

## Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille



### Quatrièmes Journées d'Etude « Réseaux Electriques, Haute Tension et Compatibilité Electromagnétique » « REHTCE'2016 »

# CEM EN ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE: CONVERTISSEURS STATIQUES PROPRES

*Nadir IDIR*

## Contexte

**I. Etude des perturbations électromagnétiques dans les réseaux électriques (BF et HF)**

**II. Evolution de l'électronique de puissance**

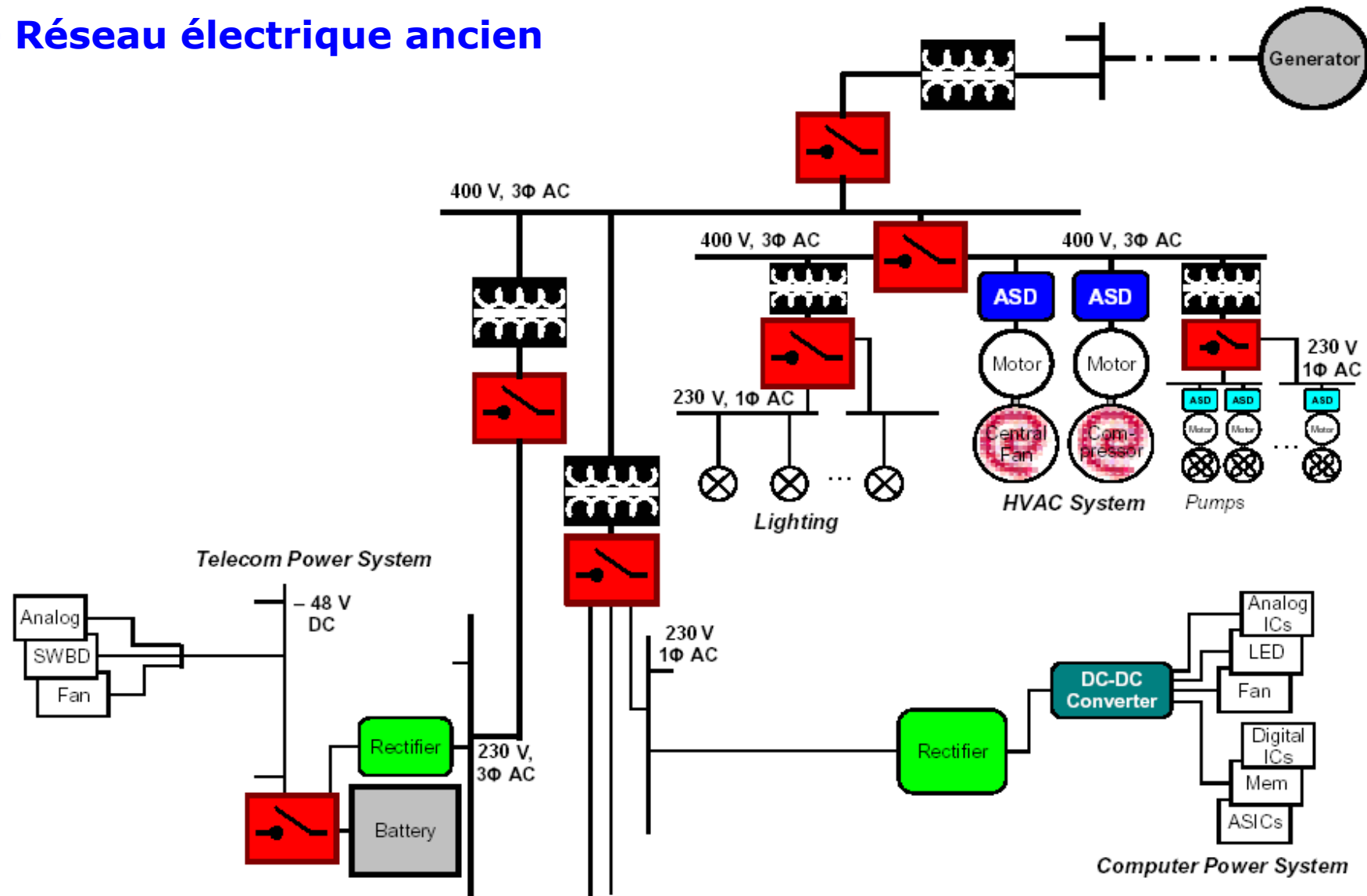
**III. Méthode de réduction des perturbations conduites des convertisseurs d'énergie**

***A - Méthode de dimensionnement des filtres CEM des convertisseurs à base de composants SiC***

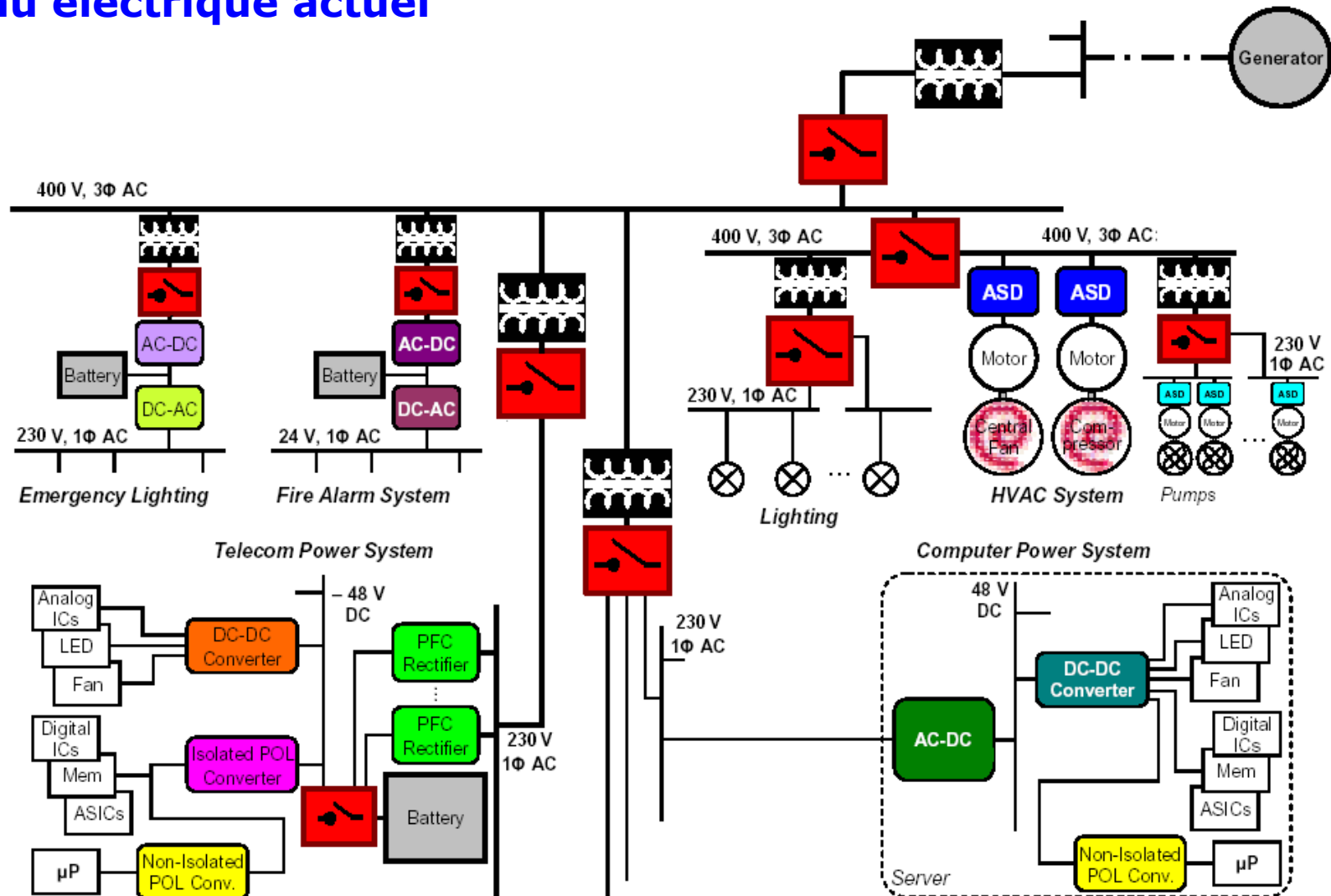
***B - Méthode de réduction par une action sur la structure et la commande du convertisseur statique***

## Conclusion

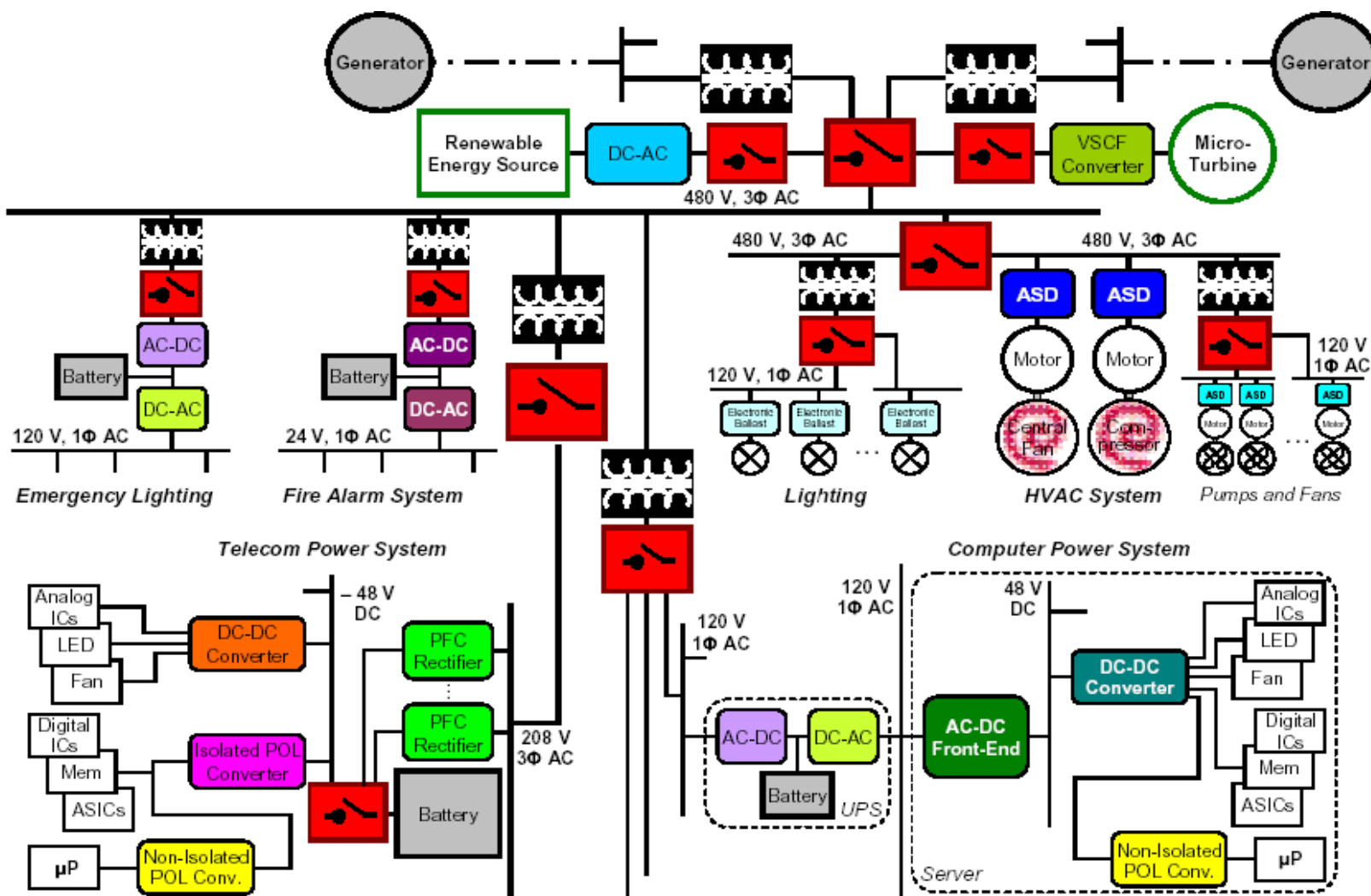
## 1- Réseau électrique ancien



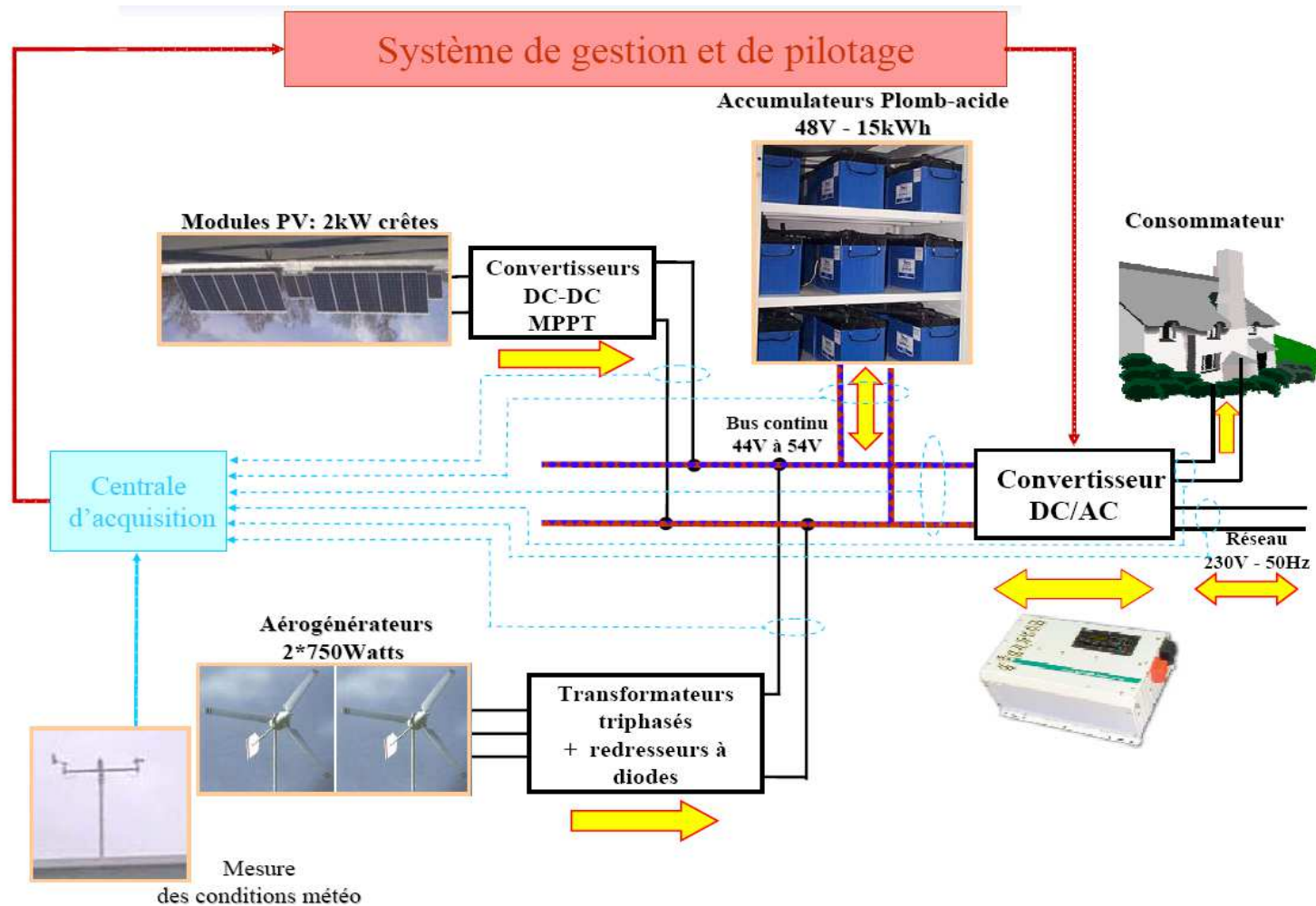
## 1- Réseau électrique actuel



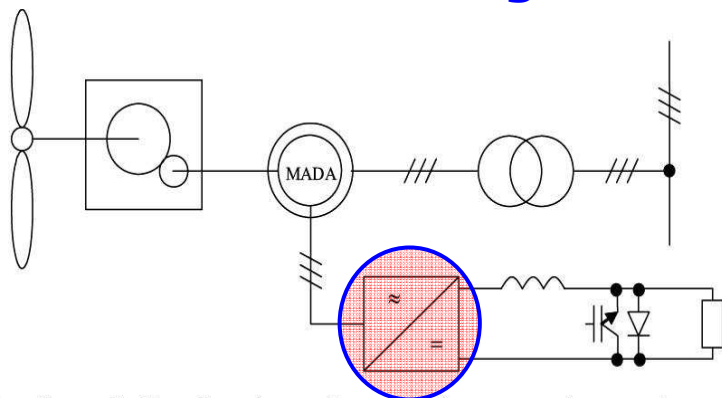
## - Réseau électrique du futur



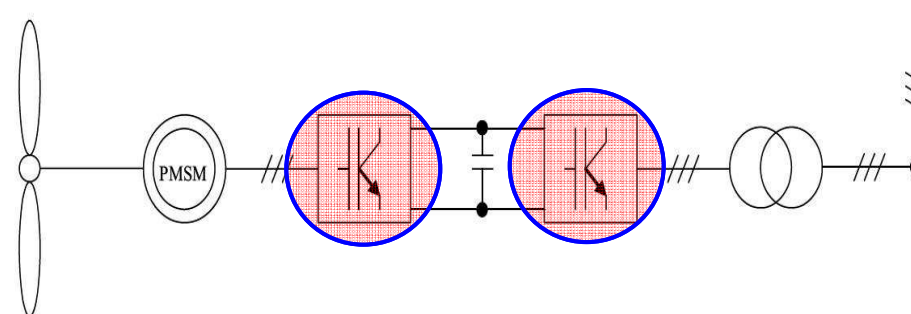
## - Energies renouvelables: du producteur au consommateur



## - Insertion des énergies renouvelables dans les réseaux électriques

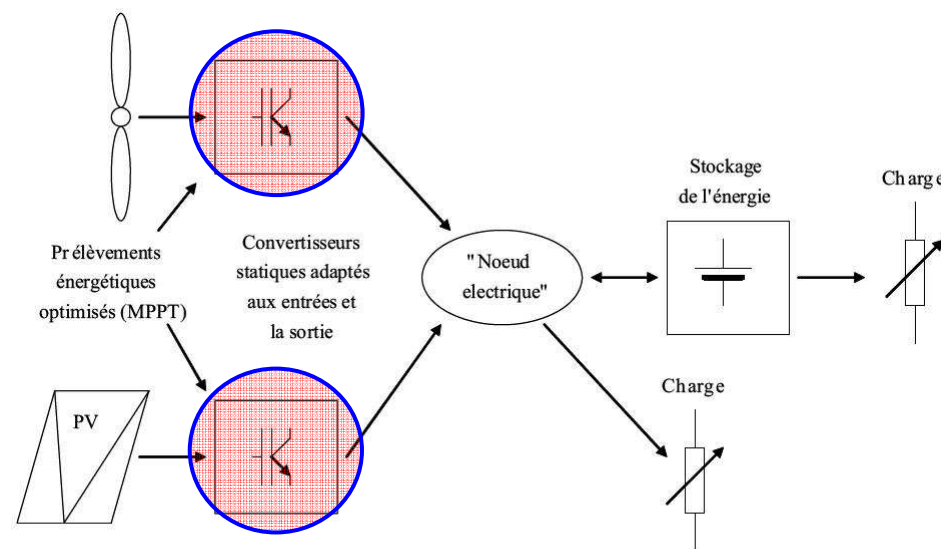


Système éolien basé sur la machine asynchrone à rotor bobiné



Système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents

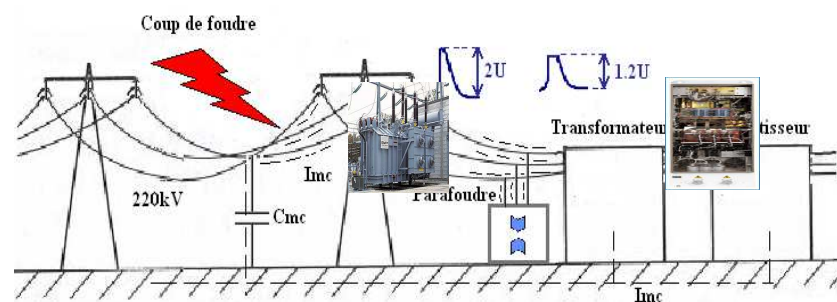
Les convertisseurs statiques sont des sources de perturbations BF (Harmoniques) et HF (CEM) vers le réseau électrique



