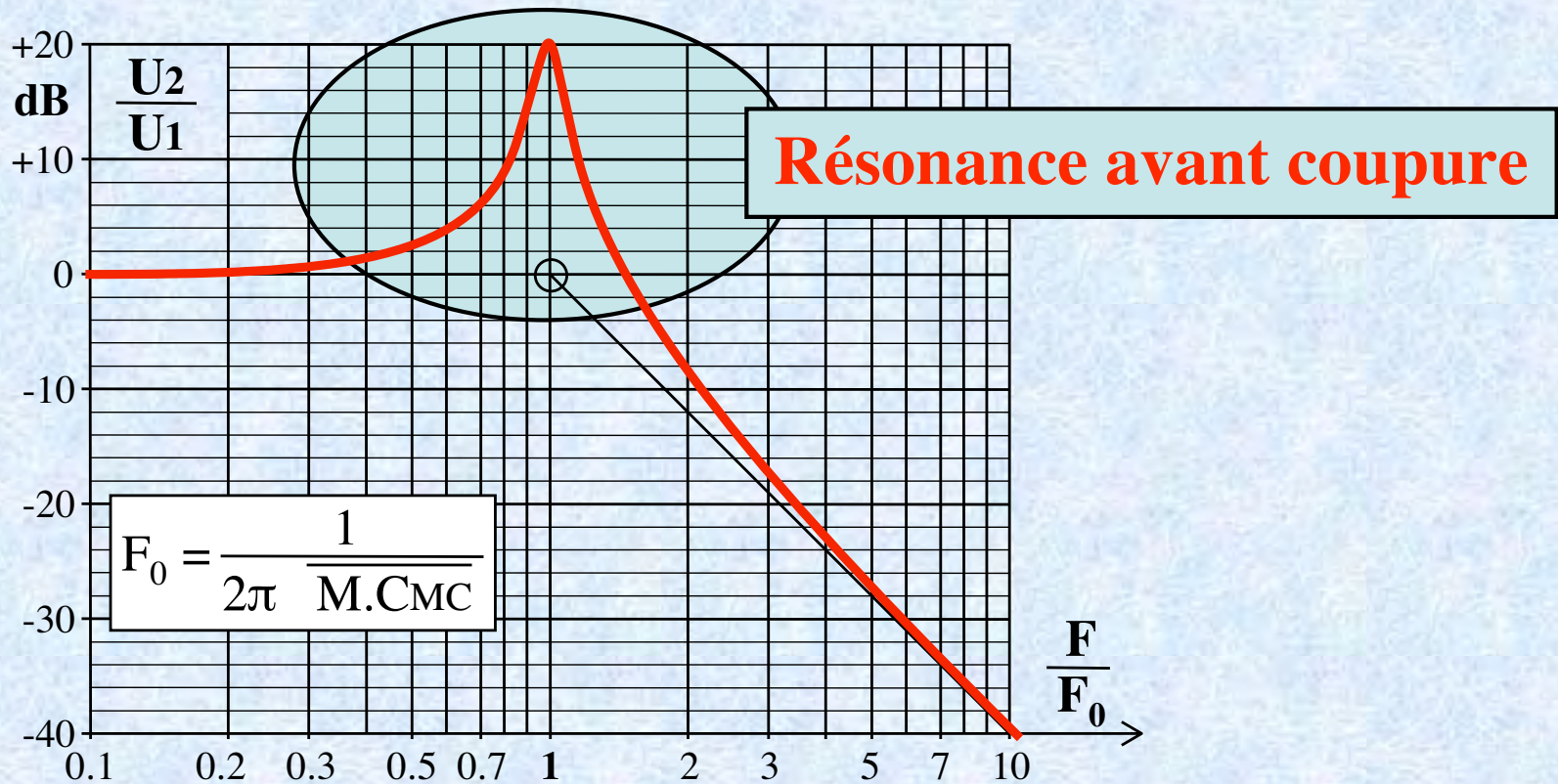
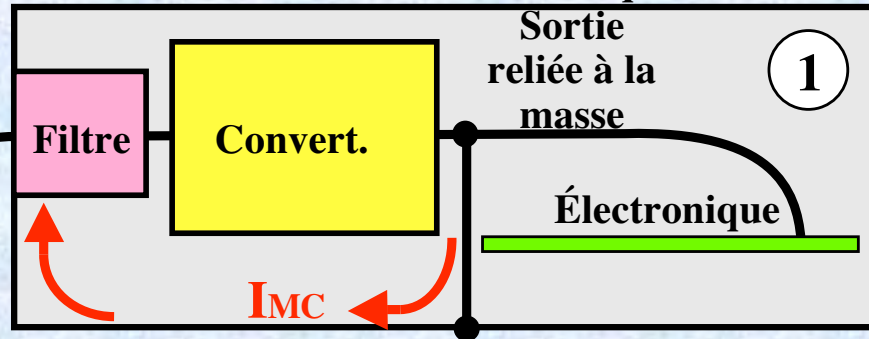


Schéma équivalent d'un filtre en mode commun simple cellule

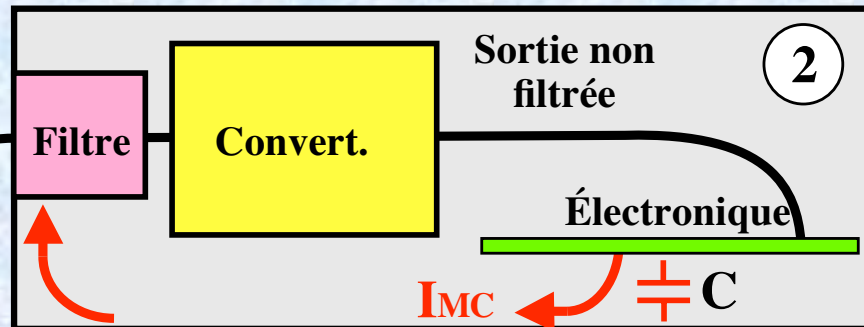


# Les 3 cas de Mode Commun Primaire - à - Secondaire

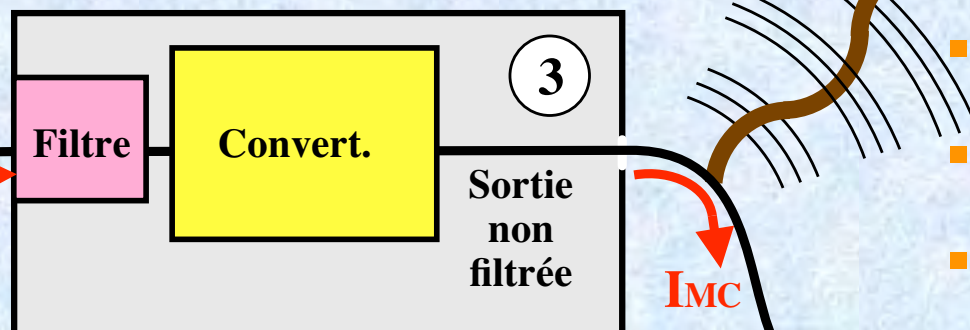
Châssis métallique



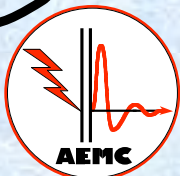
- Aucun parasite hors du châssis
- Aucun bruit de MC dans les circuits
- Filtre CEM très facile à optimiser



