

## Évaluation des courants de mode commun dans un système de variation de vitesse destiné à des applications embarquées

Travaux réalisés en partenariat  
avec la société HISPANO SUIZA

François Costa

Christian Voltaire

## Motivation des travaux

L'utilisation de l'électronique de puissance s'accroît en aéronautique

De quelques kW aujourd'hui à quelques 100kW demain

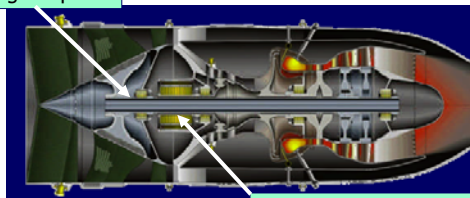
**Aujourd'hui** : actionneurs électro-hydrauliques : qqs kW

**Demain** : Auxiliaires (inverseur de poussée, pompe à kérosène, actionneurs divers, atterrisseur ?) : → qqs 100kW

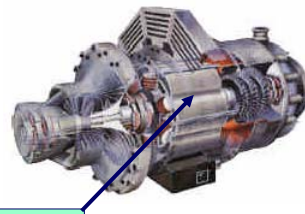
Génération de bord DC : redresseur MLI ?

Plus d'électronique de puissance dans les moteurs

Paliers magnétiques



Alternateur-démarrateur intégré



## Plus d'électricité dans les avions...

### ... c'est aussi plus de CEM !!



- La densité d'équipements d'électronique numérique et de puissance s'accroît fortement
- Effets dominant du mode commun dans les réseaux embarqués : couplage conduit  $\leftrightarrow$  rayonné, grande nuisance



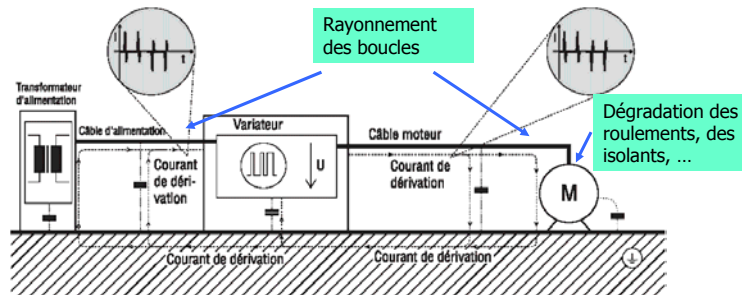
- Importance de la caractérisation des équipements et des réseaux embarqués
- Nécessité de modélisation en vue de la conception
- Intérêt d'une approche système, modularité des modèles

## Plan de la présentation

- Description du système
- Modèle homopolaire des perturbations conduites
- Formalisme matriciel de la modélisation
- Méthode d'acquisition des sources de perturbation
- identification des paramètres  $[Z]$
- Expression analytique des courants perturbateurs
- Validation expérimentale
- Extensions possibles de la méthode

## Perturbations dans les systèmes

### Les effets



### Objectifs

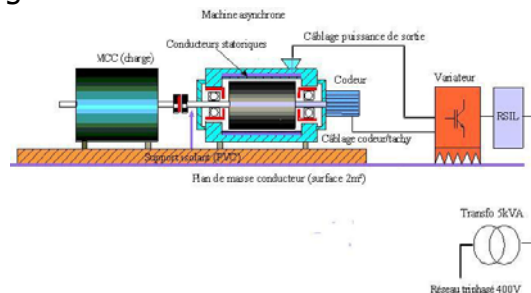
- Calcul des courants de mode commun dans un système complexe
- Évaluation des effets rayonnés par le système

## Description du système expérimental

- Dispositif analogue à un système complet
- Instrumentation pour analyse des courants parasites en tous points
- Versatilité de configuration

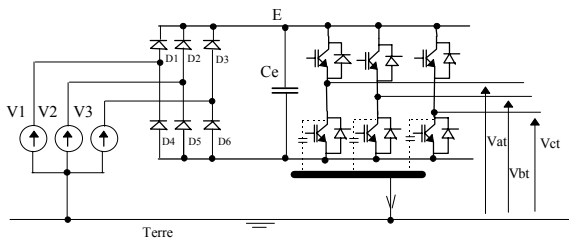
### Configuration de test

- Machine asynchrone 400V/50Hz
- Onduleur triphasé, sans filtre CEM
- Câble blindé  $l=5m$
- RSIL entre le réseau et le banc de test



## Modèle homopolaire du système

L'onduleur triphasé associé au redresseur génère un courant de mode commun qui se propage à tous les dispositifs connectés (câble, moteurs, charge, etc.)



