

# Caractéristiques et évolution du bruit électromagnétique dans les dispositifs d'alimentation embarqués sur avion

## Avion plus électrique ?

Les avancées technologiques sont pilotées par :

- ↪ **La réduction de masse**
- ↪ **Augmentation de la sûreté de fonctionnement / sécurité**
- ↪ **Augmentation des performances**
- ↪ **Réduction de coûts de fonctionnement / maintenance**

Éliminer les sources multiples de puissance (hydrauliques ...) et leurs canalisations associées pour ne conserver que l'électrique

Profits attendus\*:

- ↪ 10 % masse
- ↪ 13 % poussée moteur
- ↪ 9 % consommation
- ↪ 15 % maintenance
- ↪ 10 % coût

Snecma involvement in EMA



\* Workshop SNECMA

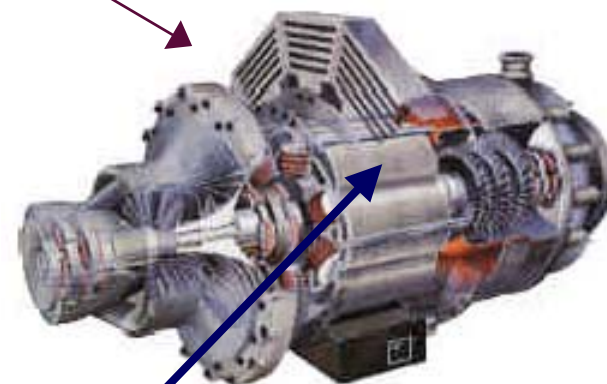
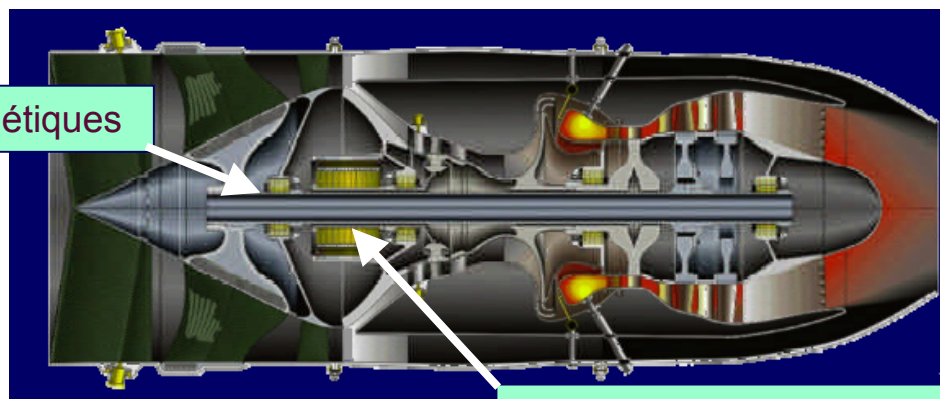
➤ Plus de convertisseurs statiques:

Aujourd'hui: qq kW, demain qq 100 kW

➤ Aujourd'hui: actionneur hydro-électrique: qq kW

➤ Demain: auxiliaires (inverseur de poussée, pompes à kérosène, ...) → qq 100kW

➤ Générateurs embarqués



Paliers magnétiques

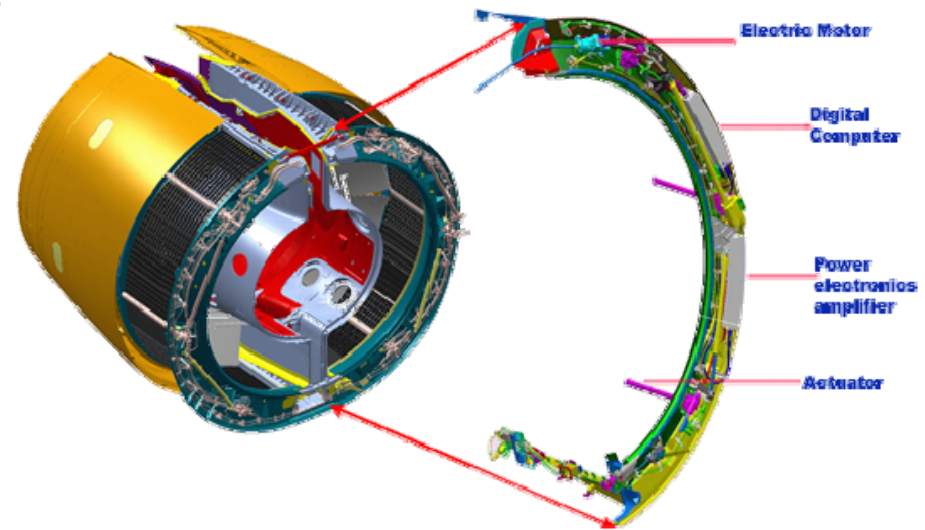
Alternateur intégré

## ↳ ETRAS™ : inverseur de poussée

- Développé par Hispano-Suiza en collaboration avec Honeywell
- Conçu pour équiper le GP7200 et le Trent 900 engine nacelles pour l'Airbus A380

## ↳ Principaux avantages

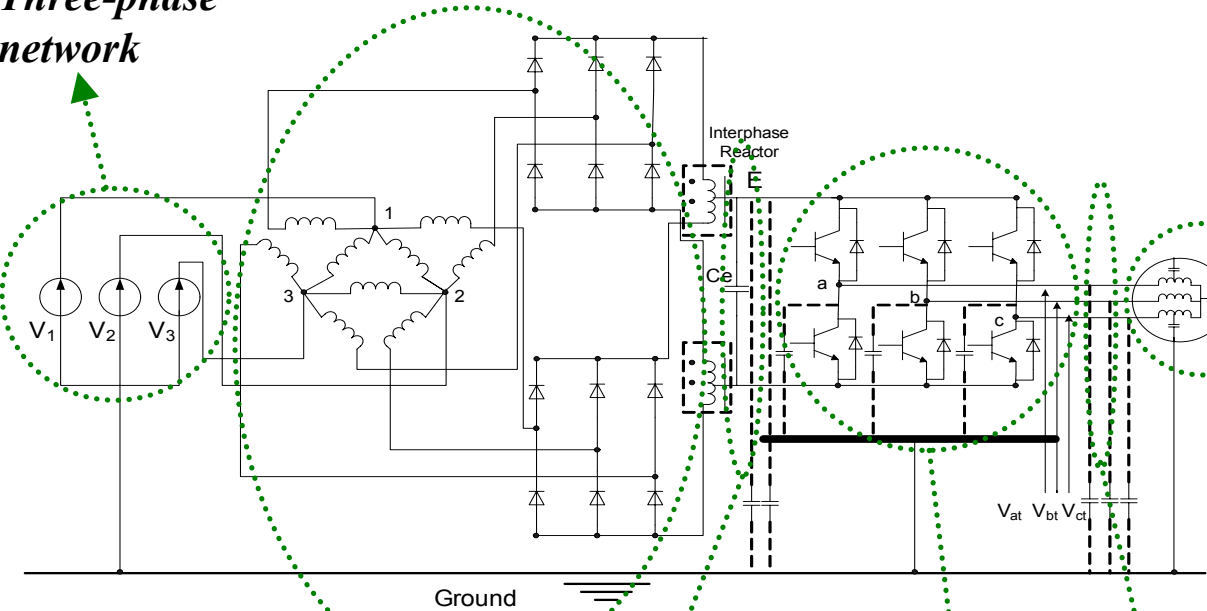
- Simplification de l'installation : remplacement des systèmes hydrauliques par des systèmes électriques
- Réduction du poids et des coûts de maintenance



