

Systèmes & Composants Passifs

Notes de cours

Mars 2021

V.BLEY

Vincent.bley@laplace.univ-tlse.fr

Objectifs du cours

- Définitions d'un système de composants passifs
- Problématique CEM dans l'avionique
- Modes de perturbations
- Normes CEM
- Réseau de stabilisation d'impédance de ligne RSIL
- Filtre CEM
- CEM conduite des convertisseurs statiques élémentaires

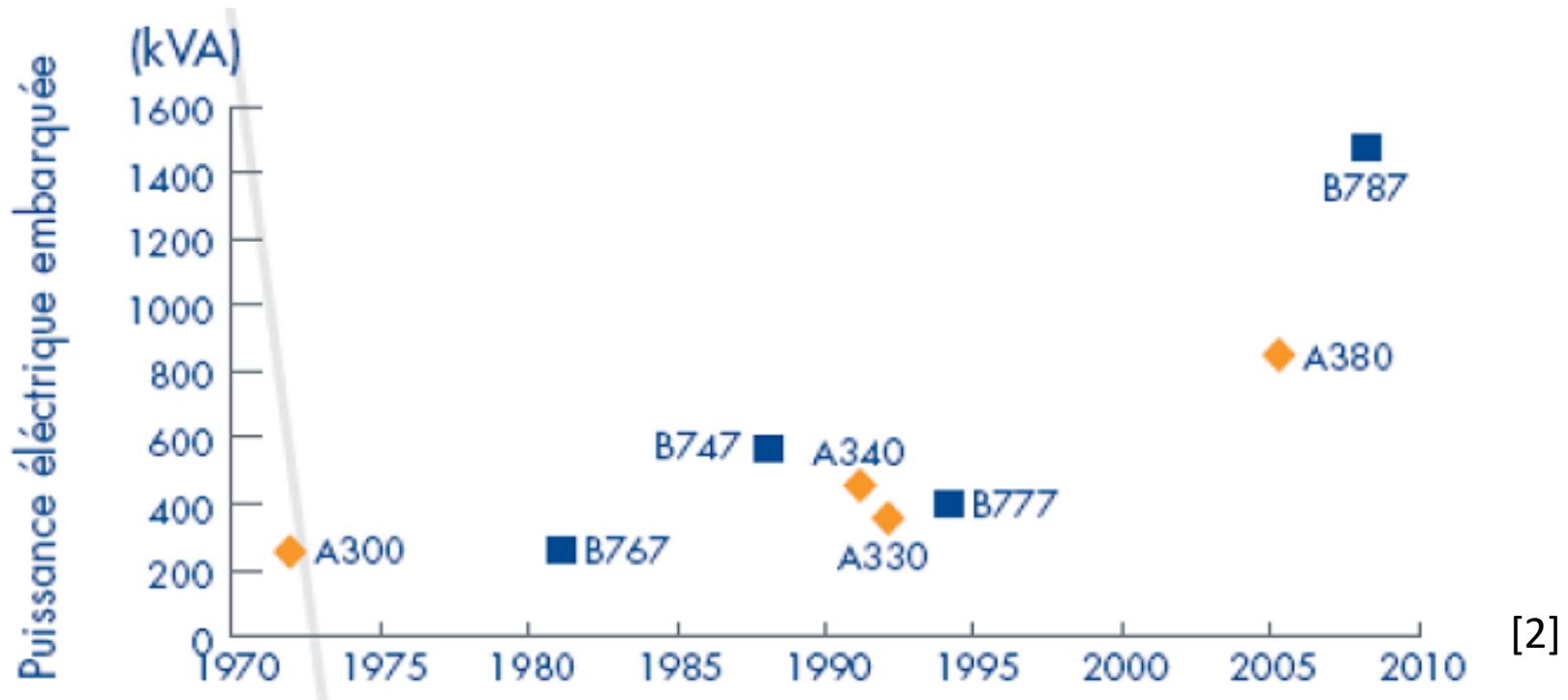
Un système ?

Une définition générale... mais adaptée :

Un système est décrit comme un **ensemble d'éléments en interaction** entre **eux** et avec **l'environnement**, intégré pour rendre à son environnement des **services** correspondants à sa **finalité**. Un système présente donc des propriétés nouvelles résultant des **interactions entre ses constituants** : si l'on intègre des éléments pour faire un système, c'est bien pour bénéficier des effets de synergie résultant de leurs interactions [1].

Dans notre cas, nous étudierons des **systèmes** de type **filtres** constitués d'éléments constitués par des **composants passifs discrets** dans un premiers temps voire **intégrés** pour profiter des effets de synergie, d'interactions mutuelles...

Le besoin ?

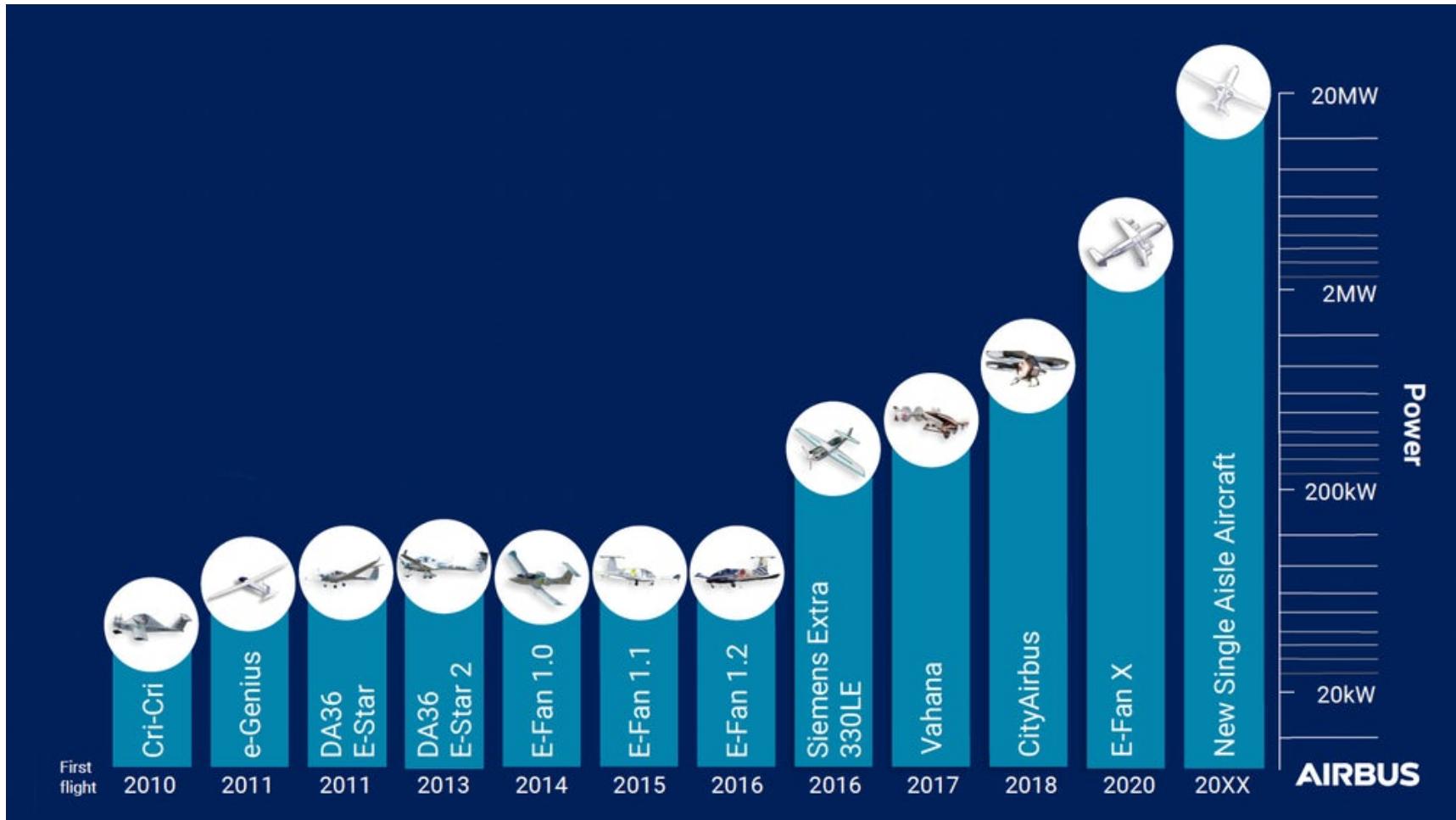


Une croissante spectaculaire de la puissance électrique embarquée mais des contraintes fortes...

- Gain de masse ? Passer de 1 à 2kW/kg à +20kW/kg ?
- Fiabilité, protections ?
- Maintenance ?
- compatibilité

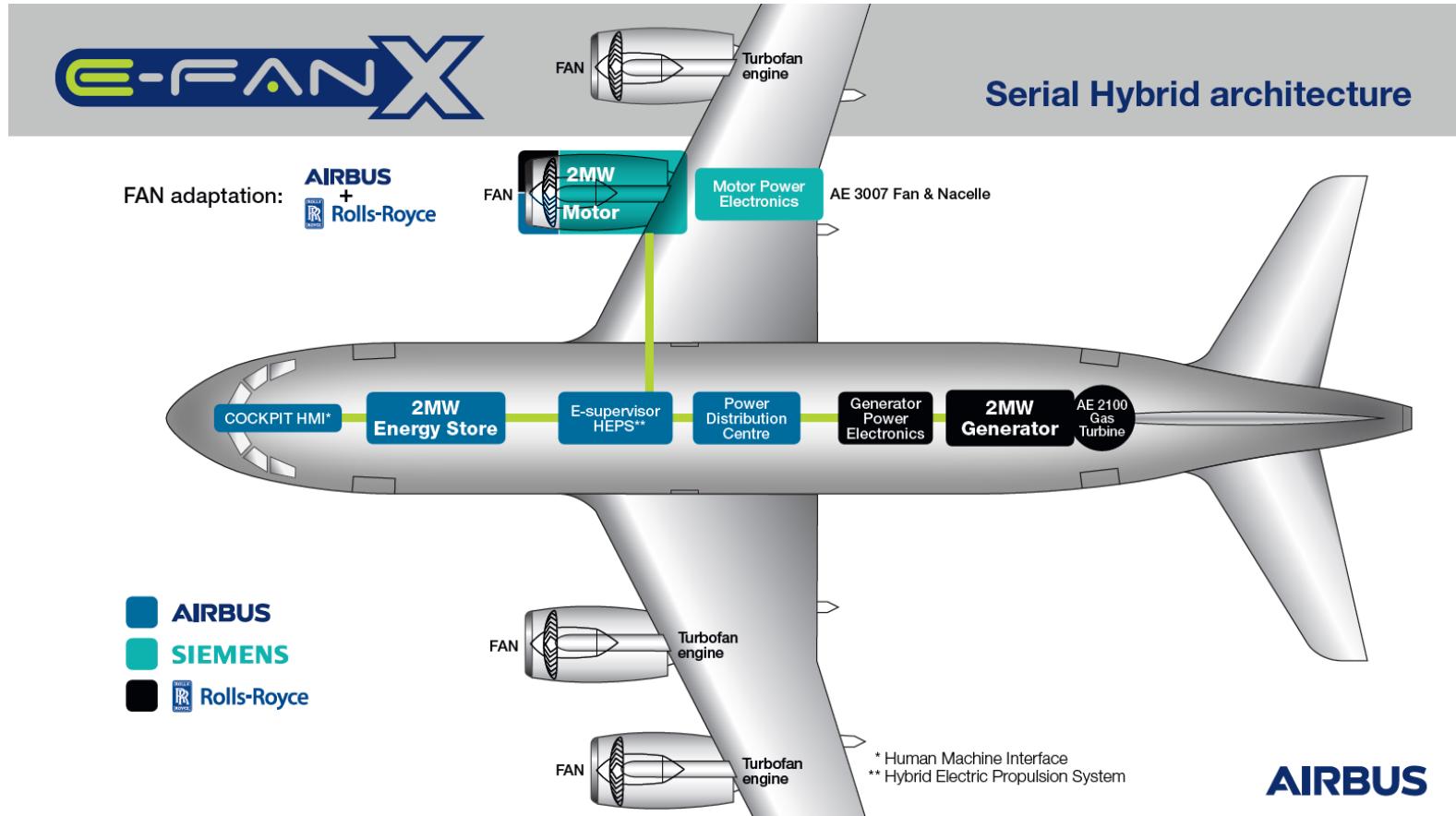
1974 → A300 → 250kVA
1995 → B777 → 400kVA
2007 → A380 → 600kVA
2011 → B787 → 1500kVA

Des projets ambitieux...

