

**Électronique de puissance  
Enjeux et solutions innovantes d'un marché en plein essor  
Polytech St Nazaire – 12 Juin 2014**

***CEM des convertisseurs de puissance***



[cyrille.gautier@satie.ens-cachan.fr](mailto:cyrille.gautier@satie.ens-cachan.fr)

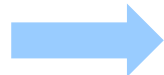
## *CEM des convertisseurs statiques*

### Plan de la présentation

- Introduction
- Les perturbations générées par les convertisseurs
- CEM de l'ensemble onduleur-machine
- Évolution des contraintes CEM liées aux commutation
- CEM des commandes rapprochées
- Filtrage et intégration
- Onduleur multicellulaire à ICT: faibles émissions conduites
- Efficacité du blindage (outils de simulation EM 3D)
- Conclusion

## *Enjeux liés à la Compatibilité Électromagnétique*

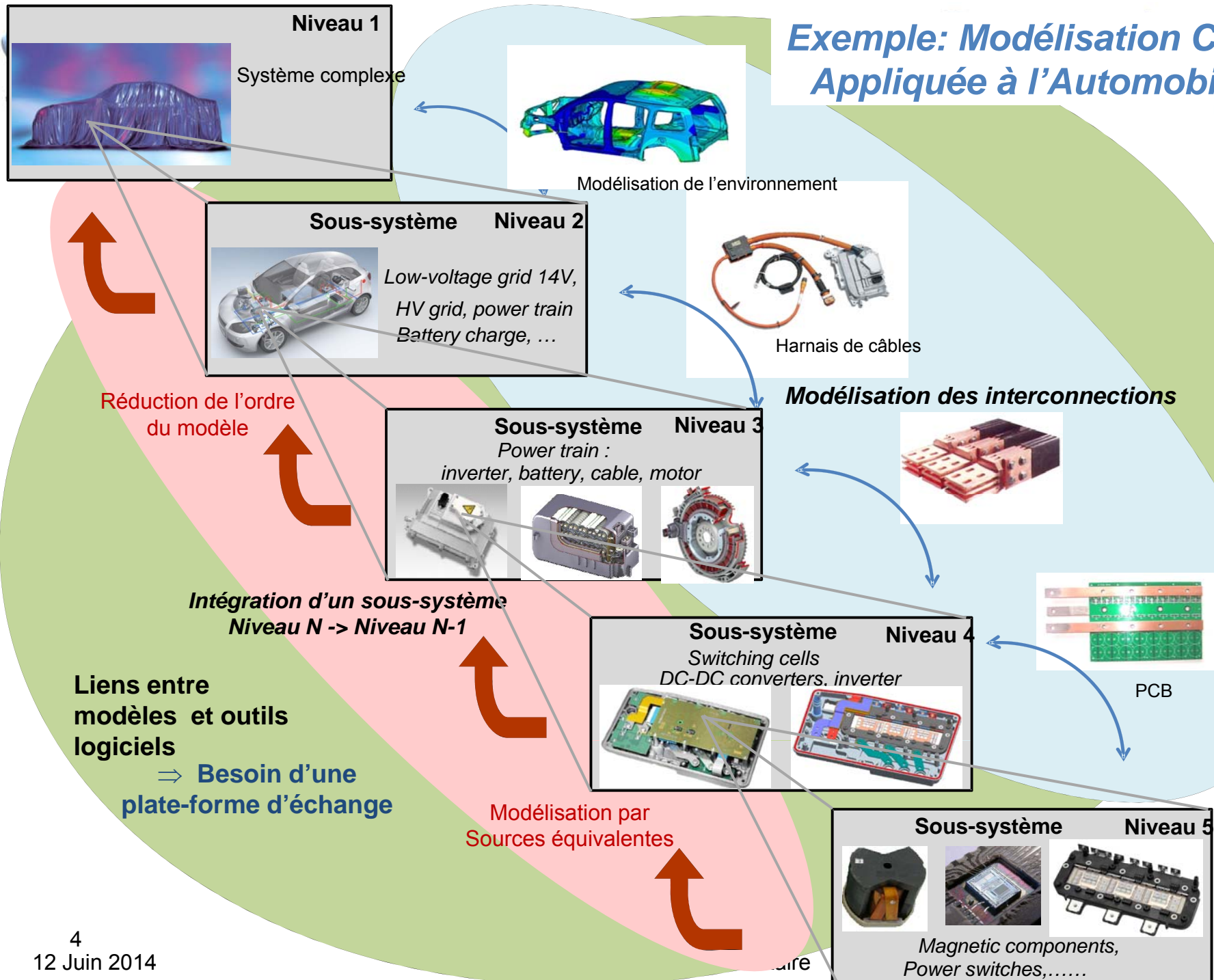
- Respect des normes et des exigences de sécurité
  - Le respect des normes CEM est obligatoire dans tous les pays et pour tous les équipements électriques pour des raisons commerciales et pour des raisons de sécurité. (Aéronautique, Automobile, Santé, ...)
- Compromis Volume/Poids et cout.
  - 20 à 40% du cout de fabrication et du volume des convertisseurs de puissance est imputable à la gestion de la CEM
  - Les couts liés à la CEM sont minimisés lorsque les problématiques CEM sont prises en compte très tôt durant les phases de conception.



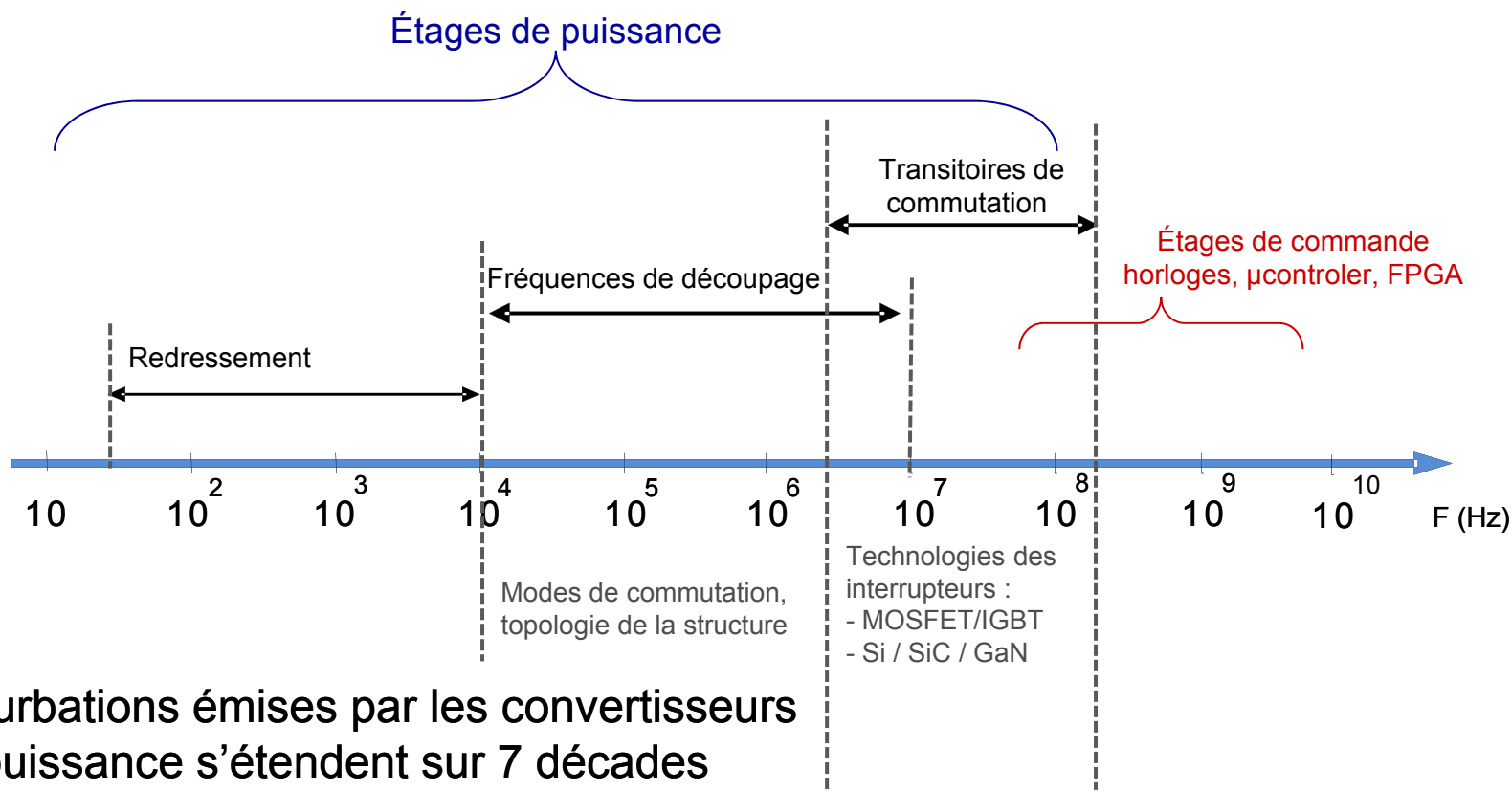
L'intégration peut-être une bonne solution