Electromechanical thrust reverser actuation system  
- ETRAS - for A380 engine nacelle



*Three-phase network*

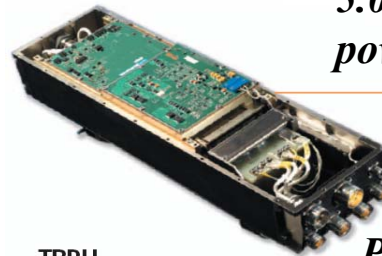


*3- $\phi$ , 4-pole, permanent magnet AC synchronous electrical motor electromagnetic brake*



*12-pulse diode Rectifier*

*0.63 shielded power cable*



*5.0 shielded power cable*

*PWM voltage Inverter*



## ↪ Cohabitation des systèmes embarqués:

- Foisonnement croissant des systèmes de contrôle (bas niveaux) et des systèmes de puissance

## ↪ Nouvelles problématiques CEM en aéronautique

- Contraintes spécifiques: cyclages thermiques, vibrations, poids, matériaux composites ...
- Nouvelles solutions (comparativement aux systèmes industriels classiques) à développer

## ↪ Perturbations engendrées par les convertisseurs de puissance

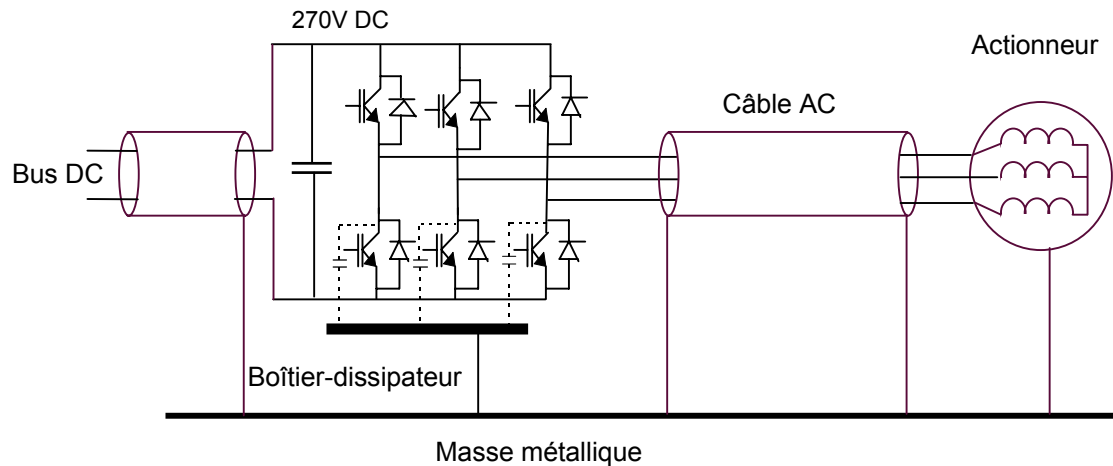
- Élément essentiel à prendre en compte dans le dimensionnement de l'architecture électrique des avions modernes

## ↳ Enjeux liés à la maîtrise du bruit EM

- **Sûreté de fonctionnement (brouillage des systèmes avioniques)**
- **Furtivité (avion d'arme)**
- **Temps et coûts de développement**
  
- **Prise en compte dès la phase de conception**
  - **Choix / validation des technologies**
  - **Répartition géométrique des systèmes (convertisseurs, actionneurs ...)**
  - **Optimisation système : répartition de la CEM sur les différents constituants (filtrage, commande, blindage ...)**
  - **Spécification d'un point de vue CEM des constituants : actionneurs, câbles ...**



## ↳ Structure de base d'alimentation des actionneurs : onduleur triphasé



- MLI (qq 10 kHz) => Onduleur = source de bruit (MC & MD)
- Distance onduleur / actionneur => câble de P (chemins de propagation des perturbations)

## ⇒ Technologies des composants:

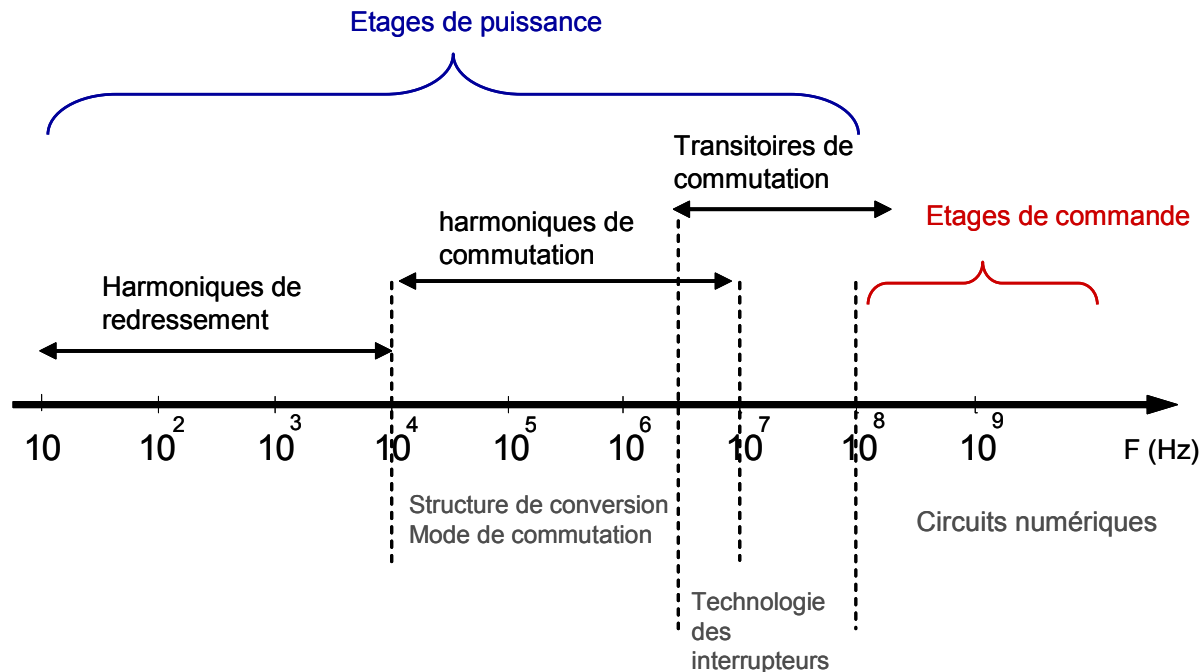
- Miniaturisation des convertisseurs => augmentation des fréquences (DC-DC : 50 kHz à 500 kHz en 10 ans ... actuellement qq MHz)
- Diminution des temps de commutation => diminution des pertes => miniaturisation
  - Maîtrise des procédés de fabrication (motifs ...),
  - Structures innovantes (COOLMOS,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