Exemple d'une configuration dédiée à un site isolé

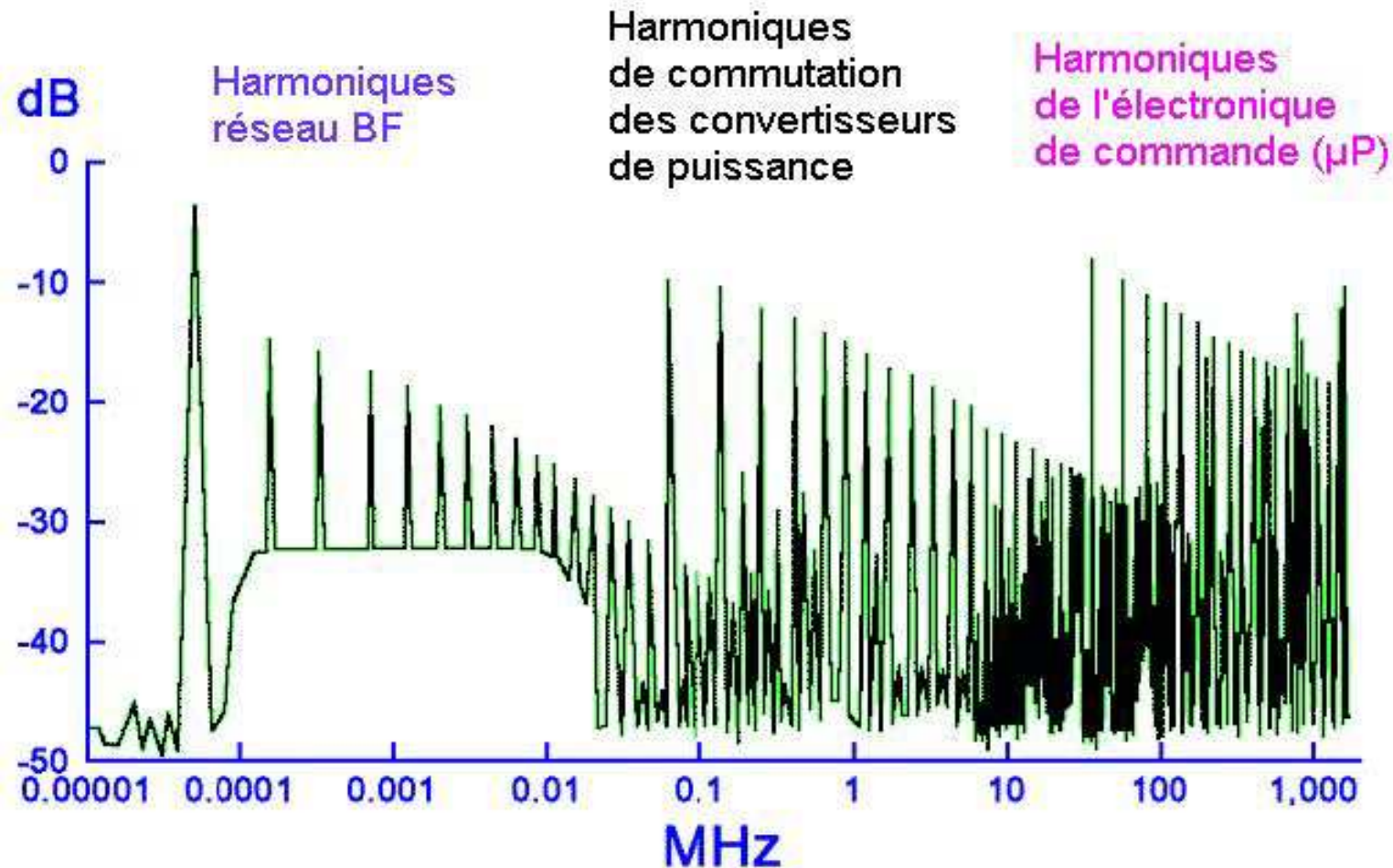


## ETUDE DES PERTURBATIONS ELECTROMAGNETIQUES DANS LES RESEAUX ELECTRIQUES (BF et HF)





## - Fréquences des perturbations des convertisseurs d'énergie



Les convertisseurs statiques sont des sources de perturbations  
Large bande de fréquence

## - Sources des perturbations

- Rapidité des commutations des composants semi conducteurs
- Charges non linéaires sur le réseau électrique
- Electronique numérique et télécommunication
- Impédances HF (résonances)
- Transmission sans fils (WiFi, ...)
- Foudre

## - Conséquences des perturbations

- Brouillages des récepteurs Hertziens
- Décharges Electrostatiques
- Surtension (Flickers, creux de tension, coupures,..)
- Perturbations et immunité des équipements
- Sécurité des personnes
- Effets biologiques
- etc ...

## - Compatibilité ElectroMagnétique (CEM)

Aptitude d'un appareil ou d'un système à fonctionner dans son environnement électromagnétique de façon satisfaisante sans produire lui-même des **perturbations électromagnétiques** intolérables pour tout ce qui se trouve dans son environnement.

## - Perturbation ElectroMagnétique (PEM)

Phénomène ElectroMagnétique susceptible de créer des troubles de fonctionnement d'un dispositif, d'un appareil ou d'un système, ou d'affecter défavorablement la matière vivante ou inerte.

Les perturbations sont classées en fonction de:

- Fréquence
  - Basses fréquences  $< 9$  kHz
  - Hautes fréquences  $> 9$  kHz
- Mode de transmission
  - Conduites
  - Rayonnées

## - Perturbation conduite

Une perturbation est dite conduite lorsqu'elle se trouve véhiculée par l'intermédiaire des conducteurs (fils, câbles, pistes de circuits imprimés, ...).

## - Perturbation rayonnée

Une perturbation est dite rayonnée lorsqu'elle se propage dans l'espace environnant par un champ électromagnétique.

## - Perturbations conduites

### - *Perturbations permanentes:*

- Le flicker
- Les variations de fréquences du réseau électrique
- Les harmoniques
- Les interharmoniques
- Les résidus de découplage en mode commun.

## - Perturbations transitoires

- Fluctuations de tension
- Creux de tension et microcoupures
- Surtensions lentes
- Surtensions sinusoïdales amorties
- Foudre
- Courants transitoires

## - Perturbations Rayonnées

- *Perturbations permanentes*
  - Champ de fuite des transformateurs
  - Rayonnement des lignes d'énergies aériennes
  - Courants de fuite à la terre
  
- *Perturbations transitoires*
  - Courts-circuits
  - Enclenchements des lignes aériennes
  - Foudre

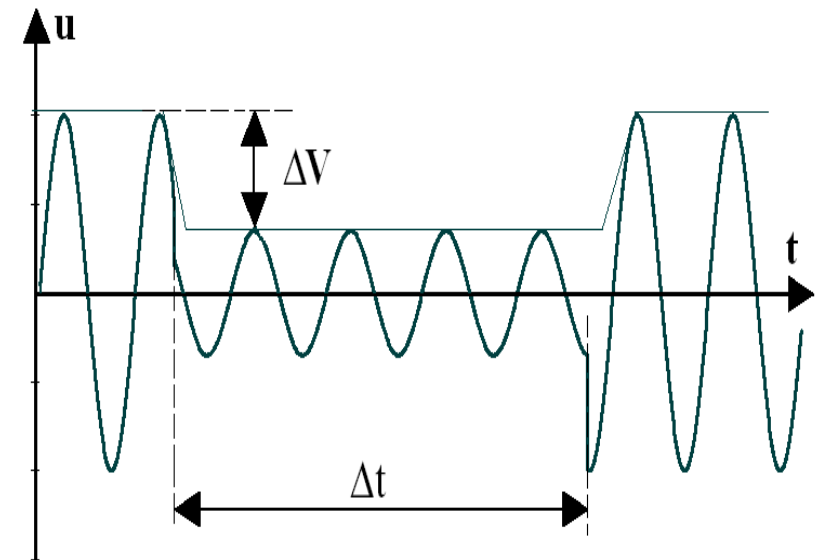
Un creux de tension est une chute brutale de l'amplitude de la tension. Il est caractérisé par :

- Sa profondeur ( $\Delta V$ )
- Sa durée ( $\Delta t$ )

La norme EN50160 fixe la diminution de la tension à une valeur située entre 1 et 90 % de la tension nominale pendant une durée de 10 ms jusqu'à une minute.

Les creux de tension sont dus à l'apparition de défauts sur l'installation ou sur le réseau de distribution.

Une microcoupure (coupure brève) est un cas particulier du creux de tension. Sa profondeur est supérieure à 90 % et de durée inférieure à 3 minutes. Les coupures longues sont supérieures à 3 minutes.





Les surtensions sont de trois natures :

- Surtensions à la fréquence industrielle (50 Hz): elles prennent naissance suite à un défaut l'isolement entre phase et terre, lors d'une surcompensation de l'énergie réactive ou encore lors d'une ferrorésonance.
- Surtensions de manœuvre: elles sont dues d'une modification de la structure du réseau: mise en service de gradins de condensateur, d'une ligne à vide.
- Surtensions atmosphériques: elles sont provoquées par la foudre soit directement, soit indirectement par augmentation du potentiel de la terre.

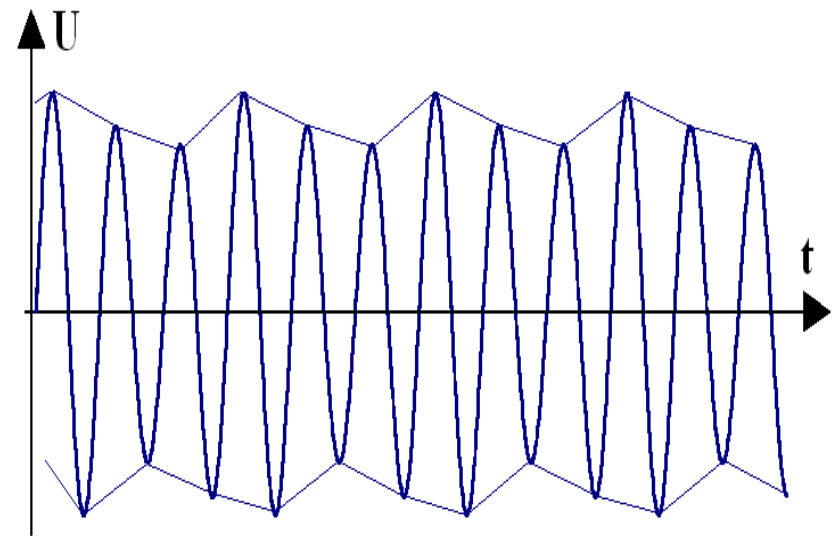
Selon le régime du neutre de l'installation, la norme EN50160 fixe les niveaux de surtensions à :

- $\Delta U < 1,7 U_n$  : quand le neutre est raccordé directement ou avec une impédance à la la terre.
- $\Delta U < 2 U_n$  : quand le neutre est isolé ou résonant.

Le **Flicker** est une diminution de la valeur efficace de la tension de moins de 10 %. La tension est modulée en amplitude par une enveloppe dont la fréquence est comprise entre 0,5 et 25 Hz.

Le Flicker est dû à la propagation dans les lignes du réseau des courants importants provoqués par la mise en service ou hors service des charges dont la puissance absorbée varie rapidement :

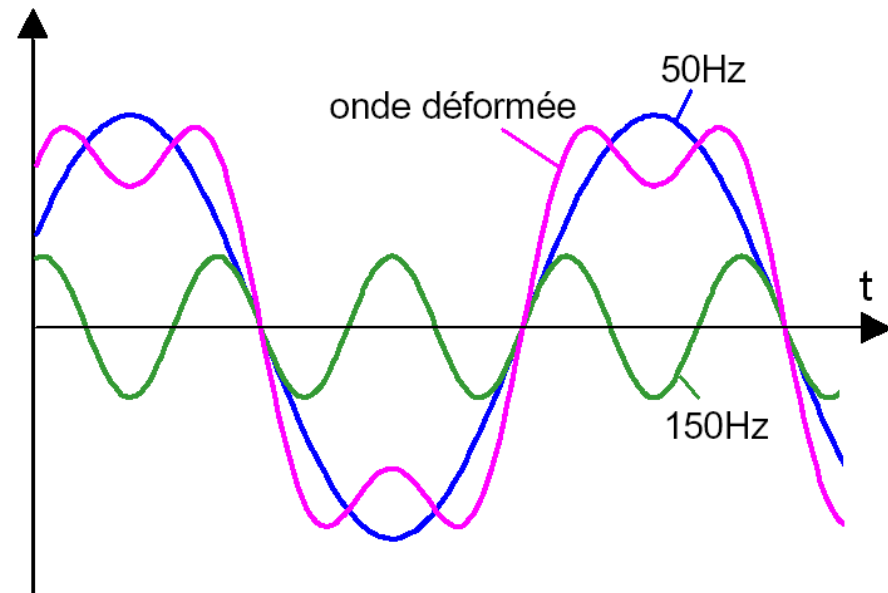
- les fours à arcs,
- les machines à souder,
- démarrages moteurs de forte puissance, ...)



**Les harmoniques** sont des signaux de fréquence multiple de la fréquence industrielle. Ils sont générés par des charges dites non-linéaires. Ils absorbent alors un courant non sinusoïdal qui se propage dans le réseau en déformant l'allure de la tension.

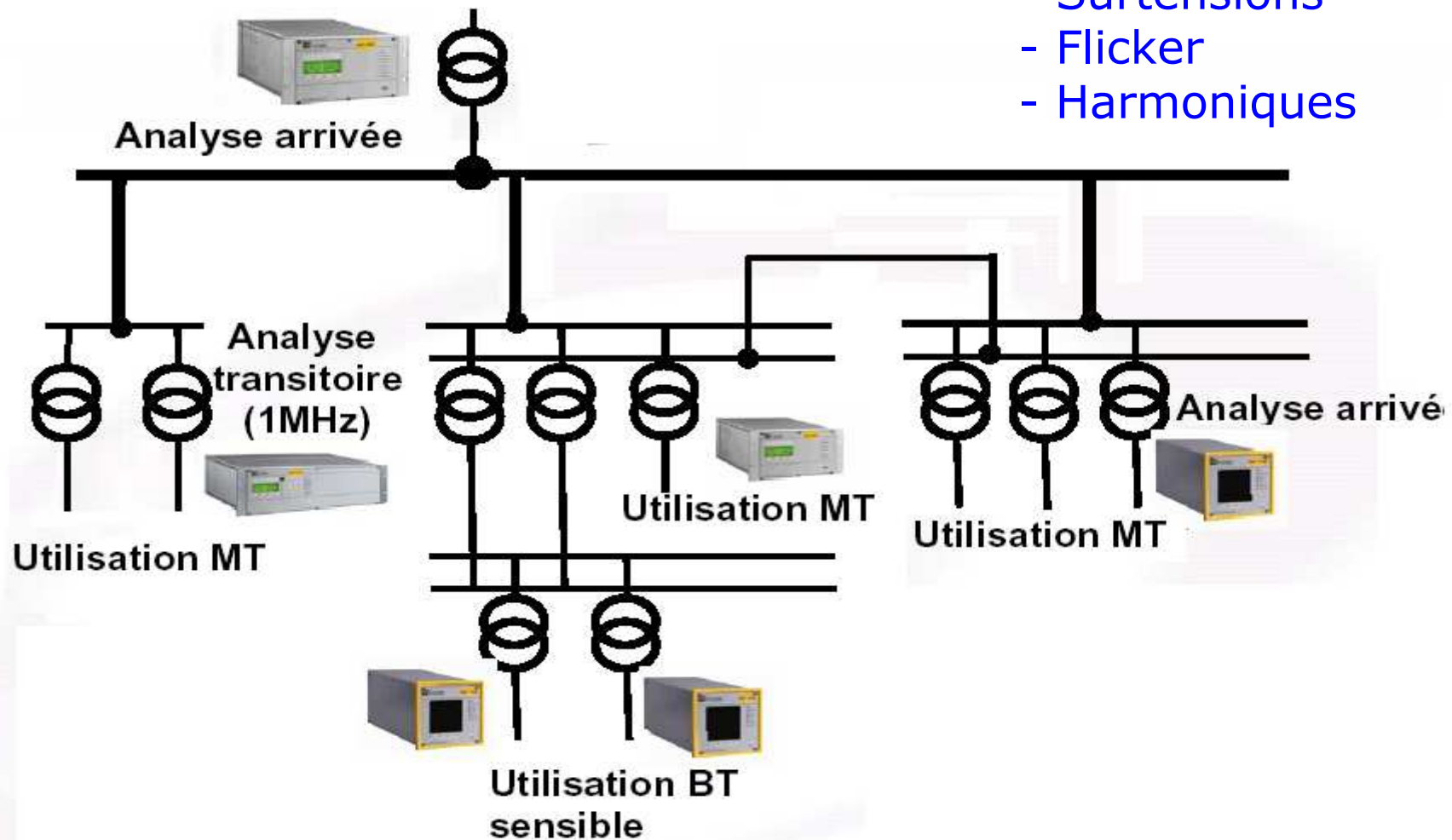
**Les interharmoniques** sont des signaux non multiple de la fréquence industrielle (50Hz). Les principaux générateurs sont:

- variateurs de vitesses (onduleurs) pour machines asynchrones,
- fours à arcs.

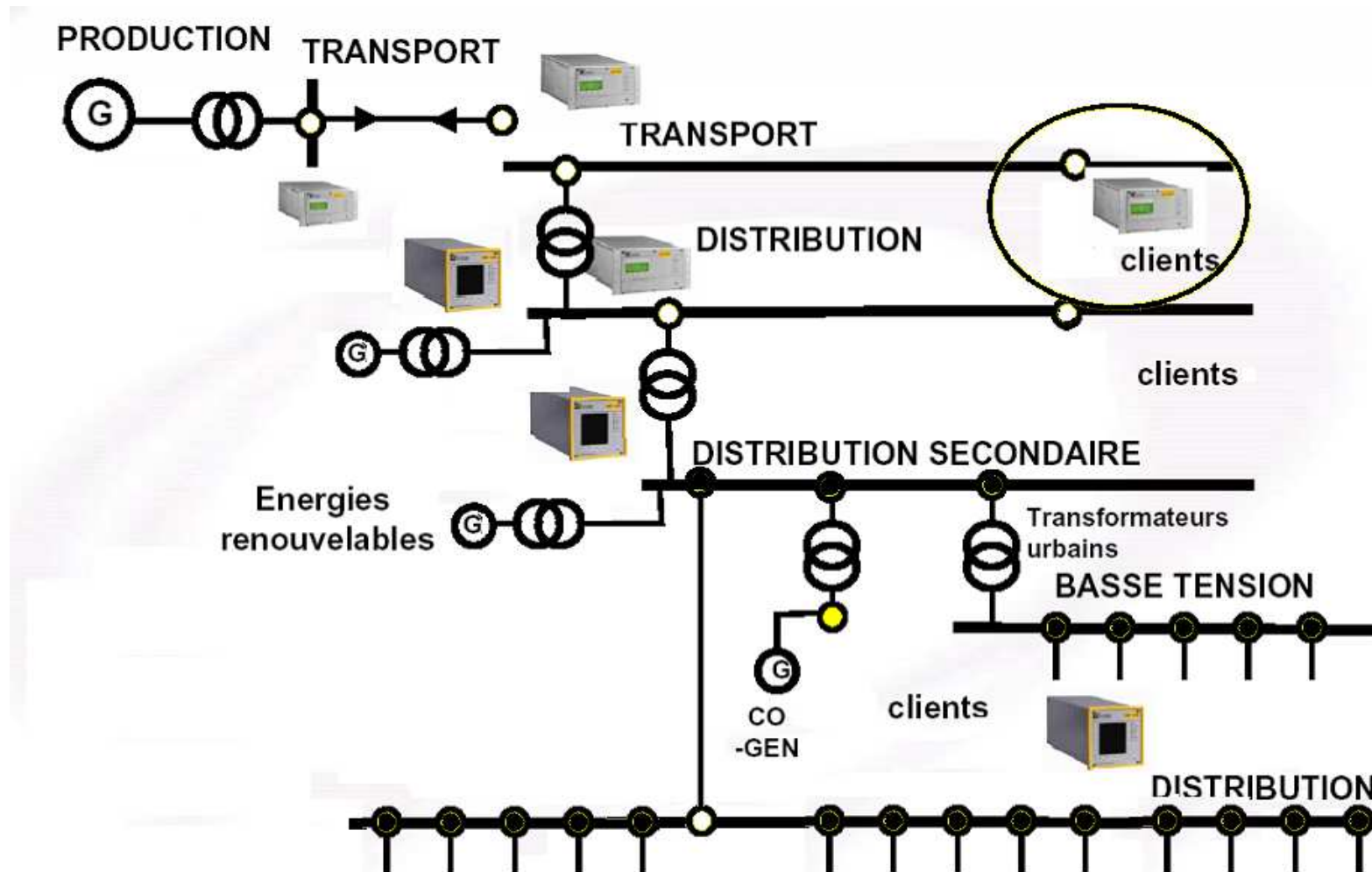


## - Analyse de la qualité d'énergie

- Creux de tension
- Microcoupures
- Surtensions
- Flicker
- Harmoniques



## - Analyse de la qualité d'énergie



## - Perturbations conduites

- *Perturbations permanentes*
  - Bruit de commutation des moteurs à collecteur
  - Courant de mode commun des convertisseurs statiques
- *Perturbations transitoires*
  - Coupure de bobines
  - Décharges électrostatiques

## - Perturbations Rayonnées

- *Perturbations entretenues*
  - Machines Industrielles Scientifiques ou Médicales (ISM)
  - Émetteurs hertziens
- *Perturbations transitoires*
  - Décharges ElectroStatiques
  - Manœuvres des équipements de Haute Tension



- Foudre
- Convertisseurs statiques
- Branch. / débranch. des éléments passifs (C,L)
- DES
- Émetteurs Hz
- Court circuit dans réseau
- Manœuvres sur le réseau (Ouverture et fermeture des lignes)
- ...