# Exemple: Modélisation CEM Appliquée à l'Automobile

DES ARTS ET MÉTIERS



# Fréquence de propagation des perturbations en électronique de puissance

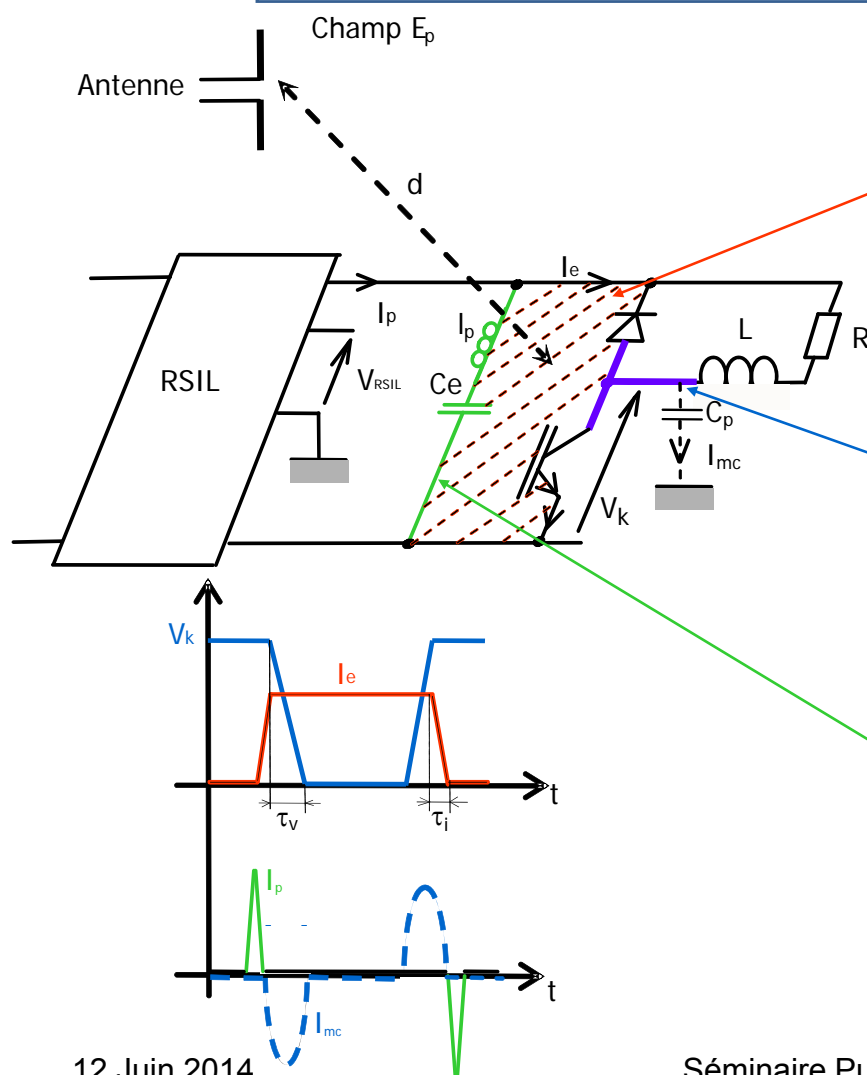


Les perturbations émises par les convertisseurs de puissance s'étendent sur 7 décades

- ⇒ La gestion de la CEM doit prendre en compte les aspects « large bande » dans les techniques de modélisation, les structures, les matériaux et les commandes
- ⇒ L'utilisation de composants commutant très rapidement étend le domaine des perturbations jusqu'au GHz. Utilisation de méthodes issues des hyper-fréquences

# Sources de bruit en électronique de puissance

## Exemple d'un hacheur avec RSIL



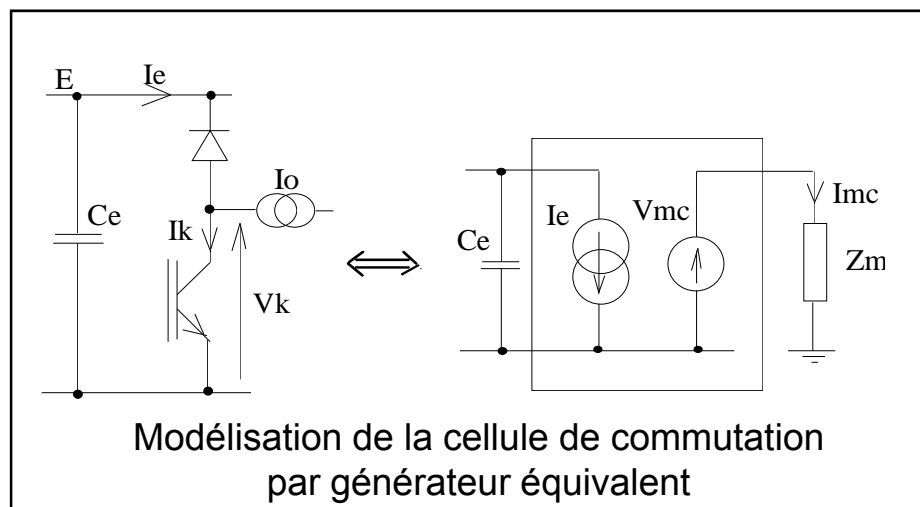
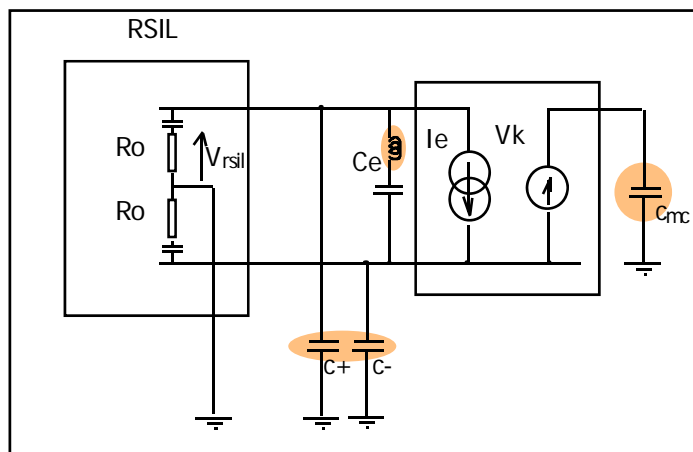
- Maille (zone hachurée)  $I_e$  subit des variations très rapides à haute fréquence  
 $\Rightarrow$  Boucle = dipôle rayonnant magnétique

- Conducteurs subissant de fortes variations de tension ( $V_k$ ): dipôle rayonnant électrique + transmission à la terre de courants impulsionnels  $I_{mc}$  via  $C_p$

- Condensateur de découplage  $C_e$  (imperfections : résistance et inductance série  $I_p$ ), n'empêche pas la propagation sur le réseau d'alimentation d'un courant parasite impulsionnel  $I_p$ .

## Mécanismes de perturbation

### Approche simplifiée sur une cellule de commutation



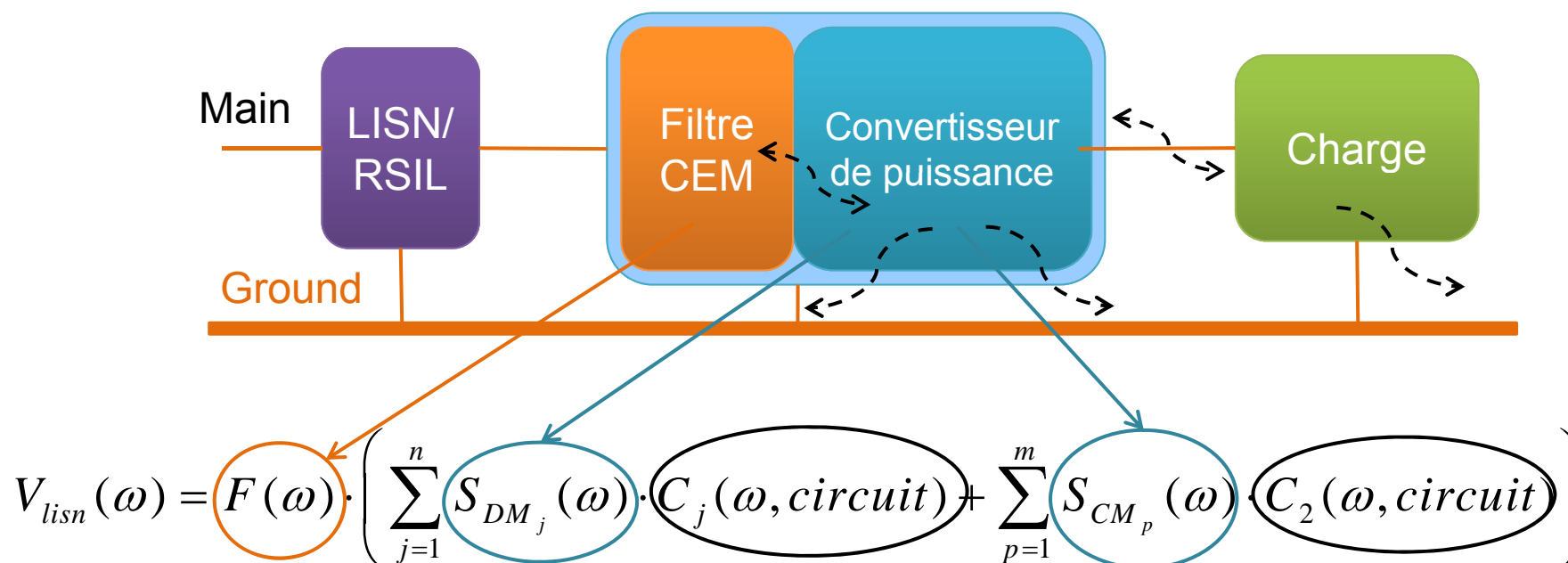
- Les sources : grandeurs variables du convertisseur
  - tension d'interrupteurs :  $V_k$
  - courant absorbé :  $I_e$
- Représentation par des sources équivalentes

- Les couplages à l'environnement sont définis par des fonctions de couplage
  - en mode conduit  $C(\omega, \text{circuit})$
  - en mode rayonné  $R(\omega, \text{espace})$

$$V_{rsil}(j\omega) = I_e \cdot C_1(j\omega, \text{circuit}) + V_k \cdot C_2(j\omega, \text{circuit})$$

## Problématiques CEM en électronique de puissance

### Modèle des perturbations conduites



Le niveau de perturbations émises dépend de:

- ❑ CM et DM générés par les sources internes (interrupteurs),
- ❑ CM et DM couplés avec l'environnement électrique (capacités parasites, inductances de fuite, etc..),
- ❑ **Atténuation du filtre CEM** (mode commun (CM) et mode différentiel (DM)).