## ↳ Performances des interrupteurs

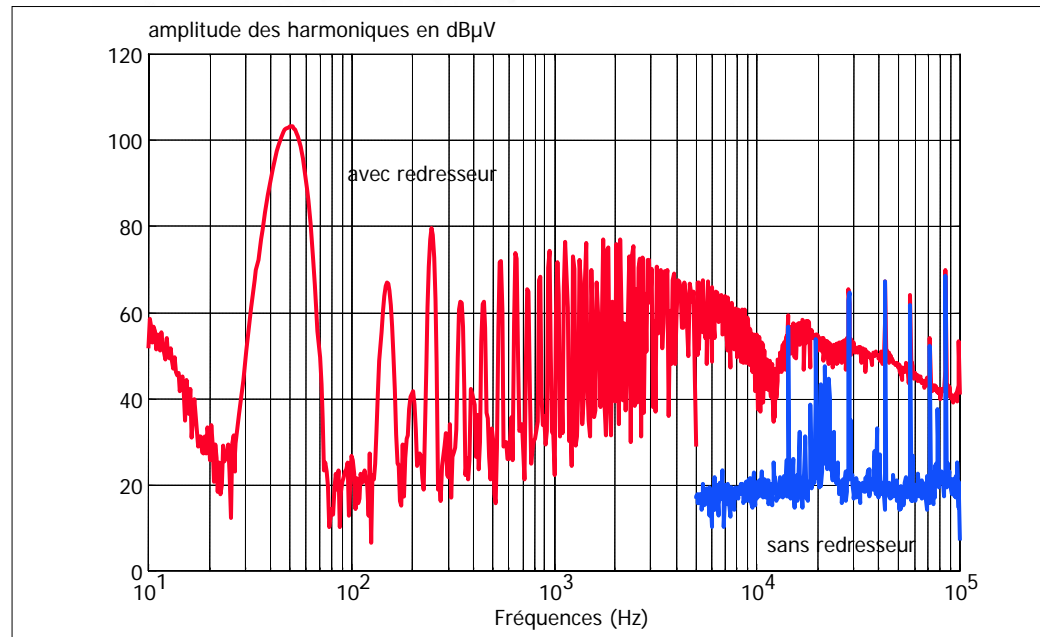
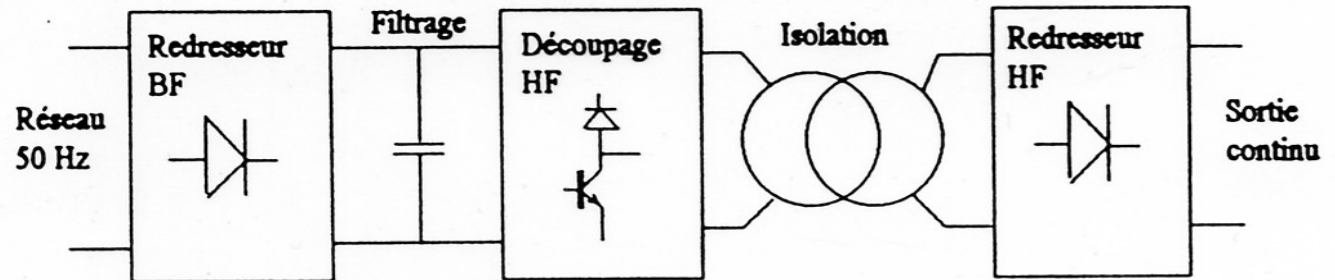
Ans	1970	1980	1985	1990	2000	2000	2003	2005	2005	2010
Interrupteur	Thyristors, diodes de P	GTO, T bipolaire, diodes rapides	MOSFET	IGBT	COOLMOS	IGBT (réseau 400V)	TrenchMOS	IGBT (Traction)	Diodes Schottky Sic	JFET SiC IGBT SiC
calibres	3 KV 3 KA	3kV 3kA 100A 1kV	50A 1000V	100 A 100 V	50 A 600 V	100A 1,2kV	50A 25V	100 A 6 kV	100 A 600 V	10 A 1200 V
Fréquence	100 Hz	300Hz qqes kHz	qqes 100kHz	qq kHz	qqes 100kHz	10-100 kHz	1 MHz	qq kHz	qq 100 kHz	qqes 10-100 kHz
dV/dt dI/dt	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

## Étendue spectrale du bruit EM généré par les convertisseurs de P

- Plage fréquentielle très étendue
- Chaque étage de conversion contribue à l'émission globale
  - En conduit et en rayonné
  - Interférences entre les sources de perturbation (modulation ...)