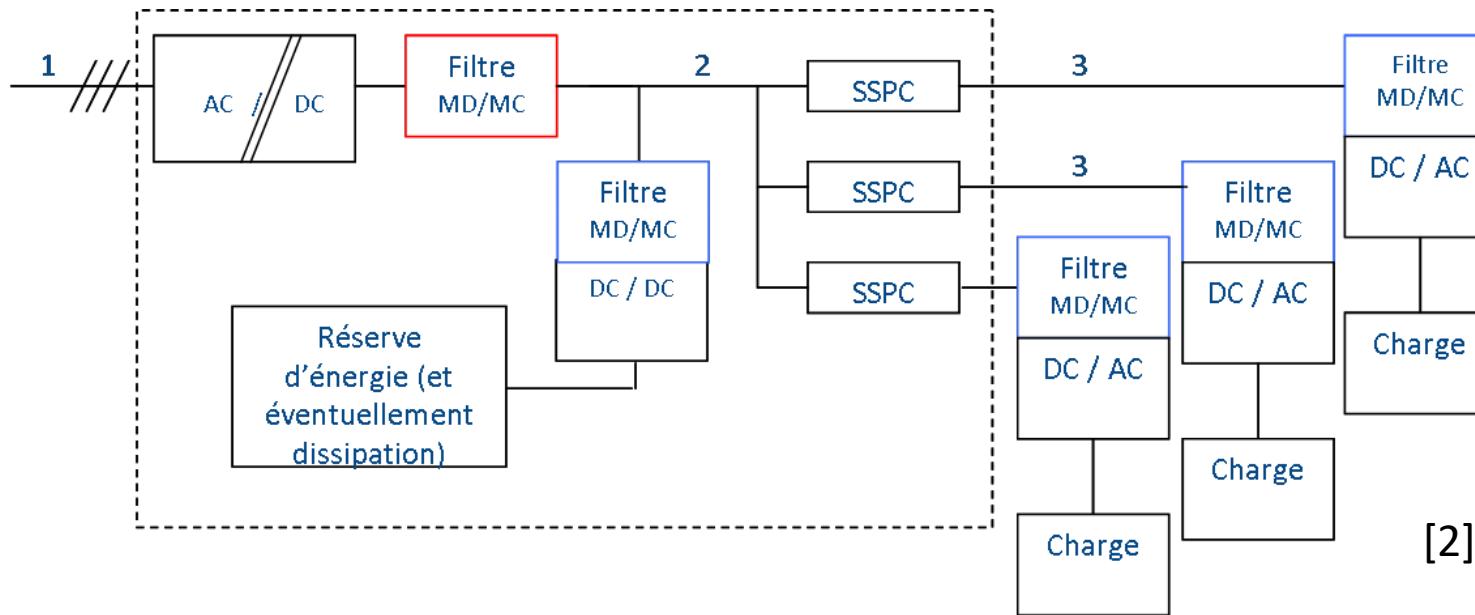


<https://leehamnews.com>

Des architectures proposées



Exemple de réseau de bord actuel

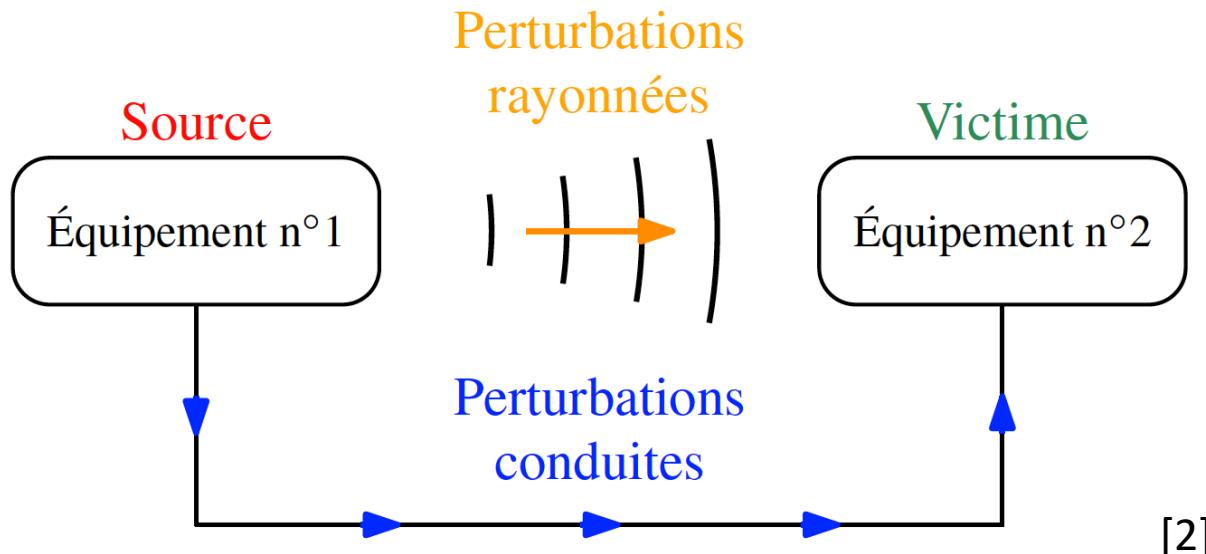


SSPC : Solid State Power Control

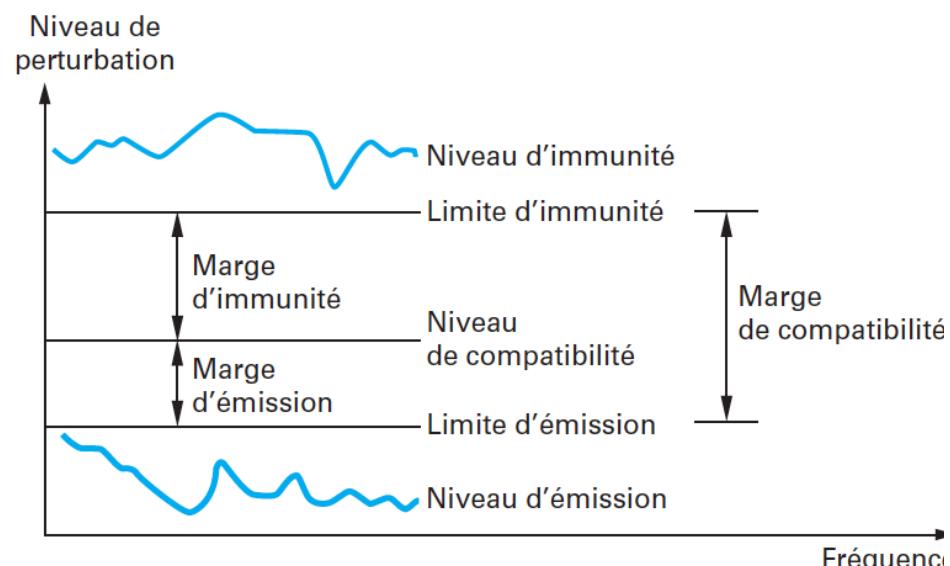
- Nombre de convertisseurs croissant !
- Nombre de filtres croissant → Masse ?, fiabilité ?

Définitions

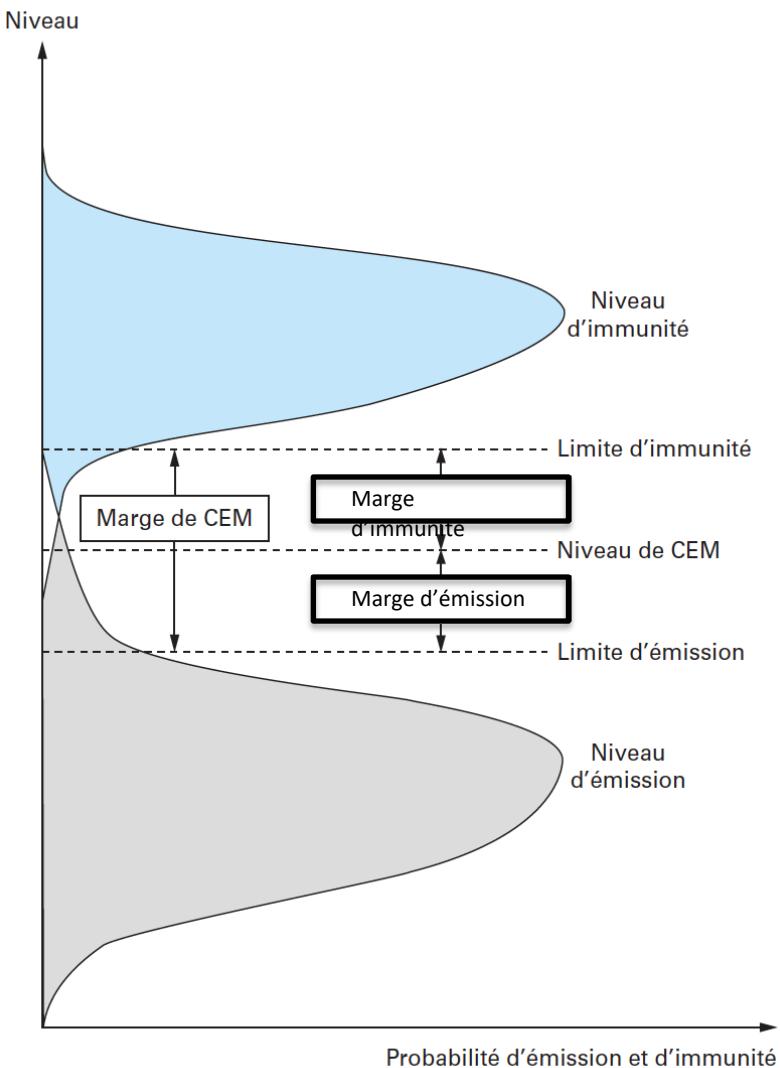
- PEM : Perturbation Electromagnétique
- CEM Compatibilité électromagnétique
- Source de perturbation → étude d'émission → notion de niveau
- Victime de perturbation → étude de susceptibilité → fonctionnement assuré
- Rayonnement : champ électrique et magnétique rayonné en l'absence de matière
- Perturbation conduite : par les conducteurs, composants...