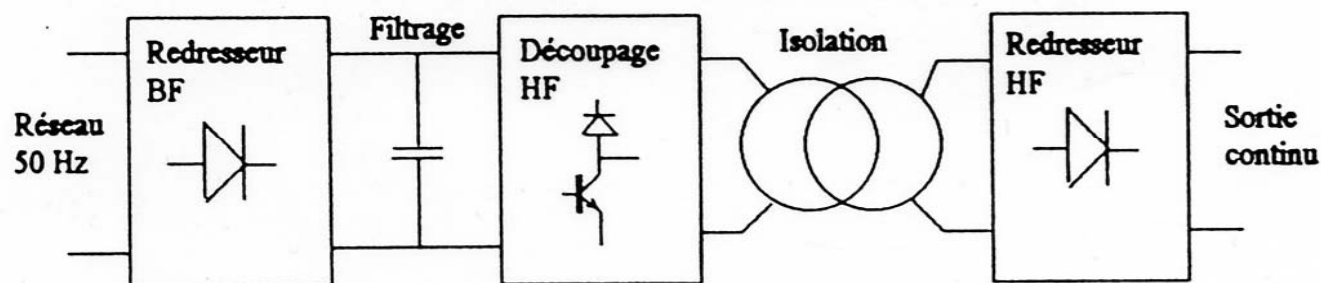


Tout ou partie des ces éléments doivent être traités pour la gestion de la CEM



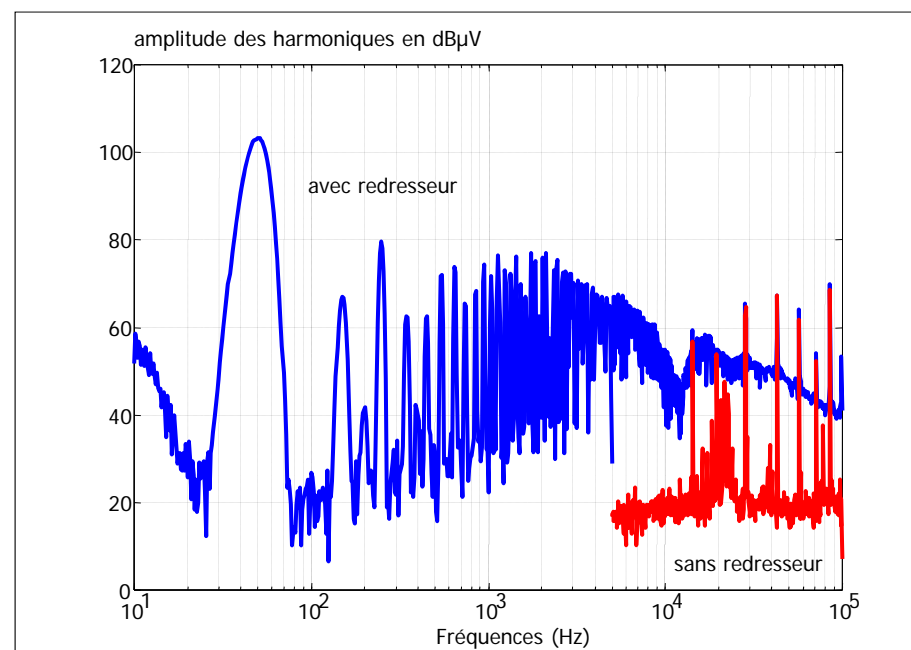
## Origines des perturbations

Différents étages de découpage, effets de modulation

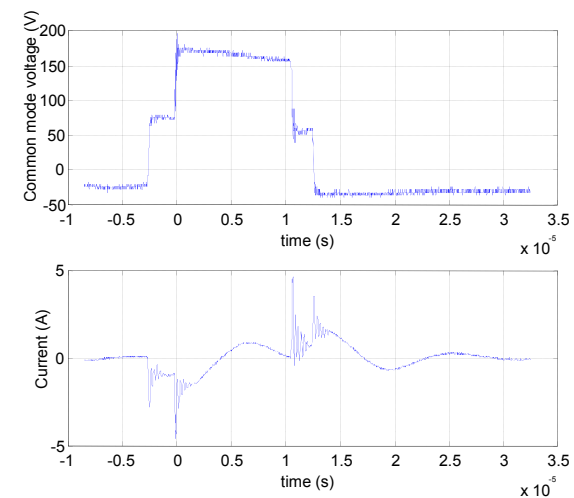
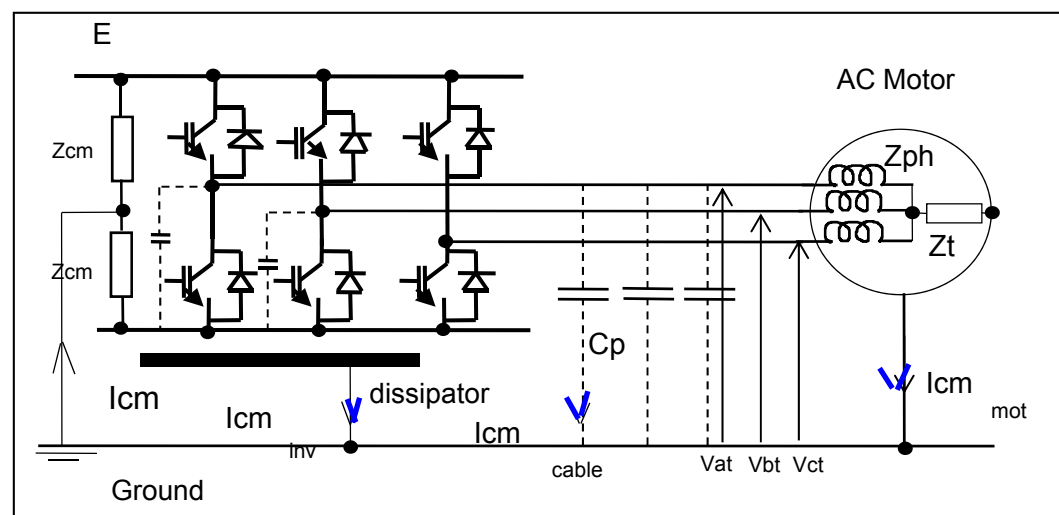
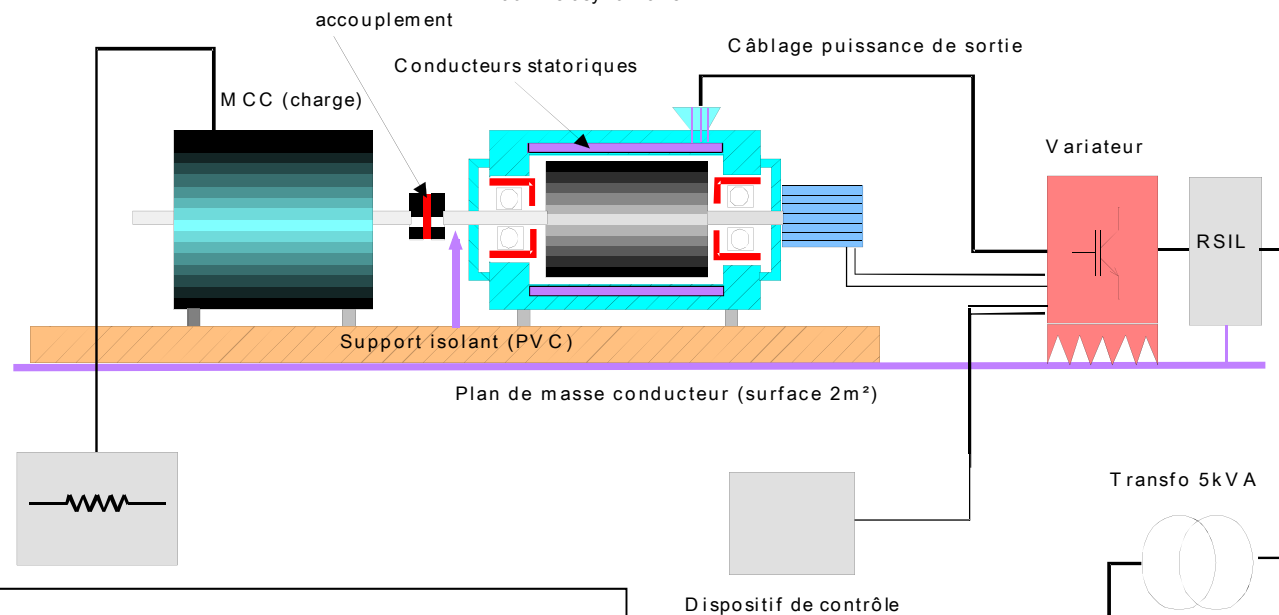


### Exemple : alimentation à découpage

- Modulation de la composante HF par le redresseur, spectre modulé
- Apparition de raies BF, harmoniques réseau



### Machine asynchrone



## *Accroissement du bruit Électromagnétique*

- Technologies des composants:
  - Miniaturisation des convertisseurs => augmentation des fréquences  
(DC-DC : 50 kHz à 500 kHz en 10 ans ... actuellement qq MHz)
  - Diminution des temps de commutation  
=> diminution des pertes  
=> miniaturisation
    - Maîtrise des procédés de fabrication (motifs ...),
    - Structures innovantes (COOLMOS, IGBT Trench ...),
    - Nouveaux matériaux (SiC, GaN)
  - Augmentation des contraintes de CEM
    - Augmentation des  $dV/dt$
    - Augmentation des  $dI/dt$
    - Drivers