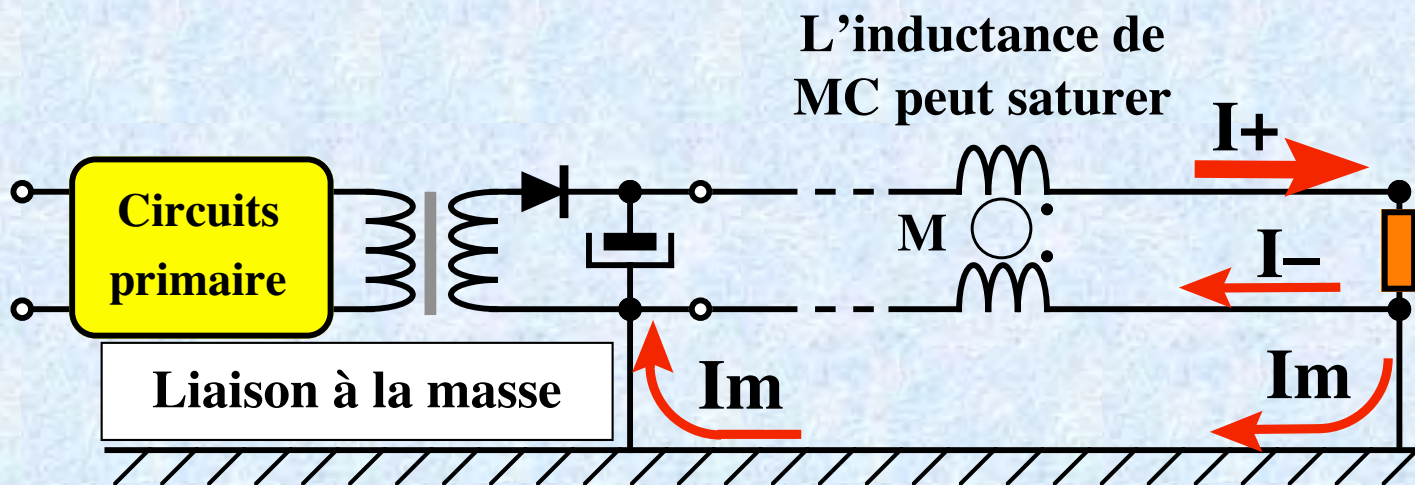
- Aucun parasite hors du châssis
- Du courant de MC dans les circuits
- Filtre CEM plus difficile à optimiser



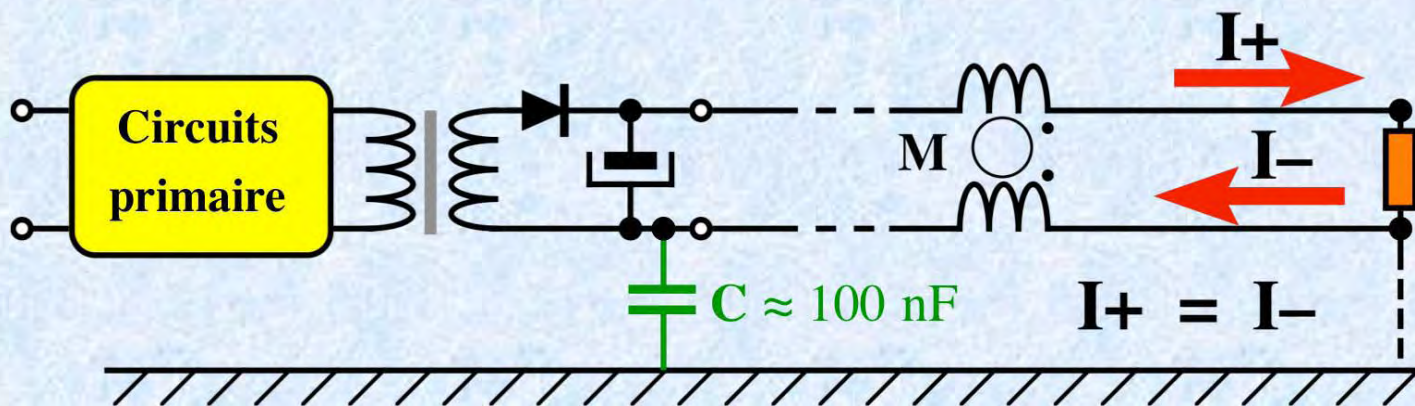
- Des champs rayonnent à l'extérieur
- Filtrage d'entrée impossible
- Le câble de sortie doit être filtré ou blindé avec mise à la masse



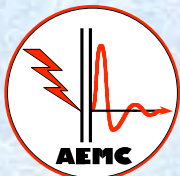
# Faire flotter, ou ne pas faire flotter ?