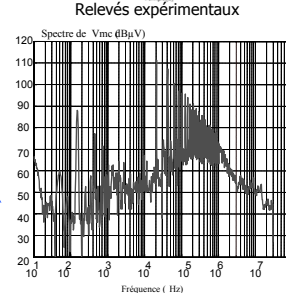
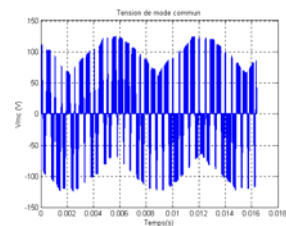
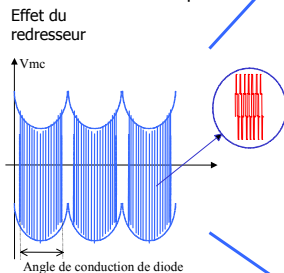
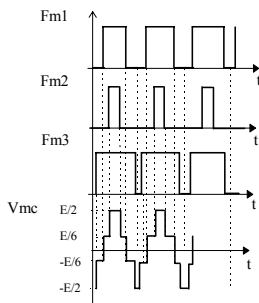
Le courant de mode commun dépend de :

- Tensions de bras  $V_{at}$ ,  $V_{bt}$ ,  $V_{ct}$
- Tensions  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$
- Impédances de propagation en mode commun dans le variateur, vers la charge et dans celle-ci, vers le réseau

Système homopolaire ou de mode commun ↔ Représentation unifilaire

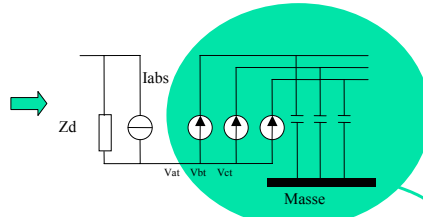
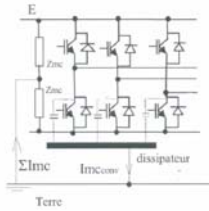
## La tension de mode commun

Nécessité de caractériser la source équivalente de mode commun



$$V_{mc} = \{ \inf(V_1, V_2, V_3) + [f_{m1}(t) + f_{m2}(t) + f_{m3}(t)] \cdot E \} / 3$$

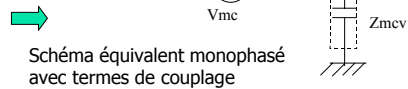
## Modèle équivalent de l'onduleur



L'onduleur est représenté par 2 types de sources

- de courant pour le mode différentiel
- de tension pour le mode commun (3 sources : bras triphasés)

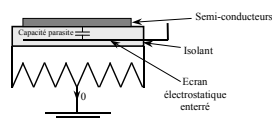
➔ Restriction au seul mode commun



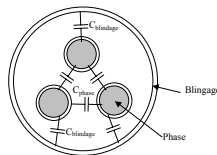
➔ Schéma équivalent monophasé avec termes de couplage

## Couplages capacitifs parasites (= chemins de propagations des perturbations de MC)

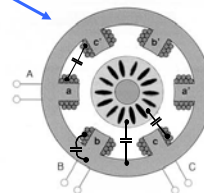
Nécessité de caractériser tous les couplages parasites de mode commun dans le système



Effets capacitifs dans l'IPM



Effets diélectriques et inductifs dans le câble



Capacités réparties dans les encoches, rotor/stator, inter-enroulements

## Formalisme matriciel

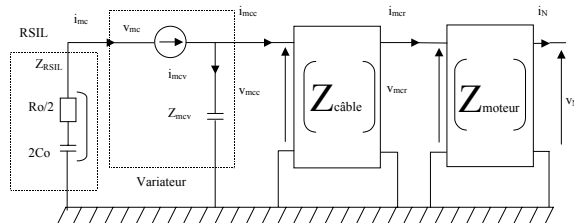
Dans la représentation unifilaire, chaque élément est représenté par sa matrice  $[Z]$  : bien adapté à la représentation fréquentielle