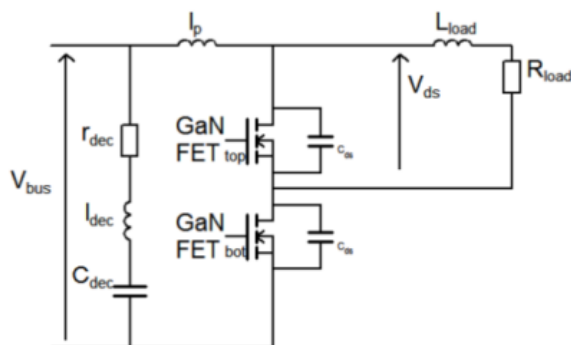
# Accroissement du bruit Électromagnétique

## Performances des interrupteurs

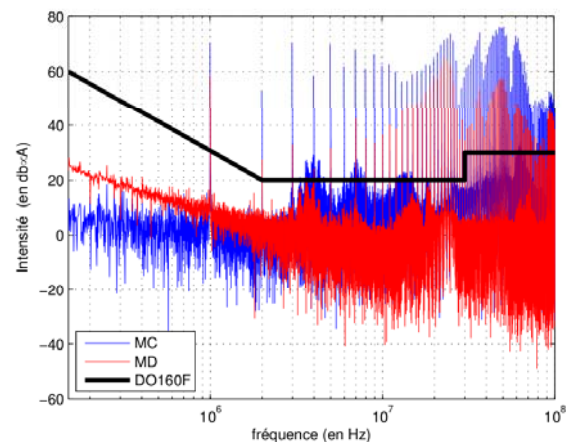
Année	1970	1980	1985	1990	2000	2000	2003	2005	2005	2010	2012
Techno	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	SiC	SiC	GaN
Interrupteur	Thyristors, diodes PIN	GTO T bip. diodes rapides	MOSFET	IGBT	COOL MOS	IGBT réseau 400V	Trench MOS	IGBT Traction	Diodes Schottky	JFET IGBT	GanFET
calibres	3 KV 3 KA	3kV 3kA 100A 1kV	50A 1000V	100 A 100 V	50 A 600 V	100A 1,2kV	50A 25V	100 A 6 kV	100 A 600 V	10 A 1200 V	10 A 200 V
Fréquence	100 Hz	300Hz qqes kHz	qqes 100kHz	qq kHz	qqes 100kHz	10-100 kHz	1 MHz	qq kHz	qq 100 kHz	10-100 kHz	10 MHz qqes GHz
dV/dt (V/μs) dI/dt (A/μs)	1kV/μs 100A/μs	10kV/μs qqes 100kA/μs	qqes 10kV/μs qqes kA/μs	qqes 10kV/μs qqes kA/μs	qqes 10kV/μs qqes kA/μs	qqes 10kV/μs qqes kA/μs	qqes 10kV/μs qqes kA/μs	qqes 100kV/μs qqes 10kA/μs		qqes 100kV/μs qqes 10kA/μs	qqes 100kV/μs qqes 10kA/μs

## Exemple : commutation des composants GAN

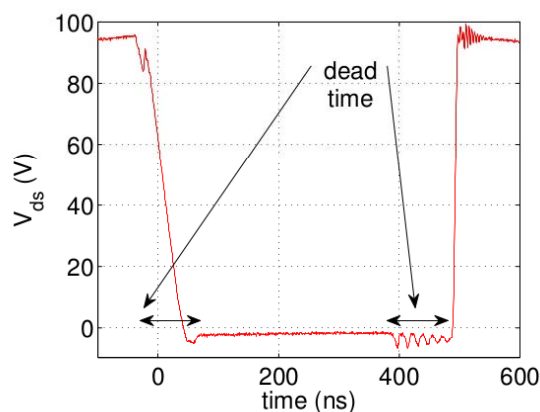
GaNFET  
EPC 2010



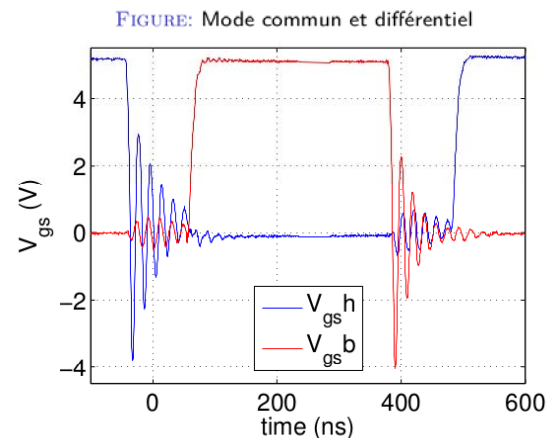
(a) Schéma du bras d'onduleur + la charge



Mesures  
Sur RSIL  
(DO160)



(a)  $V_{ds}$  sur un cycle



(b)  $V_{gs}$  sur un cycle

FIGURE: Fonctionnement du bras pour une fréquence de 1 MHz

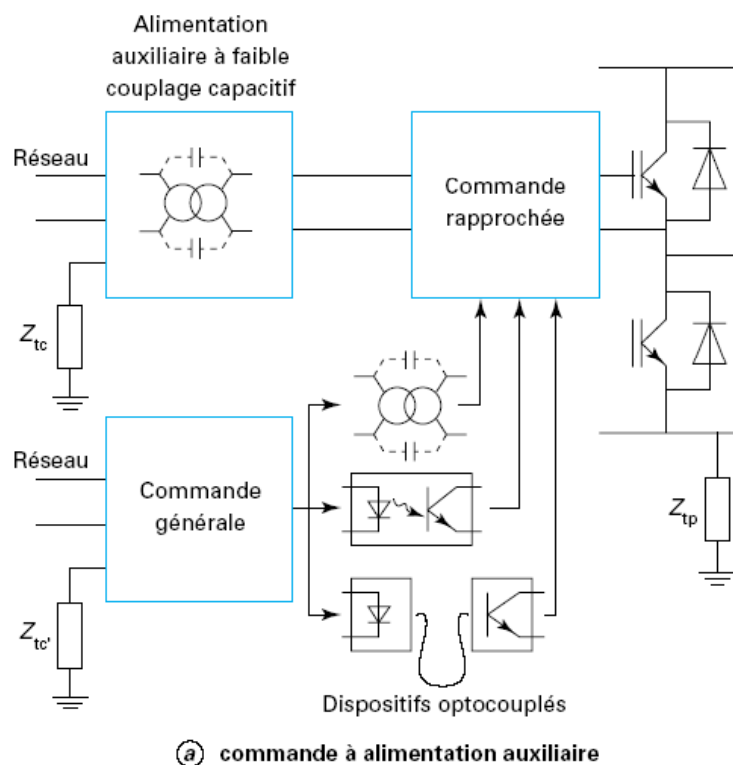
Augmentation des niveaux émis aux fréquences élevées

# Couplages capacitifs dans la commande rapprochée

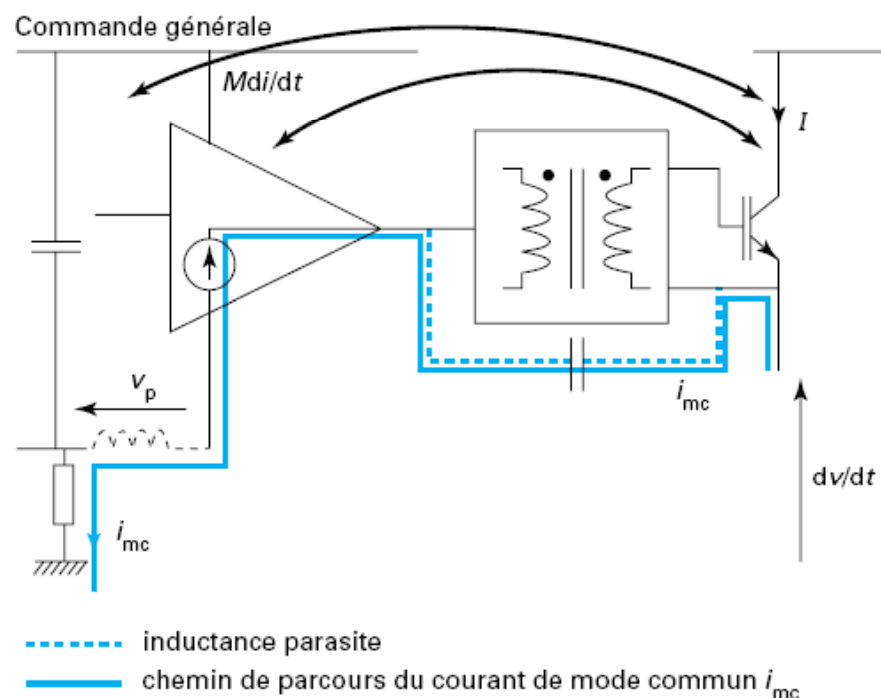
## Structures possibles

La commande rapprochée est un élément sensible :