- Diaphonie inductive
- Diaphonie capacitive
- Câble à câble
- Champ à câble
- Champ à boucle
- Impédance commune

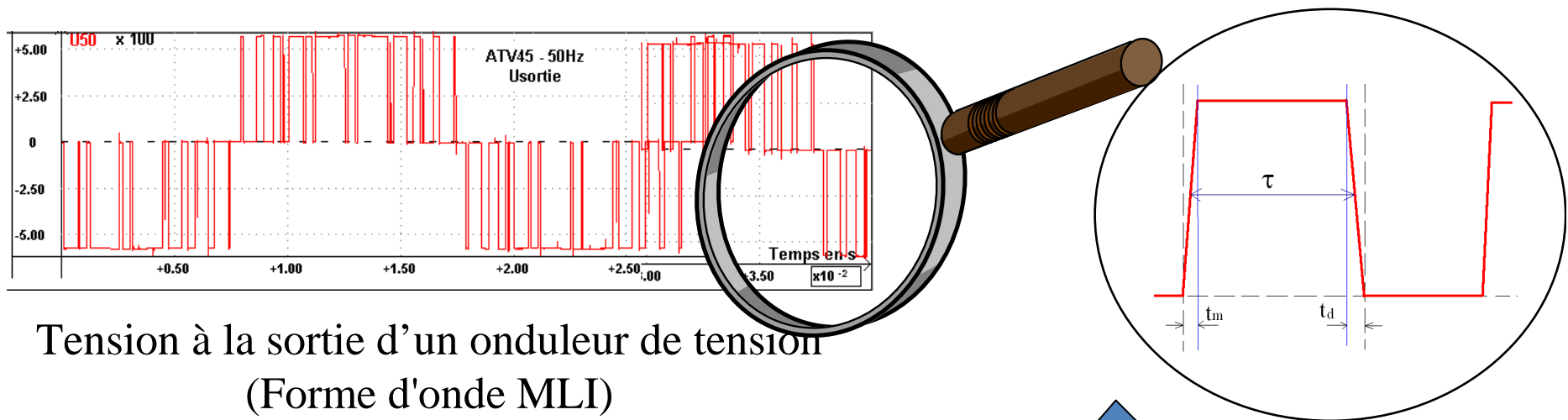
- Circuits analogiques
- Circuits Numériques
- Récepteurs Hertziens
- Antenne champ E
- Antenne champ H
- Etres vivants
- ..

On parle de PEM lorsque l'énergie transmise dépasse un niveau critique qui entraîne le dysfonctionnement d'un équipement.

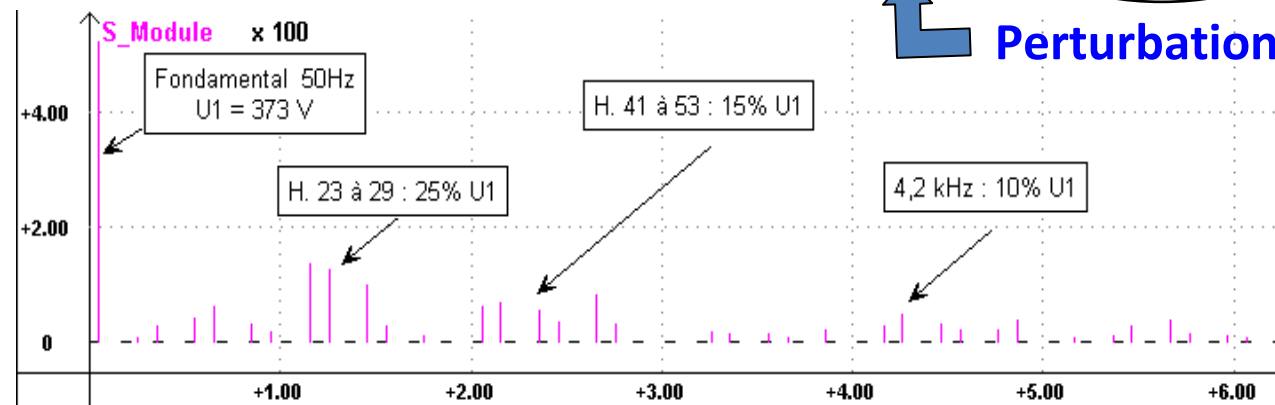


## - Sources des perturbations BF et HF des convertisseurs statiques

Les transistors IGBT du pont onduleur sont alors commandés pour fournir à la machine les ondes de tension MLI.

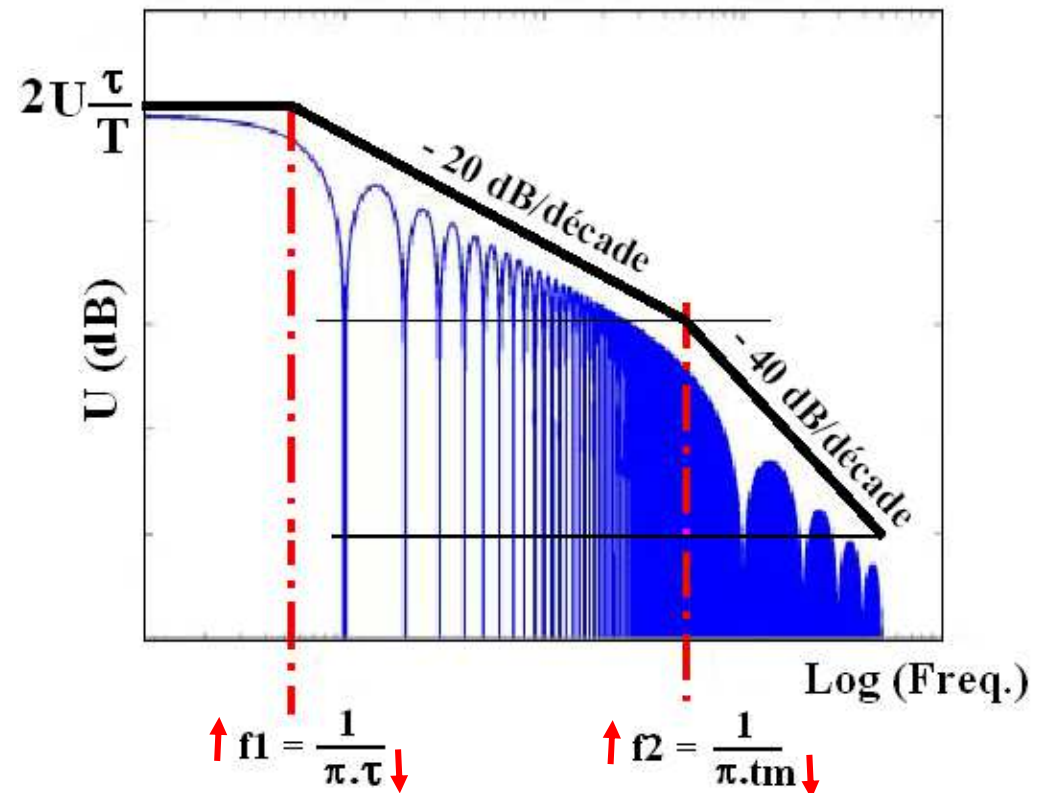
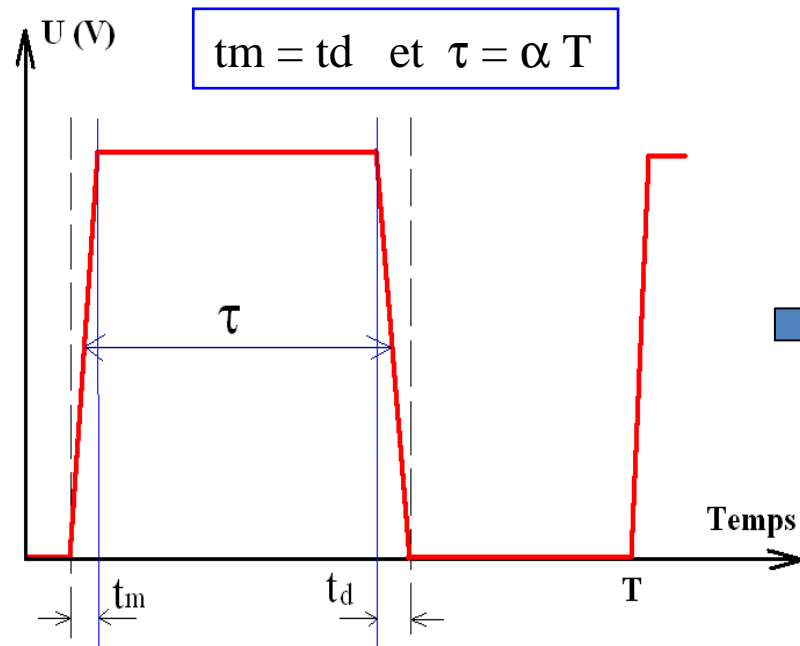


Perturbations BF



Perturbations HF

Analyse spectrale BF de la tension MLI



Les variations rapides du signal (**montée et descente**) sont les principales causes du contenu **haute fréquence** du spectre. Plus le spectre du signal s'étend vers les hautes fréquences, plus le **couplage devient efficace**.

Analyse spectrale HF de la tension MLI

$$U(f) = U \tau \left| \frac{\sin(\pi f \tau) \sin(\pi f t_m)}{(\pi f)^2 \tau t_m} \right| \dots\dots\dots(1)$$

## EVOLUTION DE L'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE

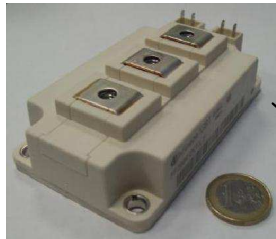


# Evolution de l'électronique de puissance

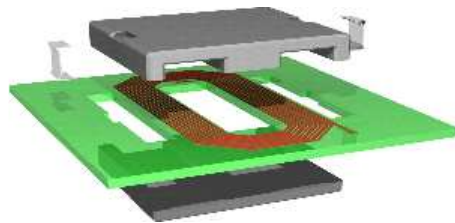
26

Composant

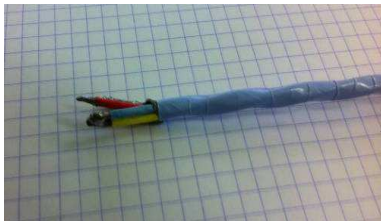
Système



Actifs



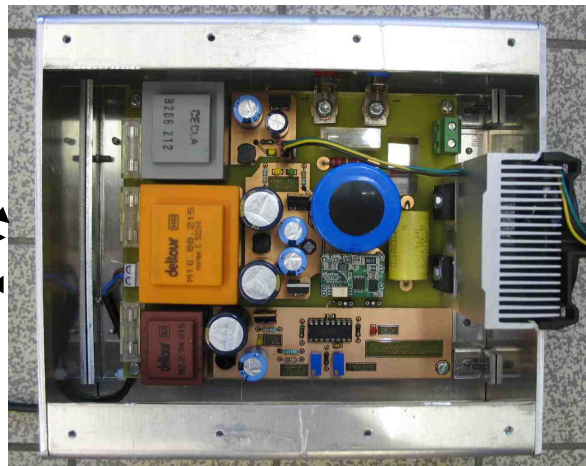
Passifs



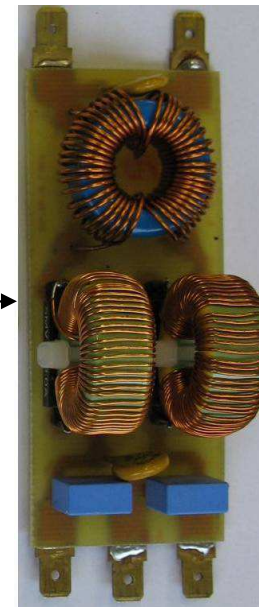
Câbles



Stockage



Convertisseur d'énergie



Filtrage BF et HF

## Comment améliorer les performances des convertisseurs statiques ?

### - Actions sur l'évolution des « composants »:

- composants semi-conducteurs rapides (Si, SiC, GaN)
- composants magnétiques HF (planar, bobinés)
- câbles d'énergie
- sources de perturbations électromagnétiques  
(convertisseur)

### - Actions sur les « structures » = association de composants :

- choix de la structure de conversion adaptée
- nouvelles stratégies de commande et contrôle
- optimisation de la structure de filtrage CEM
- utilisation de nouveaux matériaux magnétique



## Alimentation en énergie électrique moderne

### Production d'énergie



### Distribution d'énergie



### Consommation d'énergie



## Conversion d'énergie statique



[Source Infineon]

- **Objectif : augmentation de la densité de puissance des convertisseurs statiques**

- **Composants au Nitrure de Gallium (GaN)**

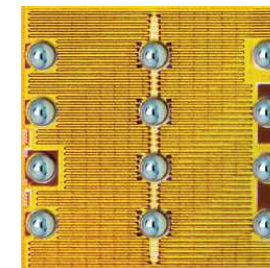
- *GaN Systems Technologie GS66516T*



Enrichissement, GaN-on-silicon, Island Technology,  
 $V_{ds}$ , 650 V,  $I_{ds} = 60$  A,  $R_{ds\ ON} = 25\ m\Omega$ ,  
 $V_{gs}$ , 0 à 6 V,  $V_{gs\ th} = 1.1$  V,  
Dimensions:  $9 \times 7.6\ mm^2$

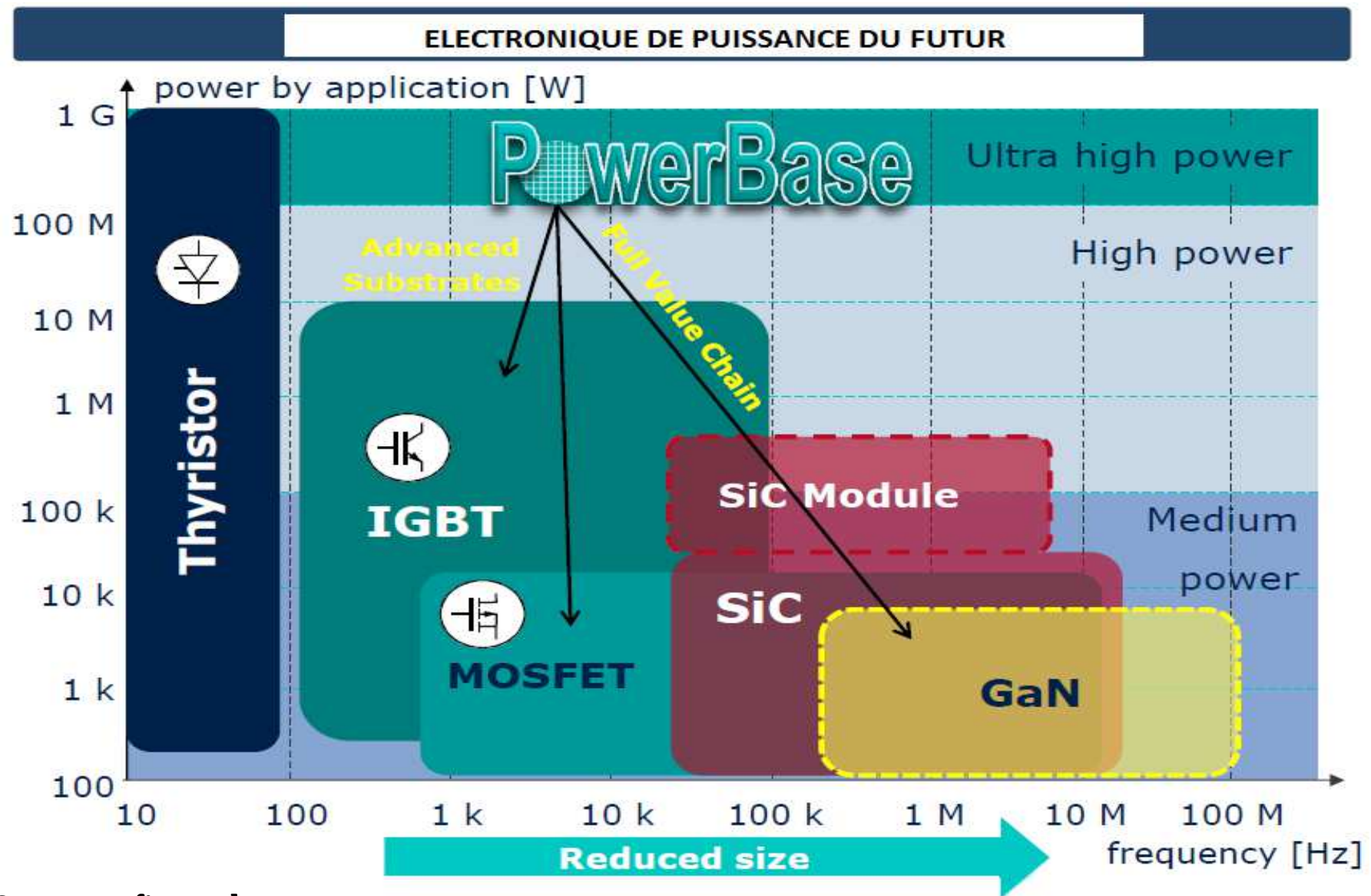


- *EPC Technologie GaN- EPC2025*

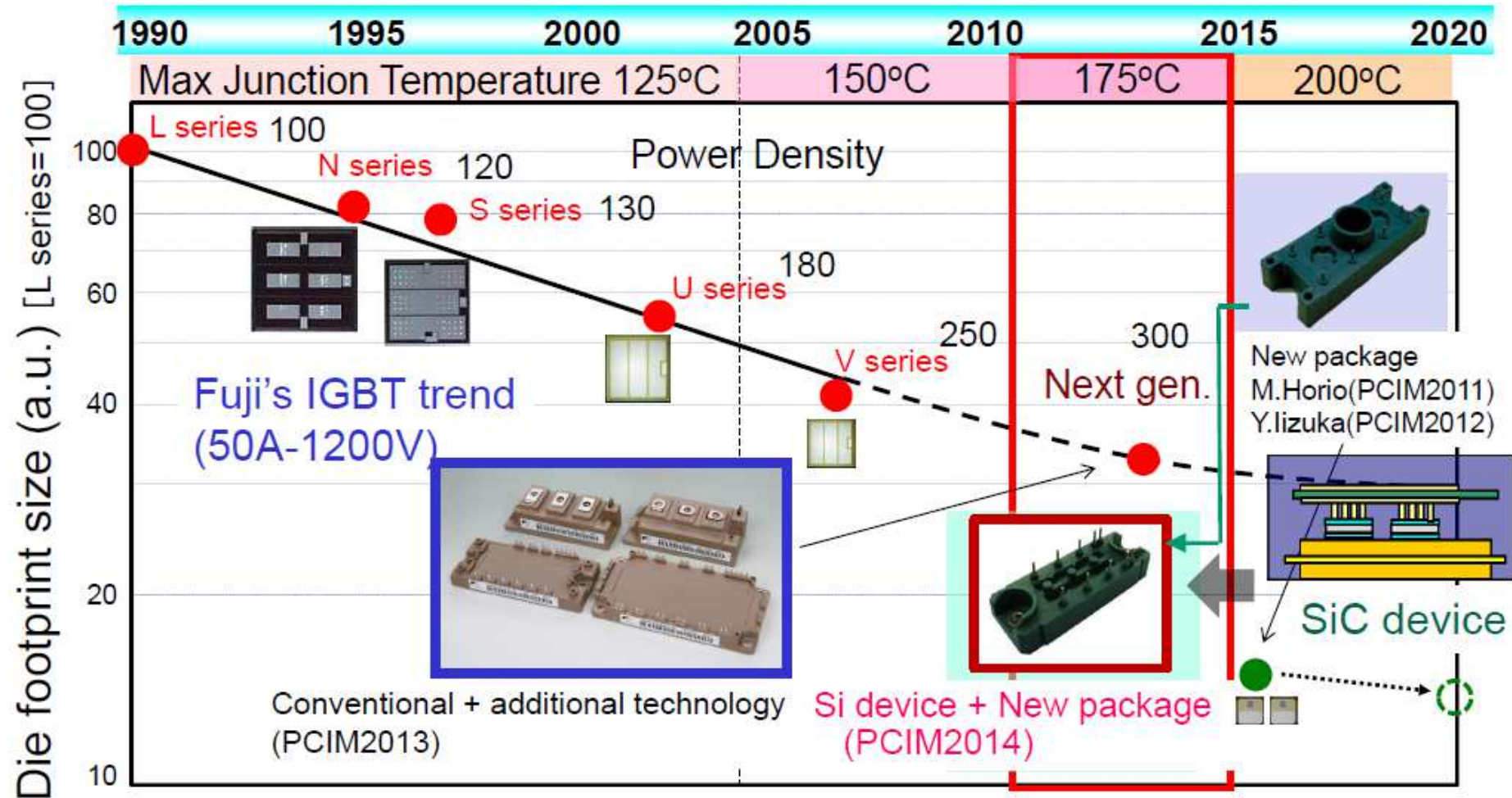


Enrichissement, GaN-on-silicon,  
 $V_{ds}$ , 300 V,  $I_{ds} = 6.3$  A,  $R_{ds\ ON} = 120\ m\Omega$ ,  
 $V_{gs}$ , -4 à 6 V,  $V_{gs\ th} = 1$  V,  
Dimensions:  $1.95 \times 1.95\ mm^2$