-câble, moteur et réseau → nécessité de les caractériser dans ce formalisme

- Par expérimentation directe (réalisé ici)
- Par simulation (MTL, FEM, etc..) → problème de modèles

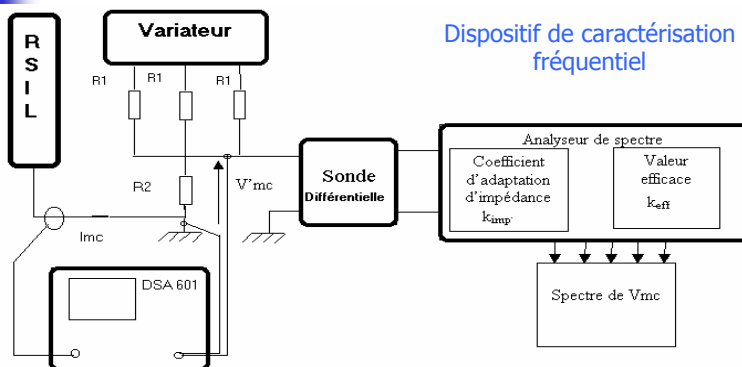
-on ajoute la source de tension de mode commun → doit être caractérisée

➔ Intérêt pour la conception du filtre MC



Logiciel de calcul  
Matlab → très rapide

## Méthode d'acquisition des sources

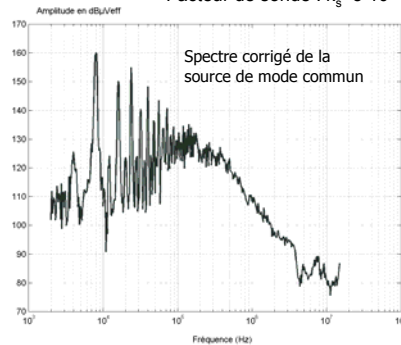
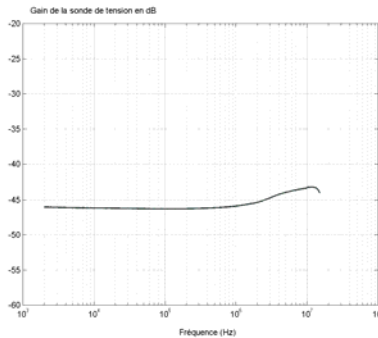


Calibration de chaque élément

- sonde différentielle en fréquence
- Adaptation d'impédance avec l'analyseur de spectre

## Méthode d'acquisition des sources

Réseau résistif :  $k_R = 0,952$   
Facteur de sonde :  $k_s = 5 \cdot 10^{-3}$



Nécessité d'une grande dynamique ( $\sim 100\text{dB}$ ) pour le calcul

-Amélioration du rapport signal/bruit au niveau de l'analyseur de spectre

-Correction de bruit  $V_{mc}(h) = \sqrt{V_{mc}^2 - V_{bruit}^2}$

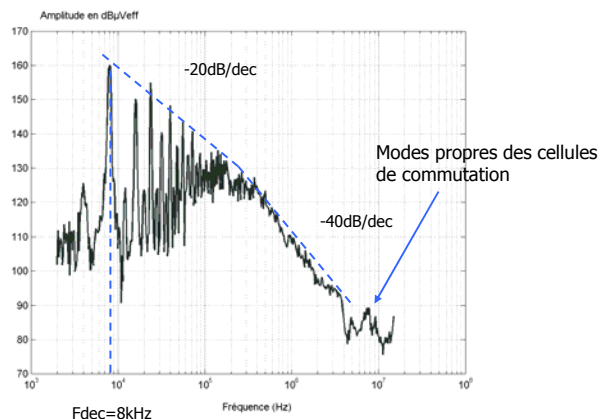
## Caractéristiques du Spectre de $V_{mc}$