↳ Exemple:  
Alimentation  
à découpage



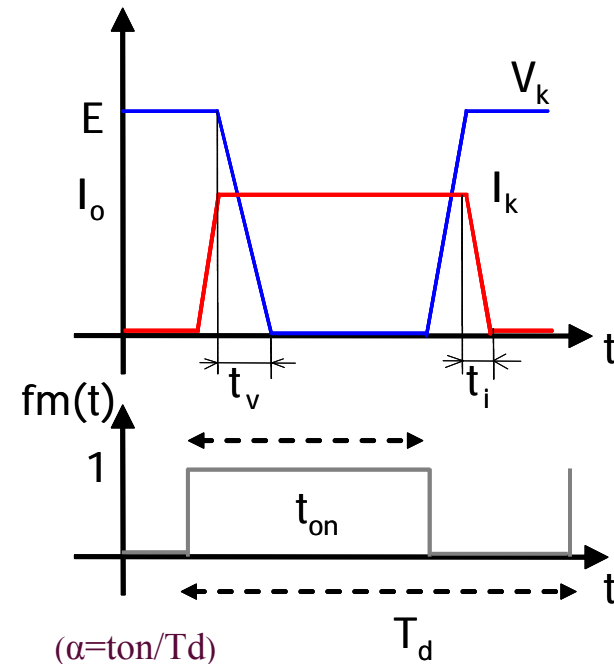
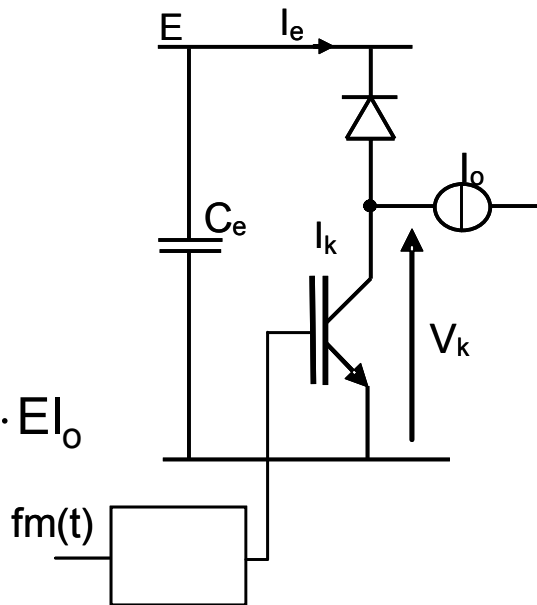
## ↳ La cellule de commutation

- Structure élémentaire des convertisseurs d'EdP
- Association de 2 interrupteurs : gestion du transfert d'énergie entre sources
- Grandeurs externes à la cellule sont constantes ( $E, I_o$ ), les internes variables ( $I_e, V_k$ ) modulées par la fonction  $fm(t)$

$$v_k(t) = fm(t) \cdot E$$

$$i_e(t) = fm(t) \cdot I_o$$

$$P_s = \langle v_k \rangle \cdot I_o = \alpha \cdot E I_o$$

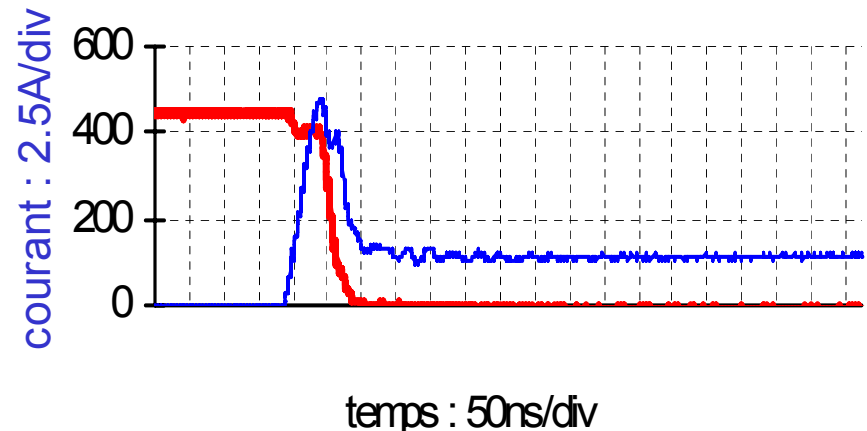
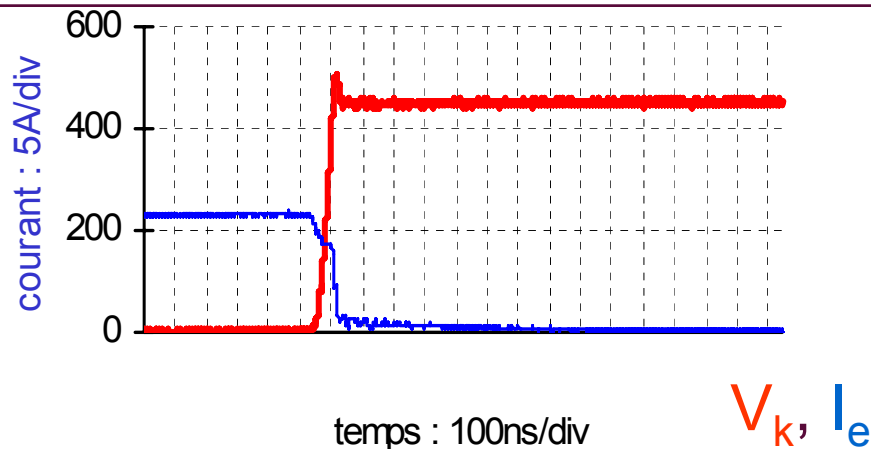