$$I_+ \neq I_-$$

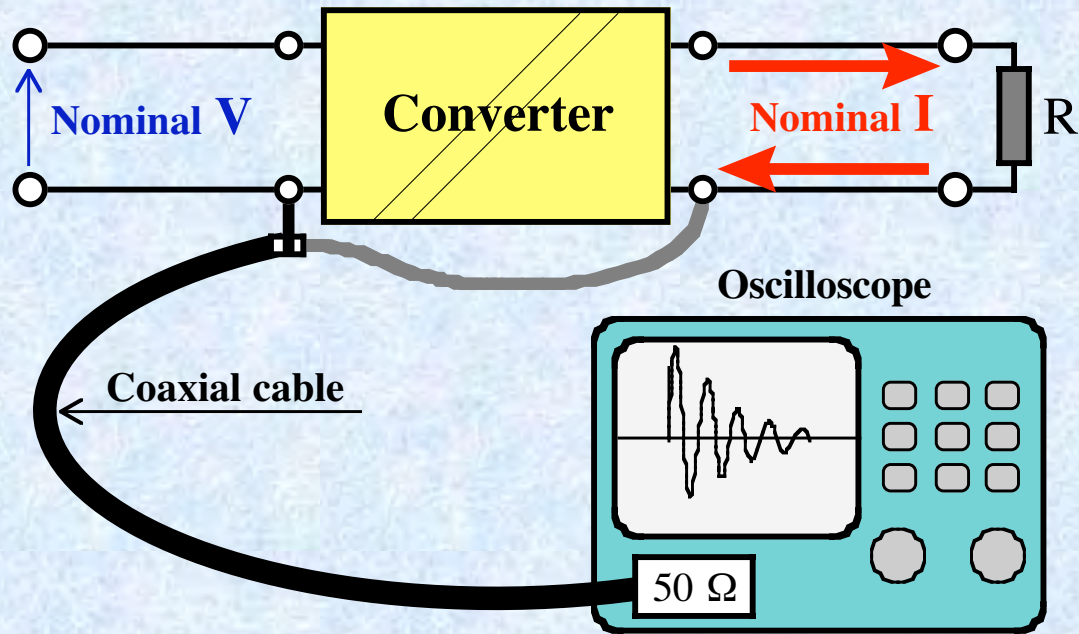


Une solution (presque) universelle



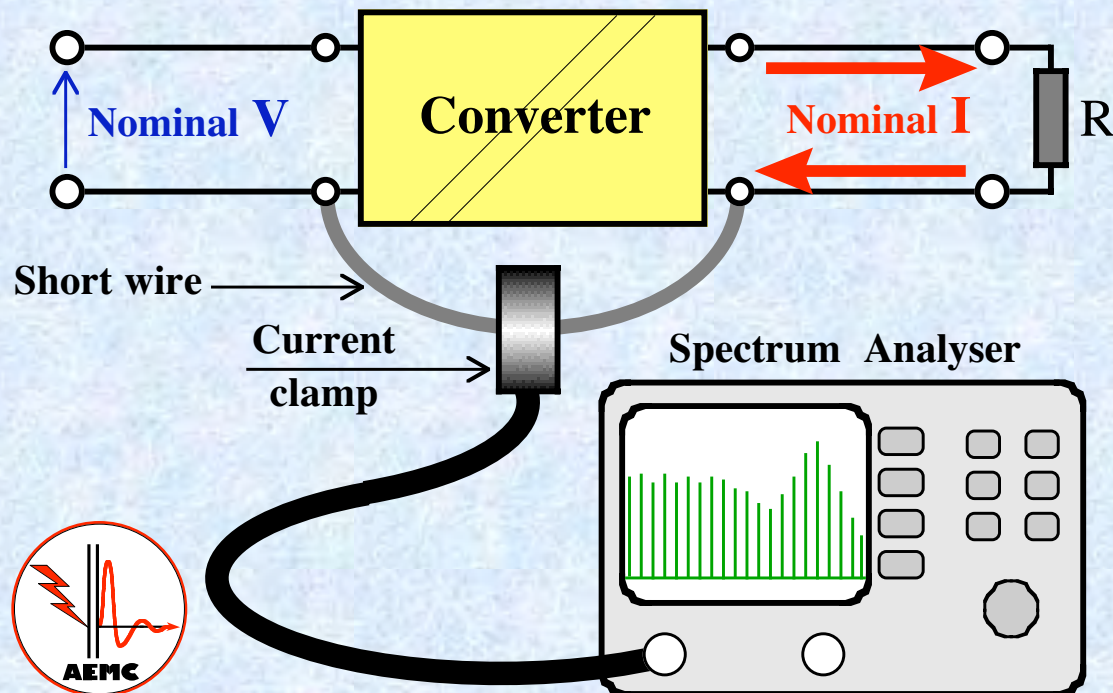


# Comment mesurer le courant de M. C. Primaire à Secondaire ?



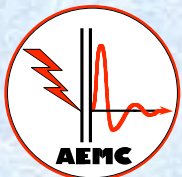
## Mesure temporelle

- Sensibilité : 50 mV/mA
- Bande passante :  $\geq 100$  MHz
- 1 mA crête-crête = Excellent
- 10 mA crête-crête = Moyen
- 100 mA crête-crête = Excessif

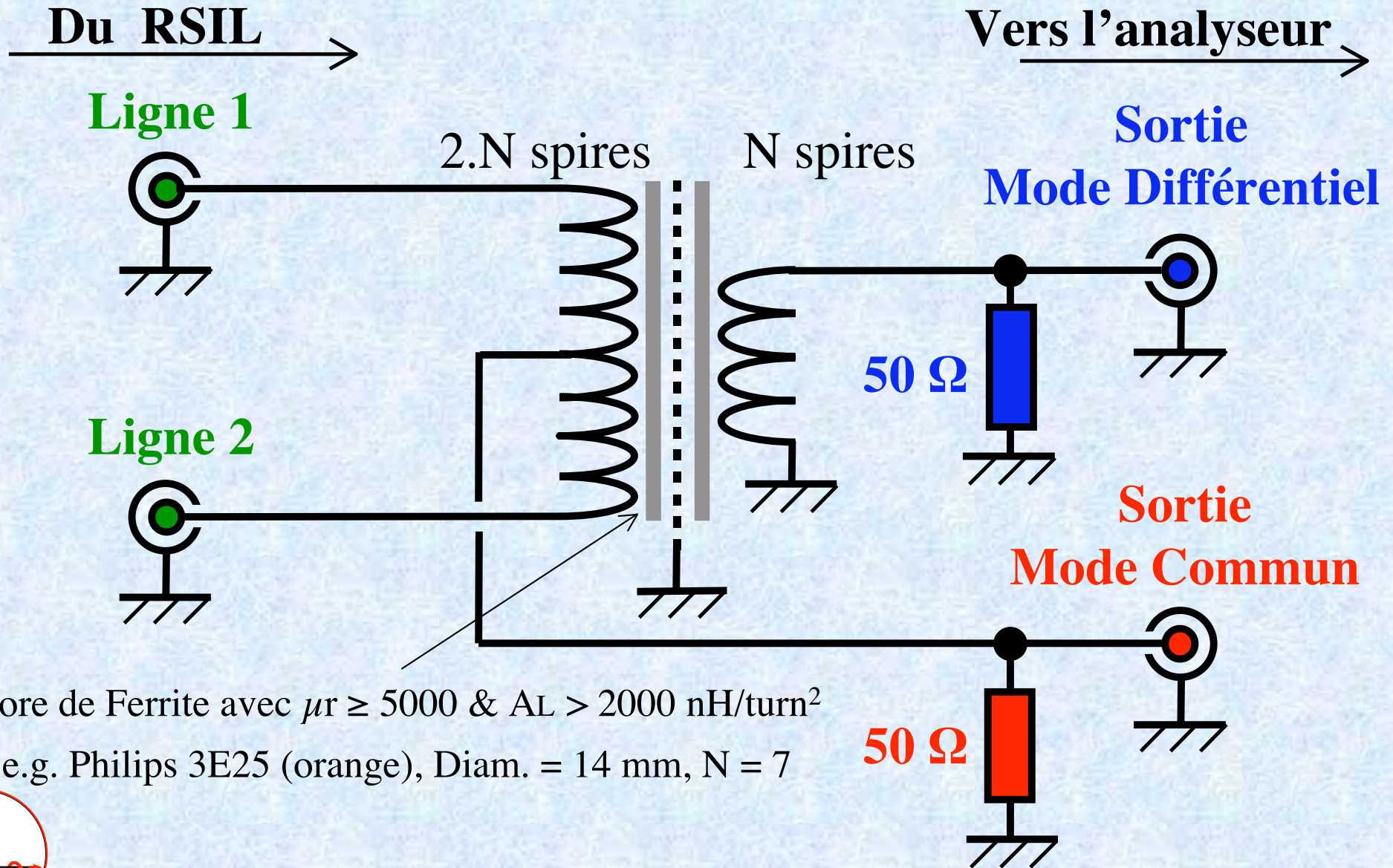


## Mesure fréquentielle

- RBW: 9 or 10 kHz, Détection crête
- SPAN : 0,1 à 50 MHz (100 MHz)
- 10 dB $\mu$ A = Excellent
- 30 dB $\mu$ A = Moyen
- 50 dB $\mu$ A = Excessif