- à l'interface puissance/commande
- doit être extrêmement fiable



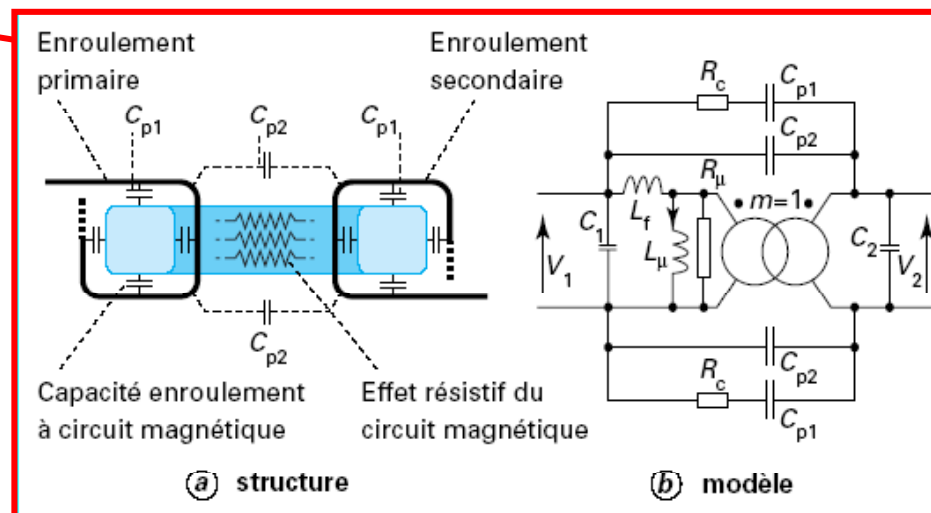
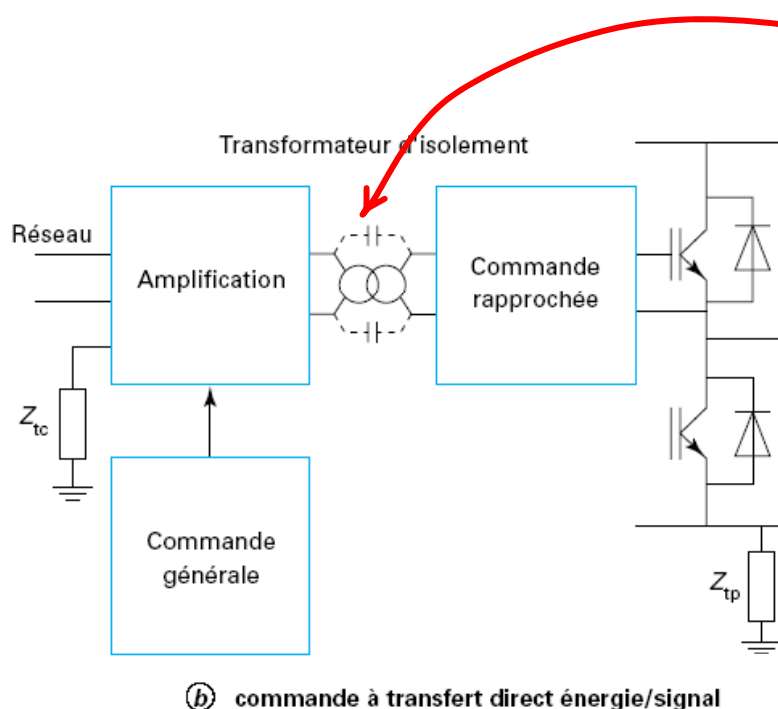
## Couplage et modes de perturbation



Couplages :

- par impédance de mode commun dû au courant de mode commun,
- par mutuelle inductance (diaphonie)

## Couplages capacitifs: transformateur d'impulsions

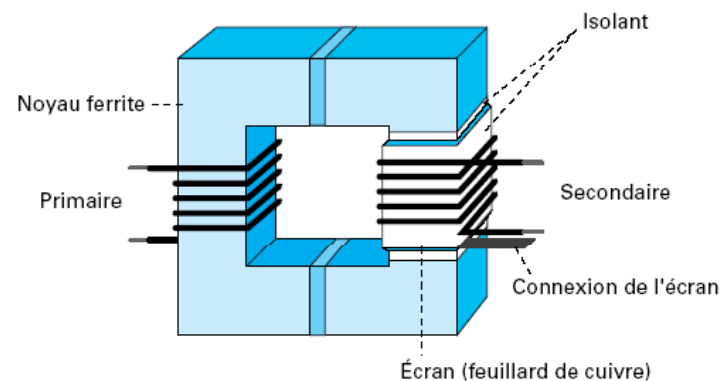


Origine des couplages capacitifs :

- effets électrostatiques inter-enroulements
- charge électrostatique du circuit magnétique

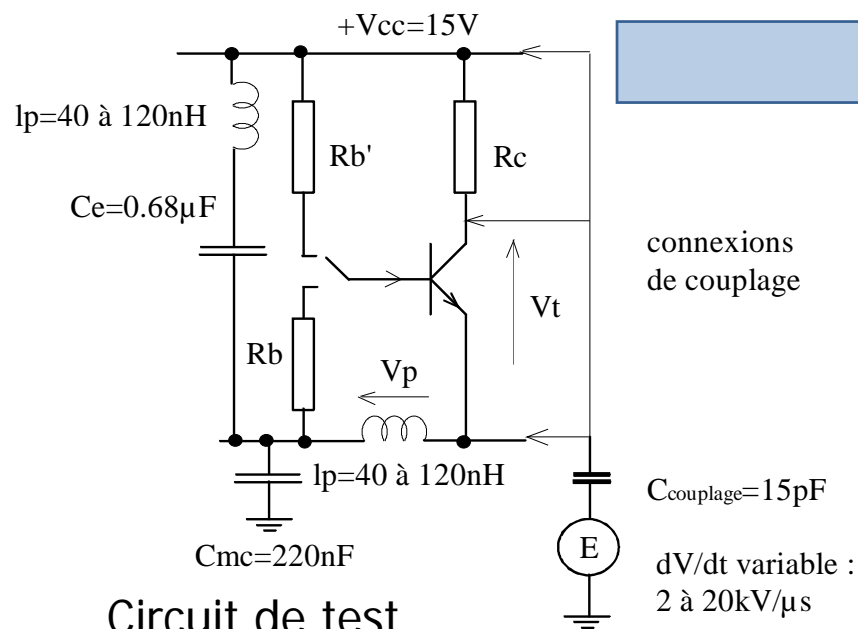
Réduction du couplage capacitif :

- écran électrostatique
- circuit magnétique très impédant/entrefer





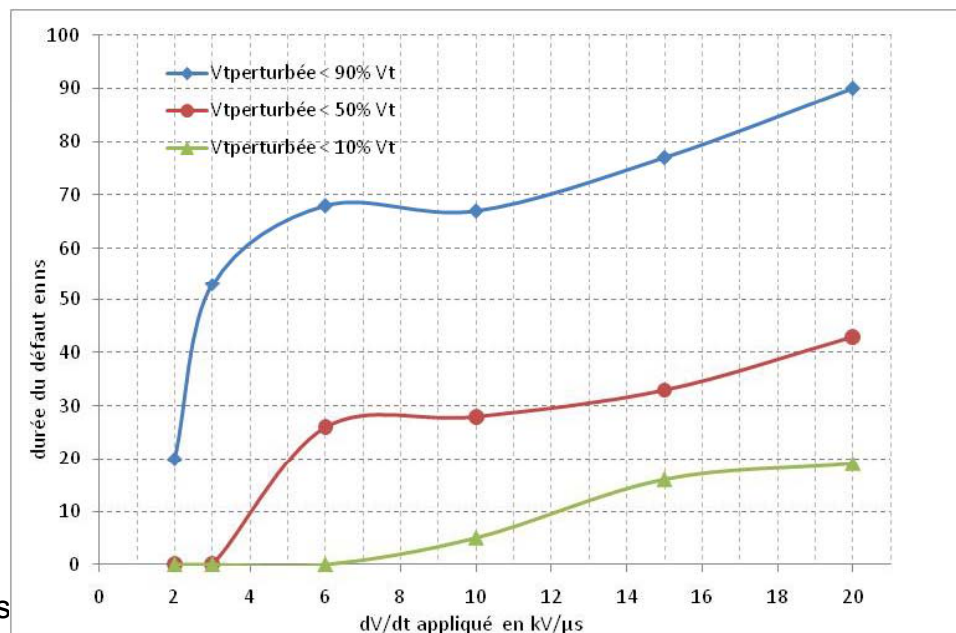
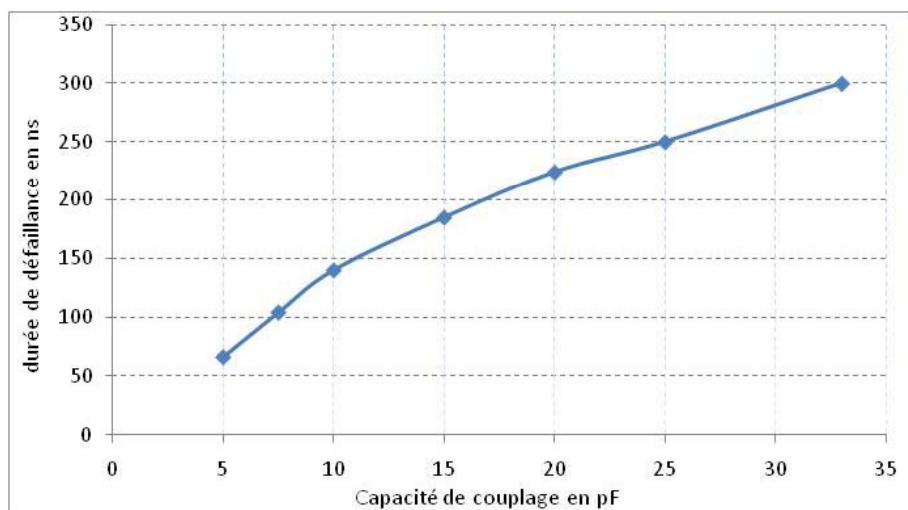
## Sensibilité des composants