### Réglages analyseur de spectre

- 2kHz-15MHz
- RBW=300Hz
- détec. Crête
- Att=-30dB
- Bruit=40dB $\mu$ V

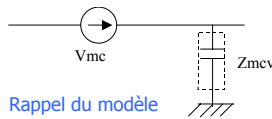
### Réglages onduleur

- Fdec=8kHz
- Fmod=40Hz

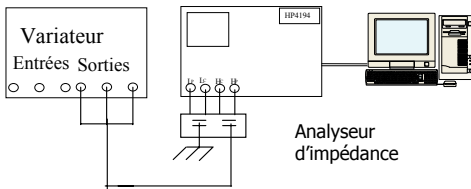


- **MLI non visible**
- **Cassure du spectre à  $\sim 300\text{kHz}$**

# Acquisition des termes parasites du variateur



## Principe de la mesure



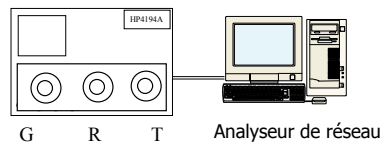
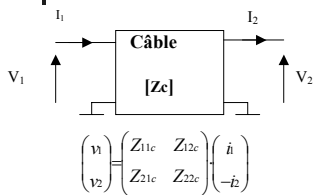
Mesures effectuées entre 2kHz et 15MHz

→ Comportement capacitif sur toute la gamme

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot Z} \approx 840 \text{ pF}$$

Les trois sorties des cellules d'onduleur sont court-circuitées (hors tension), mesure de l'impédance vis-à-vis de la terre

# Identification des paramètres du câble

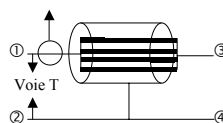


Mesure de Z11 : G → ① et ② T → ① et ② R → ①	Mesure de Z12 : G → ③ et ④ T → ① et ② R → ③
Mesure de Z21 : G → ① et ② T → ③ et ④ R → ①	Mesure de Z22 : G → ③ et ④ T → ③ et ④ R → ③

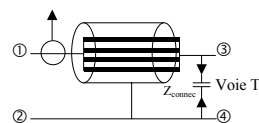
## Principe de mesure

- utilisation d'un analyseur de réseau pour évaluer le rapport  $Z=U/I=T/R$
- utilisation d'une sonde de courant (rapport 1)
- mesure entre 2kHz et 15MHz
- corrections de mesure

Sonde de courant



Sonde de courant

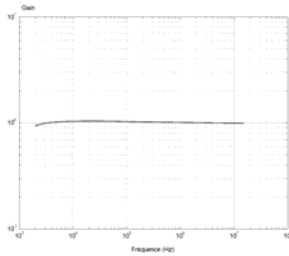


G : signal : Tension injectée  
R : entrée ref : Courant mesuré  
T : entrée test : tension mesurée

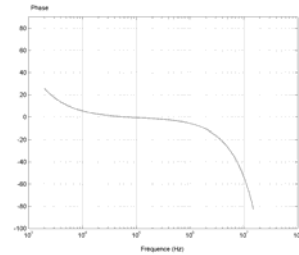
G : signal : Tension injectée  
R : entrée ref : Courant mesuré  
T : entrée test : tension mesurée



## Corrections de mesure

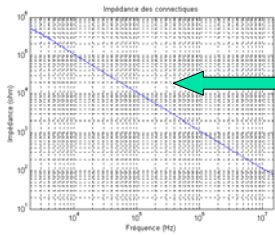


Bande passante de la sonde de courant : **importance de la correction de phase**



### Corrections de mesure

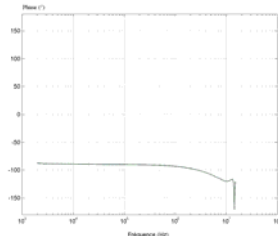
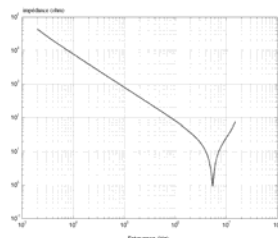
- Correction de mesure de la sonde (surtout en phase)
- Correction de la connectique : le câble coaxial est considéré comme essentiellement capacitif sur la plage de mesure
- Correction de connectique indispensable sur l'évaluation de  $Z_{12}$