# Ce simple “SÉPARATEUR MC-MD” réduit par 10+ le temps et la difficulté d’optimiser un filtre CEM monophasé

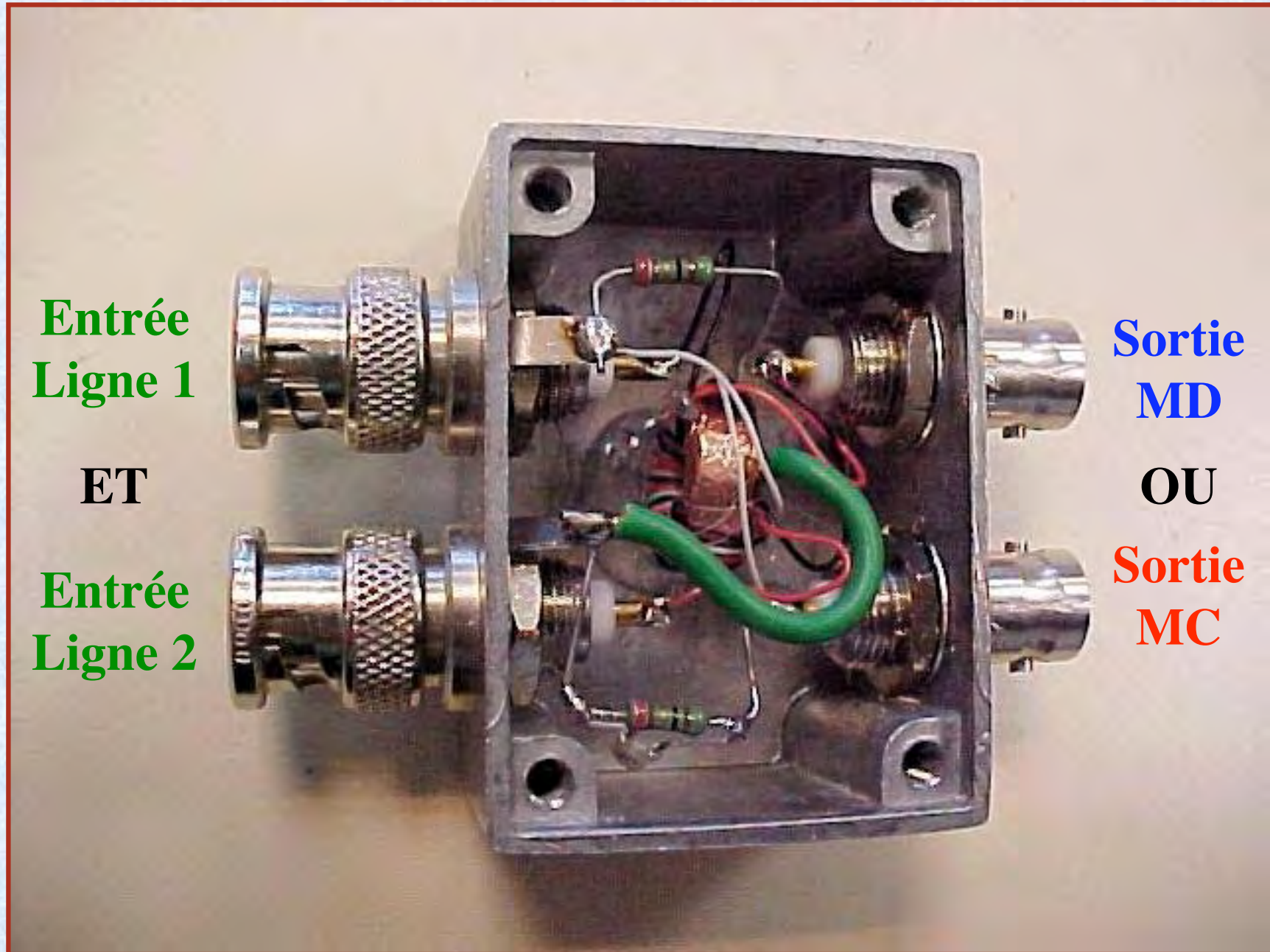


Tore de Ferrite avec  $\mu_r \geq 5000$  &  $AL > 2000$  nH/turn<sup>2</sup>

e.g. Philips 3E25 (orange), Diam. = 14 mm, N = 7



# Exemple de réalisation d'un "SEPARATEUR M. C. - M. D."



Entrée  
Ligne 1

ET

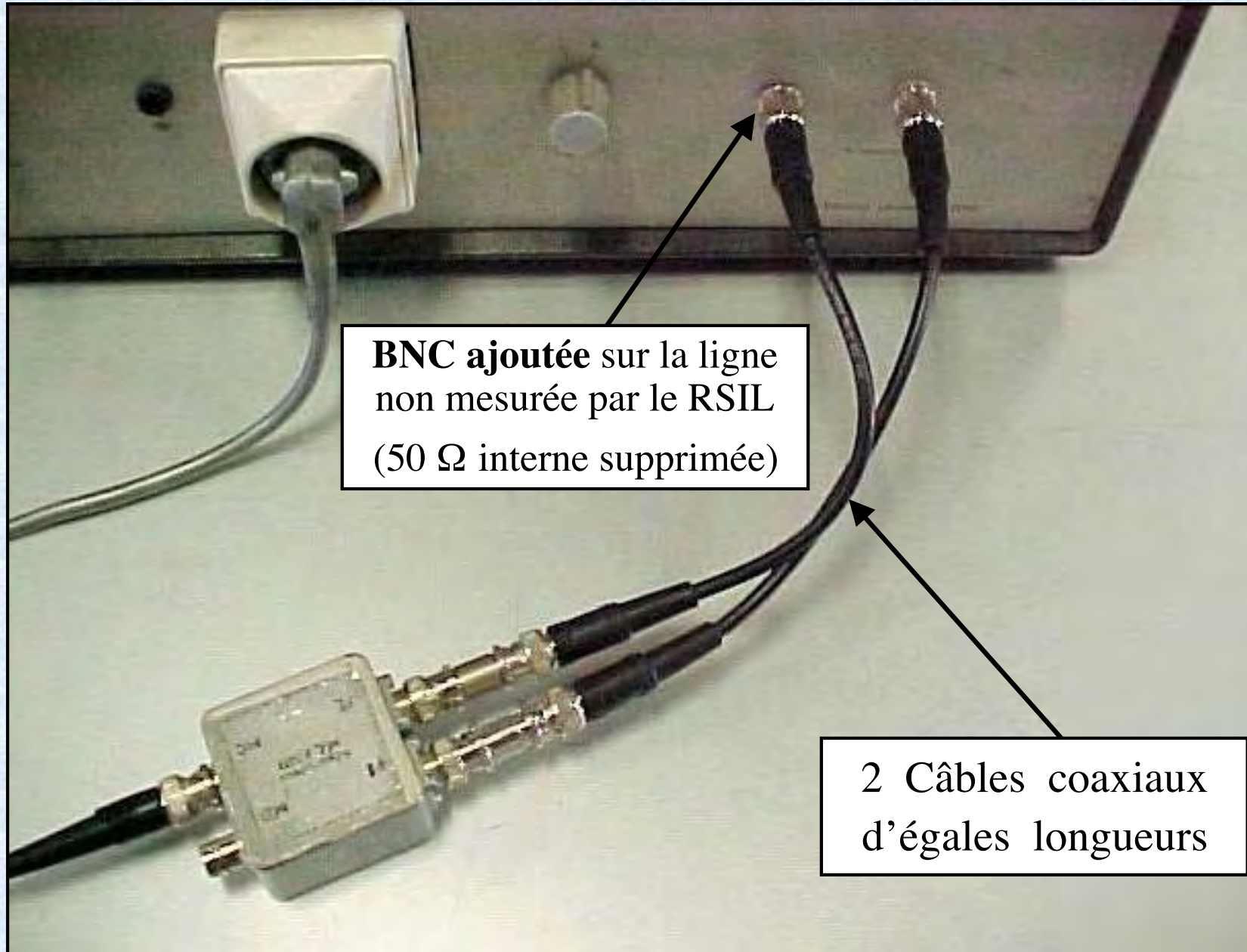
Entrée  