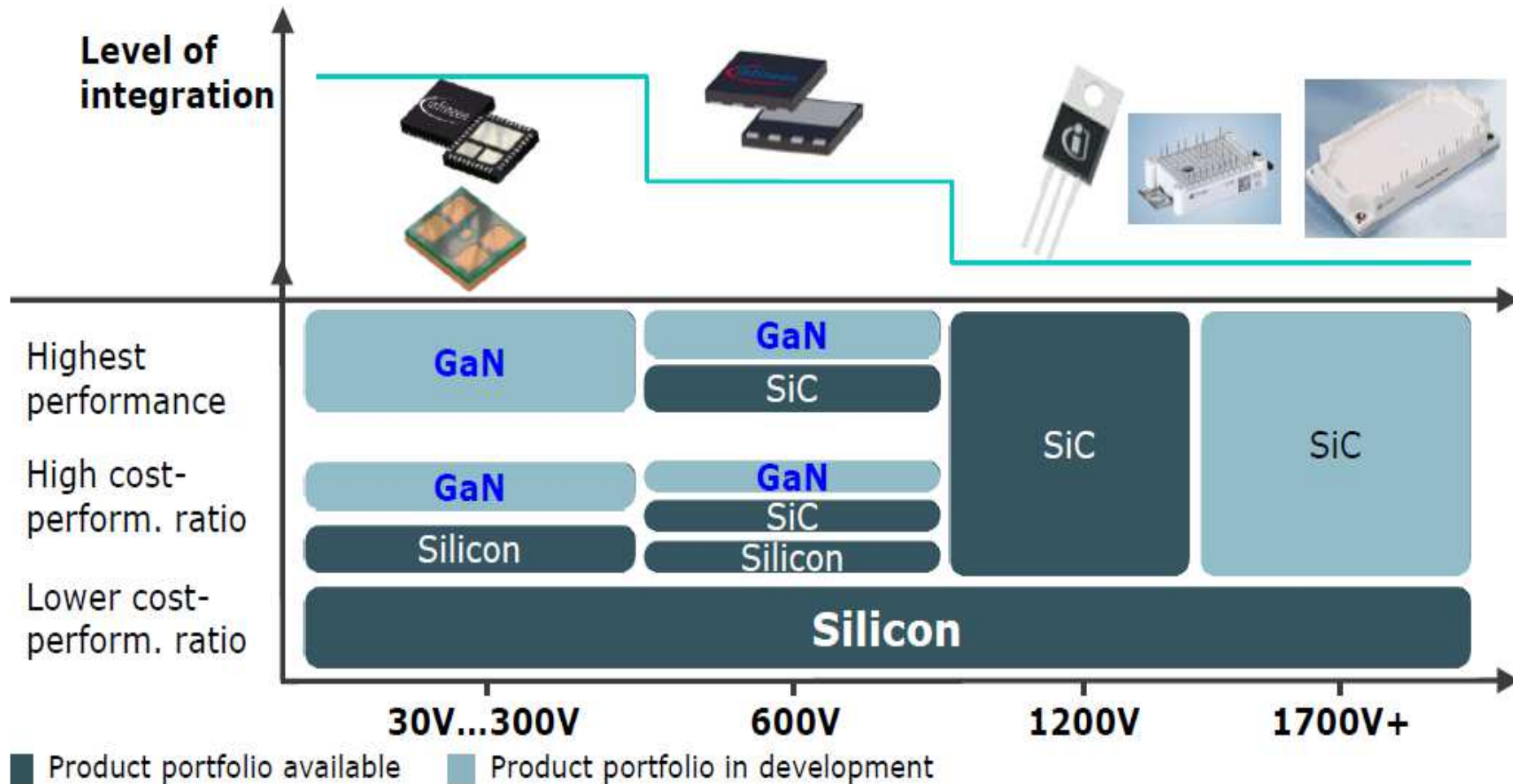




[Source Infineon]



[Source Fuji Electric]



[Source Infineon]



## All-SiC Example - 20kW 3-Phase PV Inverter



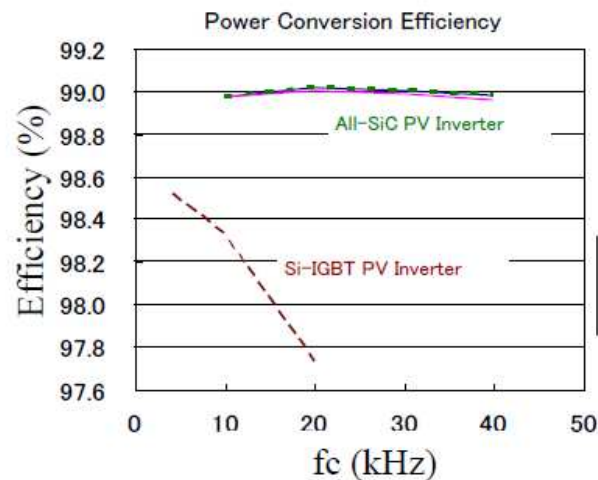
1200V-100A All-SiC Module  
Installed



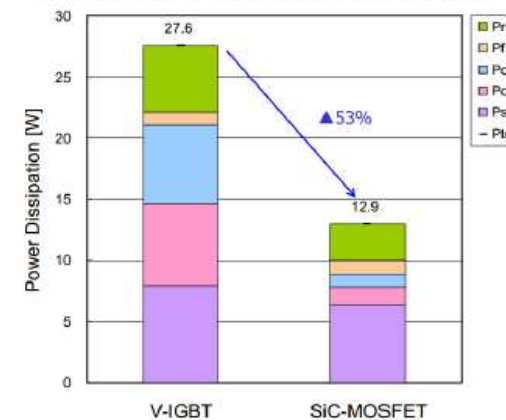
1/4 Inverter Size  
1/8 Power Stack Size



1/2 Device Loss  
Compared to Si IGBT



$V_{dc}=600V$ ,  $I_a=12A_{rms}$ ,  $f_a=50Hz$ ,  $f_c=8kHz$ ,  $cos\phi=0.9$ ,  $k=1.0$ , 3arm mod.

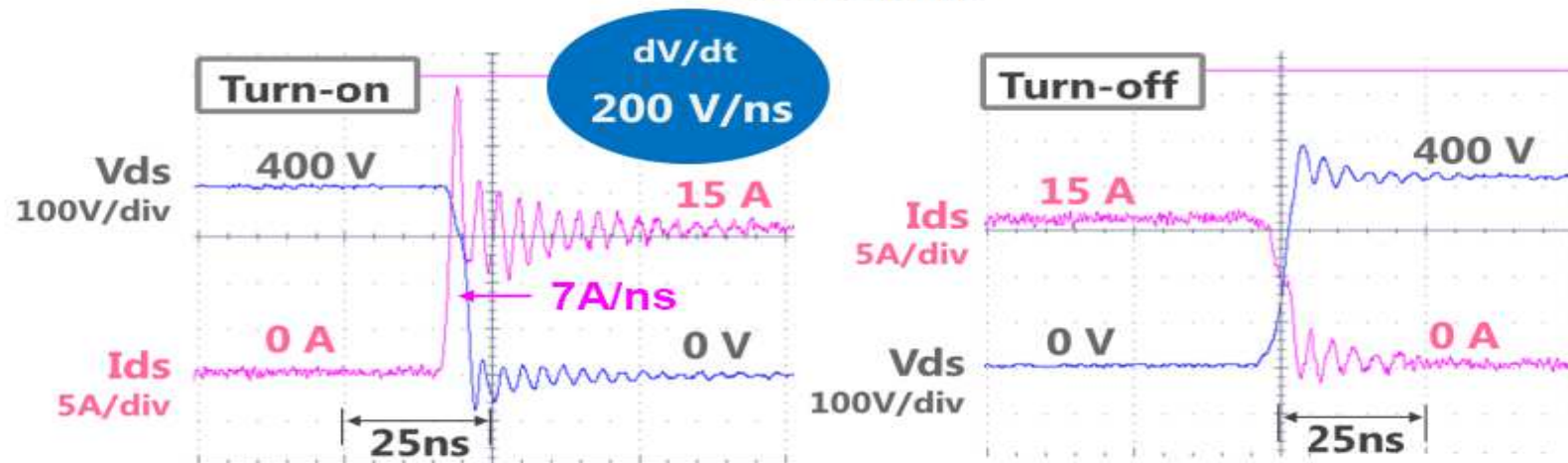
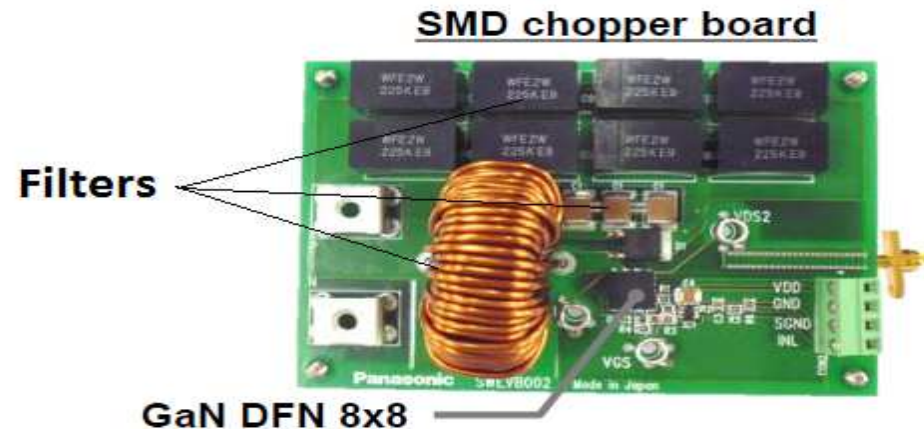
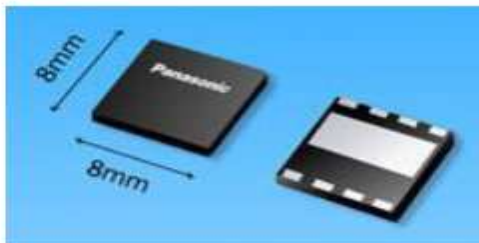


- 99% efficiency even at high carrier frequency
- 1/8 power stack size and 1/2 device loss

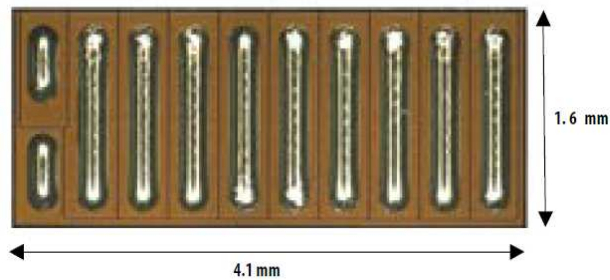
[Source Fuji Electric]

- SMD package with **reduced parasitic inductances** enables very fast switching with  $dV/dt$  of **200V/ns**,  $di/dt$  of **7A/ns**

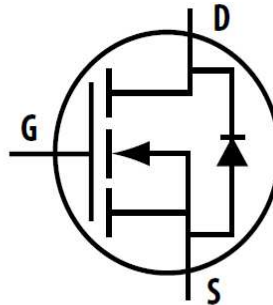
Photo of SMD package



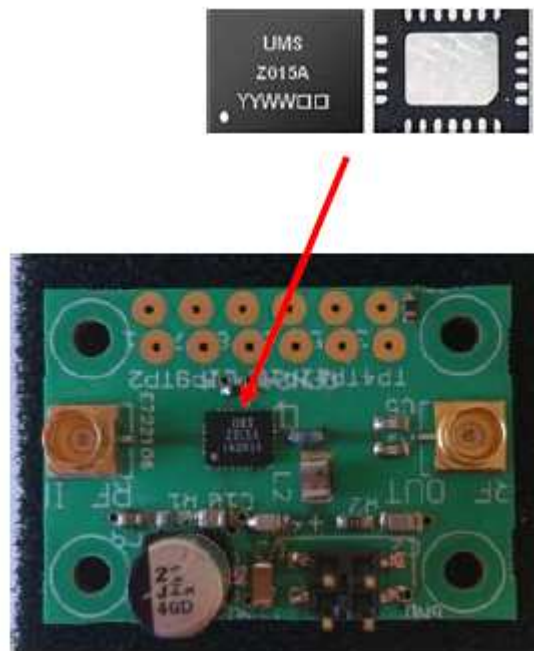
[Source Panasonic]



Top view of a completed eGaN FET.  
This device is rated at 40 V, 4 mΩ, and 33 Amperes.



## - Intégration en technologie SIP

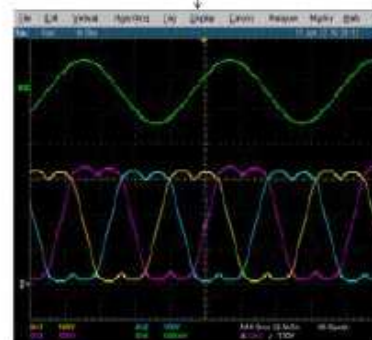
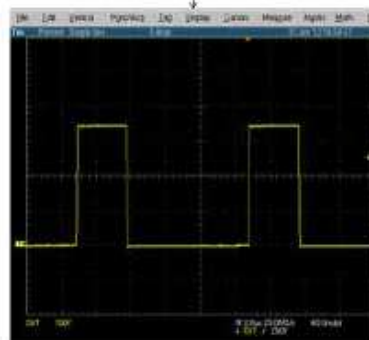
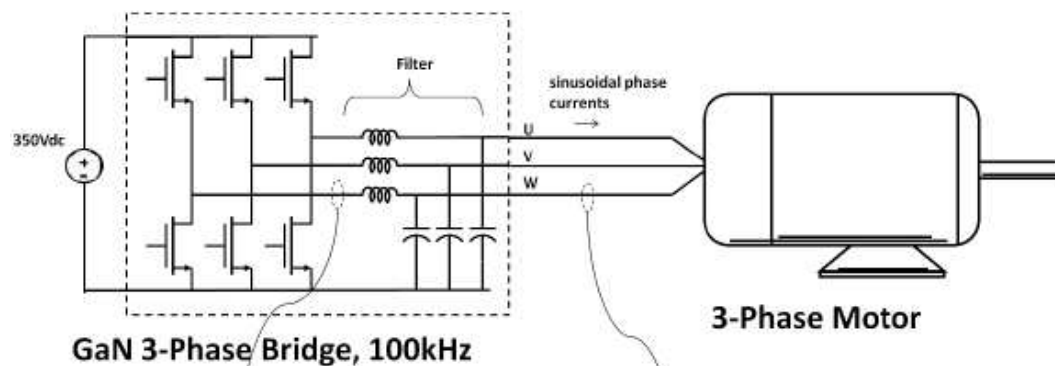


## - Intégration en technologie SOC





## - Avantages de les composants GaN-SiC pour la variation de vitesse



System size reduction and smaller (cheaper) passive components (Copper) while delivering high efficiency

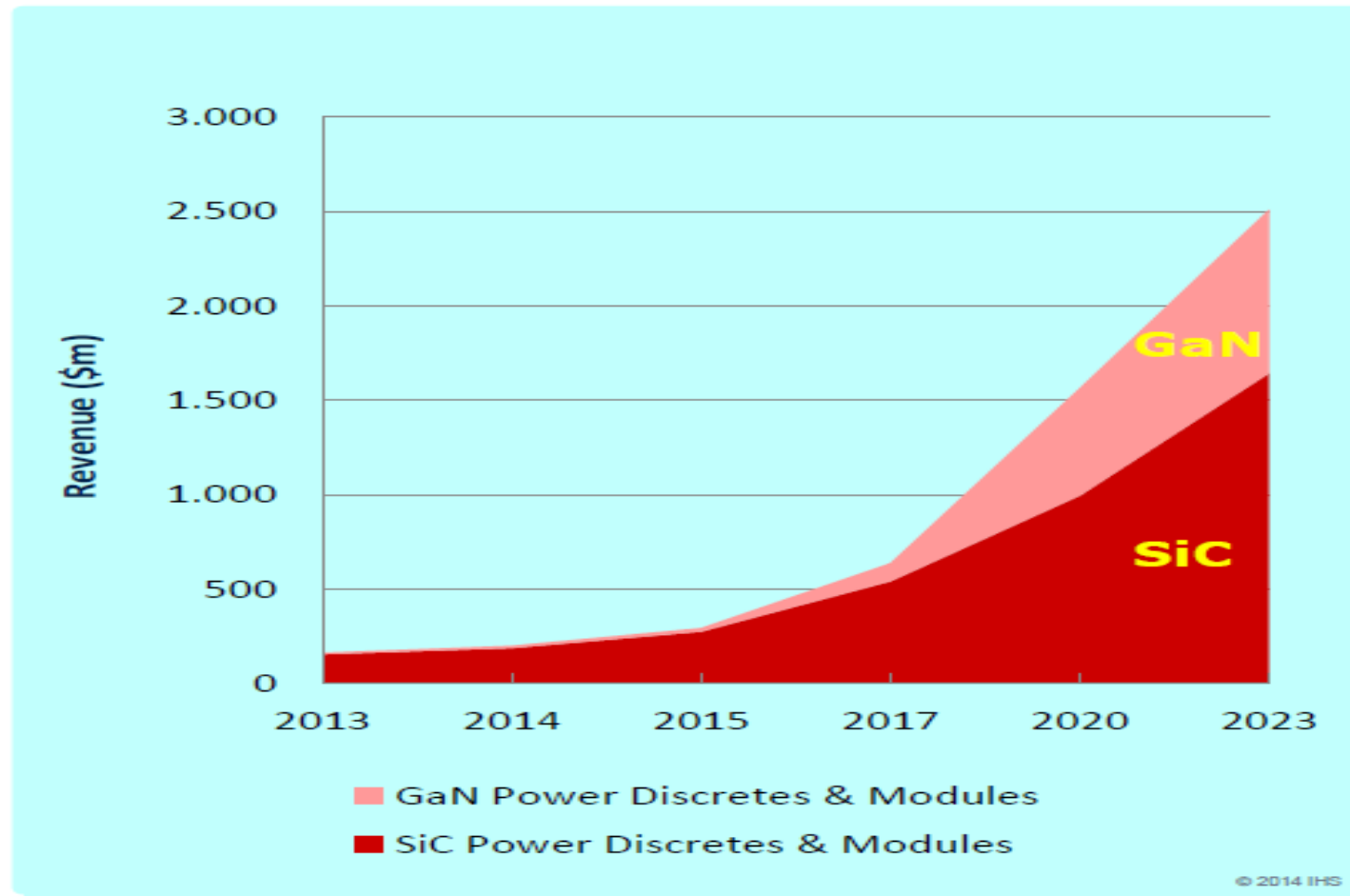
### Benefits:

- High frequency enables small output filters
- Pure sine output
- Less insulation stress and EMI due to transients.
- Less loss in the inverter due to external capacitance.
- Less motor loss due to distortion.

[Source Transphorm]



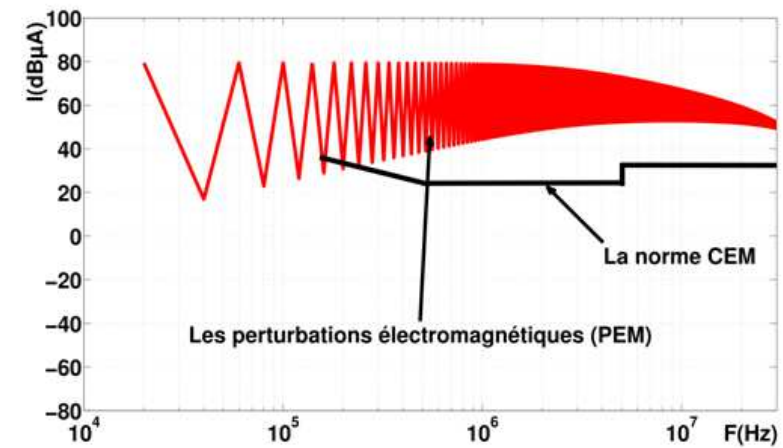
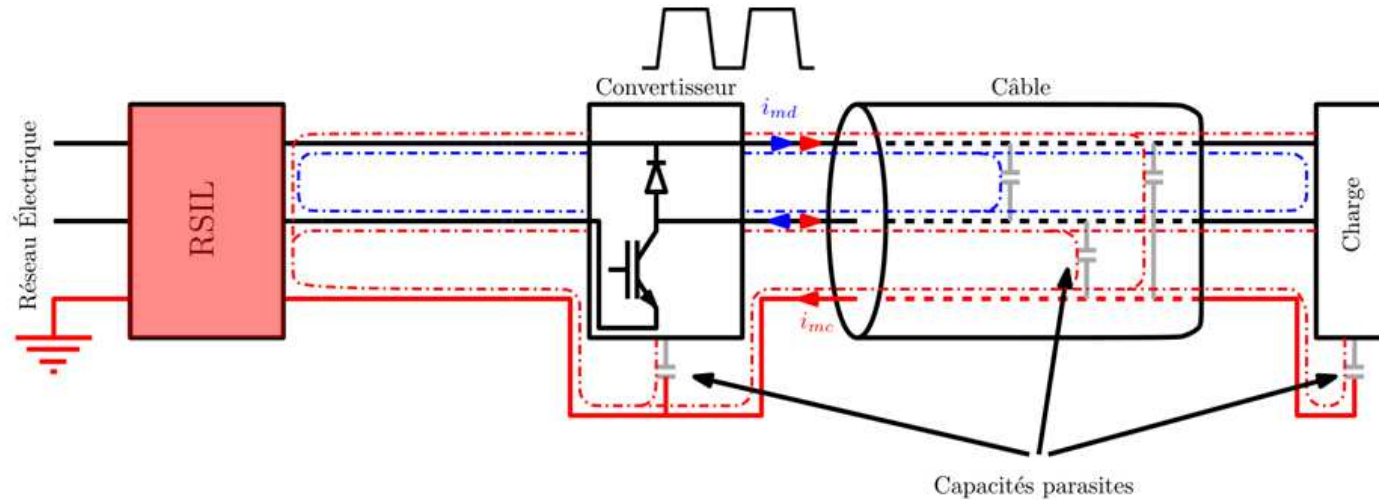
## FUTUR MARCHÉ DES GaN /SiC



Les convertisseurs intégrés sont des sources de perturbations  
Large bande de fréquence qu'il faut réduire

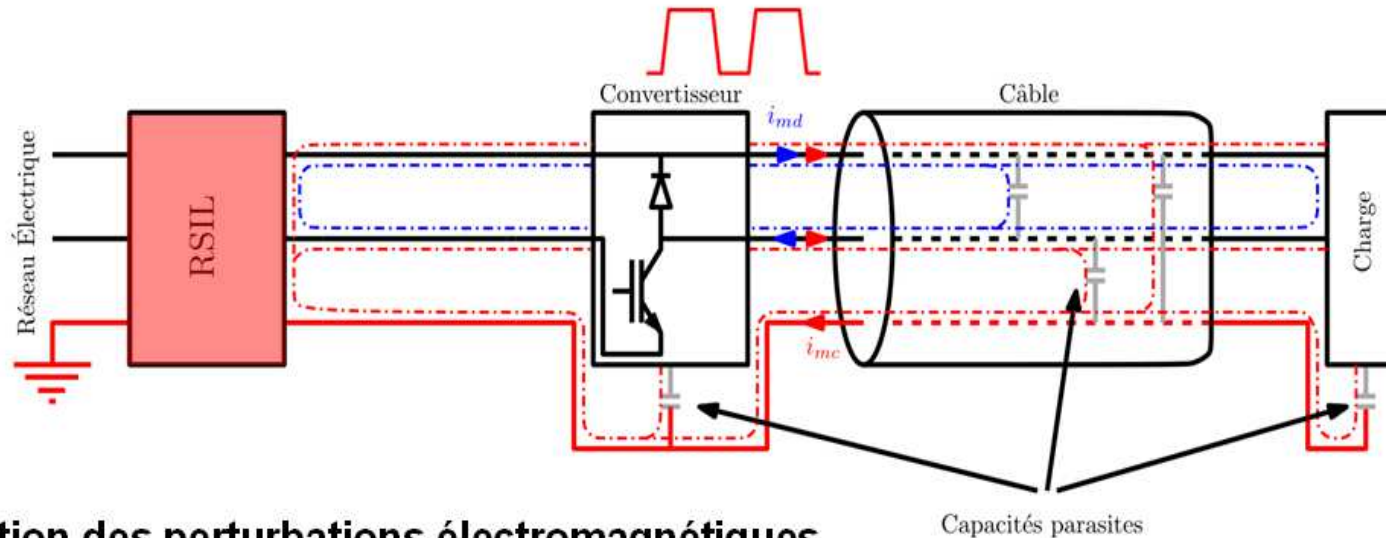
## **METHODE DE REDUCTION DES PERTURBATIONS CONDUITES DES CONVERTISSEURS D'ENERGIE**