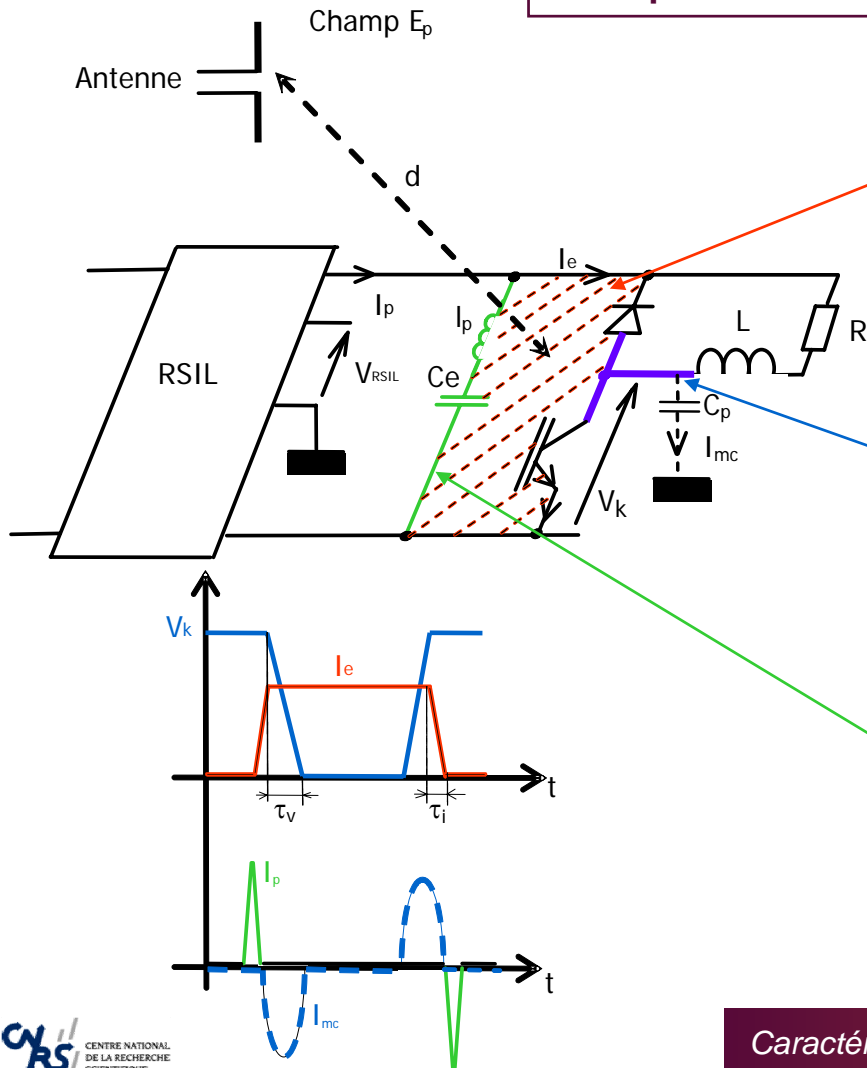
## Origine des perturbations

- Grandeurs électriques variables dans la maille de commutation
- Réduction des pertes : commutations très rapides (présence de tension et de courant simultanément - 1 kA/ $\mu$ s et 50 kV/ $\mu$ s)

Exemple de commutation d'1 IGBT dans une cellule de commutation sous 400 V



## Exemple d'un hacheur avec RSIL



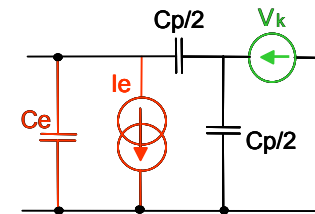
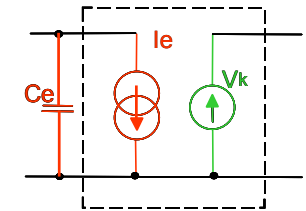
- Maille (zone hachurée)  $I_e$  subit des variations très rapides à haute fréquence  
 ⇒ Boucle = dipôle rayonnant magnétique

- 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  $I_p$ .

## Modèle de la cellule de commutation

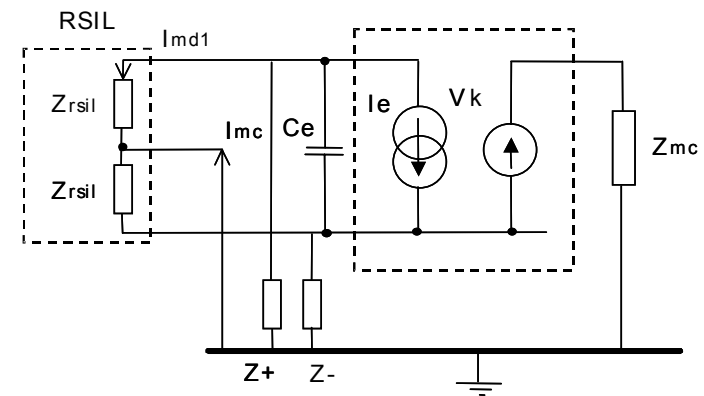
- Courant d'entrée ( $I_e$ ): générateur de courant créant le courant parasite de MD par couplage par impédance commune ( $C_e$ )
- Tension d'interrupteur ( $V_k$ ): générateur de tension créant le courant de MC via les chemins de propagation capacitifs
- Impédances de liaison (parasites) des  $\neq$  potentiels de la cellule à la référence : effets localisés (dimensions  $\gg \lambda$  des signaux les + rapides)



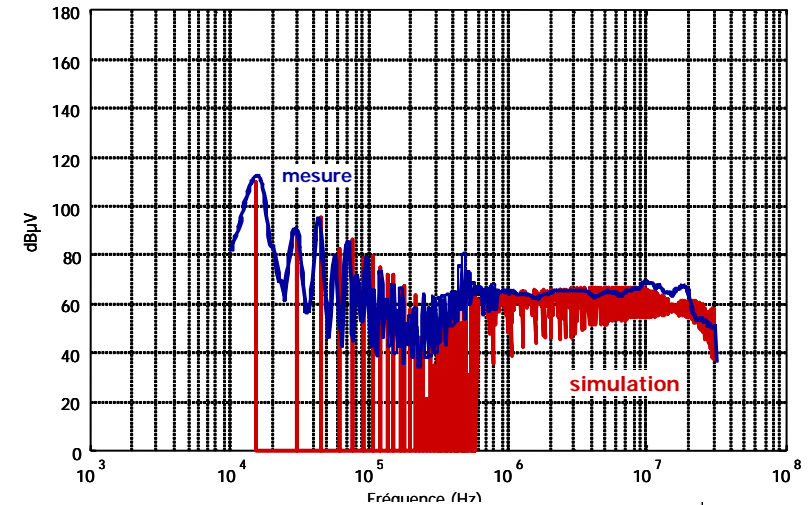
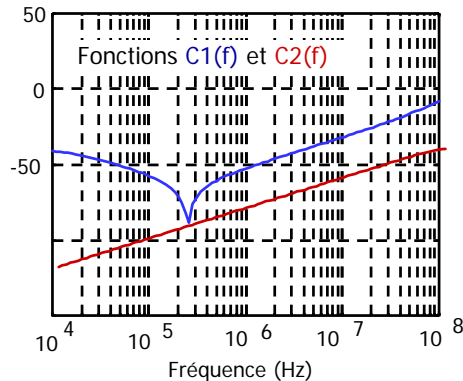
$$I_p = I_e \cdot C_1(f) + V_k \cdot C_2(f)$$