### commande rapprochée

- $dV/dt$  appliqué
- Capacité de couplage
- Inductance parasite de câblage

Le couplage par impédance commune dans l'inductance parasite de câblage  $I_p$  provoque un changement d'état parasite du transistor





## Imperfections du filtrage

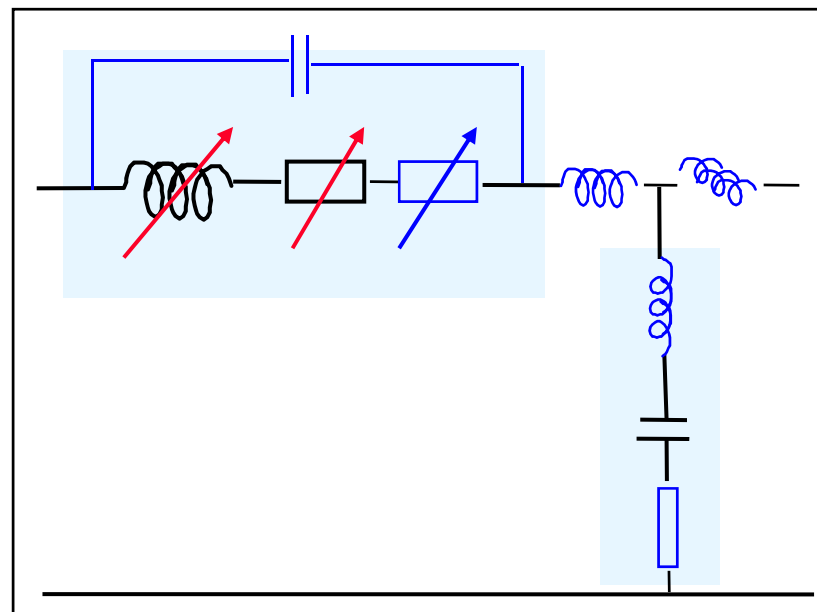
Influence de la variation des propriétés magnétiques de 0 à 30MHz

Influence de la capacité parasite répartie

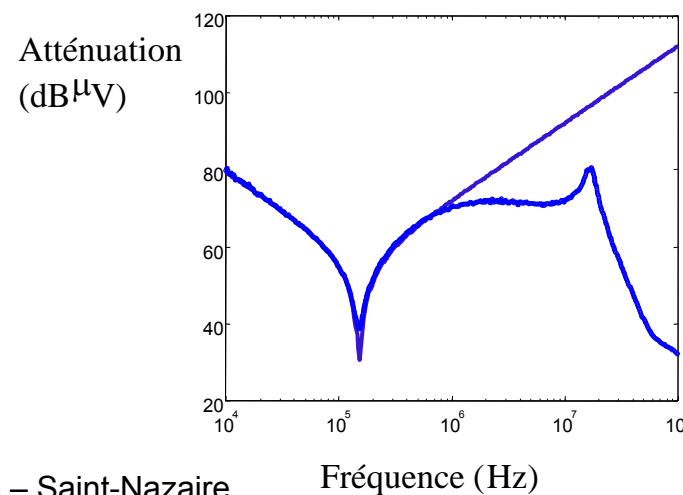
Influence de la variation de la résistance avec la fréquence (effet de peau/proximité)

Influence de la connectique/câblage

Influence de la résistance et de l'inductance série des condensateurs



**Conséquences : dégradation de l'atténuation non contrôlée**





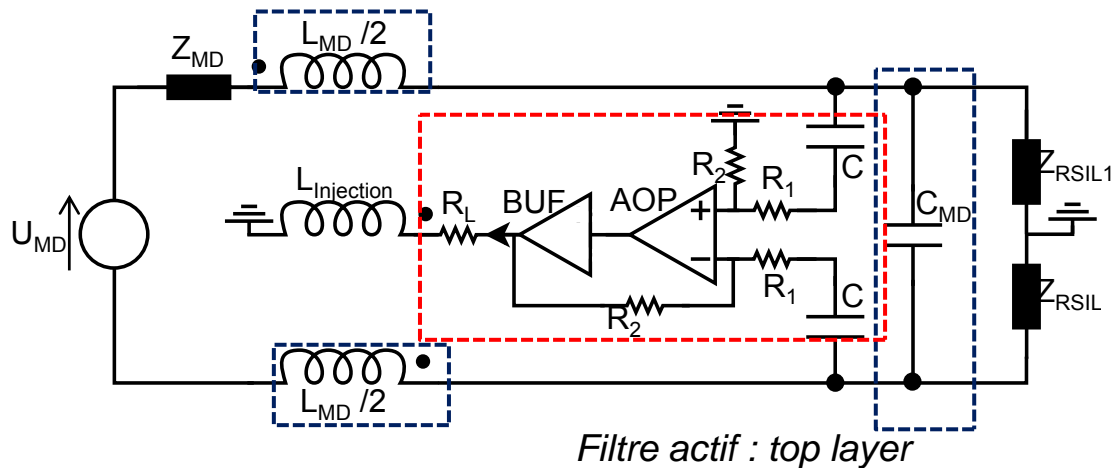
## Intégration d'un filtre CEM hybride -1-

PhD M. Ali 2011, FRAE

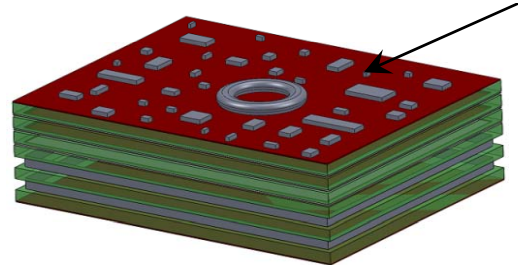
Réduction de la taille d'un filtre CEM pour un convertisseur avionique DC-DC basse tension

### Deux idées maitresses :

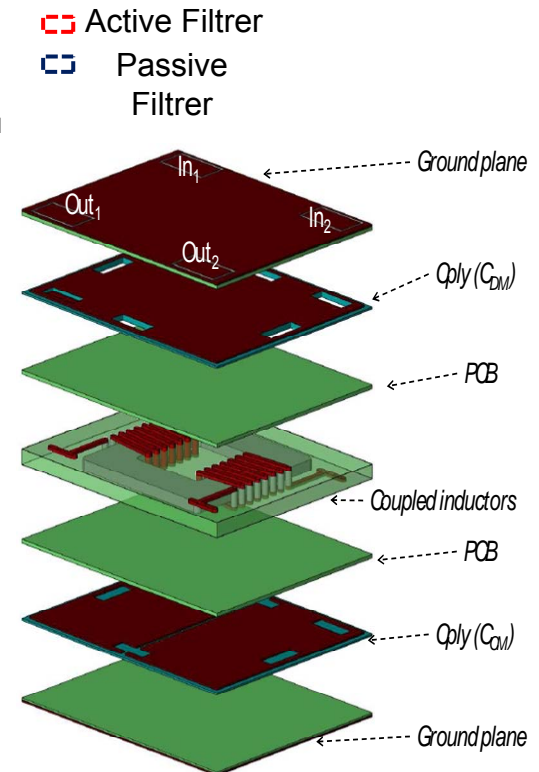
- Utilisation d'un filtre actif pour la partie BF: remplacer les «gros» composants passifs
- Intégration de la partie passive dans le PCB ( Gain de place en zone de routage )