- ❑ Les perturbations électromagnétiques (PEM) conduites dans le une chaîne de conversion



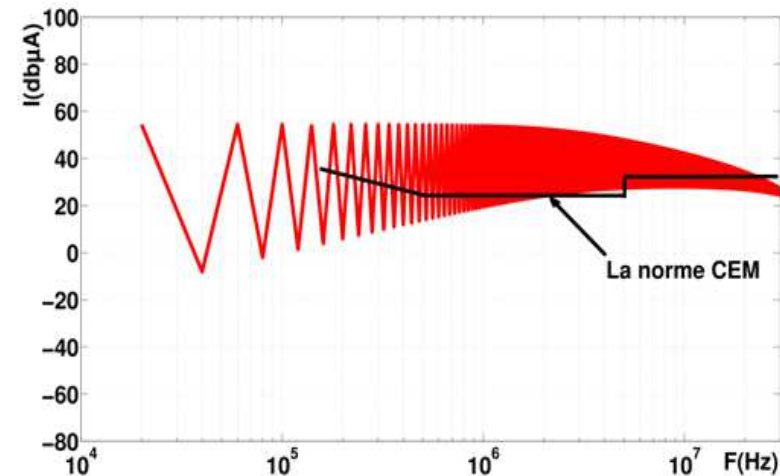
Ne respecte pas la norme

- ❑ Les perturbations électromagnétiques (PEM) conduites dans le une chaîne de conversion

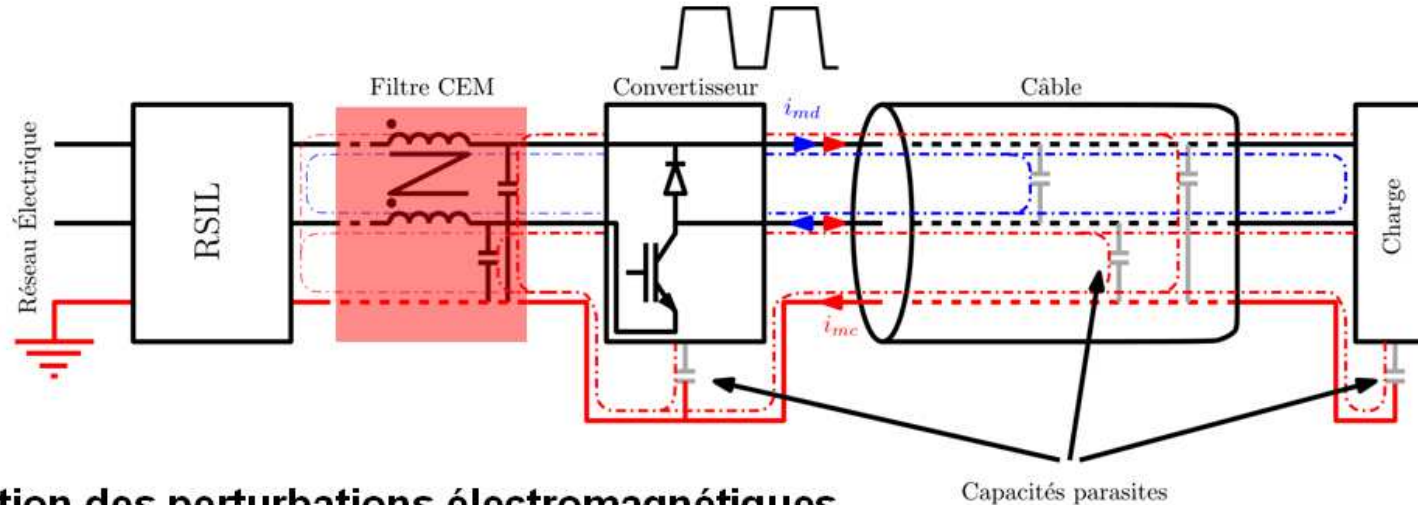


- ❑ Réduction des perturbations électromagnétiques

- Action sur la commande du convertisseur

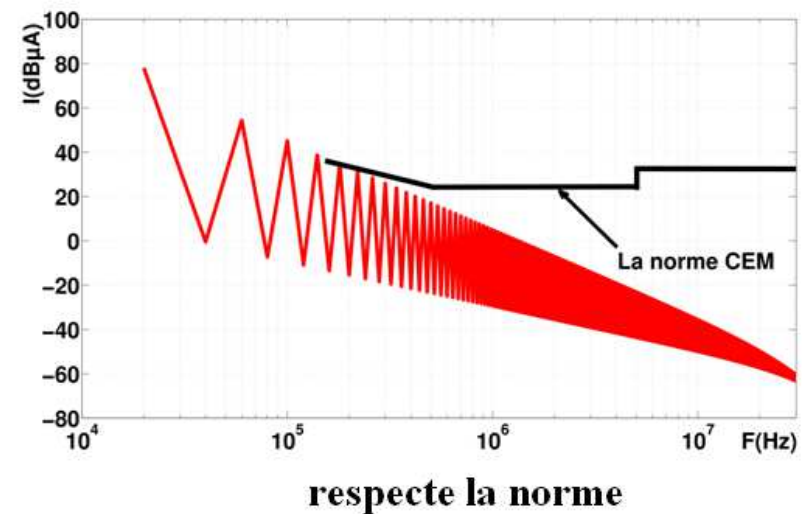


## □ Les perturbations électromagnétiques (PEM) conduites dans le une chaîne de conversion

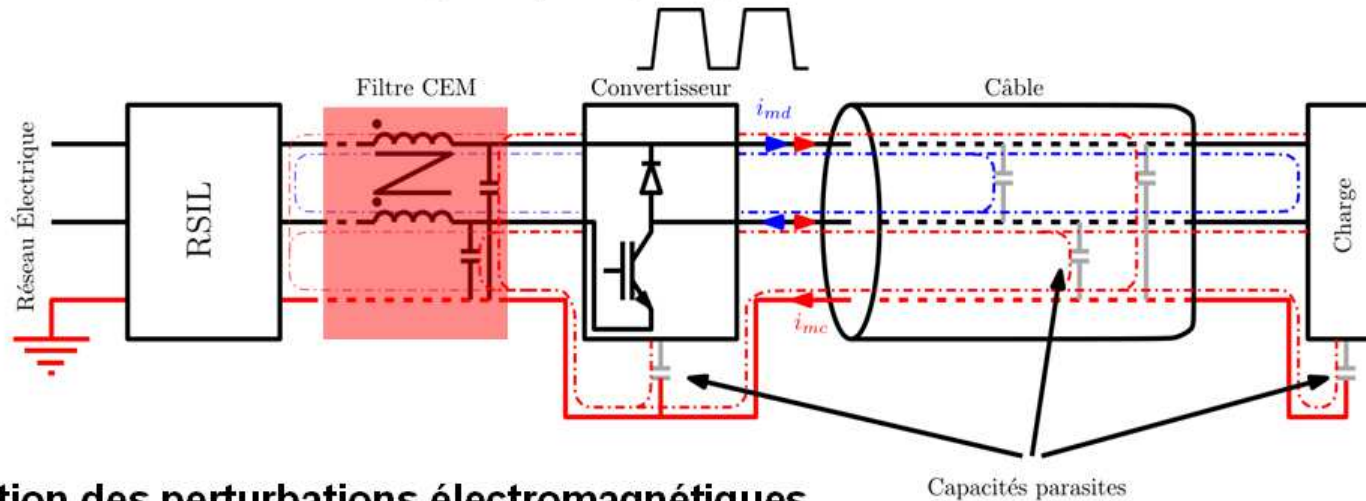


## □ Réduction des perturbations électromagnétiques

- Action sur la commande du convertisseur
- Installer des élément passifs de filtrage CEM (des bobines et des condensateurs)



- ❑ Les perturbations électromagnétiques (PEM) conduites dans le une chaîne de conversion



- ❑ Réduction des perturbations électromagnétiques

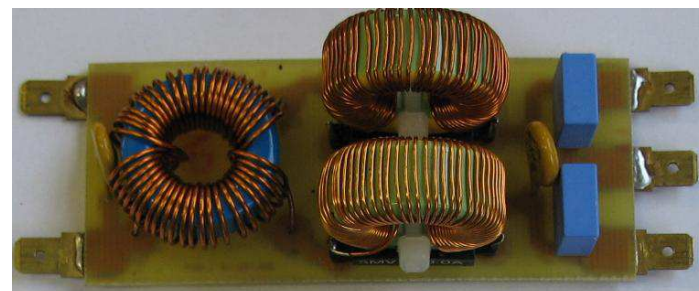
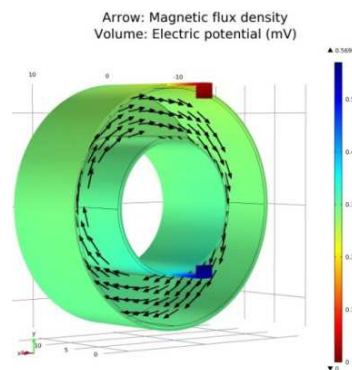
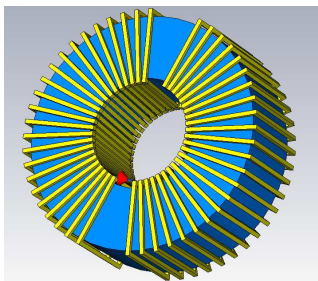
- Action sur la commande du convertisseur
- Installer des élément passifs de filtrage CEM (des bobines et des condensateurs)



Variateur de vitesse triphasé



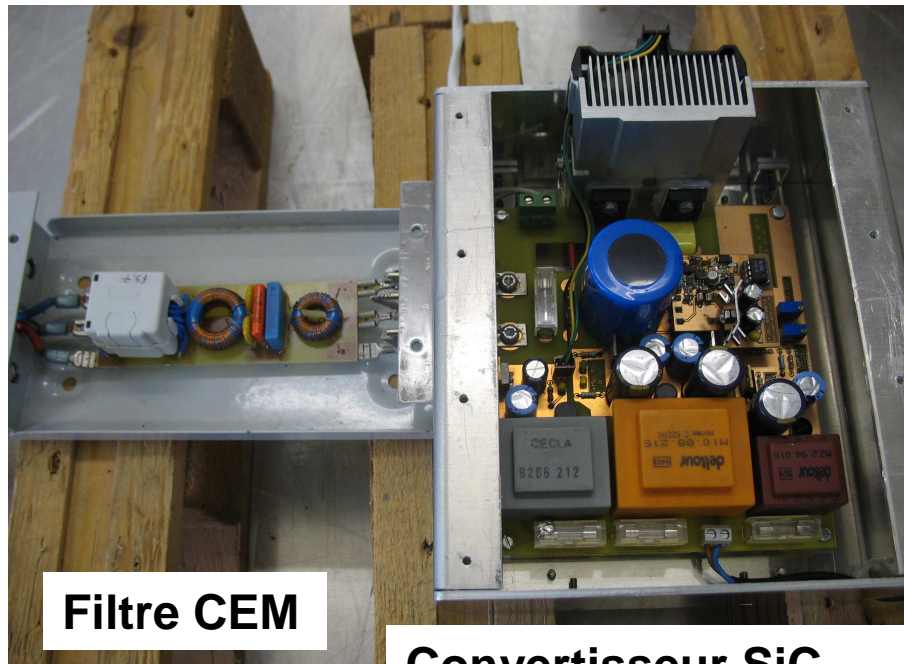
## Méthode de dimensionnement des filtres CEM des convertisseurs à base de composants SiC





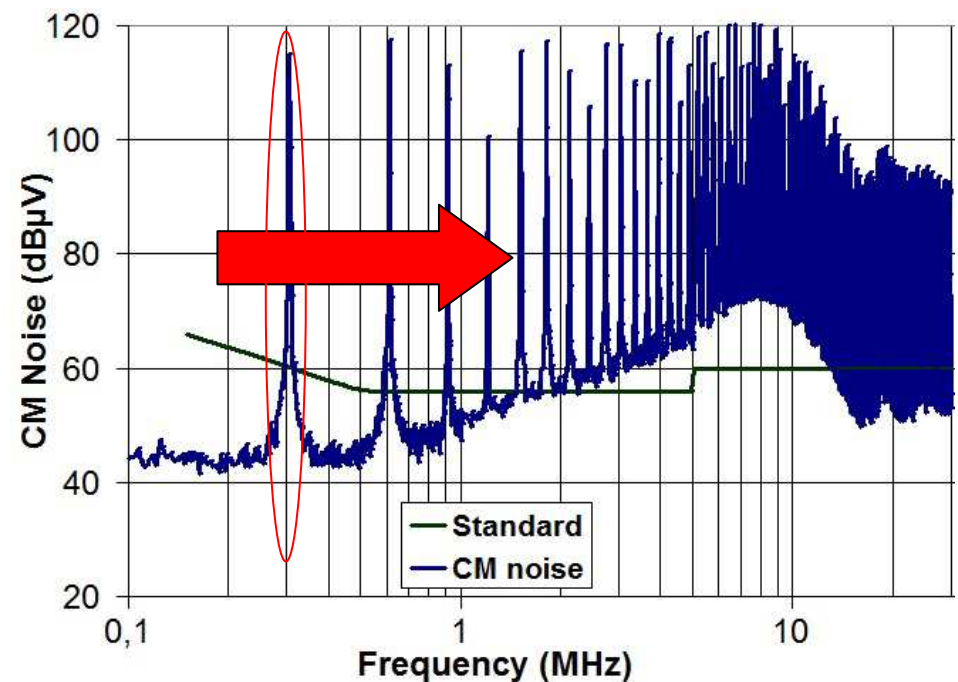
## CEM et les défis du futur. Pourquoi la CEM ?

- Généralisation de l'utilisation des composants à grand gap (GaN et SiC)
- Augmentation des fréquences de commutation des convertisseurs d'énergie
- Intégration des convertisseurs statiques