Ligne 2

Sortie  
MD

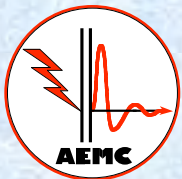
OU

Sortie  
MC

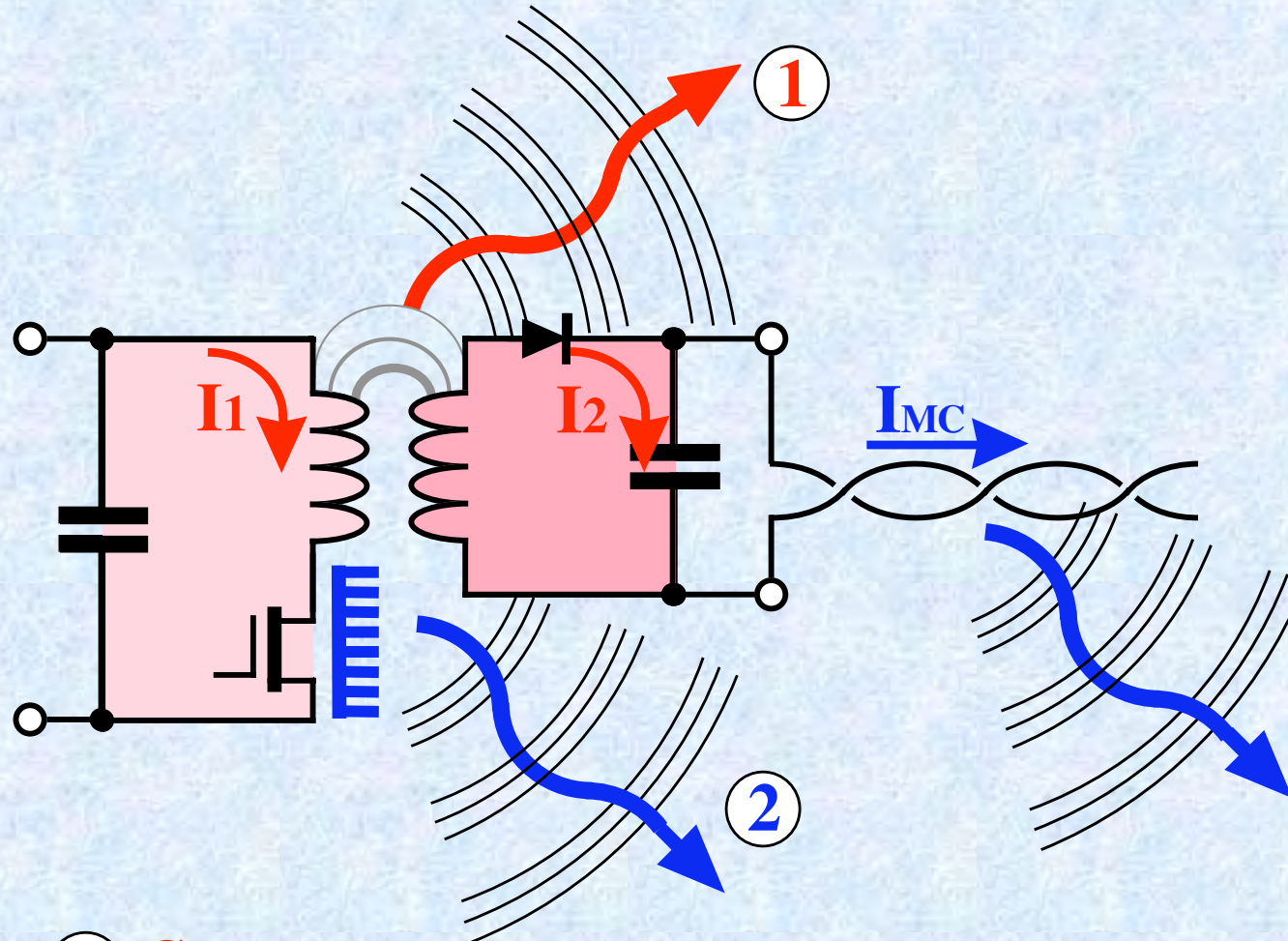
# Adaptation d'un séparateur MC / MD à un RSIL commercial



- **Introduction**
- **Immunité en mode différentiel**
- **Émission en mode différentiel**
- **Émissions en mode commun**
- **Champs électromagnétiques**

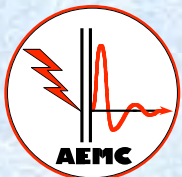
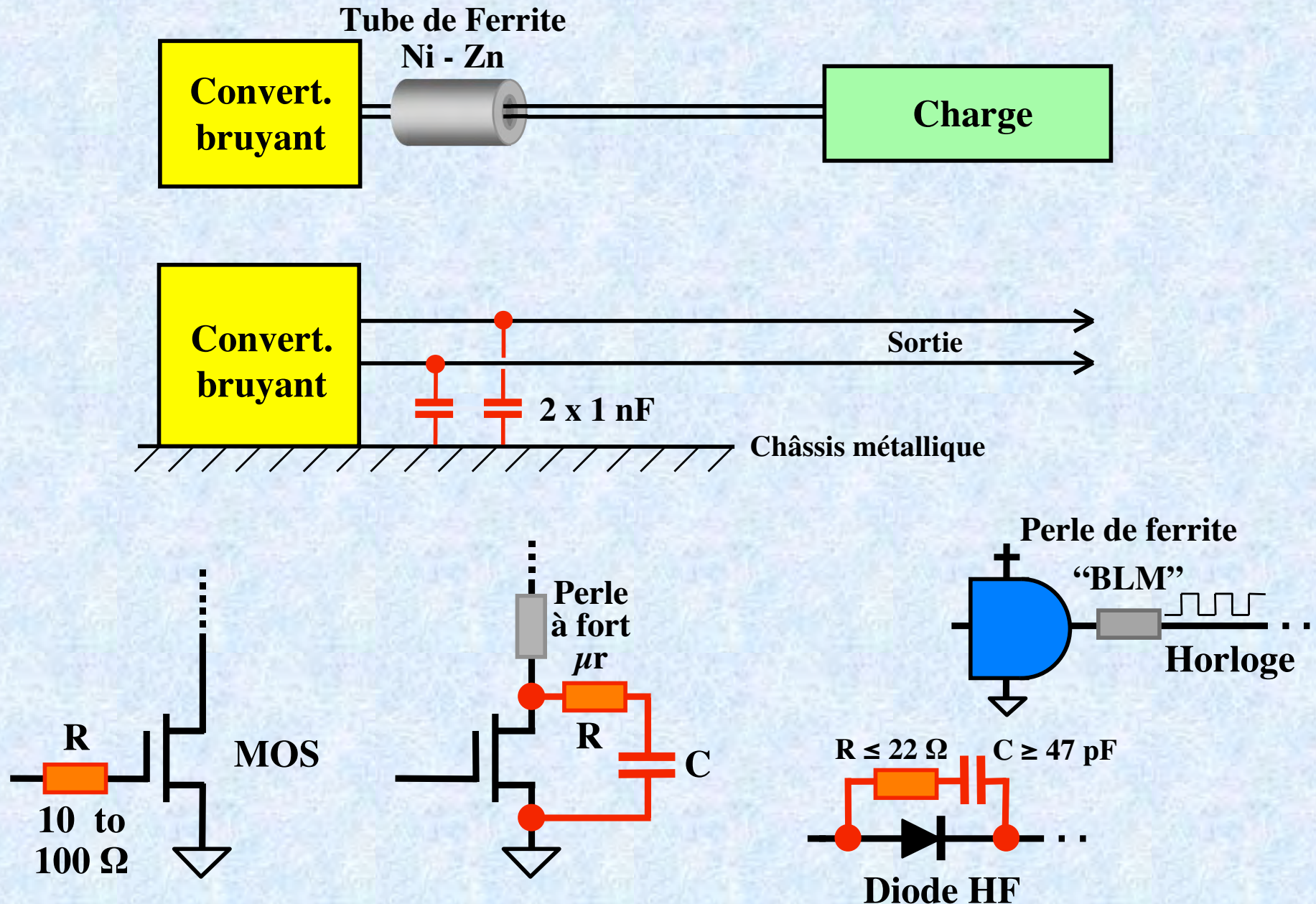