Filtre actif : top layer



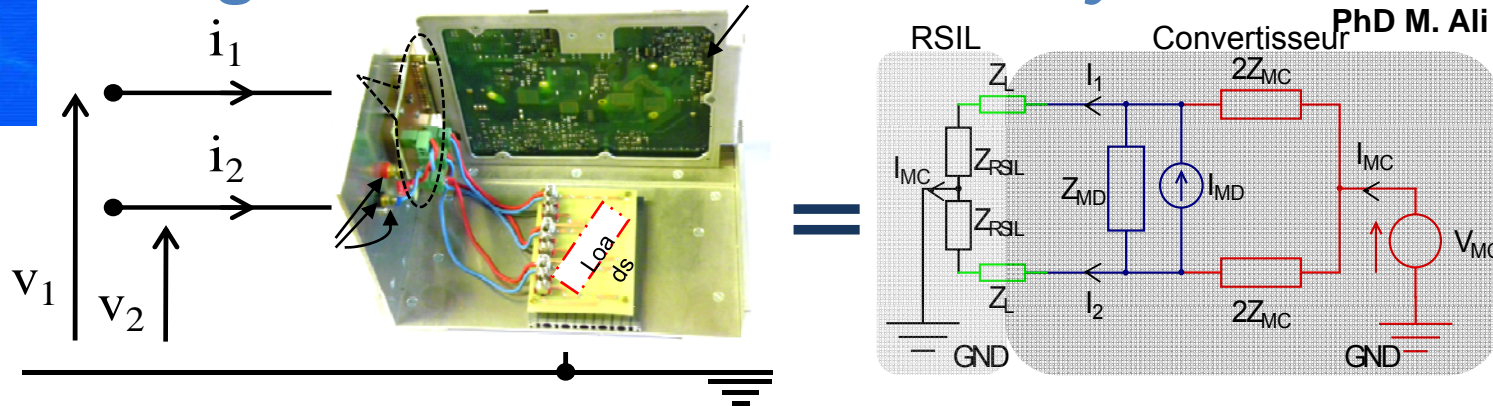
Filtre passif multi-couches





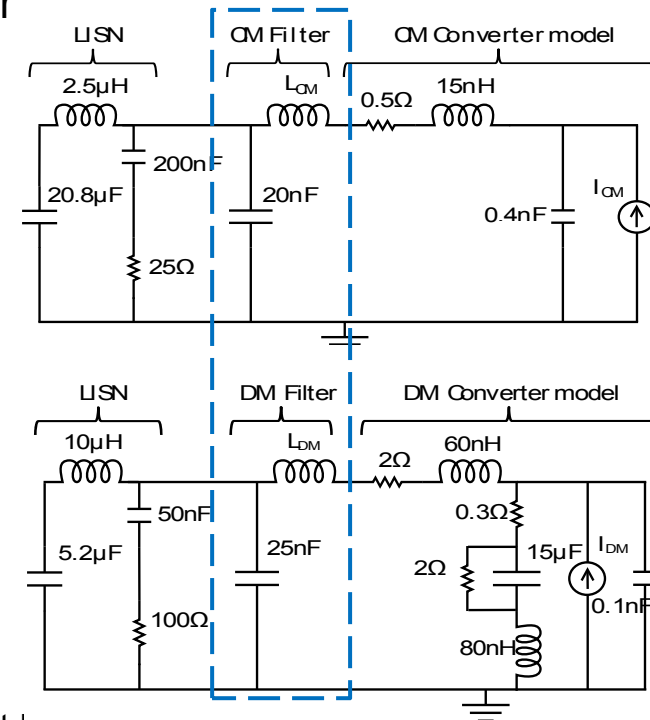
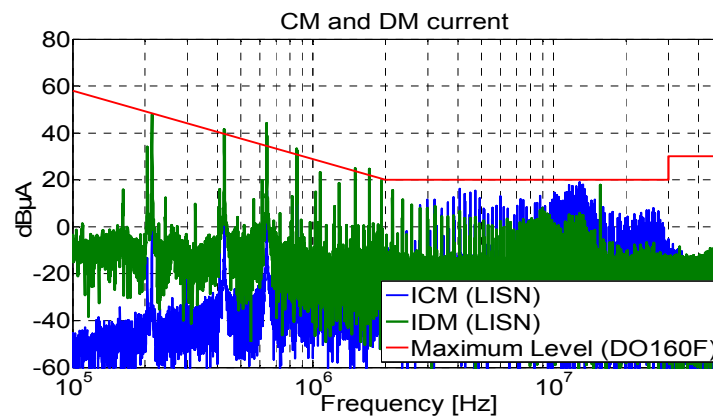
# Intégration d'un filtre CEM hybride -2-

PhD M. Ali 2011, FRAE



**1<sup>ère</sup> étape:** Modélisation boîte noire du convertisseur

**2<sup>nde</sup> étape:** Conception du filtre (structure) et dimensionnement avec contraintes technologiques (Intégration PCB)



## Intégration d'un filtre CEM hybride -3-

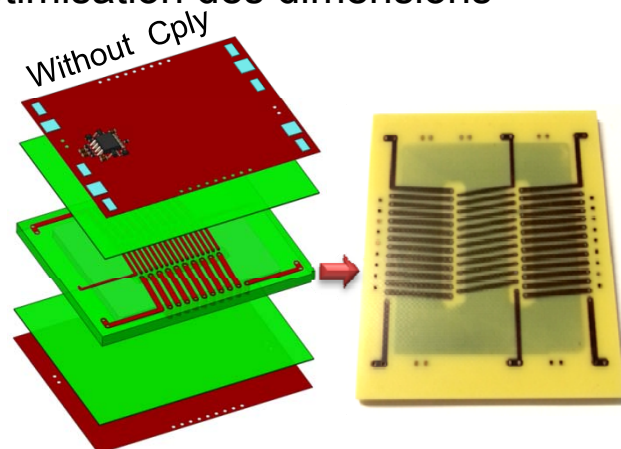
PhD M. Ali 2011, FRAE



**3<sup>ème</sup> étape:** développement du PCB

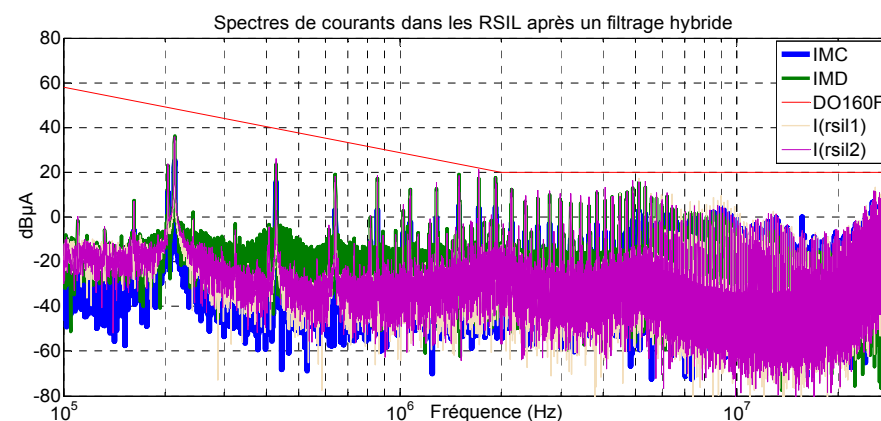
Procédé d'intégration :

- Choix des matériaux adaptés,
- Optimisation des dimensions

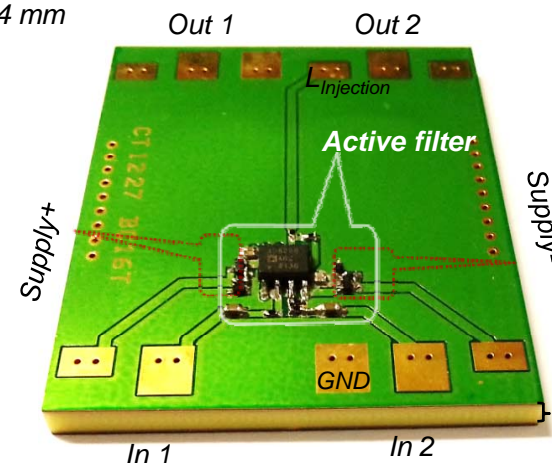


Bénéfices par rapport au filtre initial :

- |  |            |
|--|------------|
| ✓ Diminution du volume de passifs  | <b>55%</b> |
| ✓ Réduction du volume global du filtre   | <b>75%</b> |
| ✓ Réduction de la masse totale du filtre   | <b>53%</b> |
| ✓ Maîtrise précise des éléments parasites  |            |
| ✓ Diminution du rayonnement en champ proche ; Blindage plans de cuivre / couches magnétiques |            |
| ✓ Augmentation de la robustesse et de la fiabilité   |            |
| ✓ Zones de routage disponibles pour implanter d'autre fonctions                              |            |



$e=3.4\text{ mm}$



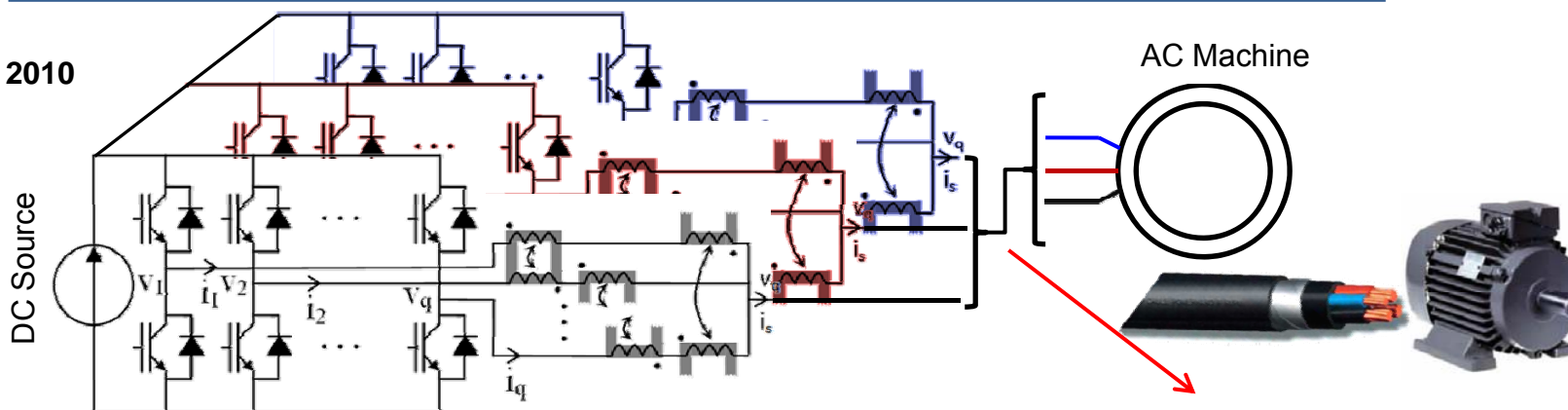




# Onduleur à faibles émissions conduites -1-

## Onduleur multicellulaire couplé par ICT

Thèse F. Adam 2010



Structure parallèle multi-niveaux avec transformateurs inter-cellule (ICT)