Filtre CEM

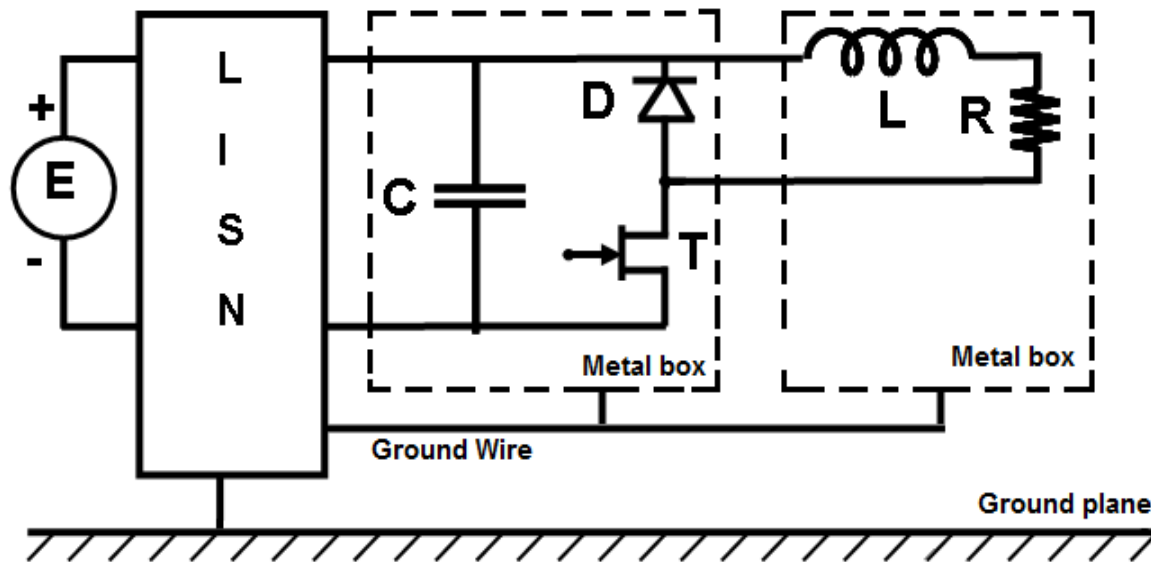
Convertisseur SiC



Perturbations conduites

**Convertisseur doit respecter les normes CEM**

## - Caractéristiques du dispositif expérimental



$E = 400V$

$C = 470\mu F$

$L = 730\mu H$

$R = 60\Omega$

$\alpha = 0.5$

$f_s = 300kHz$

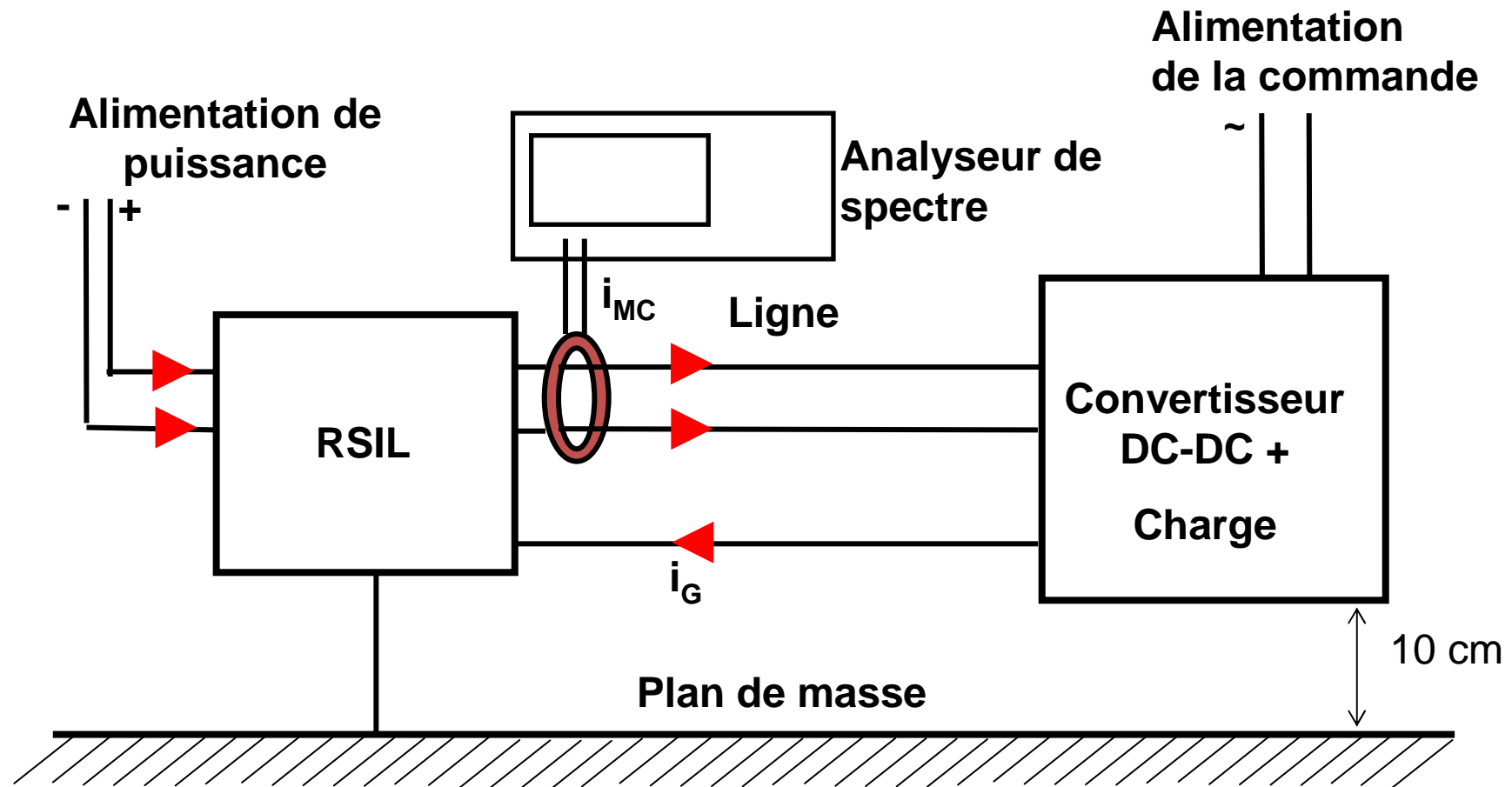
$T = \text{JFET-SiC (30A-1200V)}$

$D = \text{DIODE-SiC (20A-600V)}$

## - Temps de commutation du transistor

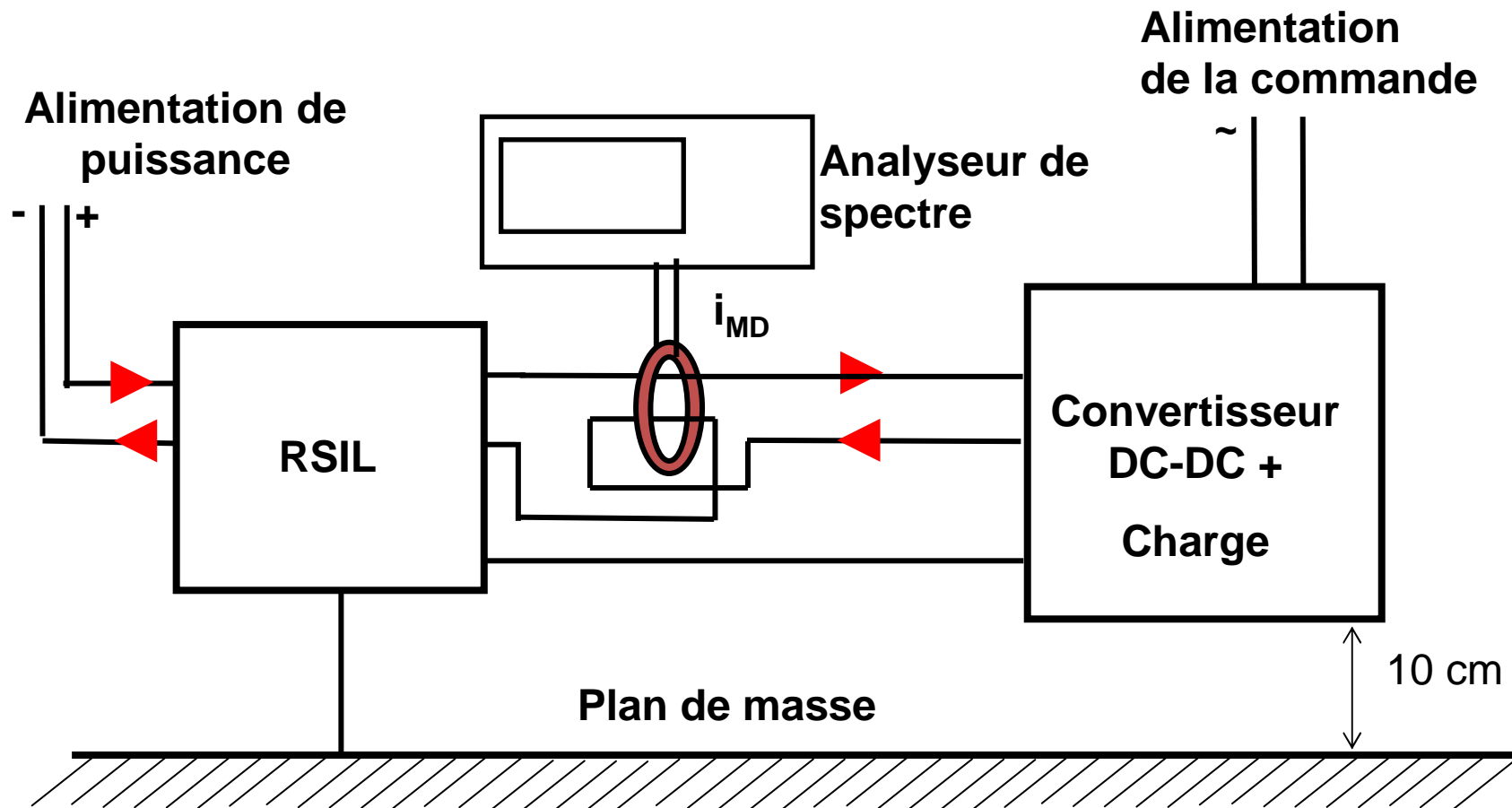
Temps de montée et de descente à la fermeture		Temps de montée et de descente à l'ouverture	
Courant	Tension	Tension	Courant
$T_m = 9,3ns$	$T_d = 18,4ns$	$T_m = 39,9ns$	$T_d = 55,1ns$

## - Mesure de perturbations de Mode commun (MC)



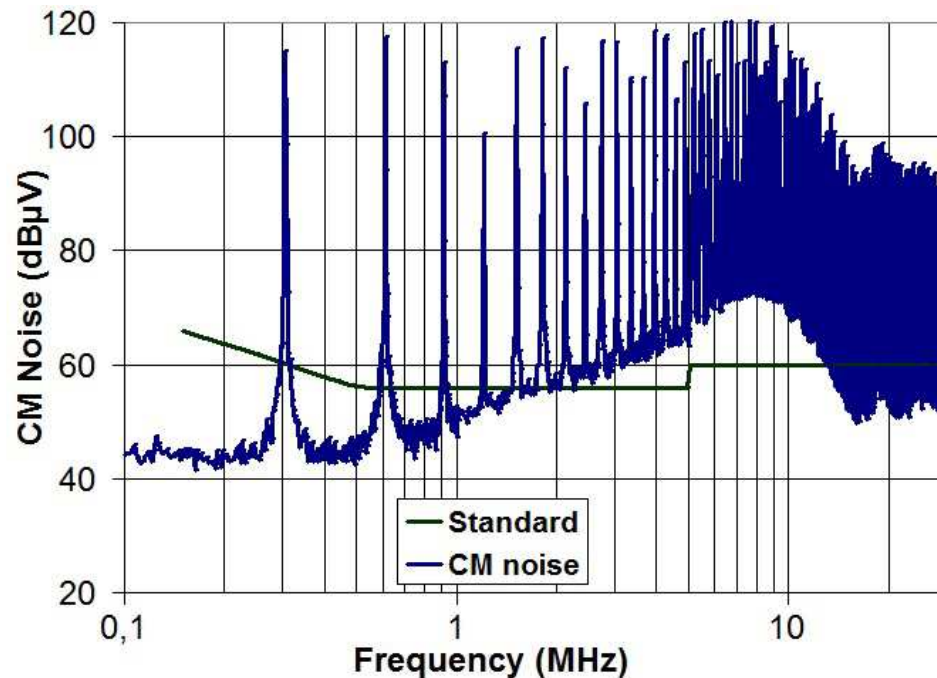
**Mesure du courant de mode commun  $I_{CM}$**

## - Mesure de perturbations de Mode Différentiel (MD)

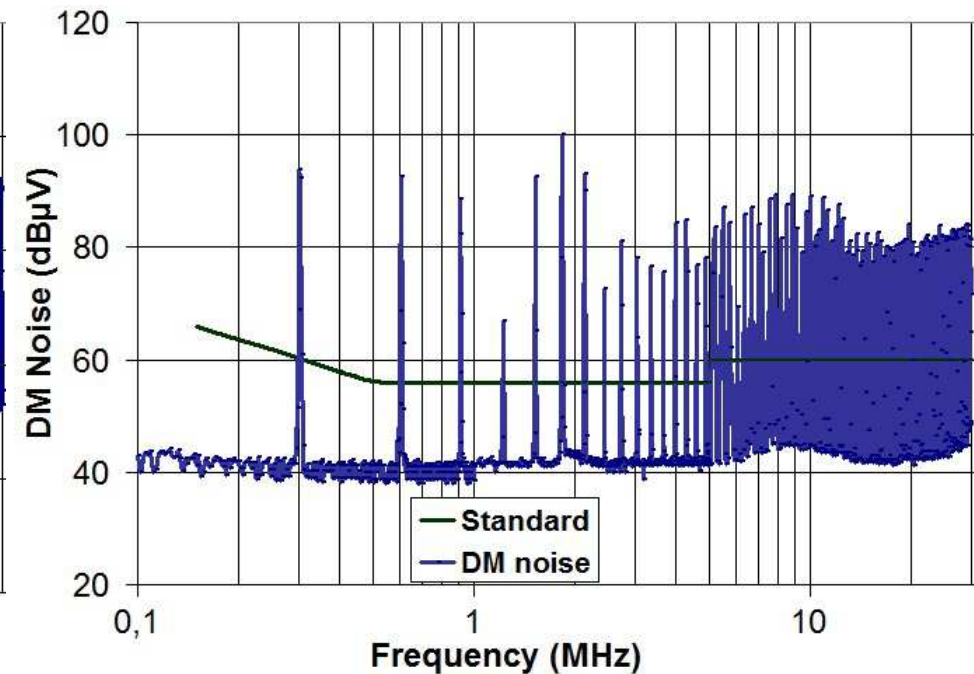


**Mesure du courant de mode différentiel  $I_{MD}$**

## - Perturbations de MC et MD du convertisseur



Perturbations de MC sans filtre

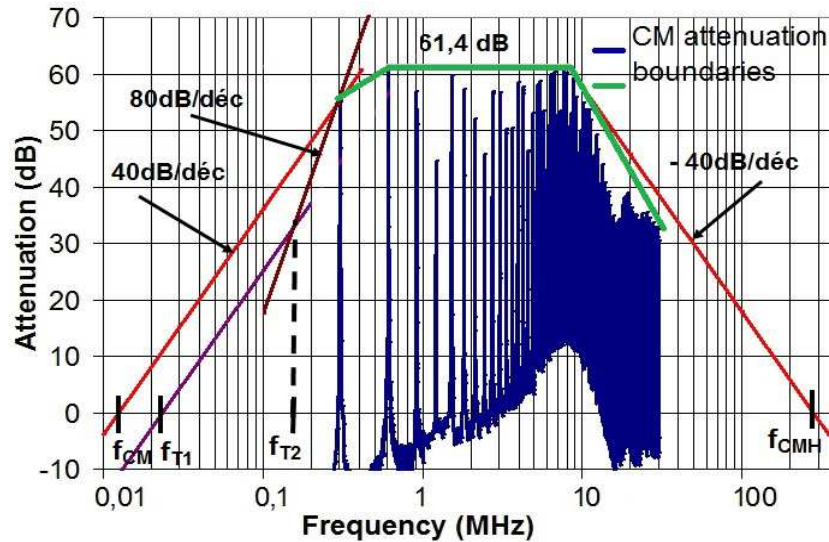


Perturbations de MD sans filtre

\_\_\_ Norme CEM: EN55022 classe B

**Atténuation du filtre (A) = Niveau de bruit (MC ou MD) – Limite de la norme**

## - Atténuation du filtre de MC



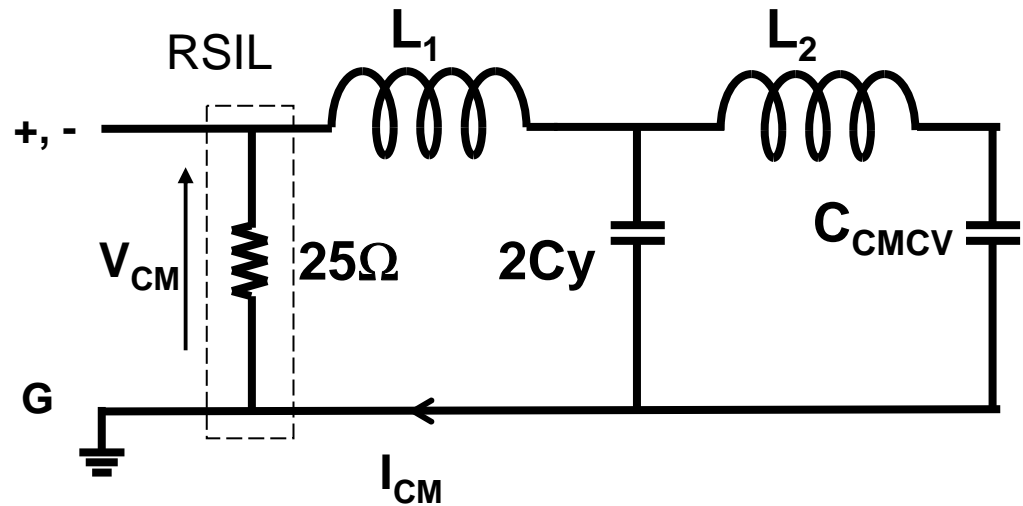
## - Calcul des selfs: " $L_1$ and $L_2$ "

- Fréquence de coupure:  $f_{T1} = 23.5 \text{ kHz}$
- Valeur choisie :  $C_Y = 4,7 \text{ nF}$

$$L_1 = \left( \frac{1}{2\pi \cdot f_{T1}} \right)^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot C_Y}$$

$$L_1 = 4,9 \text{ mH}$$

## - Circuit équivalent du filtre de MC



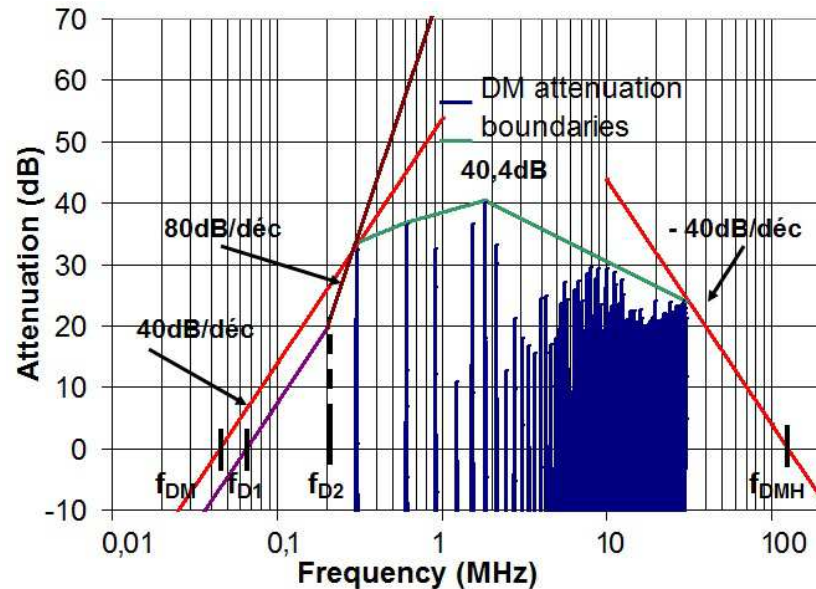
- Fréquence de coupure:  $f_{T2} = 155 \text{ kHz}$
- Valeur mesurée:  $C_{CMCV} = 398 \text{ pF}$

$$L_2 = \left( \frac{1}{2\pi \cdot f_{T2}} \right)^2 \cdot \frac{1}{C_{CMCV}}$$

$$L_2 = 2,65 \text{ mH}$$



## - Atténuation du filtre de MD



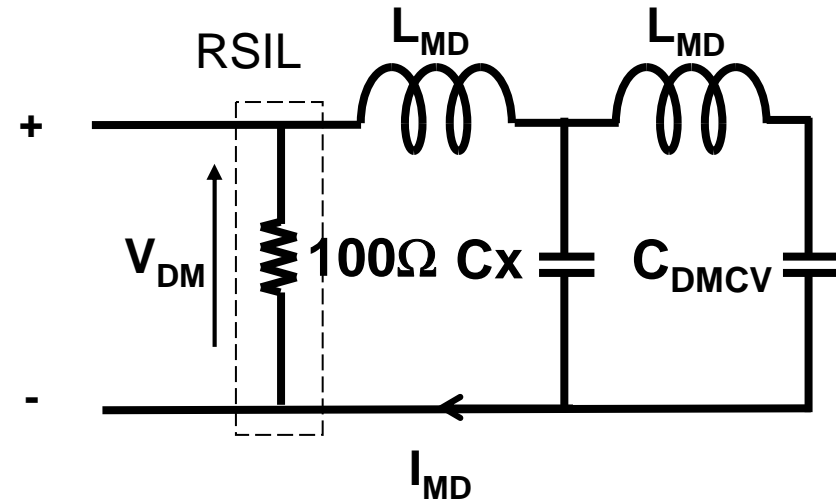
## - Calcul des selfs : " $L_{DM1}$ and $L_{DM2}$ "

- Fréquence de coupure:  $f_{D1} = 65 \text{ kHz}$
- Valeur choisie:  $C_X = 440 \text{ nF}$

$$L_{MD} = \left( \frac{1}{2\pi \cdot f_{DM}} \right)^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot C_X}$$

$$L_{DM1} = 14 \mu\text{H}$$

## - Circuit équivalent du filtre de MD



- Fréquence de coupure:  $f_{D2} = 200 \text{ kHz}$
- Valeur choisie:  $C_{DM} = 100 \text{ nF}$

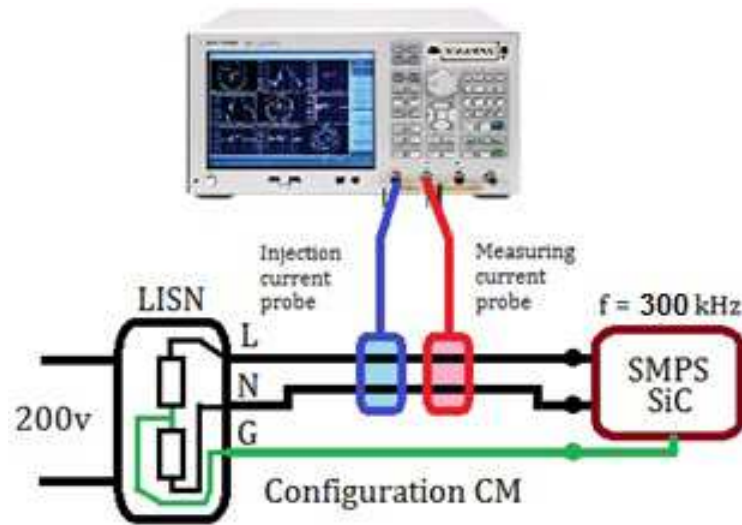
$$L_{MD} = \left( \frac{1}{2\pi \cdot f_{DM}} \right)^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot C_X}$$

$$L_{DM2} = 6.5 \mu\text{H}$$

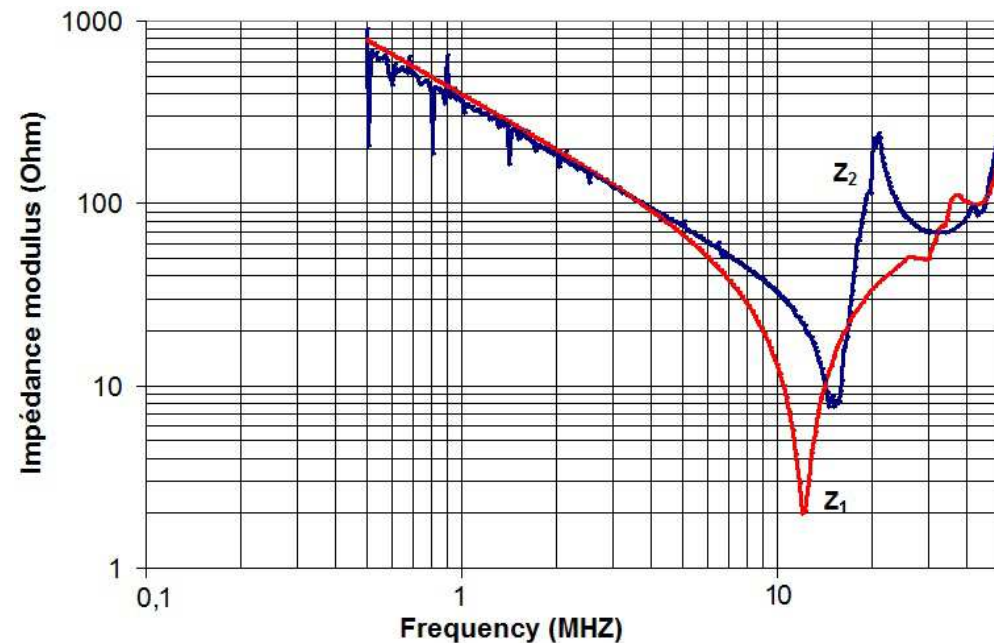


## - Mesure de l'impédance de MC du convertisseur SiC

- Impédance  $Z_{CM}$  est mesurée à l'aide de deux méthodes:
  - Utilisation d'un analyseur d'impédance: Z1
  - Utilisation de la méthode des pinces d'injection: Z2