# Sources de rayonnements électromagnétiques



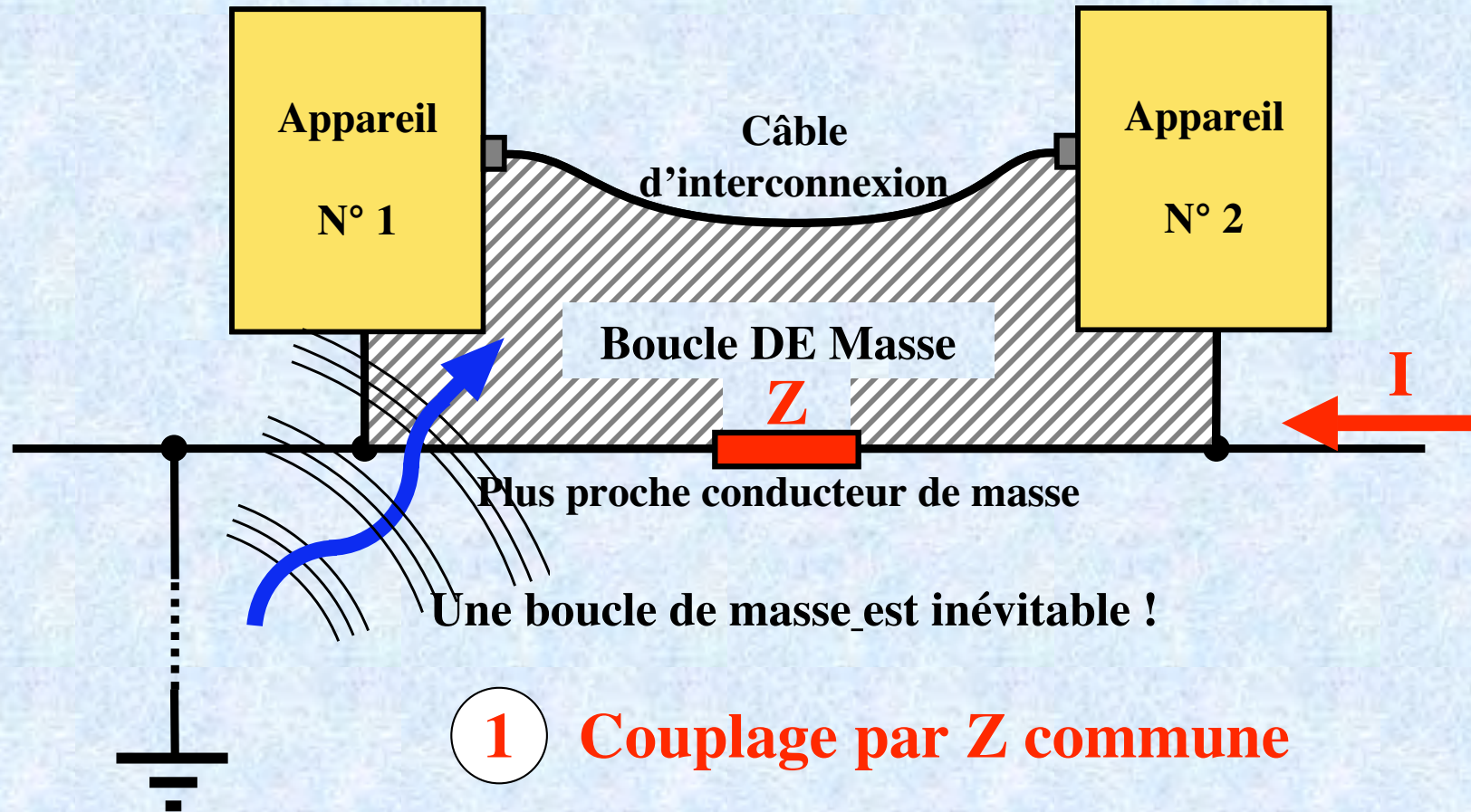
- 1 Sources de champ H :**
  - Champ de fuite des bobinages
  - Surfaces de boucle secondaires
  - Surfaces de boucle primaires
- 2 Sources de champ E :**
  - Parties soumises à fort  $\Delta V/\Delta t$  (Radiateur, pot ferrite...)
  - Câbles insuffisamment filtrés en HF (souvent le câble de sortie)

# Un remède HF est à installer près de la source



Un petit convertisseur (qq W) peut être bruyant (MC & rayonnement)