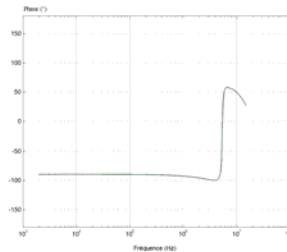
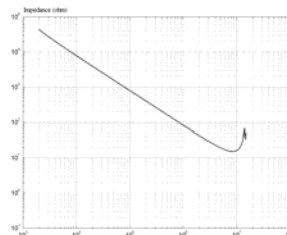
$$Z_{21} = Z_{12} = \frac{V_2}{I_1} \left( 1 + \frac{Z_{111}}{Z_{connect}} \right)$$

## Résultats des mesures sur le câble

$Z_{11}$

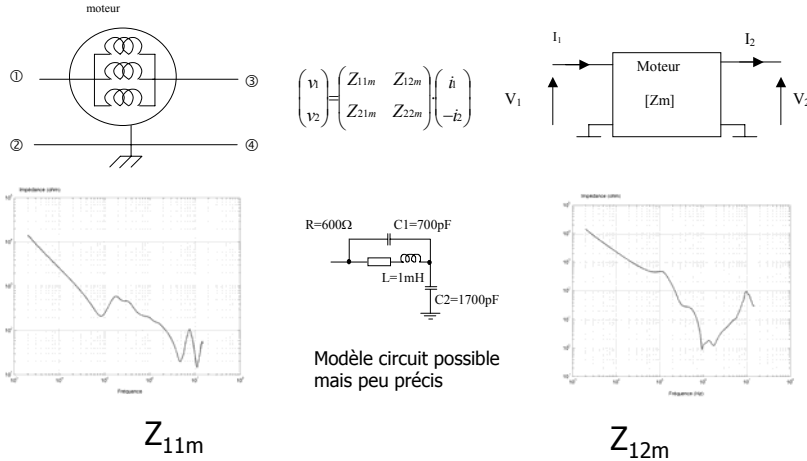


$Z_{12}$



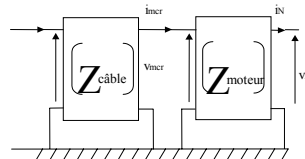
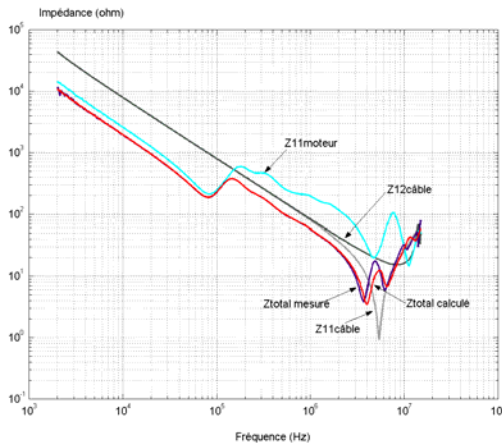
# Modèle du moteur

Mesures moteur : même procédé (et corrections) que pour le câble



# Confirmation des modèles

Mesure globale câble+moteur, mise en cascade des deux matrices [Z], comparaison avec mesure directe

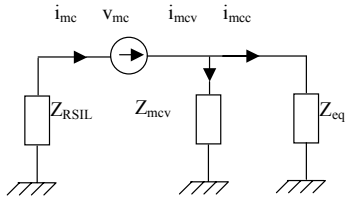


$$z_{eq} = z_{11c} - \frac{z_{12c} z_{21c}}{z_{11r} + z_{22c}}$$

➔ Validation du principe

# Expressions analytique des courants parasites

## Rappel du modèle



$$z_{eq} = z_{11c} - \frac{z_{12c}z_{21c}}{z_{11r} + z_{22c}}$$

## Expressions des grandeurs

Courant de mode commun total

$$i_{mc} = \frac{V_{mcv}}{z_{RSIL} + \frac{z_{mcv} \left( z_{11c} - \frac{z_{12c}z_{21c}}{z_{11r} + z_{22c}} \right)}{z_{mcv} + \left( z_{11c} - \frac{z_{12c}z_{21c}}{z_{11r} + z_{22c}} \right)}}$$