Probabilité d'émission et d'immunité



[3]



Notions de MC-MD

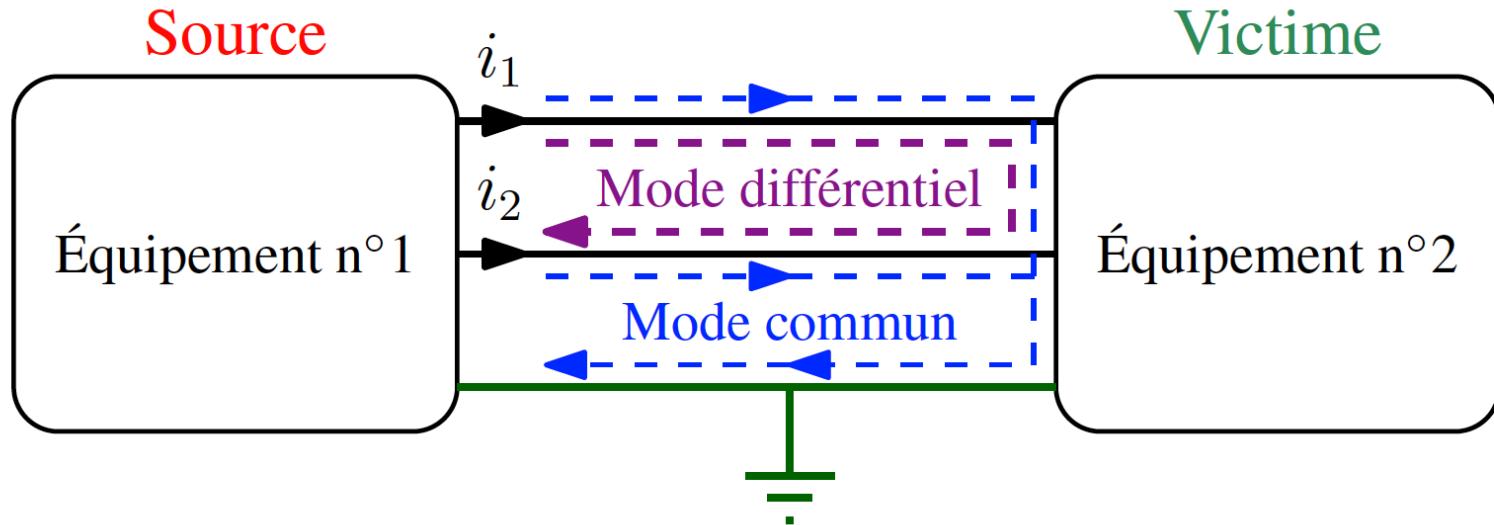
- **Les courants de mode différentiel I_{MD} :** se propagent sur une phase et reviennent par l'autre

$$i_{MD} = (i_1 - i_2)/2$$

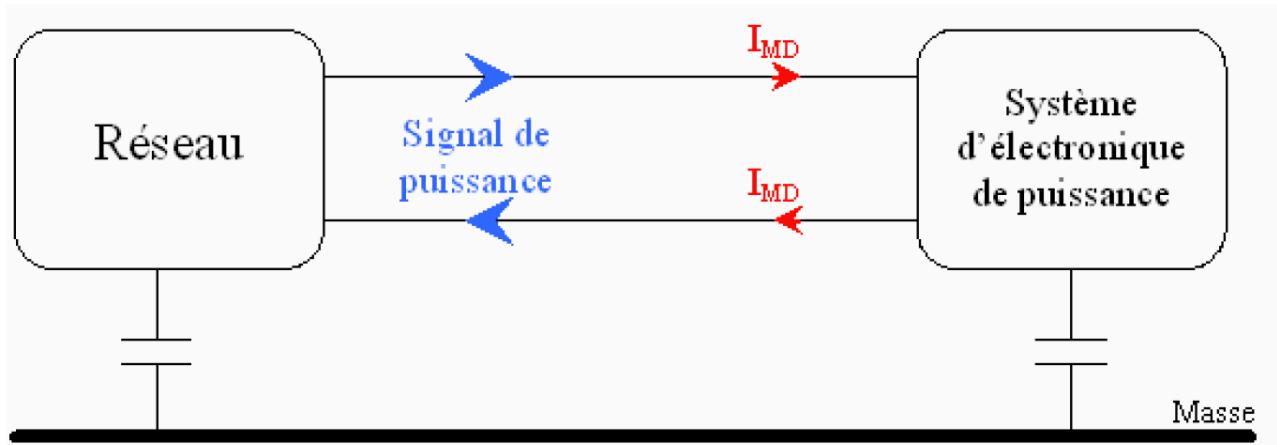
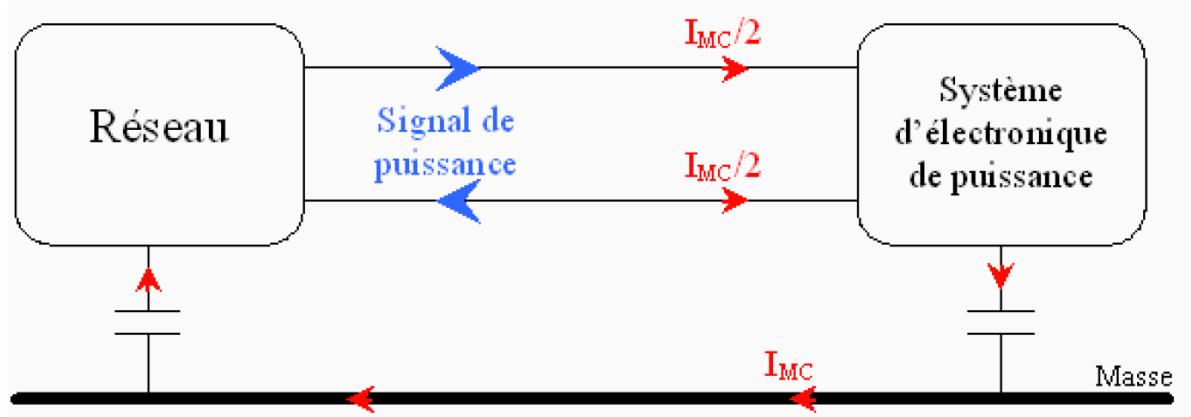
- **Les courant de mode commun I_{MC} :** se propagent sur les 2 phases dans le même sens et reviennent par la masse

$$i_{MC} = (i_1 + i_2)$$

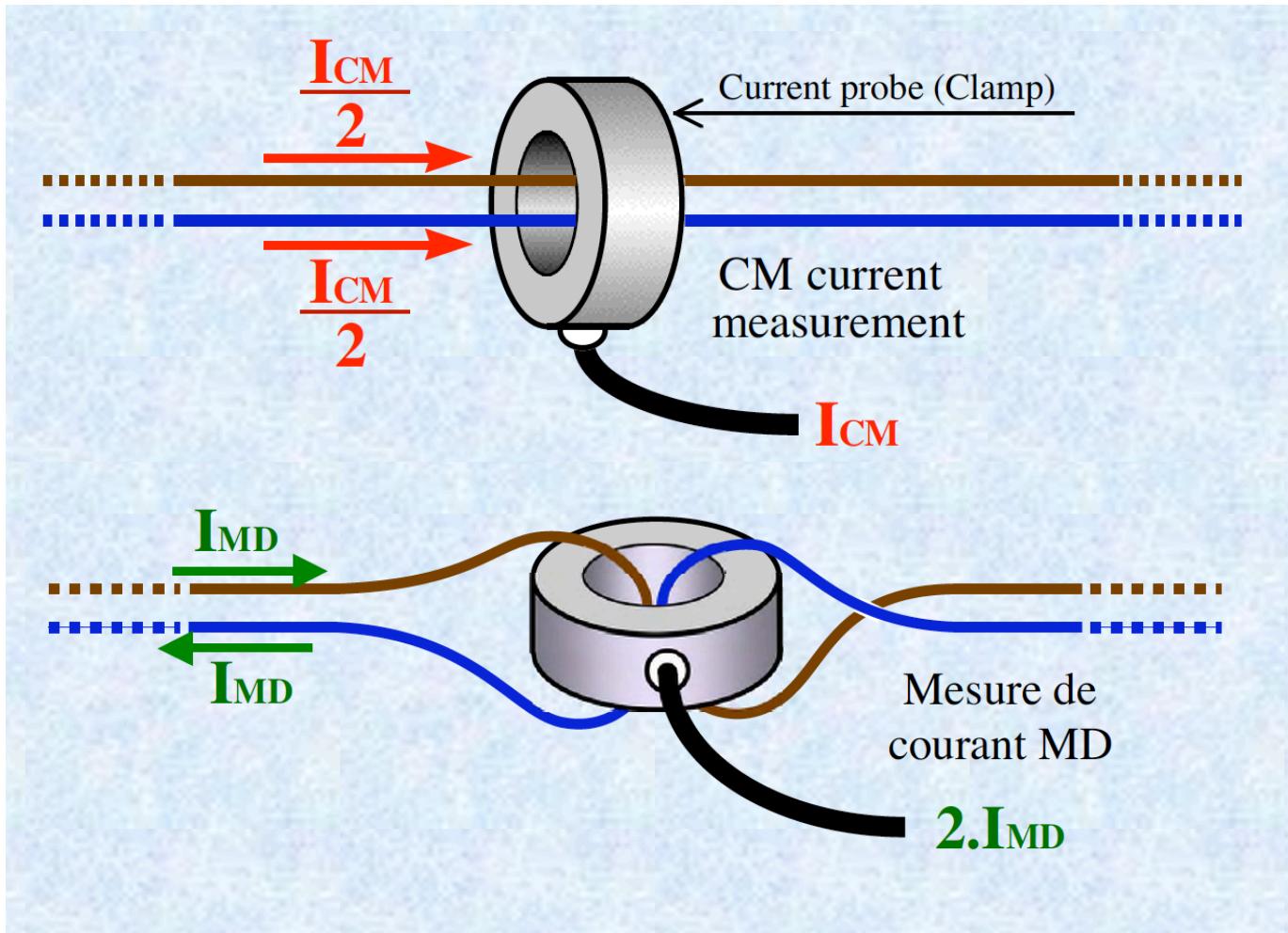
- En présence de dissymétries, possibilité de transformer MC en MD → transformation de mode



Représentation « pratique »