Prototype, 3x6 switching Cells, 300V, 3x10A

$F_s = 10\text{kHz}$

3x6 Switching Cells  
Half Bridge + Drivers

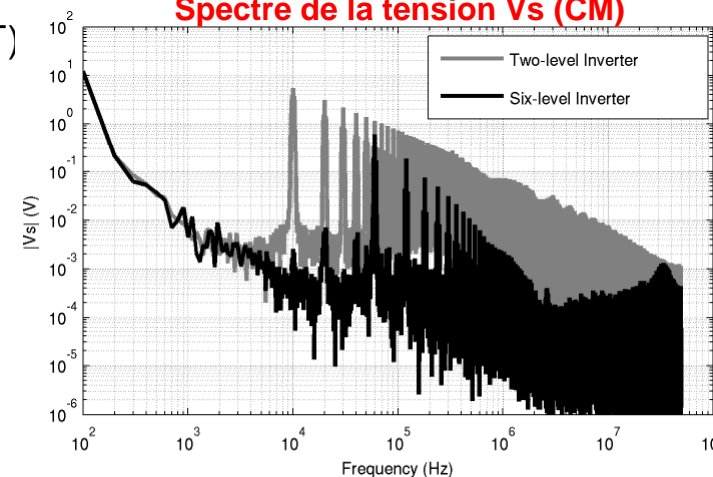
3x6 Intercell  
Coupling Transformers

FPGA Xilinx Spartan 3E

Digital Control

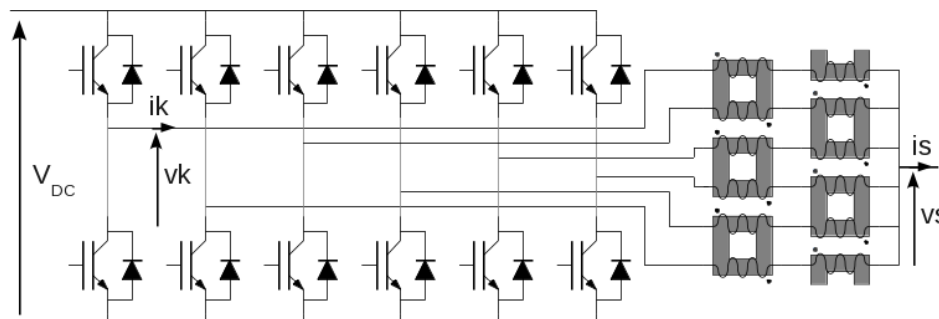
DSP TMS320 F 28335

### Spectre de la tension $V_s$ (CM)



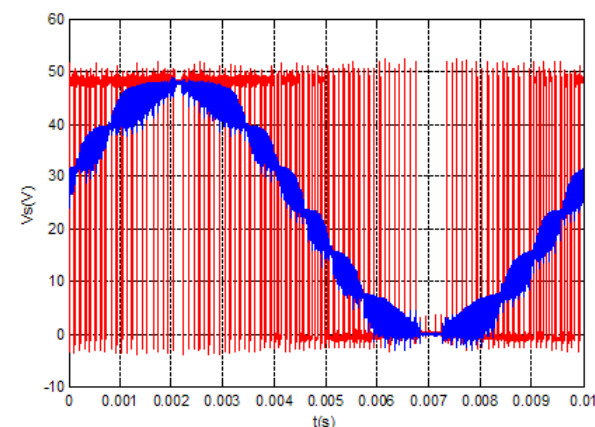
Réduction des courants CM du fait de la structure entrelacée et du filtrage apporté par les ICTs

## Onduleur à faibles émissions conduites -2-

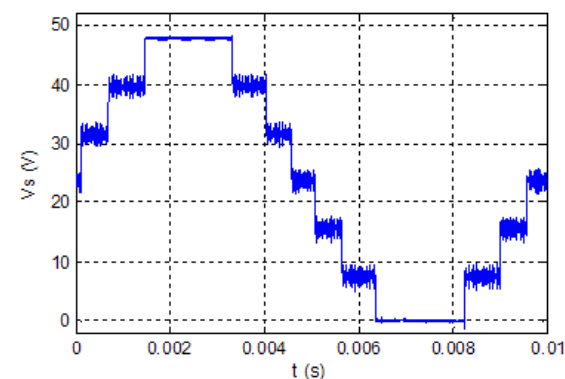


Thèse F. Adam 2010

7 levels output voltage

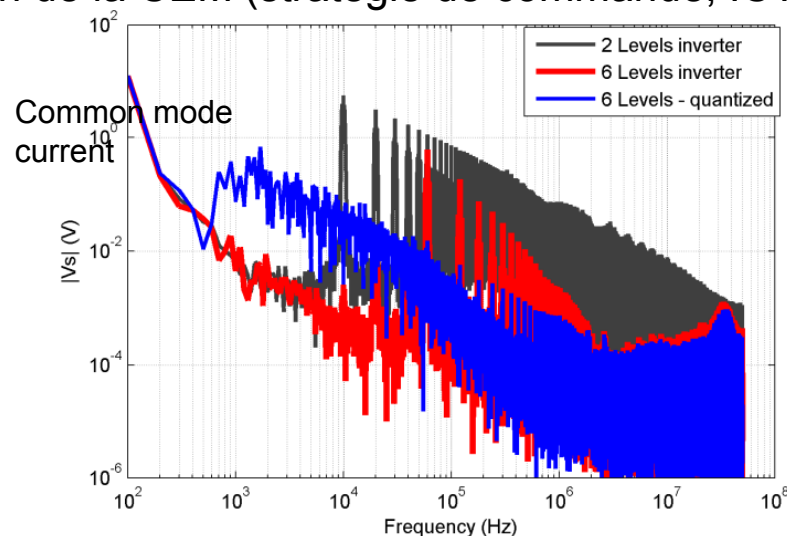


7 levels quantified output voltage

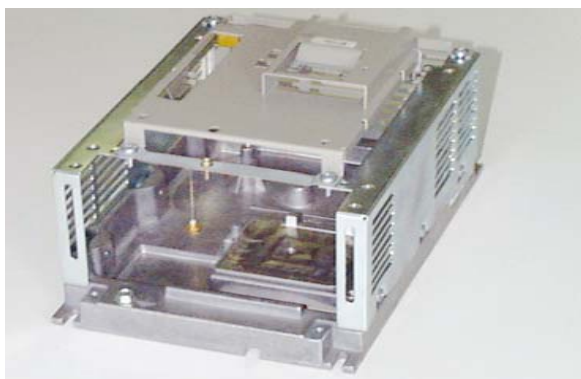


⇒ Intégration

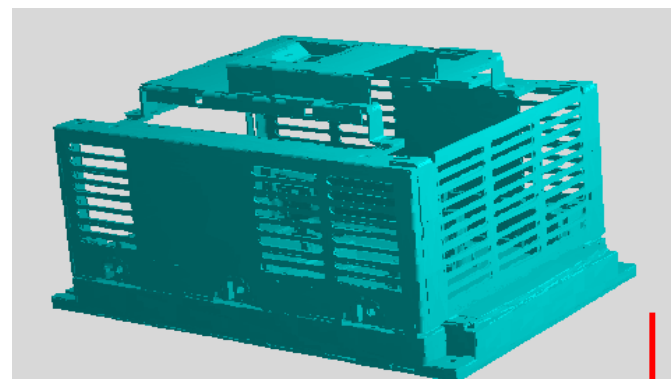
- ❑ Haute efficacité
- ❑ Optimisation CEM pour les long cables; applications:
  - ❑ controle des surtensions,
  - ❑ reduction des courants de mode commun (MC)
- ❑ Amelioration de la CEM (stratégie de commande, ICT)



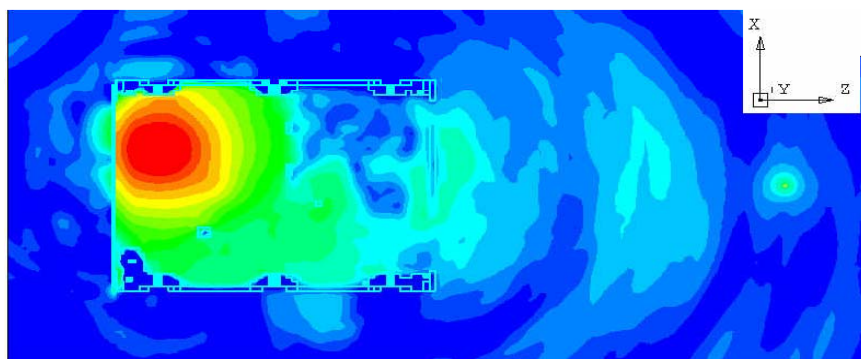
## Simulation de l'efficacité de blindage



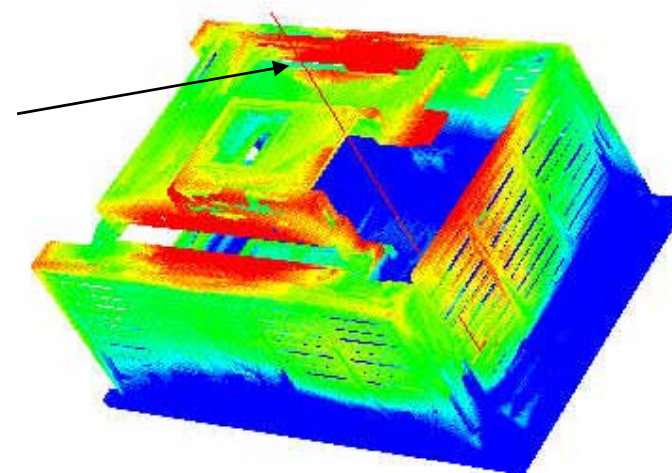
1- Blindage du système



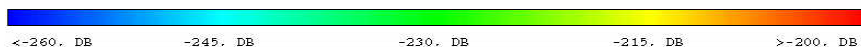
2- maillage de la structure



3- Antenne d'émission



Densité des courants de surface



4- Champ E rayonné (axe Y), F=100kHz

12 Juin 2014

Séminaire Puissance – Saint-Nazaire

23

## *CEM des convertisseurs statiques*

### Conclusion

- Interactions CEM en électronique de puissance
  - Les perturbations générées par les commutations
  - Les commandes rapprochées
  - Le filtrage
    - Dimensionnement, Efficacité, Volume, Masse
  - Le blindage
    - Limiter le rayonnement, Masse
- La CEM des systèmes
  - Modélisation des convertisseurs (Sources MC, MD)
  - Les couplages (ES, EM) et le câblage