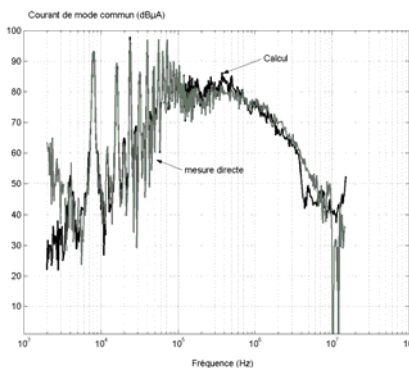
Courant de mode commun dans le câble

$$i_{mcc} = \frac{z_{mcv} V_{mcv}}{z_{RSIL} z_{mcv} + \left( z_{RSIL} + z_{mcv} \right) \left( z_{11c} - \frac{z_{12c}z_{21c}}{z_{11r} + z_{22c}} \right)}$$

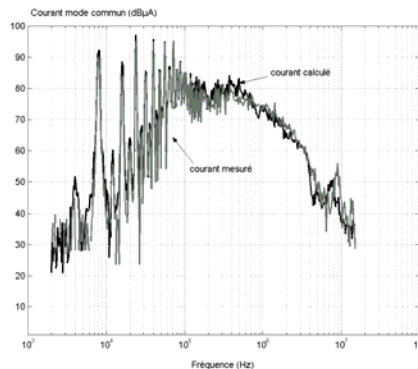
Courant de mode commun dans le moteur

$$i_{mcr} = \frac{z_{21c} z_{mcv} V_{mcv}}{\left( z_{21r} + z_{22c} \right) \left( z_{RSIL} z_{mcv} + \left( z_{RSIL} + z_{mcv} \right) \left( z_{11c} - \frac{z_{12c}z_{21c}}{z_{11r} + z_{22c}} \right) \right)}$$

# Validation expérimentale



Spectre du courant de mode commun total

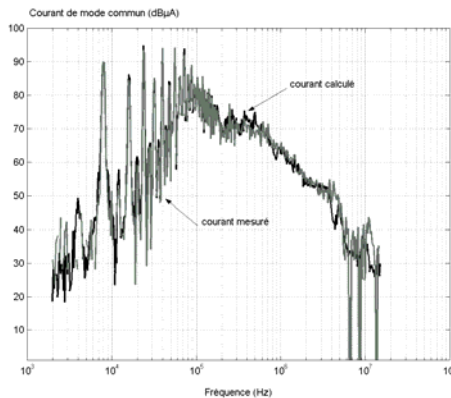


Spectre du courant de mode commun dans le câble

Gris : mesure

Noir : calcul

## Validation expérimentale



Spectre du courant de mode commun dans la carcasse du moteur

### Précautions de mesure

- Réduction du niveau de bruit de l'analyseur de spectre (choix de l'atténuation et de la bande passante)
- Correction du niveau de bruit

Globalement : bon accord

## Conclusions (perturbations conduites)

- Validité du principe pour le mode commun
- Transposition possible au mode rayonné ?
- Versatilité de la méthode, ajout d'étages
  - Lien avec les phénomènes rayonnés
  - Calcul des paramètres ou extraction expérimentale
  - Noyau pour liaison avec d'autres logiciels de simulation
- Analyse de sensibilité
- Utilisation pour le dimensionnement des filtres de MC

## Perturbations rayonnées

- Description du montage
- Résultats de mesures
- Influence de la continuité électrique de masse
- Perspectives