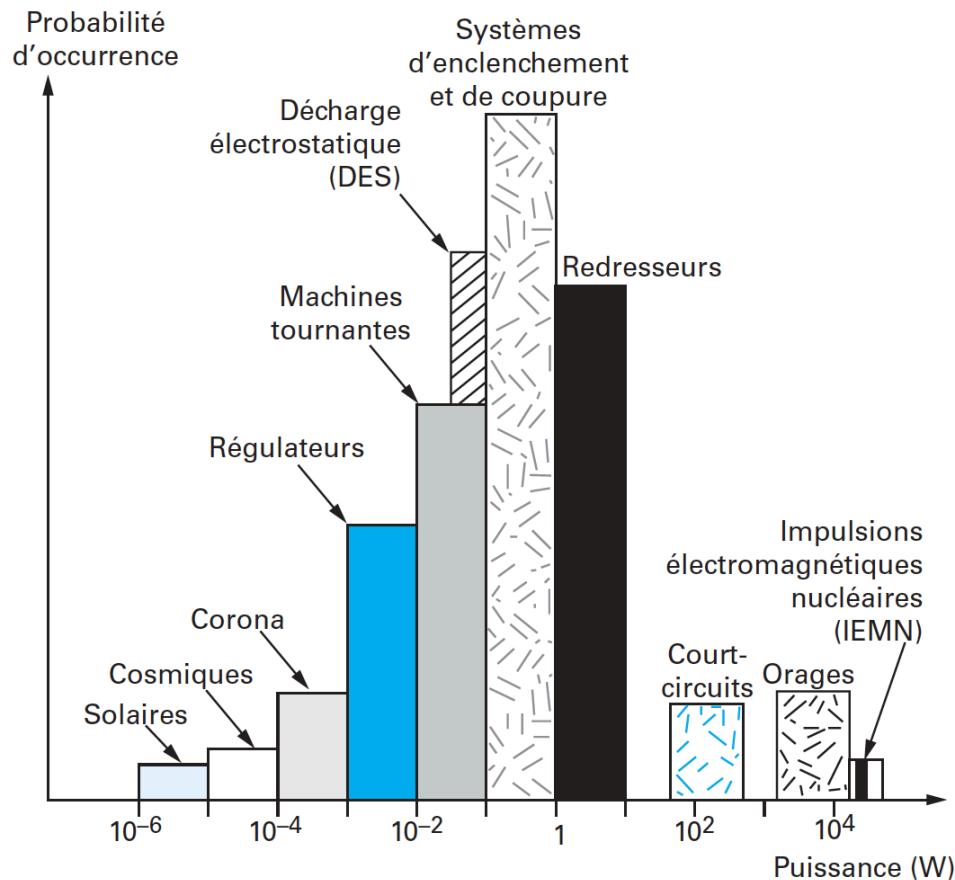
Comment les mesurer ?



Utilisation de tores adaptés au domaine de fréquence
Comparer à votre utilisation classique en BF...

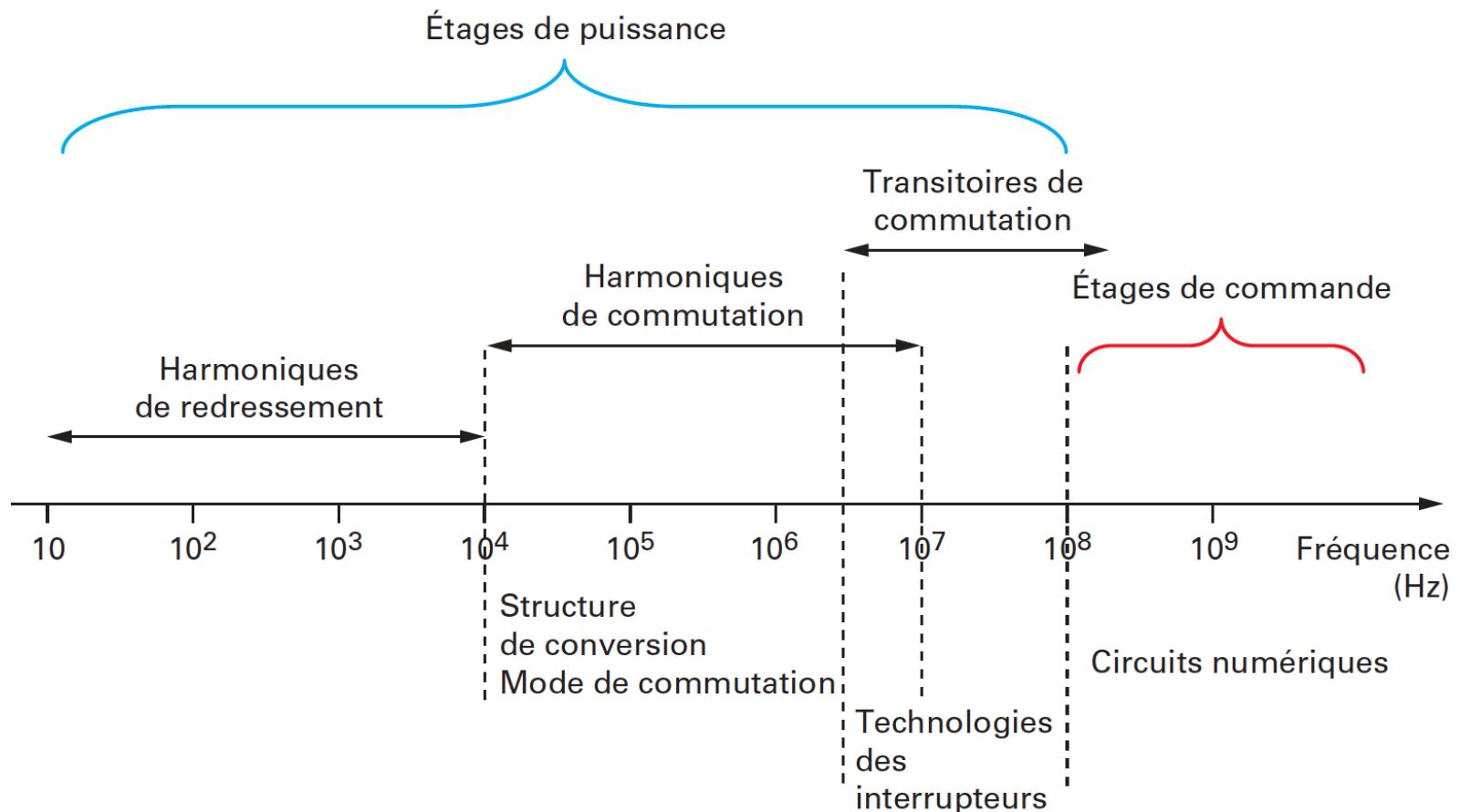
Sources de Perturbations

- Naturelles → foudre, aurores boréales...
- D'origine humaine → liée à l'activité humaine



[3]

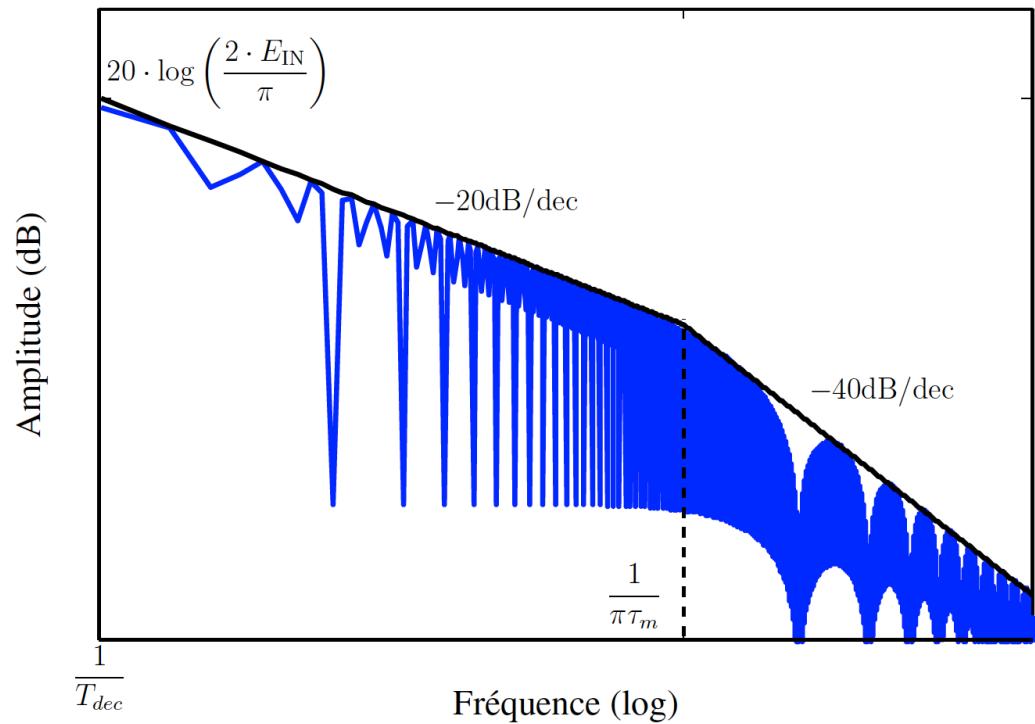
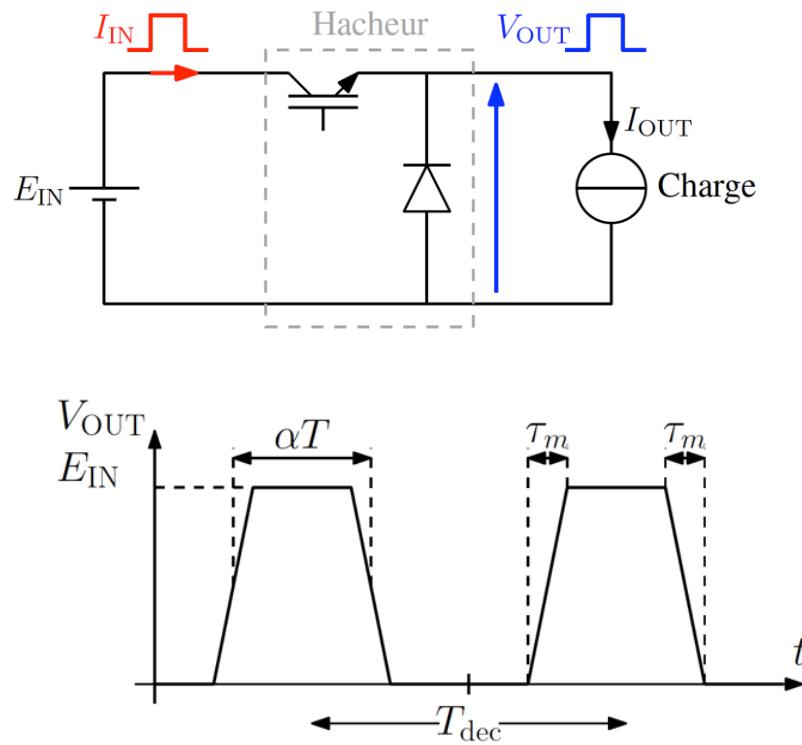
CEM des convertisseurs...



CEM des Convertisseurs

Les convertisseurs statiques de puissances génèrent des dv/dt et di/dt lors des commutations :

→ Perturbations électromagnétiques à haute fréquence



Spécificités des grands Gap

+ de perturbations générées et plus sensibles...