Avec  $C_1(f)$  et  $C_2(f)$ , fonctions de couplage

$\nwarrow$  MD  
 $\nearrow$  MC

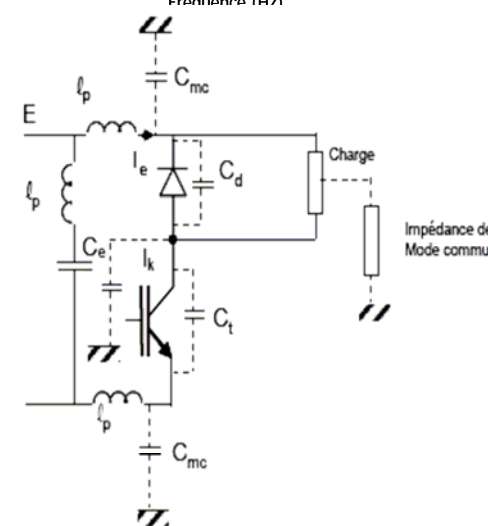


Exemple sur un hacheur : 15 kHz, 48 V, 2A

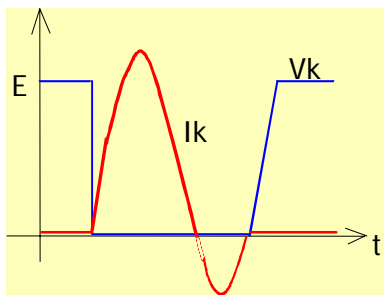


## Méthodologie applicable au mode rayonné !

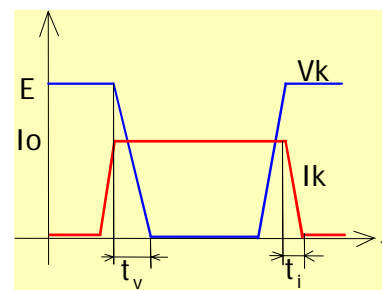
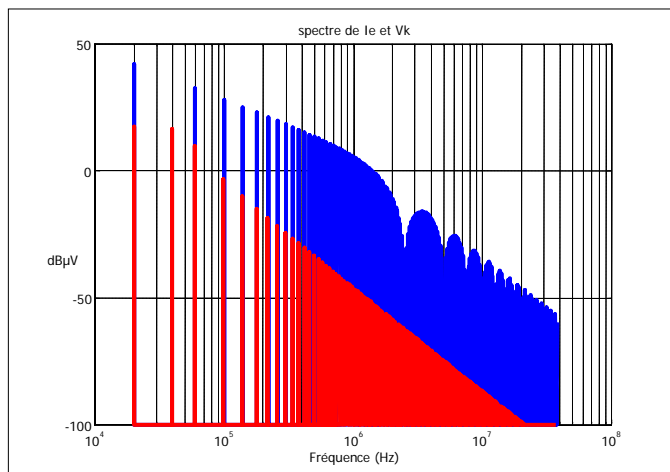
- Complexité de  $C1(f)$  et de  $C2(f)$  (géométries 3D, ...)
- Limitation de la représentation des sources en HF : adjonction de composants parasites
  - + C parasites des interrupteurs bloqués
  - + Inductances parasites de câblage
  - + Couplages parasites inductifs et capacitifs de la cellule et de la charge / à la masse
  - + ...



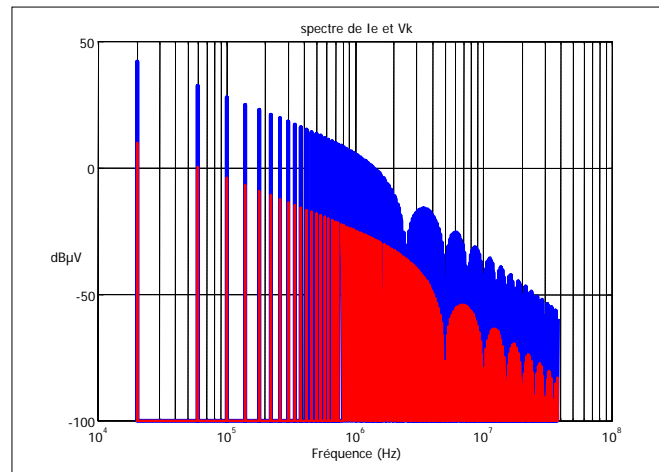
## Modes de commutation



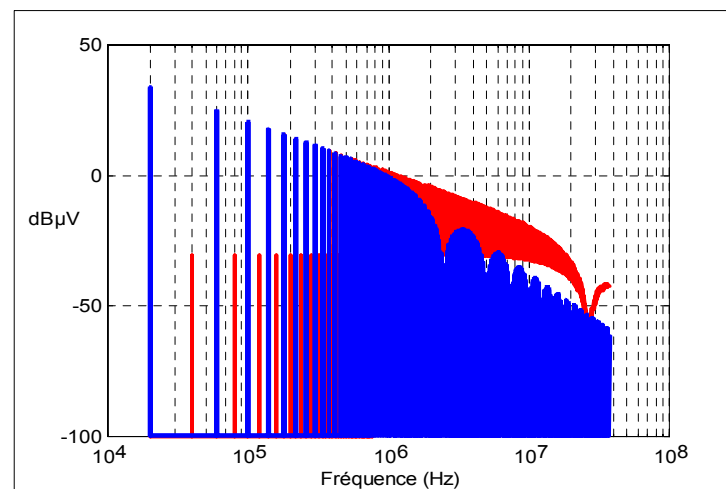
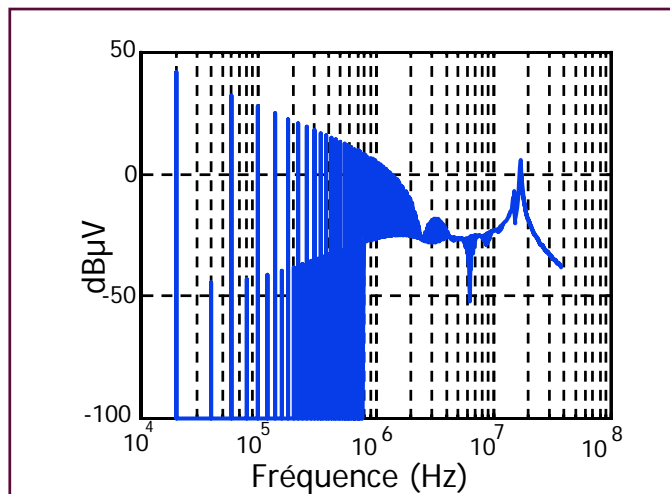
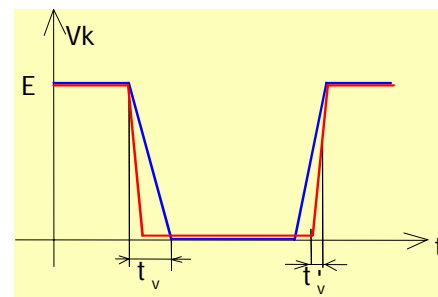
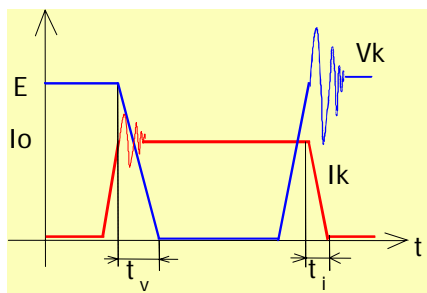
Commutation à zéro de courant