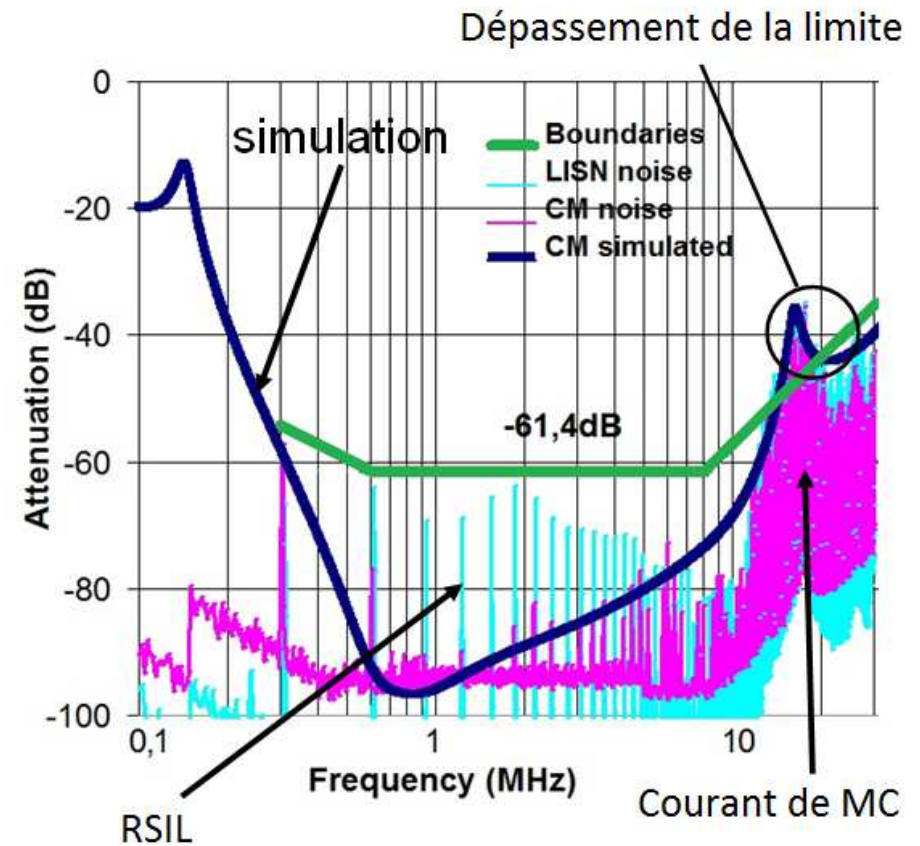
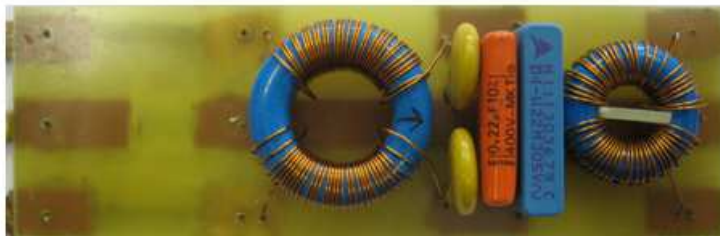
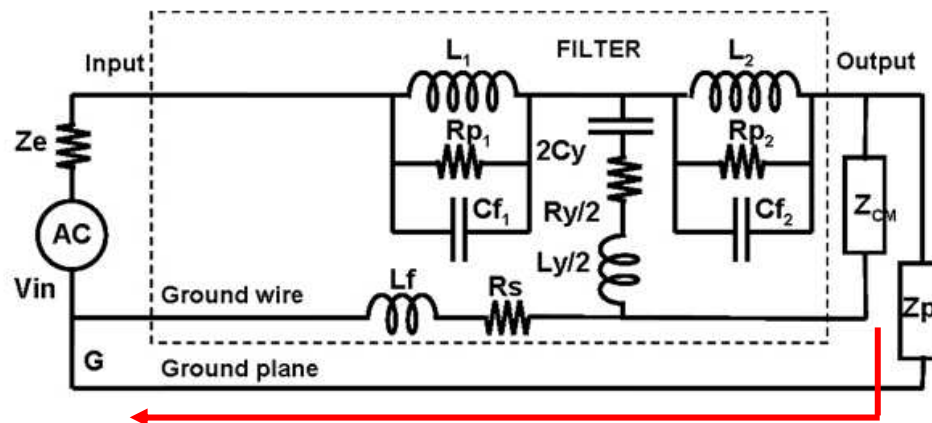
Méthode des pinces d'injection



Impédance  $Z_{CM}$  du convertisseur SiC

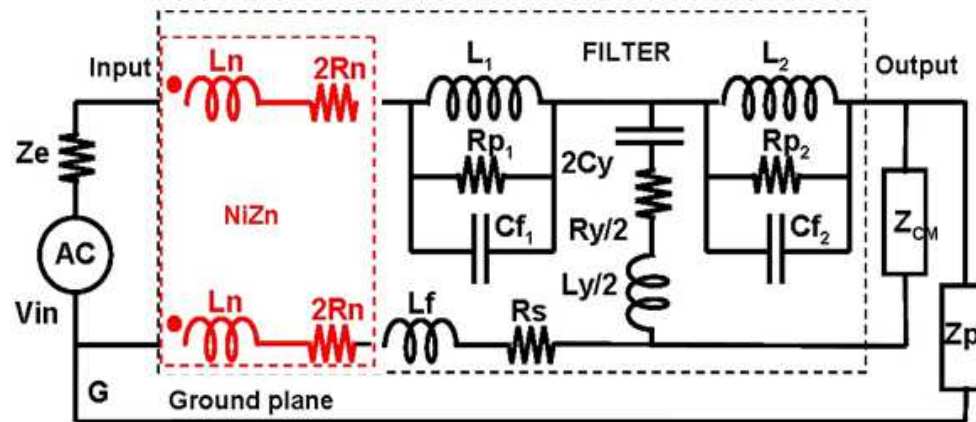
## - Outils de simulation des filtres CEM

Modèle utilisé

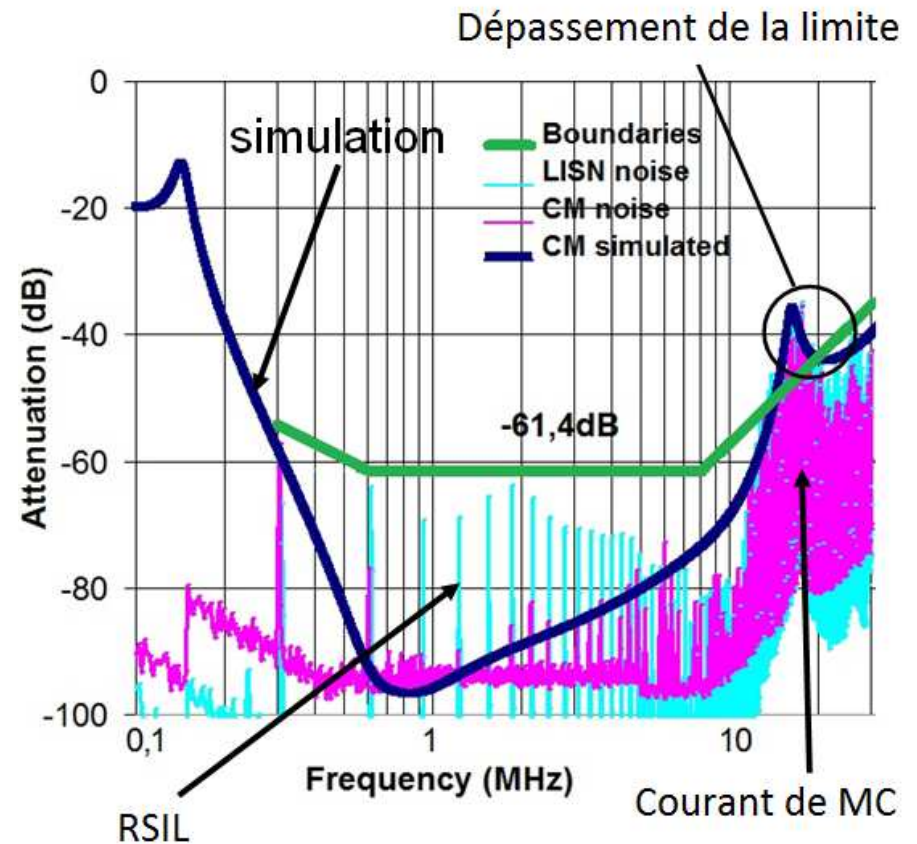
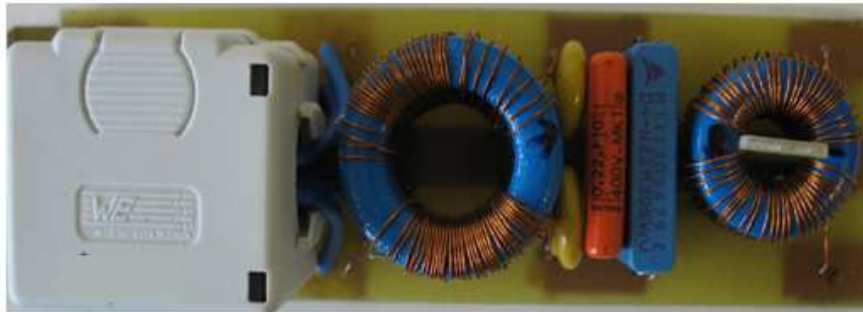


Dans la bande de fréquence 14 to 20MHz, l'atténuation du filtre n'est pas suffisante pour respecter la norme CEM.

## - Outils de simulation des filtres CEM

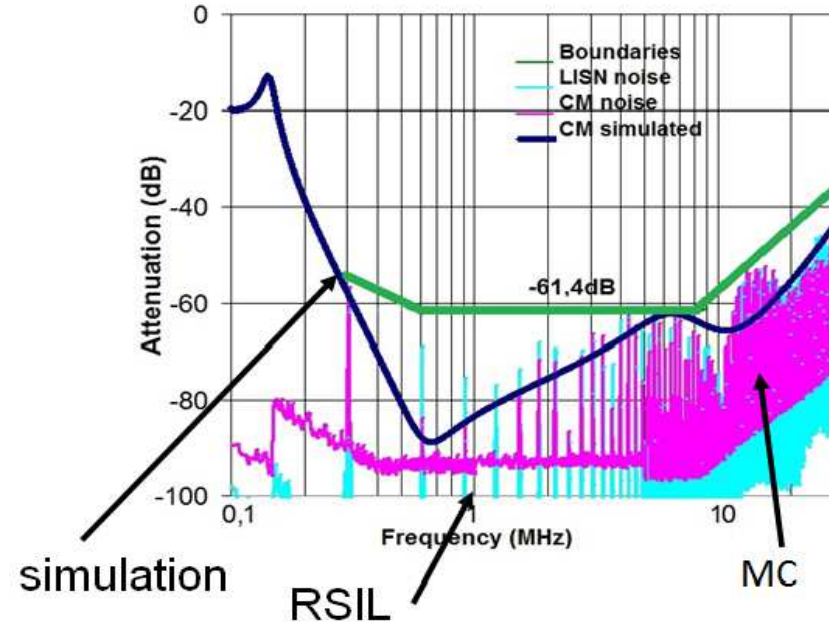
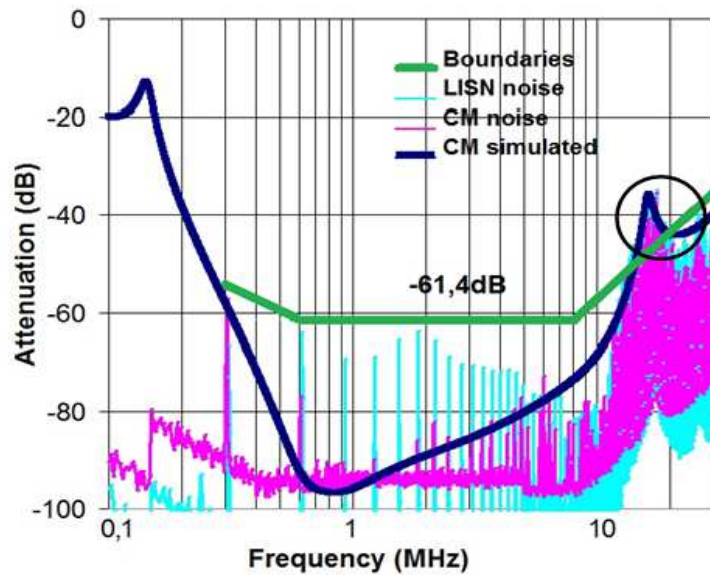
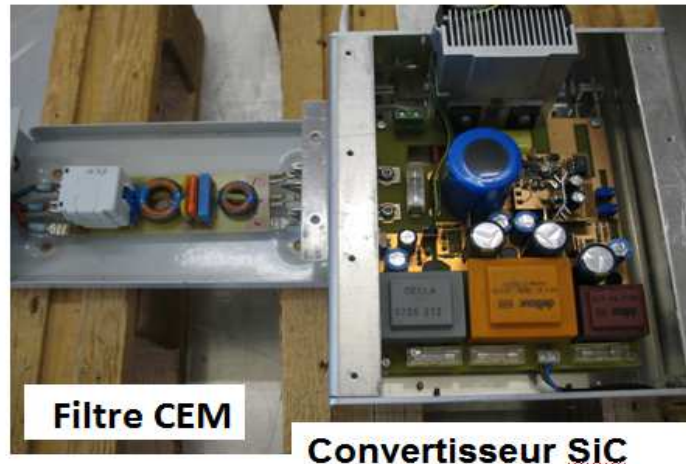


Modèle utilisé



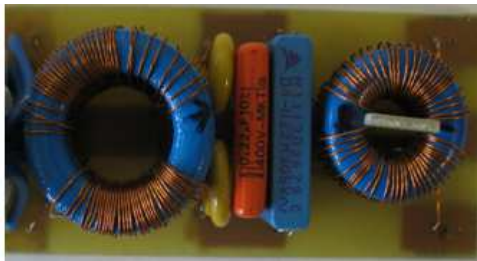
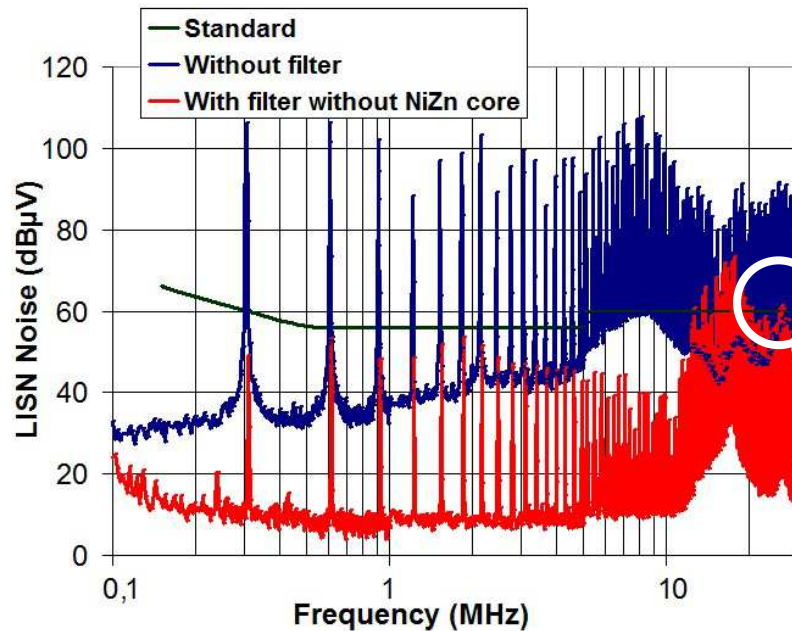
**Solution: Utilisation d'un matériau magnétique HF « NiZn » pour respecter la norme CEM**

## - Validation expérimentale du filtre de MC

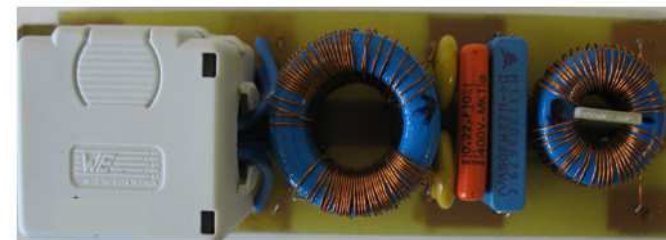
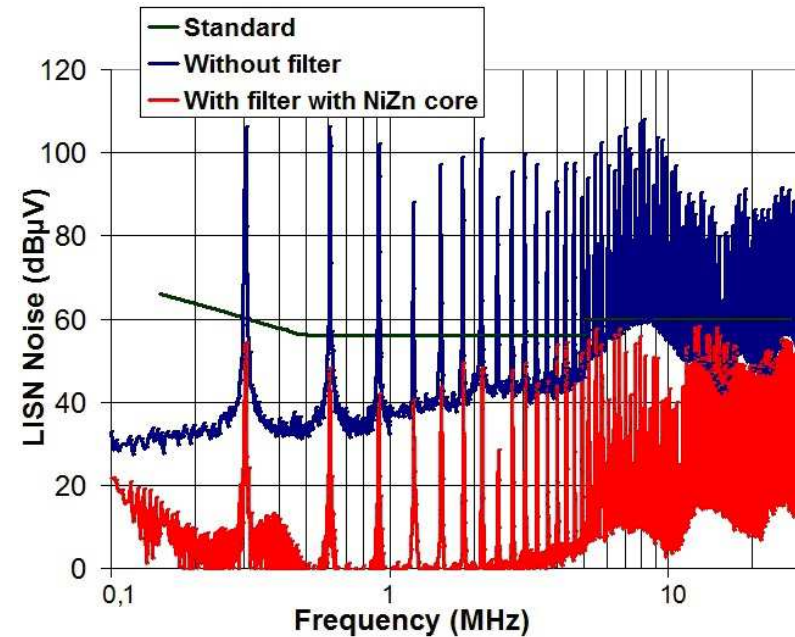




## - Validation expérimentale du filtre CEM



Emissions conduites avec filtre sans matériau HF

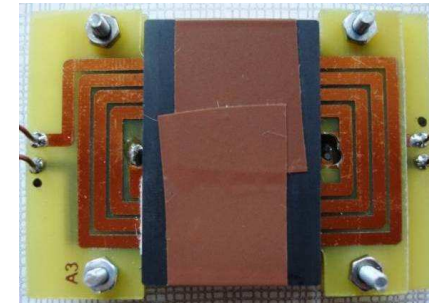
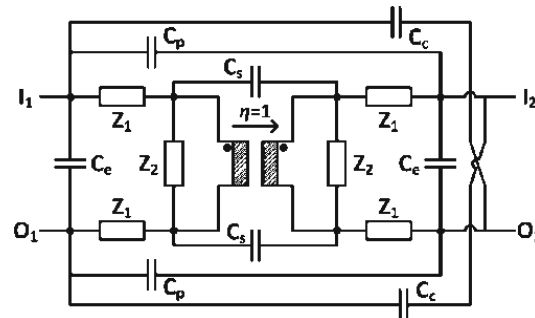
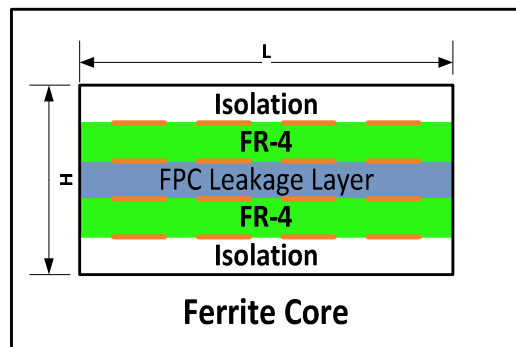


Emissions conduites avec filtre et matériau HF

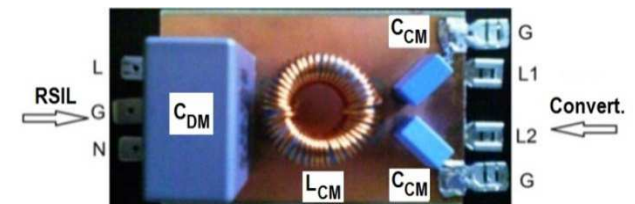
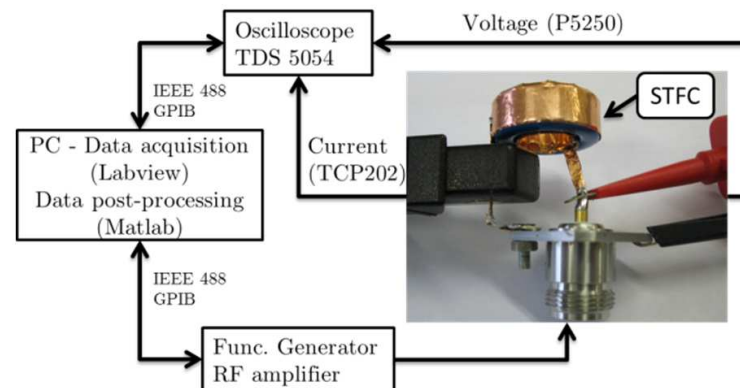
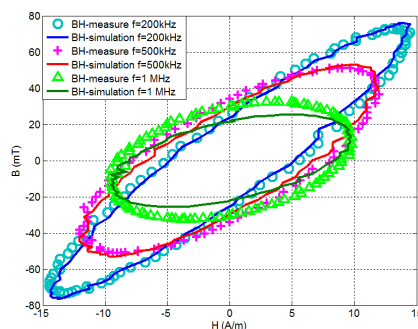
## - Composants magnétiques des filtrages CE

56

### - Modèles analytiques pour la conception des composants planars HF



### - Comportement HF des matériaux magnétiques et Méthodes de caractérisation HF



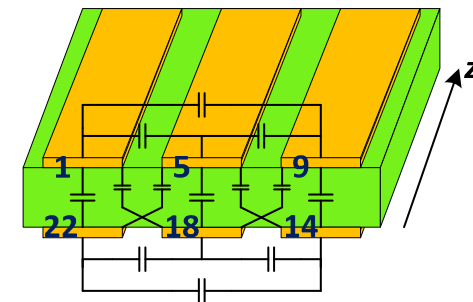
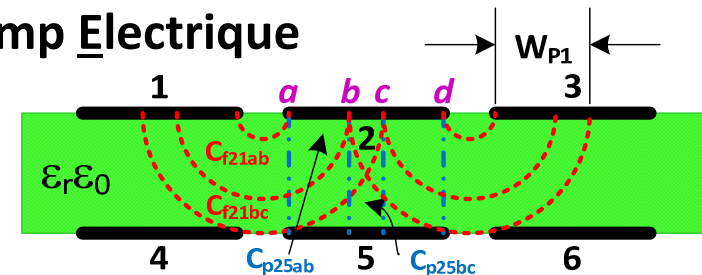
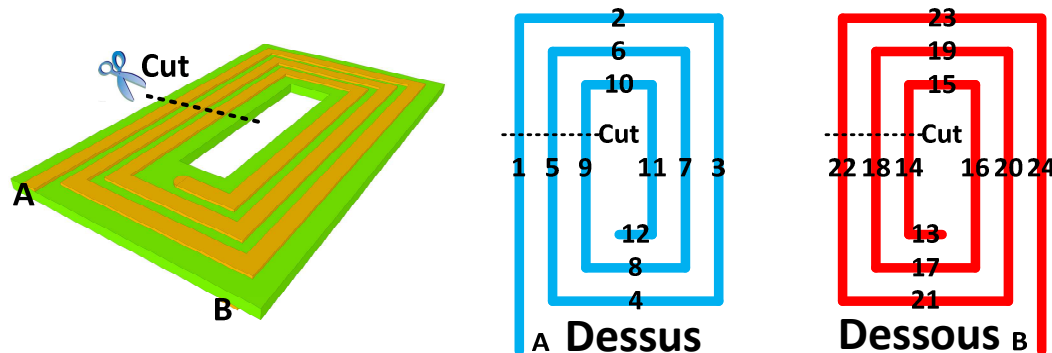