Common with Si MOSFET

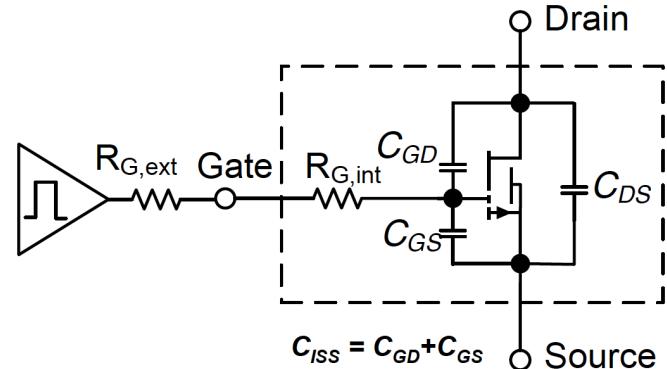
- True e-mode normally off
- Voltage driven - driver charges/discharges C_{ISS}
- Supply Gate leakage I_{GSS} only
- Easy slew rate control by R_G

Differences

- Much Lower Q_G : Lower drive loss; faster switching
- Higher gain and lower V_{GS} : +5-6V gate bias to turn on
- Lower $V_{G(th)}$: typ. 1.5V

Vs other e-mode GaN

- More robust gate: +/-10V DC max rating
- No DC gate drive current required
- No complicated gate diode / PN junction

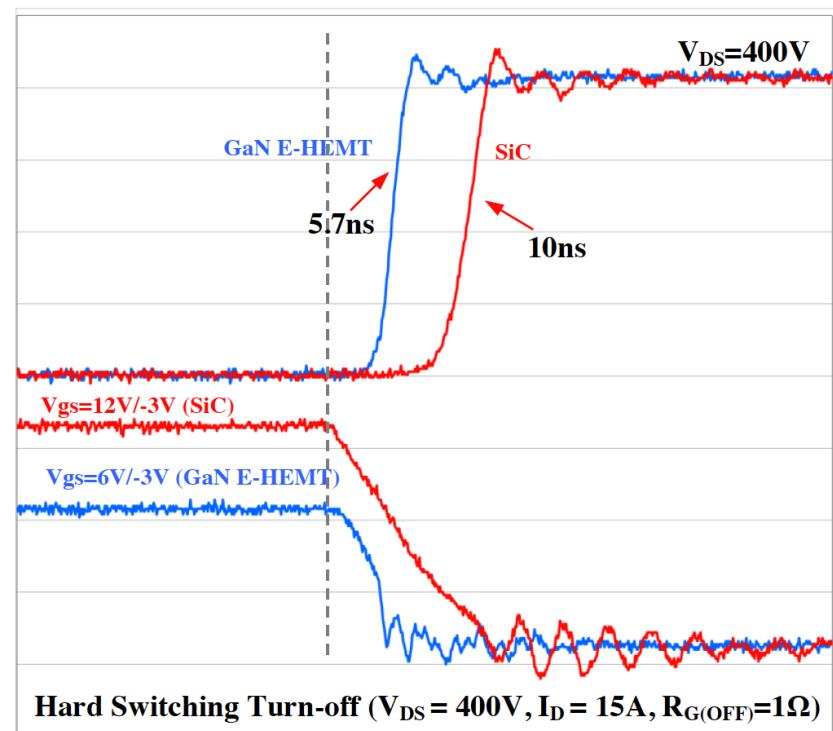
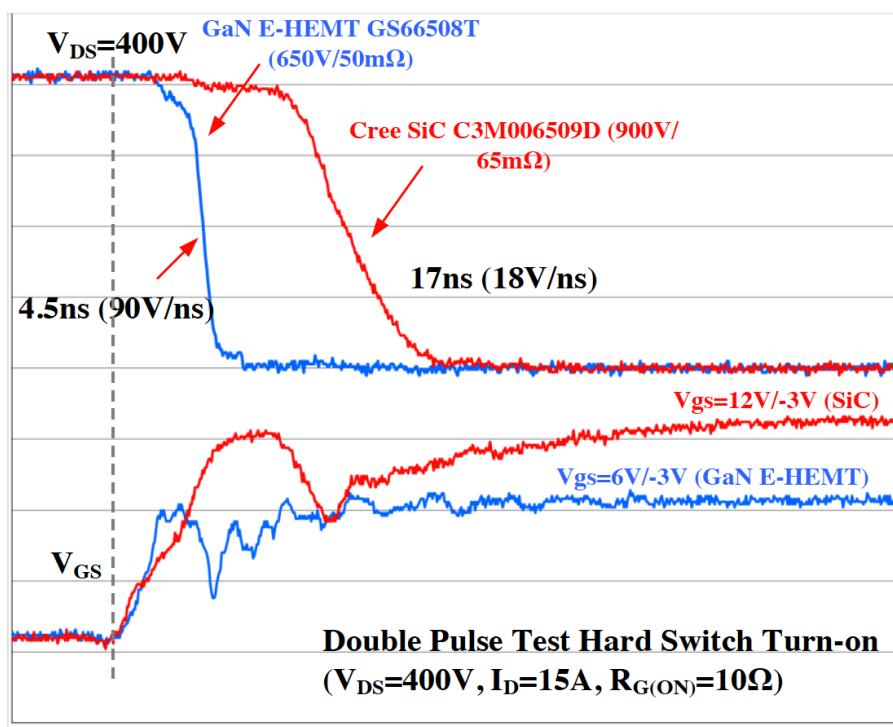


$$C_{ISS} = C_{GD} + C_{GS}$$

Gate Bias Level	GaN Systems GaN E-HEMT	Si MOSFET	IGBT	SiC MOSFET
Maximum rating	-10/+7V	+/-20V	+/-20V	-8/+20V
Typical gate bias values	0 or -3/+5-6V	0/+10-12V	0 or -9/+15V	-4/+15-20V

GaN can switch faster than Si/SiC MOSFETs with $dv/dt > 100V/ns$

- GaN shows 4x faster turn-on and ~2x faster off time than state of art SiC MOSFET with similar $R_{ds(on)}$
- **Care should be taken when designing with such a high switching speed and dv/dt**

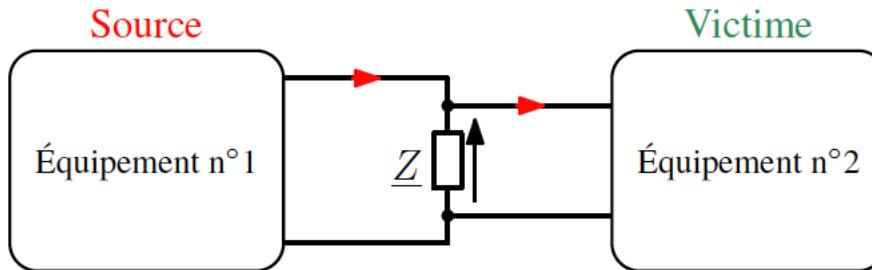


Notion de couplages

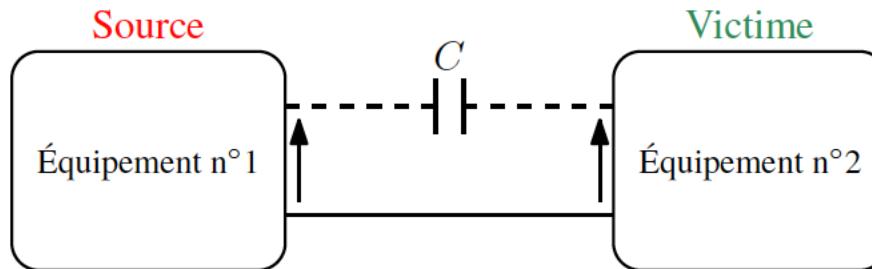
Les perturbations émises par les sources vont se propager jusqu'au victimes selon différentes voies. Ces modes de propagations sont appelés couplages

- Couplage par Impédance commune :
Une impédance en commun entre la source et la victime
- Couplage capacitif (diaphonie capacitive):
La source produit un **dv/dt** qui va agresser la victime par une capacité
(augmentation des courants de modes communs...)
- Couplage inductif (diaphonie inductive) :
Une boucle source génère un **di/dt** créant un champ magnétique variable qui va créer un courant induit dans une boucle victime (+ surtensions, pertes ...)

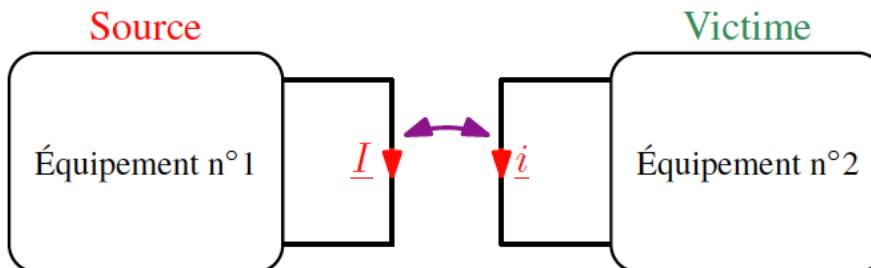
Les trois modes de couplages



Couplage par Impédance commune



Couplage capacitif (diaphonie capacitive)



Couplage inductif (diaphonie inductive)

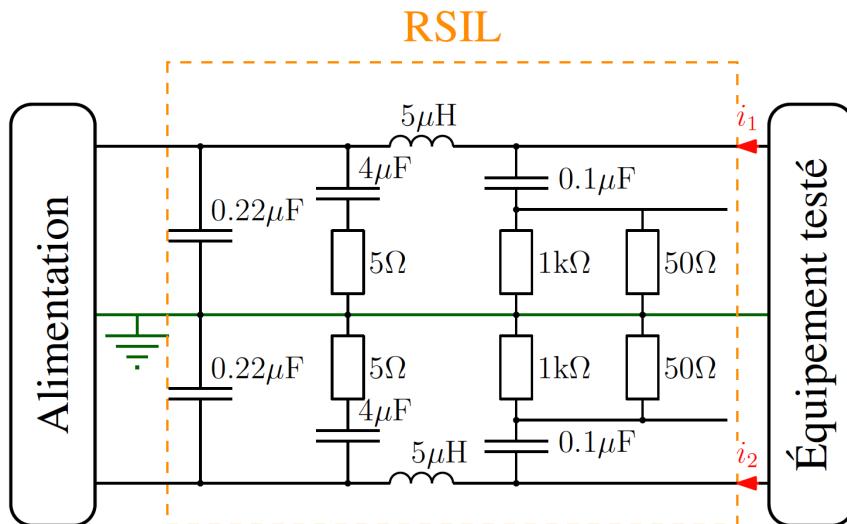
Normes CEM

- Problème CEM → respect des normes CEM
 - Fixer un niveau d'émission → gabarit
 - Fixer un niveau de susceptibilité
 - Fixer un cadre de mesure → reproductibilité
- Réseau Stabilisateur d'Impédance de Ligne RSIL :

Filtre passe bas placé entre l'équipement sous test (EST, DUT) et son alimentation, il permet d'isoler en HF l'EST de son alimentation et ainsi de mesurer i_1 et i_2