Commutation commandée



## Fronts de commutation et imperfections de la cellule

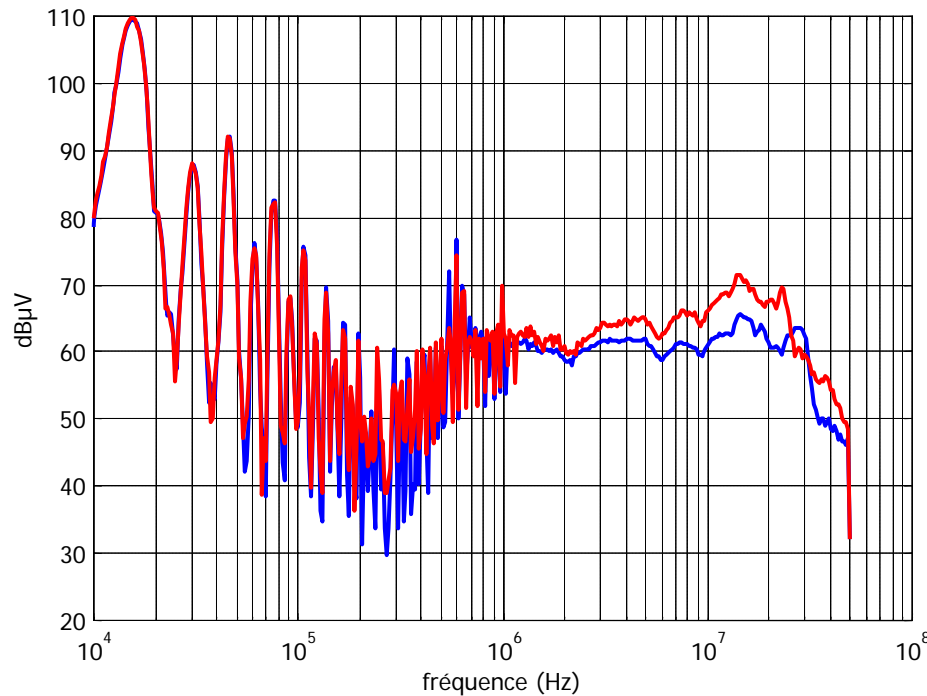


Elargissement du spectre si le  $dV/dt$  croît



## Aspects technologiques

- Exemple d'un hacheur 15 kHz,  $V_{in} = 48\text{ V}$ ,  $I_{out} = 2\text{ A}$

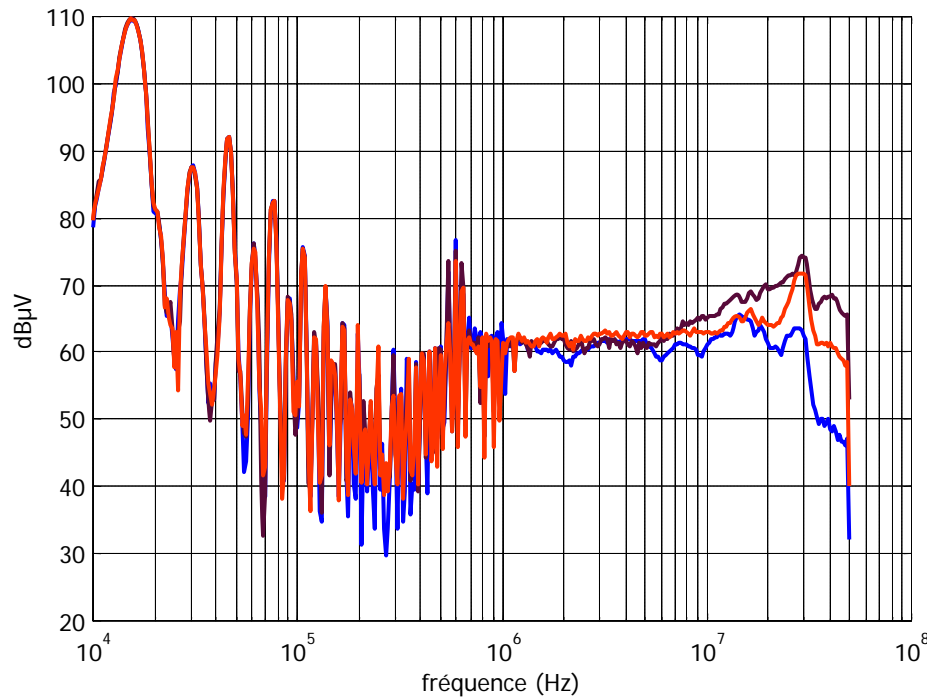


Diode snap off  
(recouvrement rapide)

Diode soft

## Commande

- Exemple d'un hacheur 15 kHz,  $V_{in} = 48\text{ V}$ ,  $I_{out} = 2\text{ A}$



Impact de la résistance de grille du MOSFET:

$$R_g = 68\ \Omega$$

$$R_g = 22\ \Omega$$

$$R_g = 0\ \Omega$$

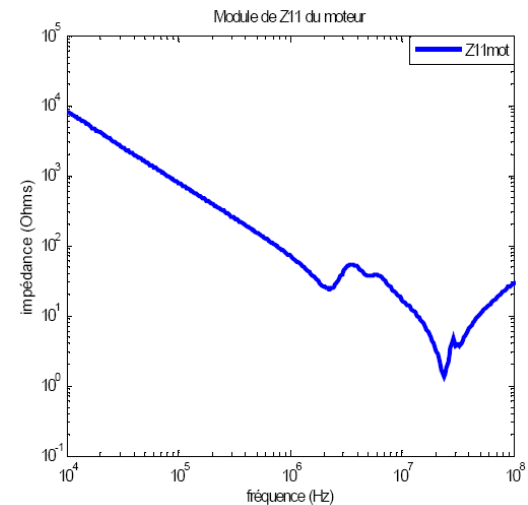
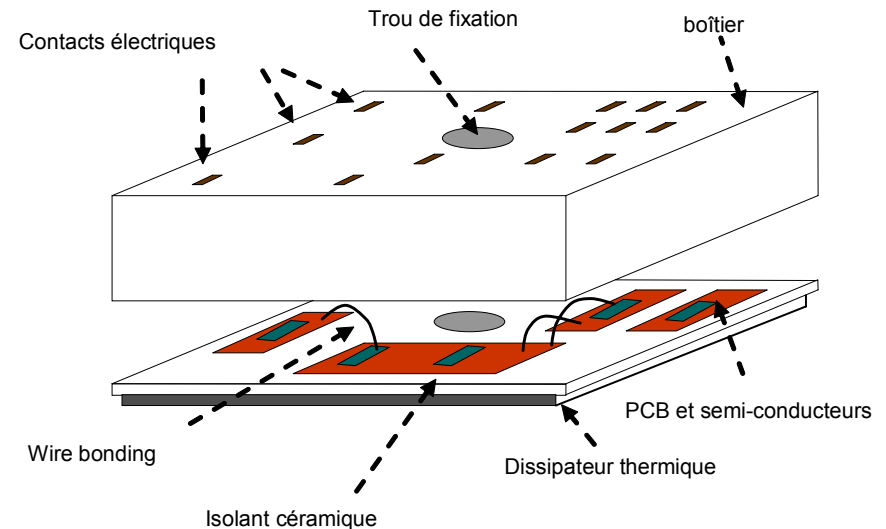
## Chemins de propagation des perturbations

### — Intra-convertisseur :

- Capacité entre SC et dissipateur thermique
- Liaisons électriques internes (bonding, bus barres ...)

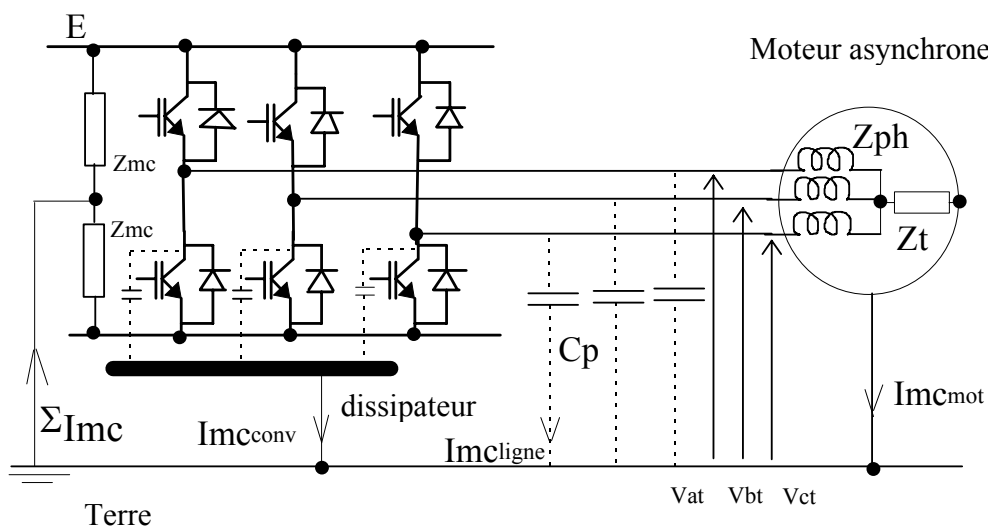
### — Externes :

- Câbles
- Actionneurs
- Transformateurs

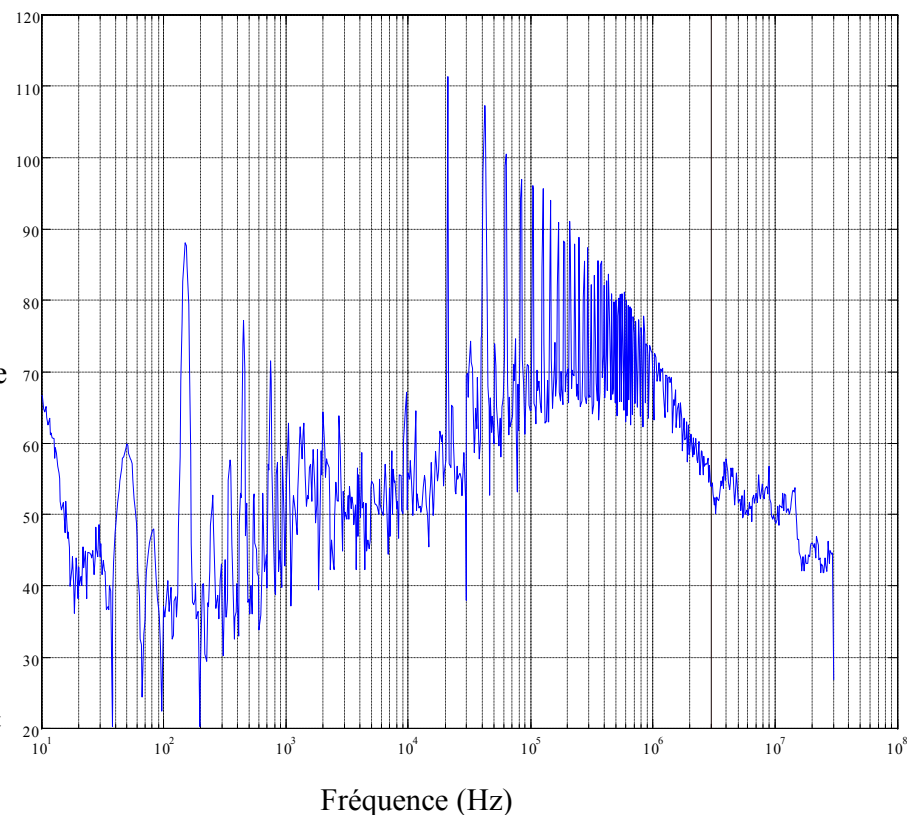


## ↪ Onduleur triphasé

- Perturbations de MC
- Perturbations rayonnées
- Perturbations conduites
- Dégradation des roulements ...



Spectre de  $V_{mc}$  (dB $\mu$ V)



## ↪ Mécanismes de génération des perturbations EM dans les systèmes de conversion statique d'énergie électrique embarqués:

- Large spectre fréquentiel
- Niveau élevé
- Paramètres influents
- Modes de propagation

## ↪ Compréhension des mécanismes (sources et mode de couplage):

- Prise en compte de la CEM dès la phase de conception
- Choix des technologies
- Répartition géométrique des systèmes (convertisseurs, actionneurs ...)
- Optimisation système : répartition de la CEM sur les différents constituants (filtrage, commande, blindage ...)
- Spécification d'un point de vue CEM des constituants : actionneurs, câbles ...