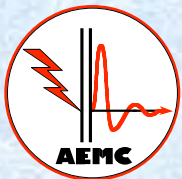
# Boucle DE Masse : Définition & Effets



1 Couplage par Z commune

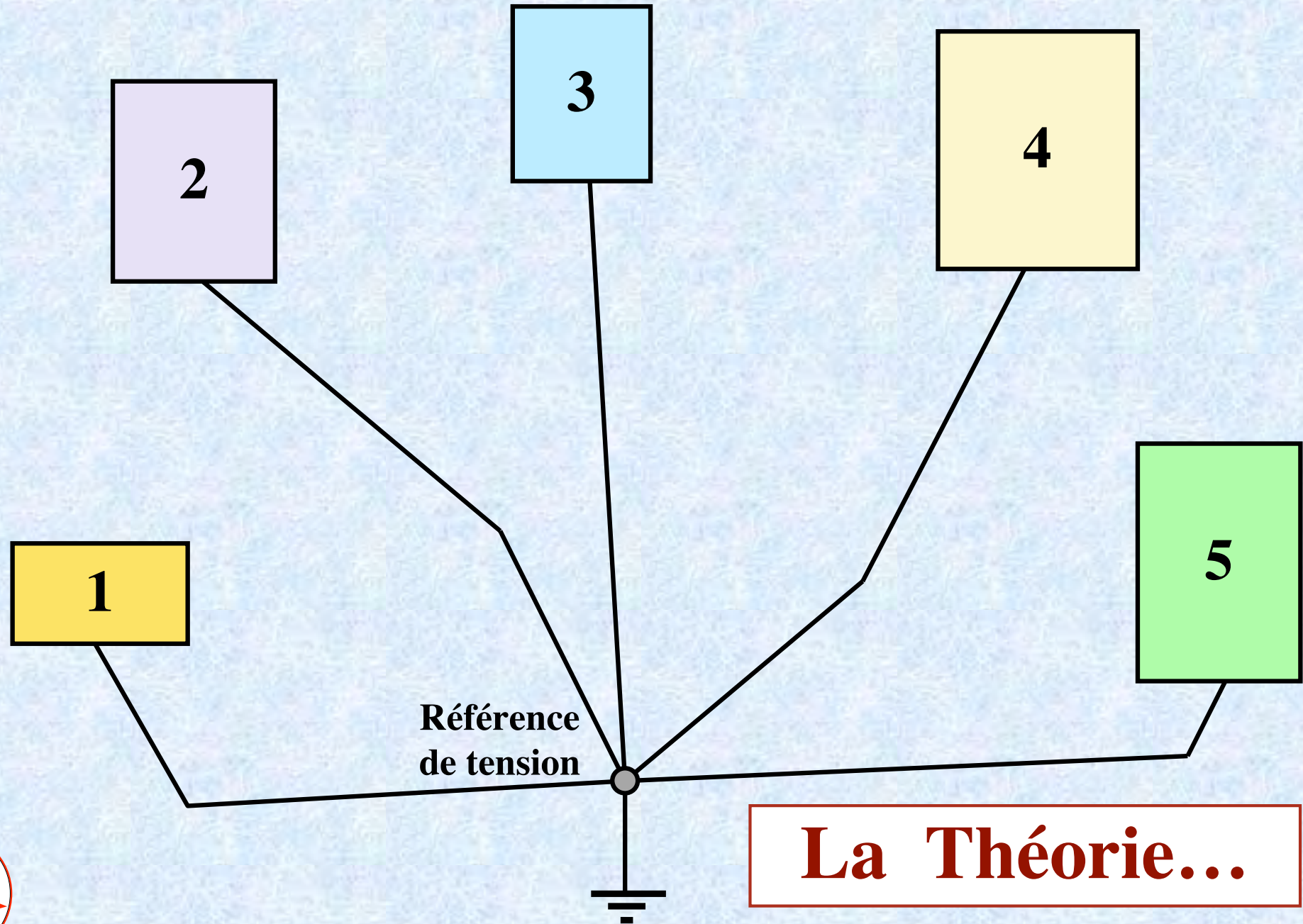
2 Couplage champ à boucle

La résistance de la (prise de) terre n'importe pas !

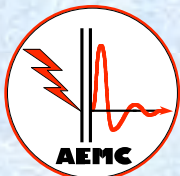




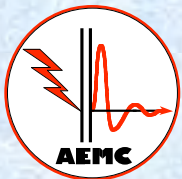
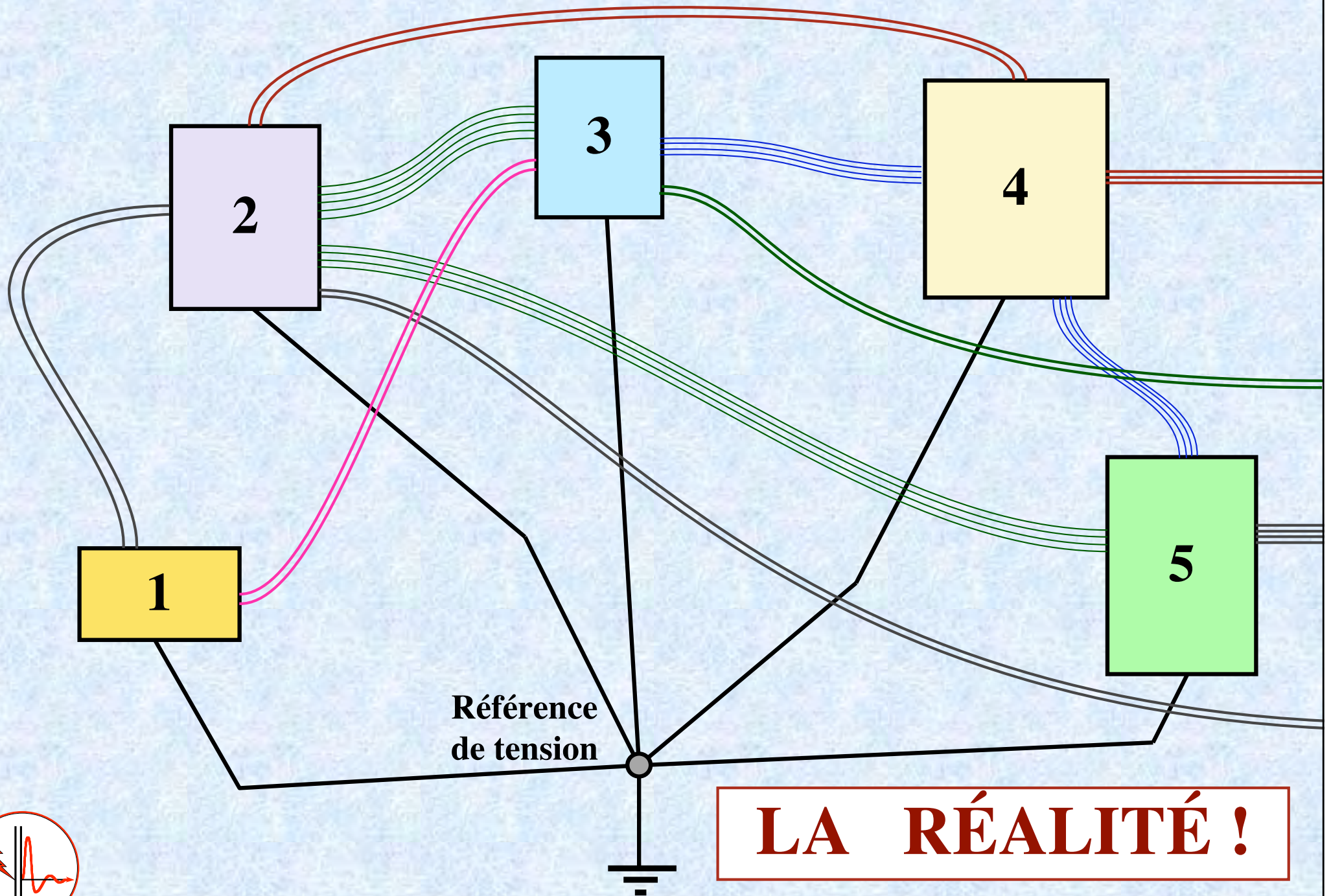
# Câblage en étoile : Principe & Réalité