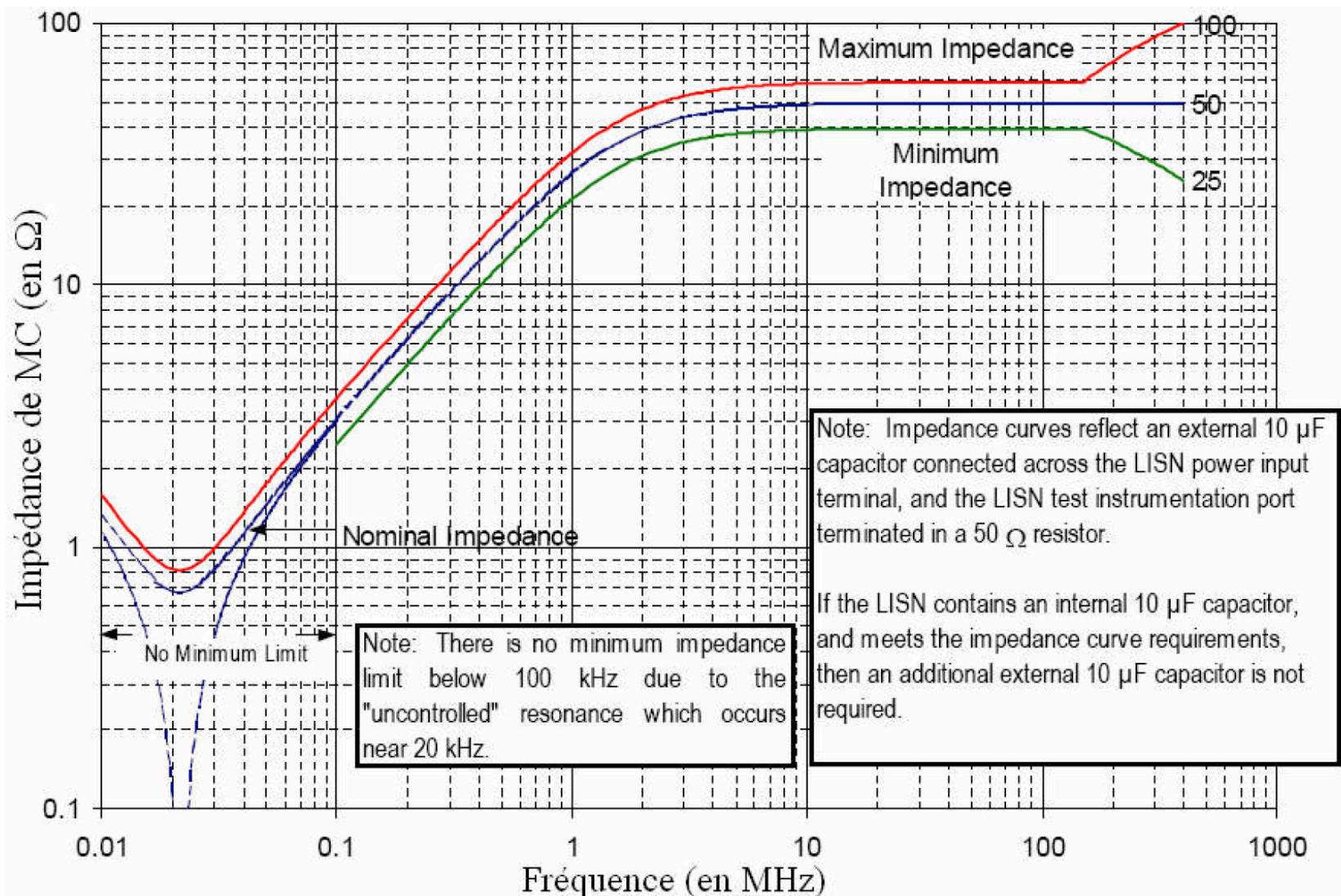
Un RSIL est adapté à une norme donc à un domaine de fréquence, l'utilisation d'un plan de masse permet de s'isoler d'éventuelles perturbation rayonnées

Exemple de norme CEM issue de la norme DO160 pour le domaine aéronautique (150kHz-30MHz)

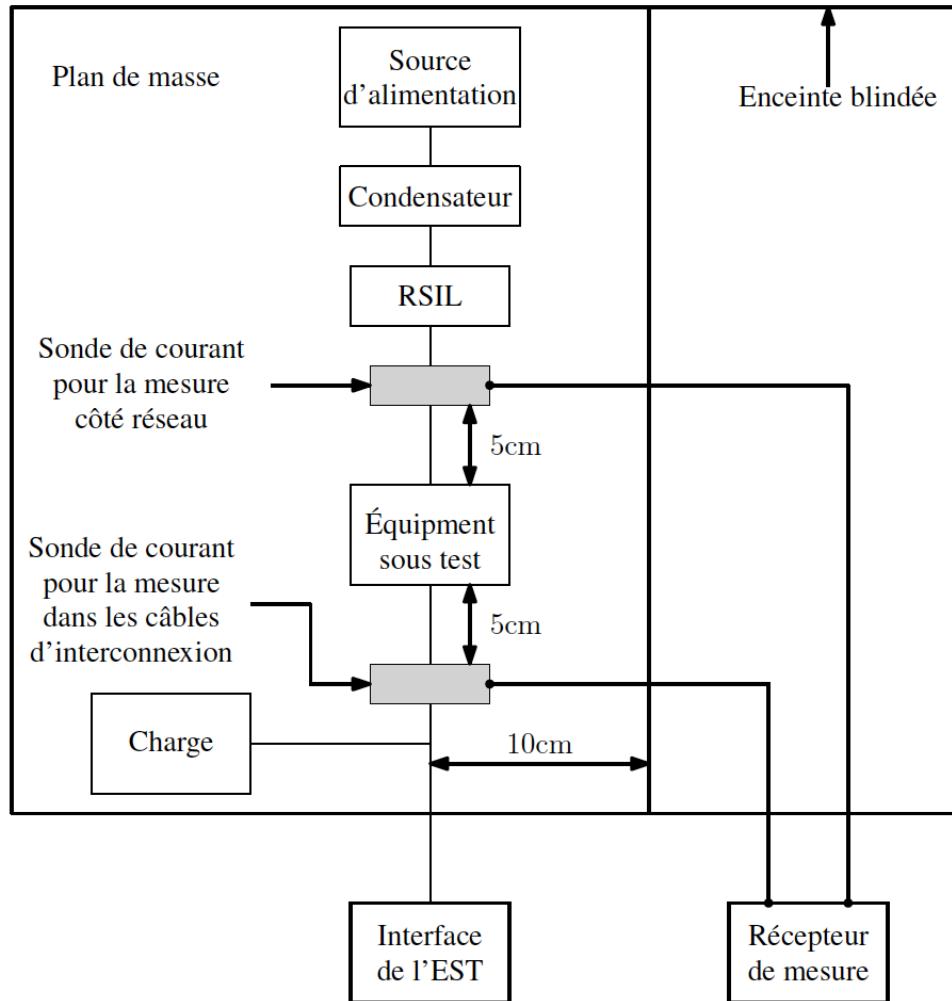


Filtres les perturbations du réseau et permettre la mesure de celles issues de l'EST