# - Composants magnétiques des filtrages CE

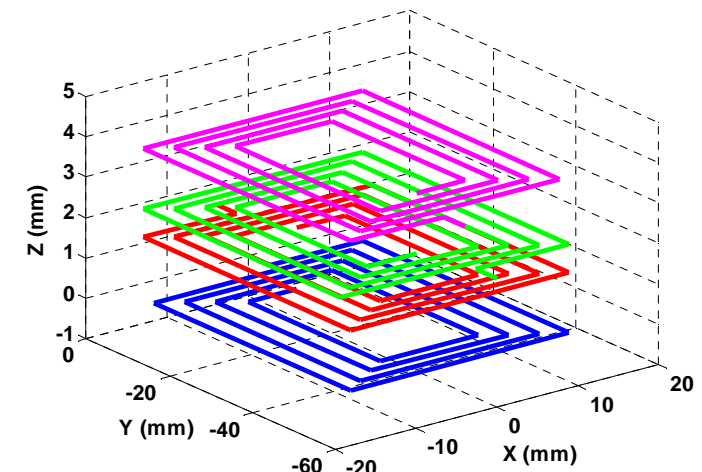
57

## - Modélisations *analytiques* des composants planars ( $C_p$ et $L_f$ )

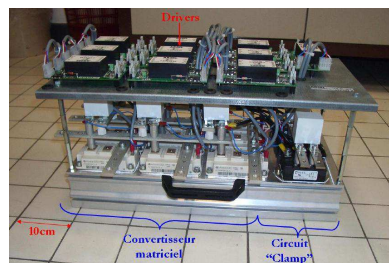
- Méthode de Décomposition de Champ Electrique
- *Passage 2D à 3D:*



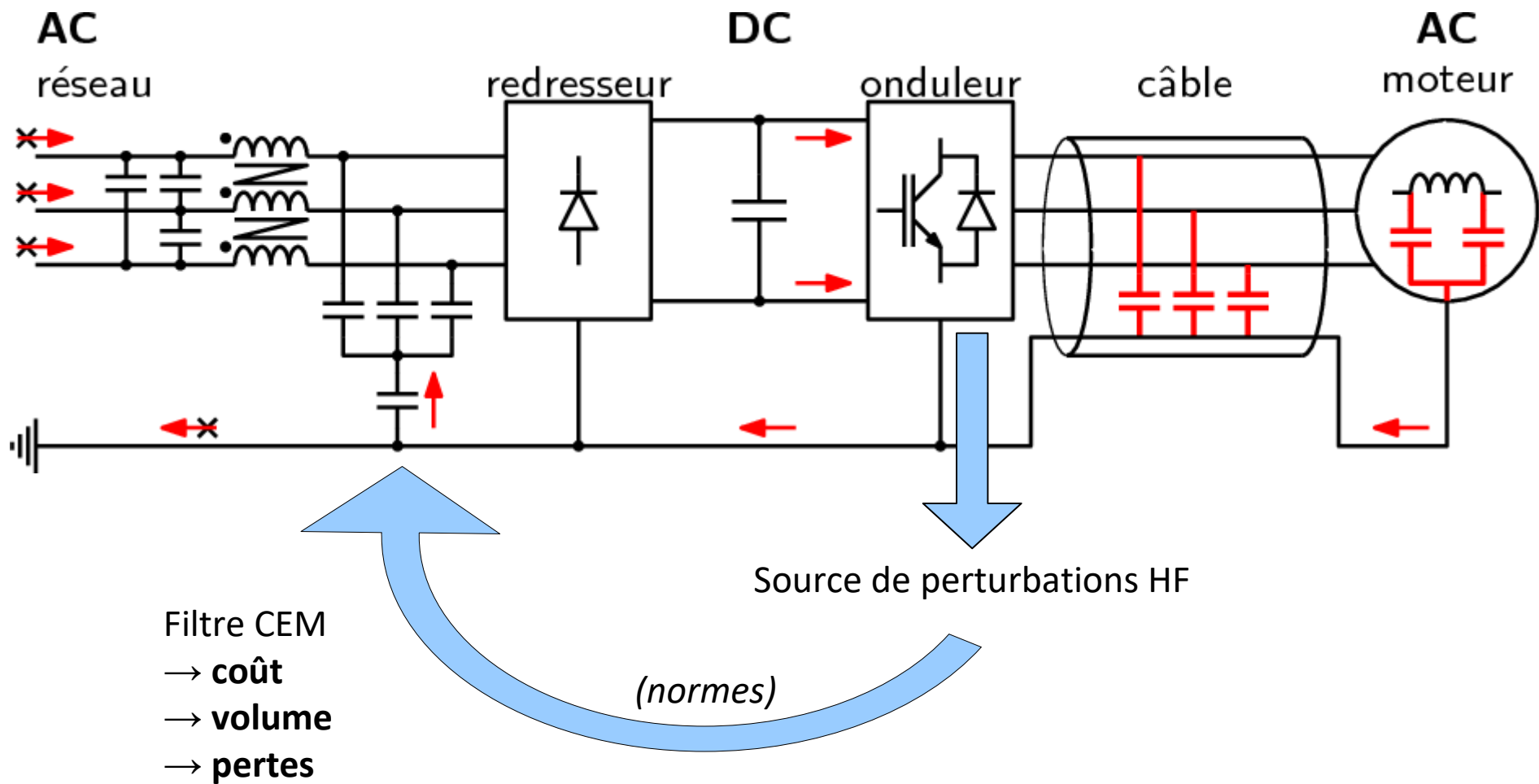
- Modèle circuit électrique
- Outils de Modélisation (matlab)
- Conception inductance planar

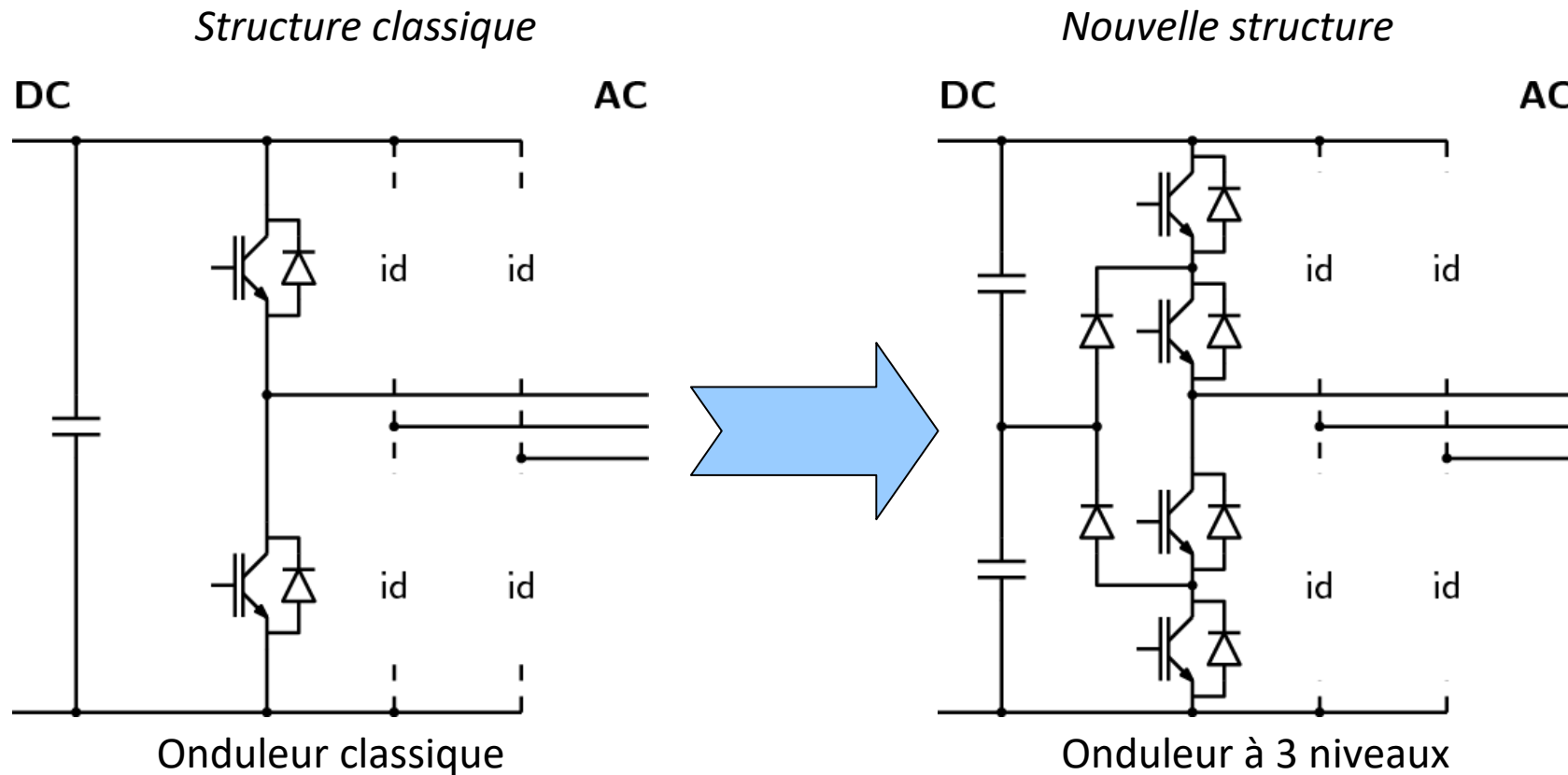


## Méthode de réduction par une action sur la structure et la commande du convertisseur statique



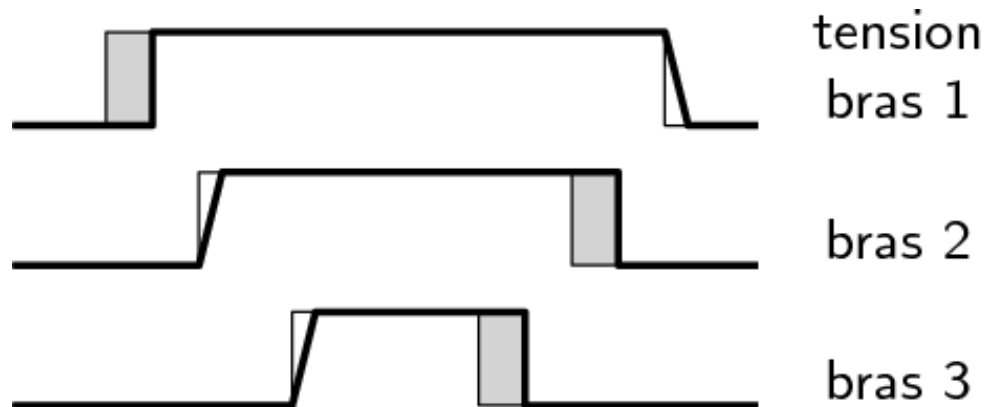
## - Variateur de vitesse à faible impact électromagnétique



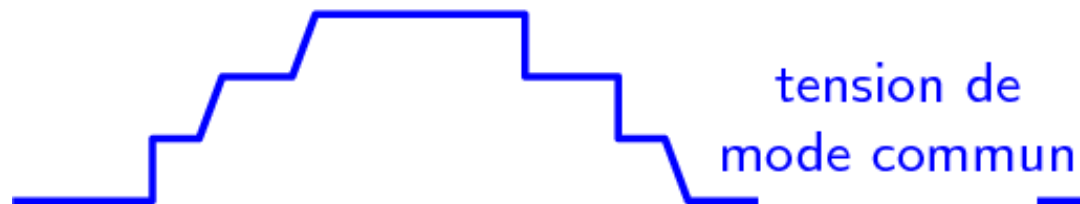
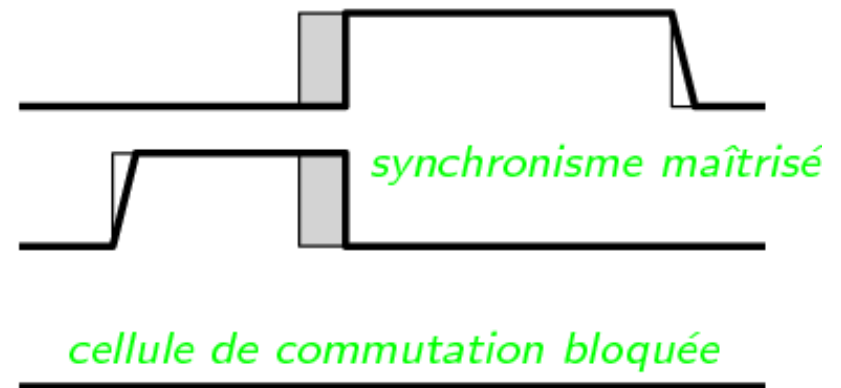


Nouvelle stratégie de commande

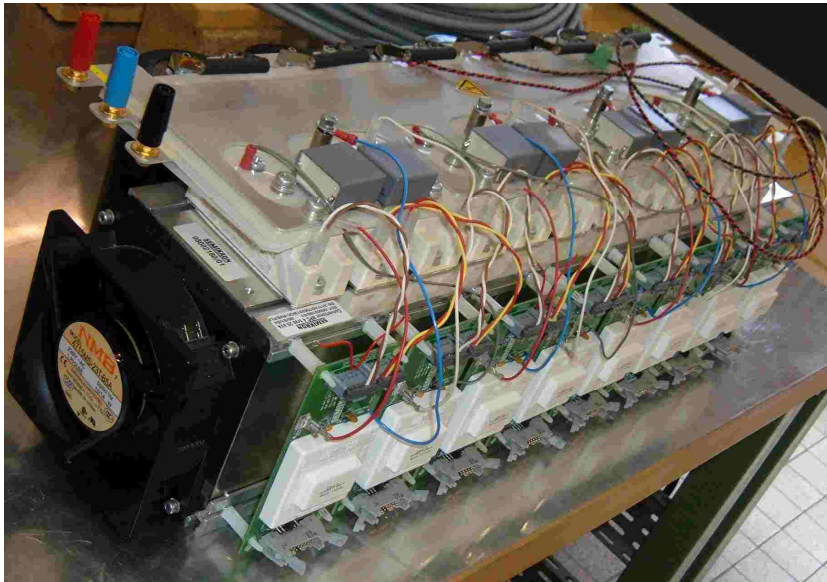
*Commande classique*



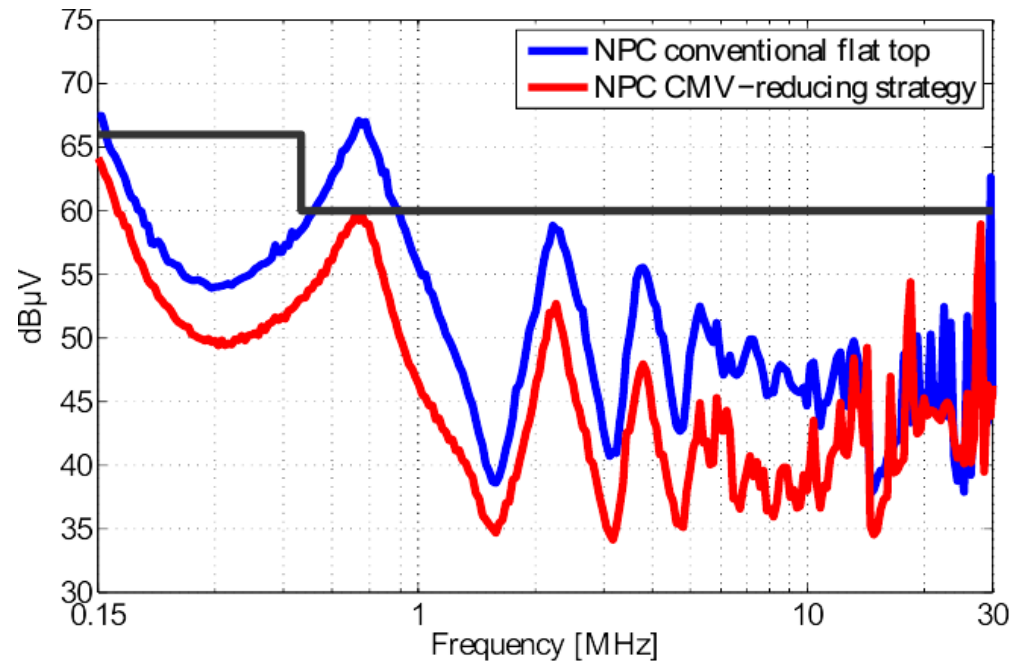
*Nouvelle commande*



## - Validation expérimentale du filtre de MC



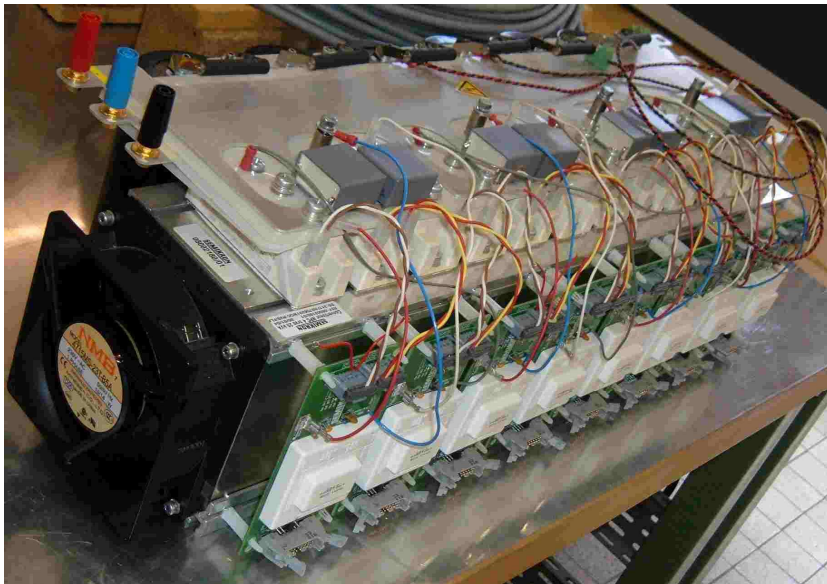
Prototype laboratoire 20 kVA



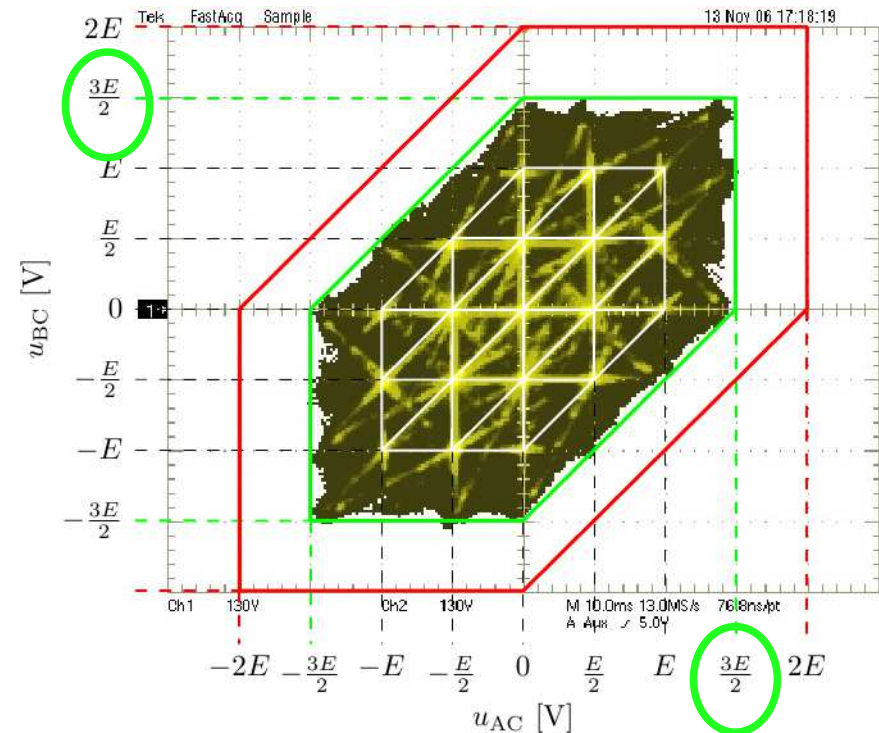
Courants de mode commun



## - Validation expérimentale du filtre de MC

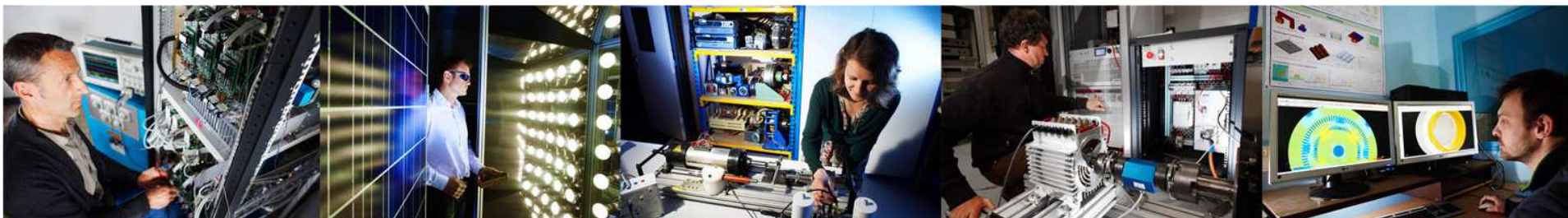


Prototype laboratoire 20 kVA



Limitation des surtensions moteur :

- Déférentes perturbations BF et HF induites vers le réseau électrique (Victime selon la norme CEM)
- Nouveaux composants de puissance à grand gap et les problèmes CEM en très hautes fréquences
- Méthodes de réduction des perturbations conduites des convertisseurs modernes
- Nouvelles approches de dimensionnements des filtres CEM pour les convertisseurs SiC et GaN.
- CEM est une problématique qui va nécessiter le développement de nouvelles approches à cause de l'intégration de puissance.



**MERCI DE VOTRE ATTENTION**