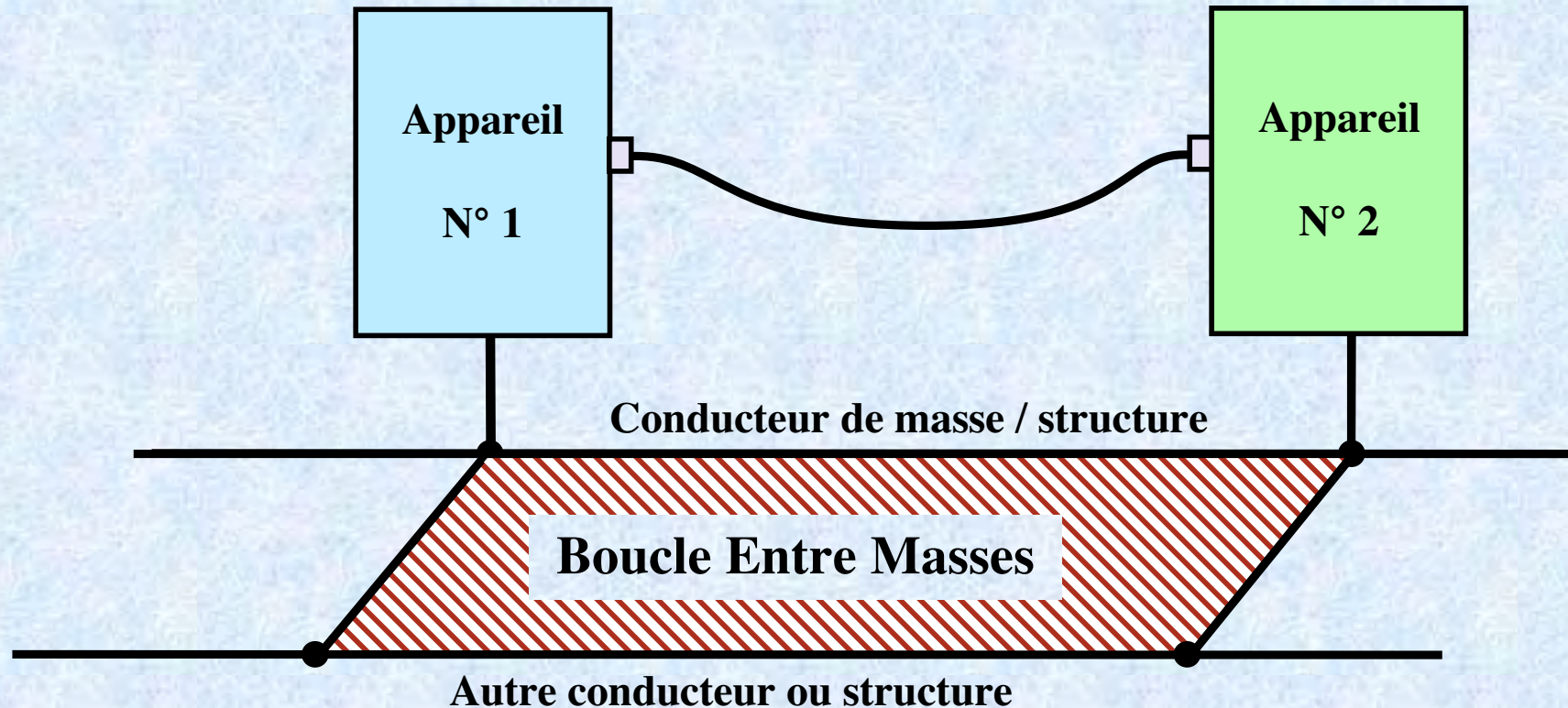
**La Théorie...**



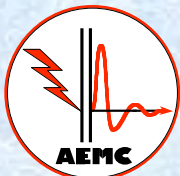
# Câblage en étoile : Principe & Réalité



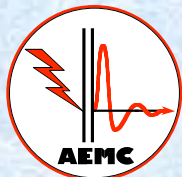
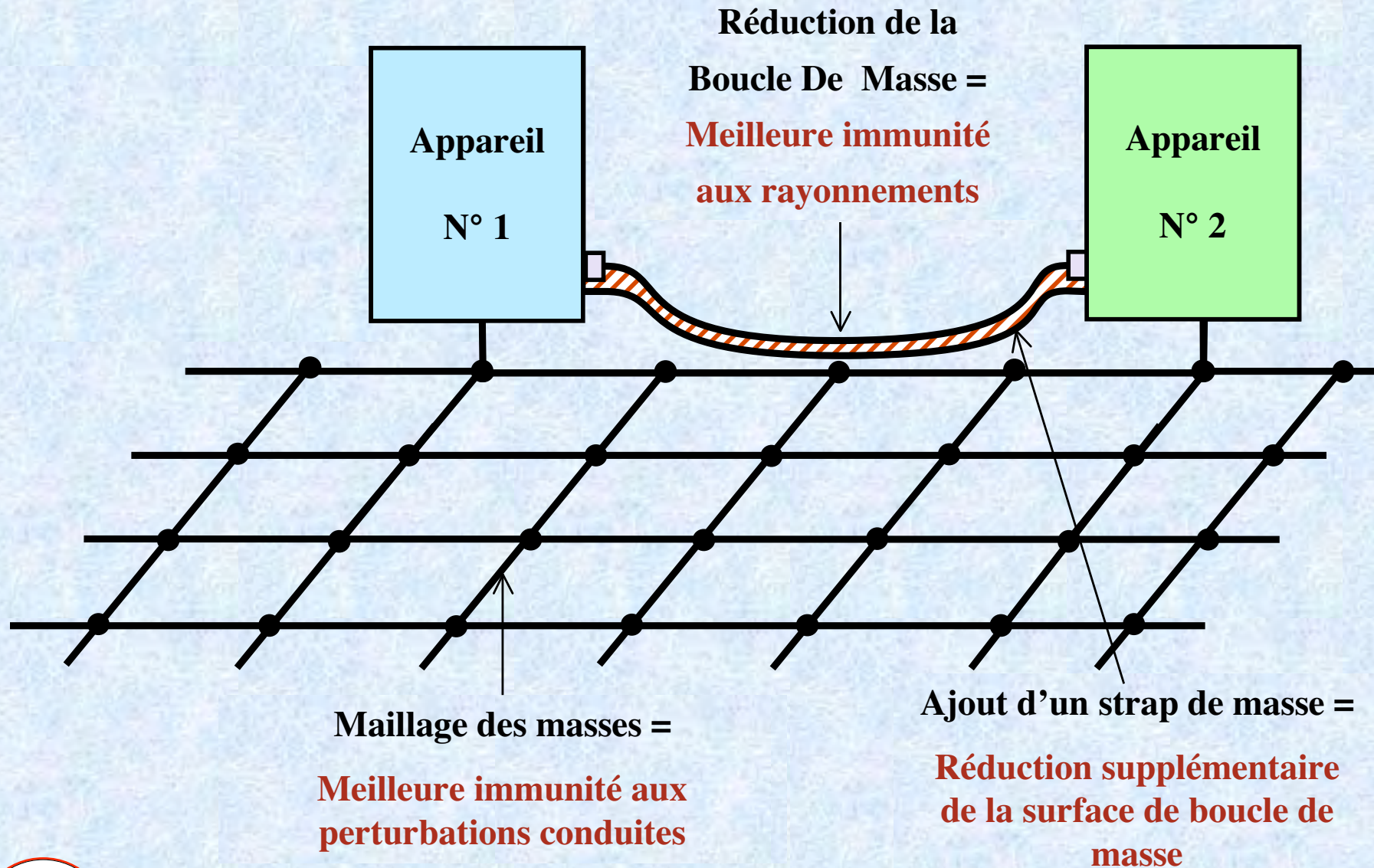
# Boucles ENTRE Masses : Définition & Effets



**Comment améliorer  
l'immunité ?**



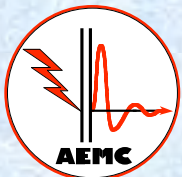
# Boucles Entre Masses : Définition & Effets



**Mailler les masses est hautement recommandé !**

# Où connecter l'écran des câbles blindés ?

- Câble de puissance : Aux deux bouts, aux châssis, sans fil de reprise.
- Coaxiaux HF : Aux deux bouts, aux châssis, sans fil de reprise.
- Numérique (sauf Ethernet en coaxial) : Aux deux bouts, aux châssis...
- Source à haute impédance ( $> 10 \text{ k}\Omega$ ) : Aux deux bouts, aux châssis...
- Tout câble interne à un équipement : Aux deux bouts, aux châssis...
- Tout écran externe (non retour signal) : Aux deux bouts, aux châssis...
- Signal faible tension, avec de basses fréquences à transmettre, avec une source à basse impédance, en environnement bruyant, sans liaison symétrique (mauvais CMRR) : **A un seul bout...**



**Mais une bonne immunité sera difficile à obtenir !**  
**Éviter les feuillards avec un drain longitudinal (sans tresse).**

# **Nous pouvons retenir de tout cela que...**

- **La CEM n'est pas de la magie noire !**
- **Des appareils de mesurage sont nécessaires...**
- **Mais des appareils très simples suffisent souvent !**
- **L'expérience importe (pour prendre confiance en soi)**
- **Il est souhaitable de comprendre comment ça marche**
- **Il est utile d'analyser avec méthode ce qui se passe**
- **Il est efficace de simplifier les problèmes de CEM**
- **Il est nécessaire de connaître les ordres de grandeur**
- **Il est politiquement souhaitable d'être convaincant**
- **Il est essentiel de ne jamais, jamais se décourager !...**