Impédance de MC en sortie d'un RSIL

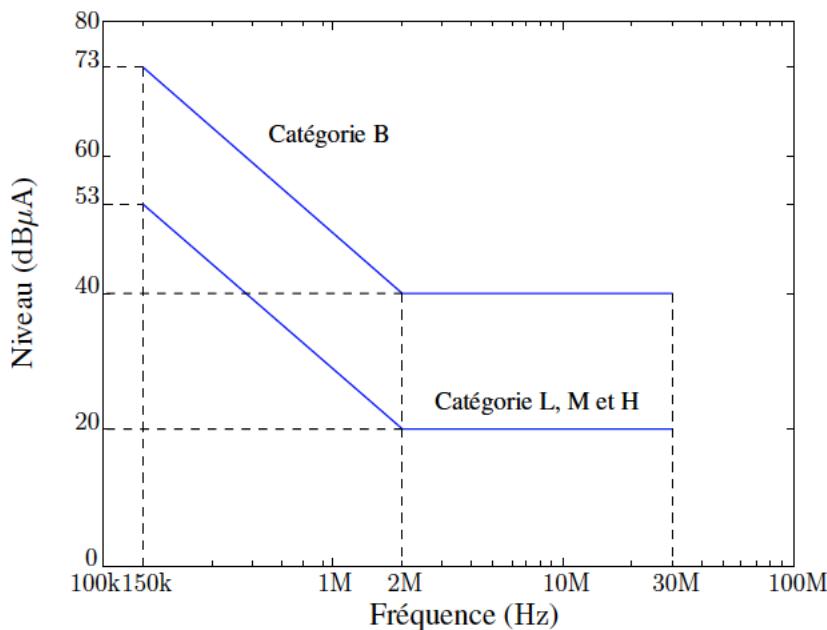


Exemple de dispositif expérimental

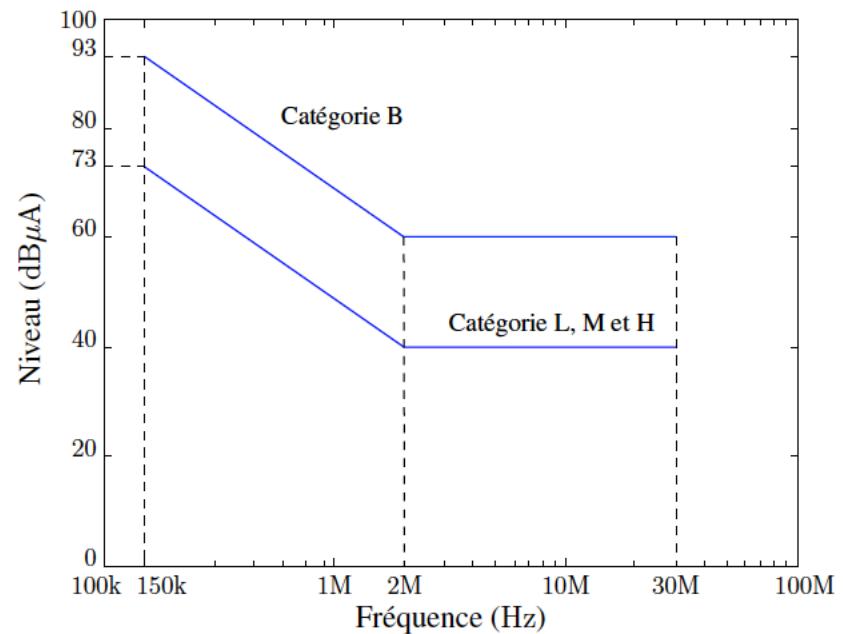


D'après la norme DO160 E

Exemple de niveaux d'émissions

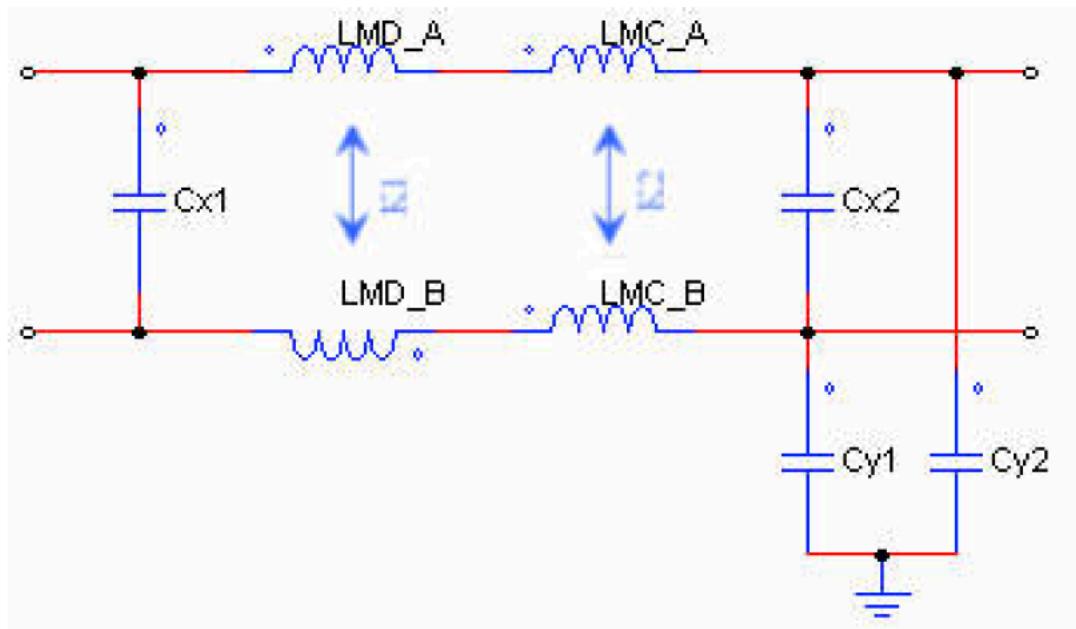


Niveaux côté réseau



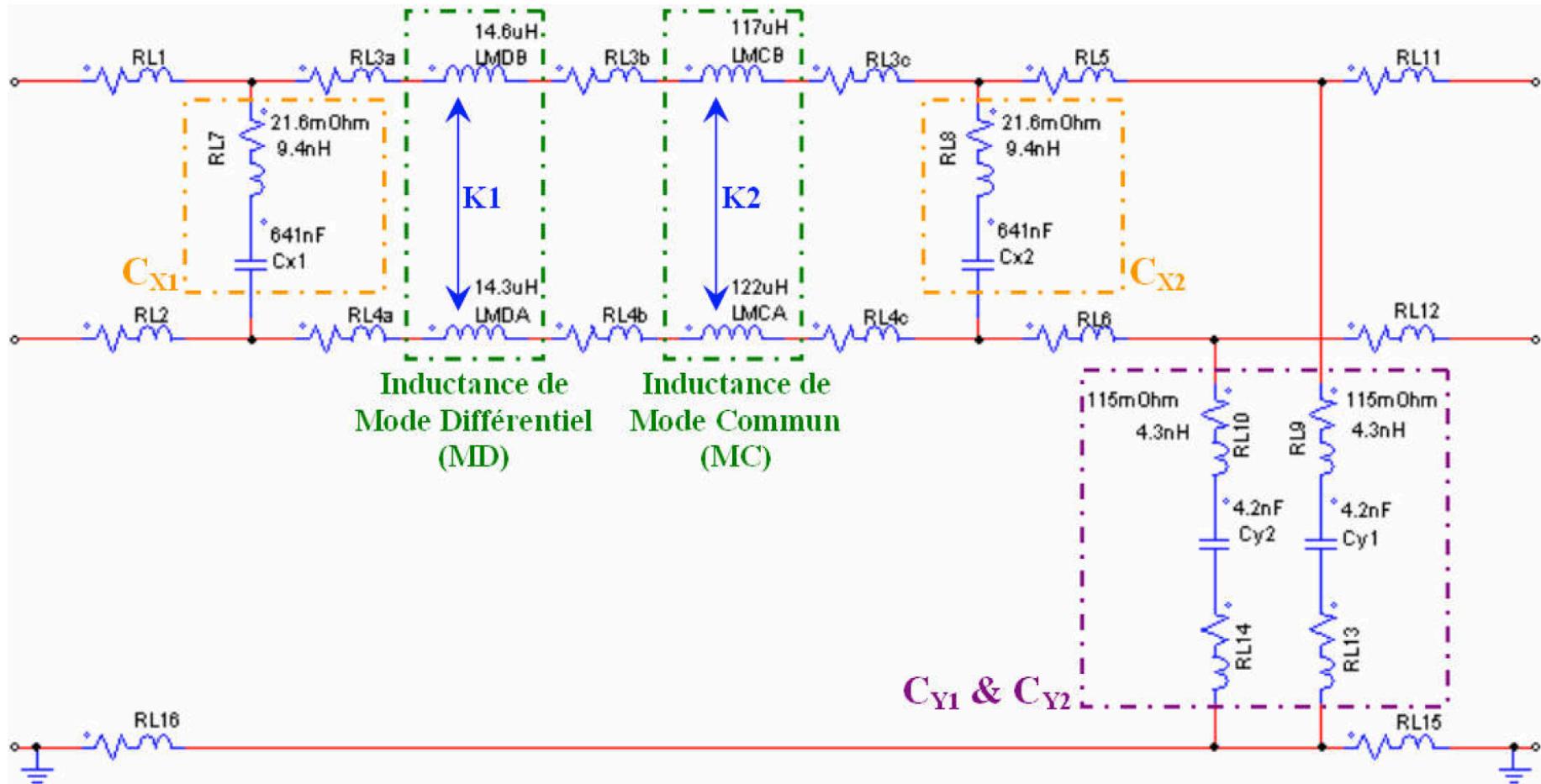
Niveaux dans les câbles d'interconnexions

Filtre CEM

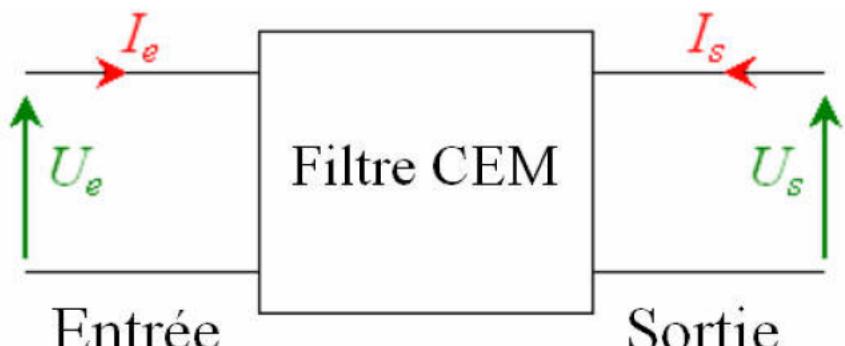


Filtre MC MD classique sans les éléments parasites des composants passifs

Circuit plus complet...



Analyse de l'impédance ou FT



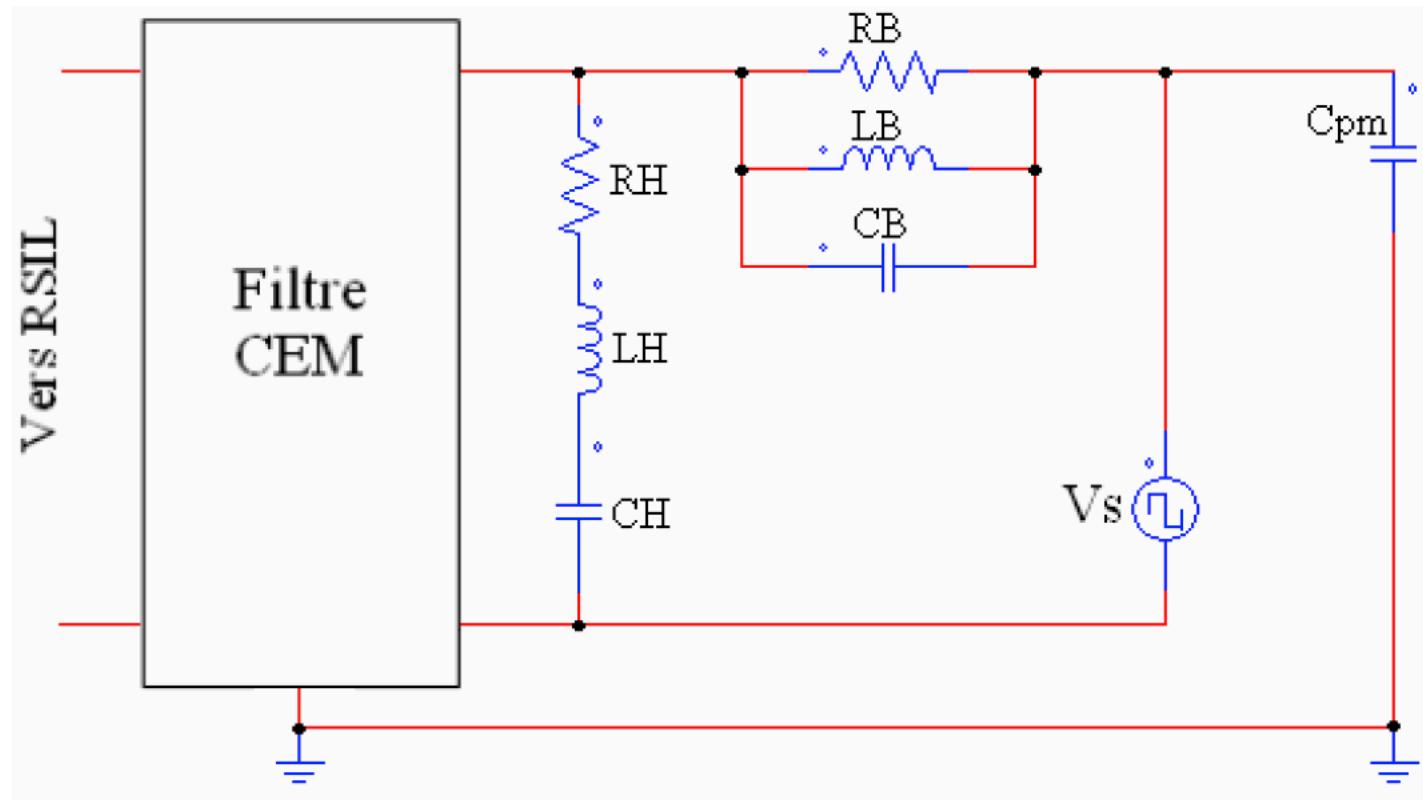
$$\begin{pmatrix} U_e \\ U_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} I_e \\ I_s \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} I_e \\ I_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} U_e \\ U_s \end{pmatrix}$$