## Description du montage

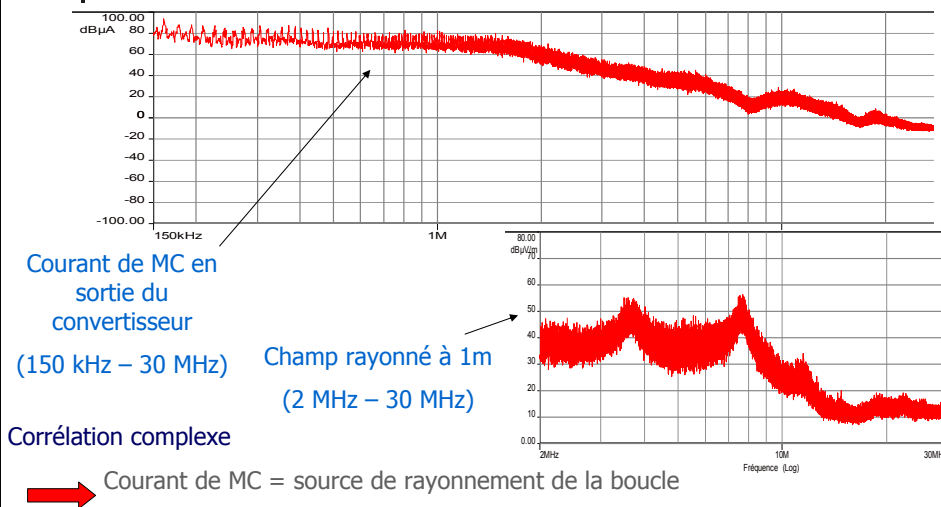
- Moteur Asynchrone : 4,5 kW
- Variateur triphasé : 400V; P = 2,2 kW
- Câble : triphasé 3 fils torsadés avec blindage tressé (fourni par HISPANO-SUIZA)
- Étude du rayonnement de l'ensemble moteur+câble
  - Convertisseur à l'extérieur de la cage de Faraday semi anéchoïque sur un plan de masse au potentiel de la cage (ou non)
  - Entrée du câble par un guide d'onde ( $f_c > 10$  GHz)



## Conditions de mesures

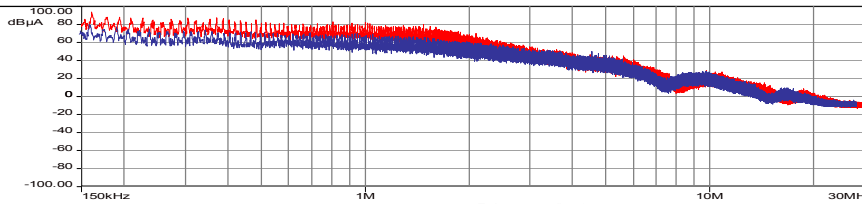
- Moteur
  - fonctionnement à vide
  - posé sur le plan de masse (relié au potentiel de la cage)
  - Reprise de blindage du câble sur la boîte à bornes
- Mesures de rayonnement et des courants de MC selon le protocole de la norme DO 160
  - position de l'antenne,
  - ouverture de filtre,
  - pas de progression fréquentiel,
  - Bruit de fond < 6 dB du gabarit normatif

## Courant de MC et champ rayonné



## Influence de la continuité électrique de la masse

- Plan de masse fixe par rapport au potentiel de la cage
- Plan de masse flottant par rapport au potentiel de la cage

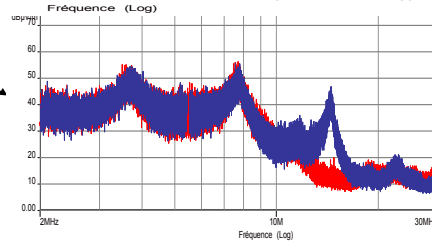


Courant de MC (150 kHz – 30 MHz) →  
 Champ rayonné (2 MHz – 30 MHz) →

Insertion de C dans le cheminement  $I_{MC}$

→ atténuation de  $I_{MC}$  (20 dBµA) en BF

→ ...mais nouveaux pics de rayonnement (résonances, dipôle ???)



## Conclusions

- Corrélation directe entre le courant de MC et le champ rayonné ?
- Influence de la continuité électrique de la masse
- Étude du «transfert» entre le courant de MC et le champ rayonné
  - Approche similaire à l'étude en conduit ? => protocole de mesures ?
  - Influence de l'environnement EM (plan de masse, blindage, objets réfléchissants à proximité, ...) ?
  - Paramètres influents ?
  - Compréhension des phénomènes prédominants => réduction des perturbations rayonnées ?