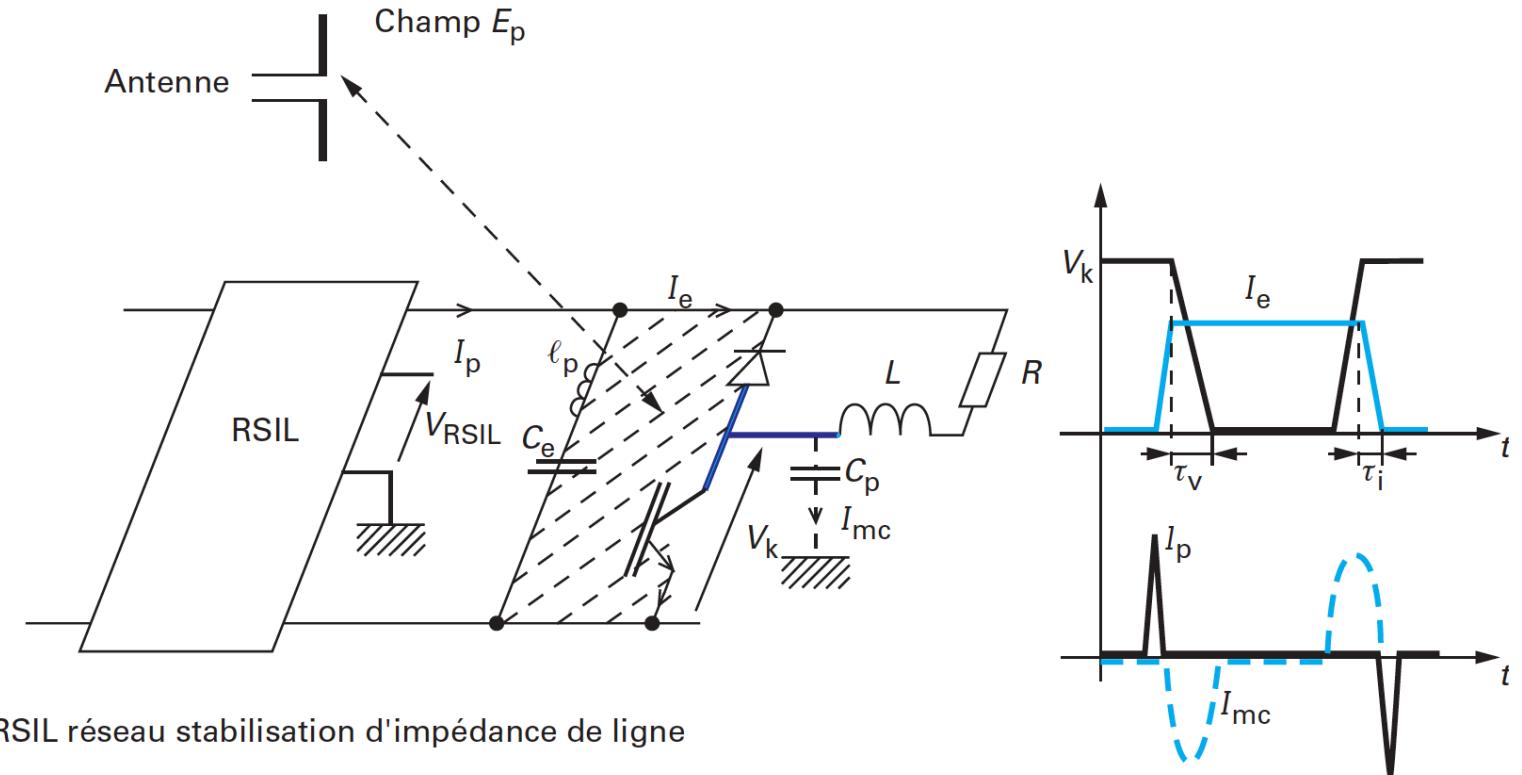
Applications limitées de la matrice d'impédance à part pour Z_{11} et Z_{22}
Problématiques de précisions de mesures pour Z_{12} et Z_{21}

$$FT_U = 20 \cdot \log \left(\left| \frac{V_s}{V_e} \right| \right) \quad , \quad FT_I = 20 \cdot \log \left(\left| \frac{I_s}{I_e} \right| \right)$$

Exemple de modèle « CEM » hacheur parallèle

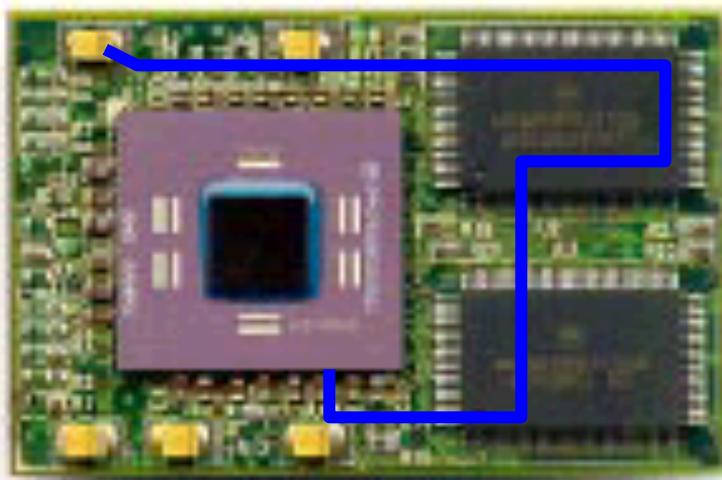


Cas du hacheur série



Mesures caractéristiques

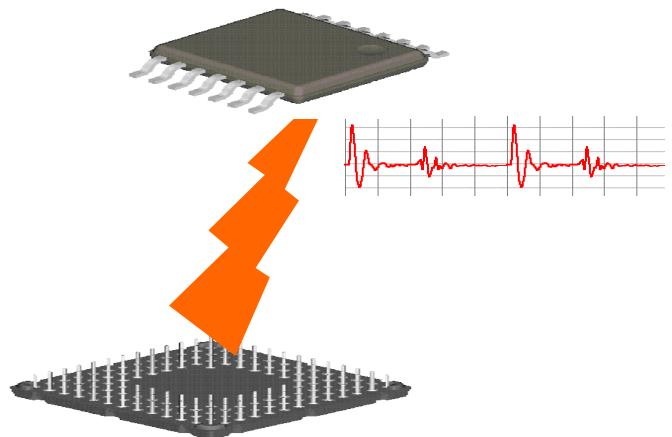
Mode conduit



*L'alimentation
Propage des parasites
Par conduction*

*Power Integrity (PI)
ou Signal Integrity → logiciel de routage*

Mode rayonné

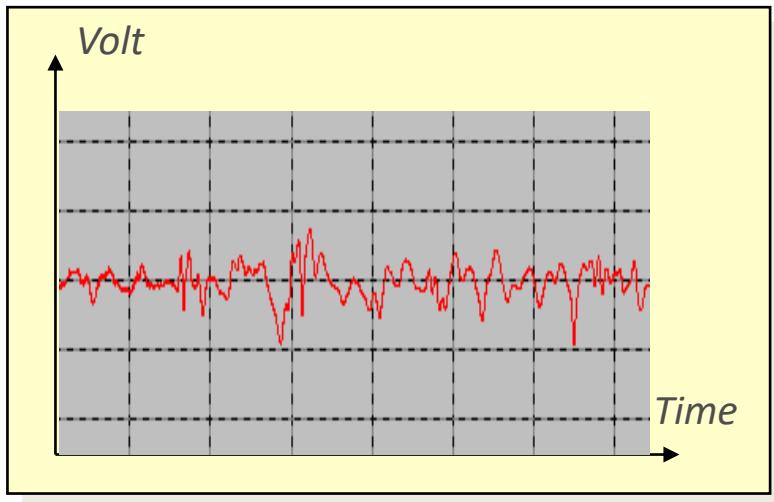


*L'onde EM se propage dans
l'air et autres matériaux*

Analogie conduit - Rayonné

<i>Domaine Electrique conduit</i>	<i>Domaine électromagnétique</i>
Voltage V (Volt)	E (V/m)
Current I (Amp)	H (A/m)
Impedance Z (Ohm)	Impedance (Ohm)
$Z=V/I$	$Z=E/H$
$P=I^2 \times R$ (watts)	$\vec{\pi} = \frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0}$ $P = \iint_S \vec{\pi} \cdot \overrightarrow{ds}$

Amplitude en dB et log de la fréquence



Mesures dans le domaine Temporel

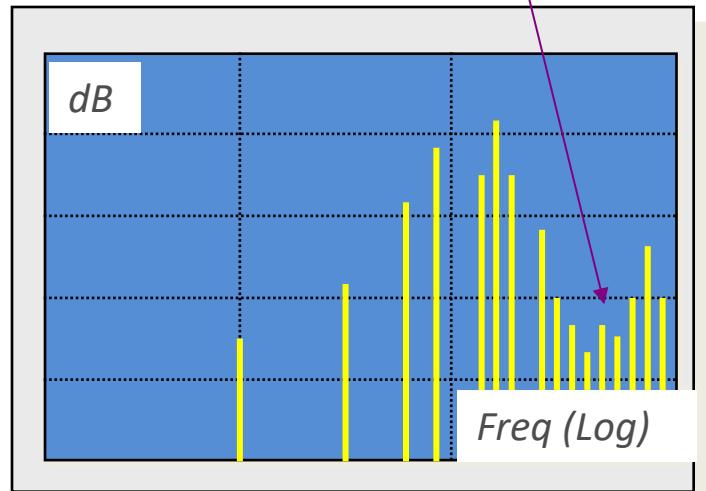


Oscilloscope



Transformée de Fourier

Distinction d'harmoniques de faibles amplitudes en HF (en dB)



Cover very large bandwidth

Mesures dans le domaine Fréquentiel



Analyseur de spectre

Des unités spécifiques

Unités de tension ou courants

Dynamique des signaux étendue en CEM
→ Utilisation des dB (decibel) et log (f)

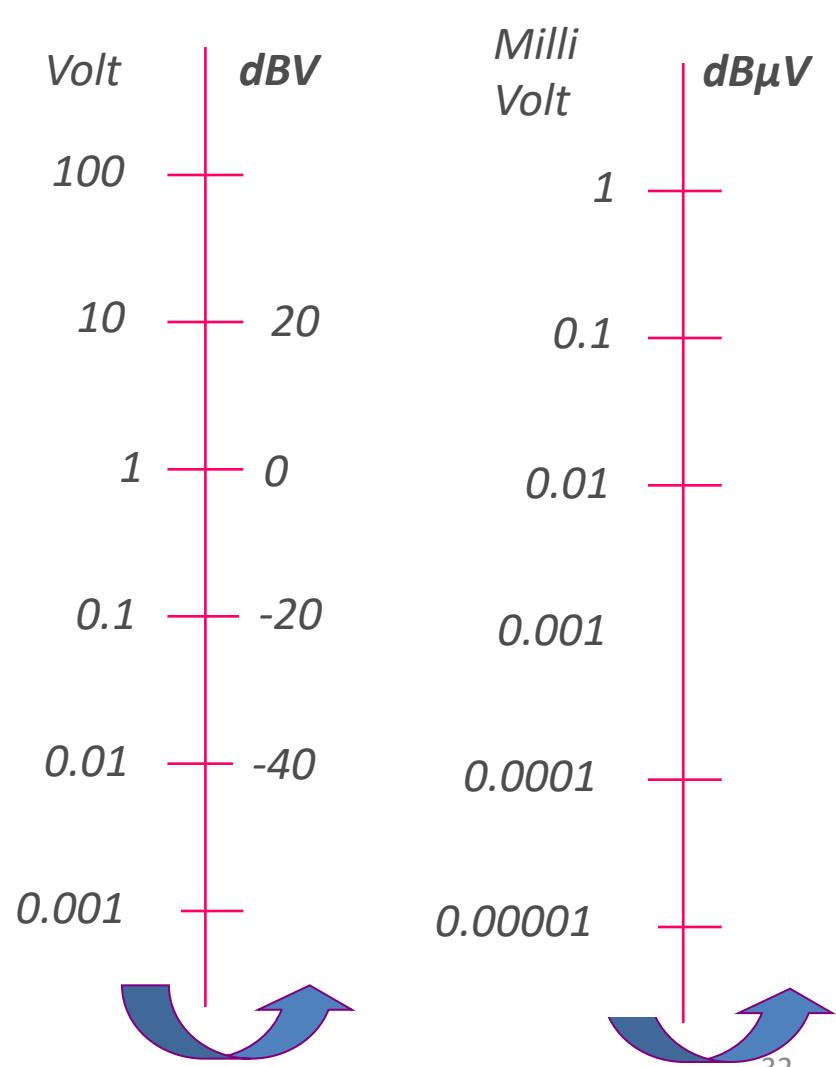
Par exemple dBV, dBA :

$$dBV = 20 \times \log(V)$$

$$dBA = 20 \times \log(A)$$

Et encore pour les très faibles signaux
dB μ V

$$V_{dB\mu V} = 20 \times \log\left(\frac{V}{1\mu V}\right) = 20 \times \log(V) + 120$$



Unité de puissance

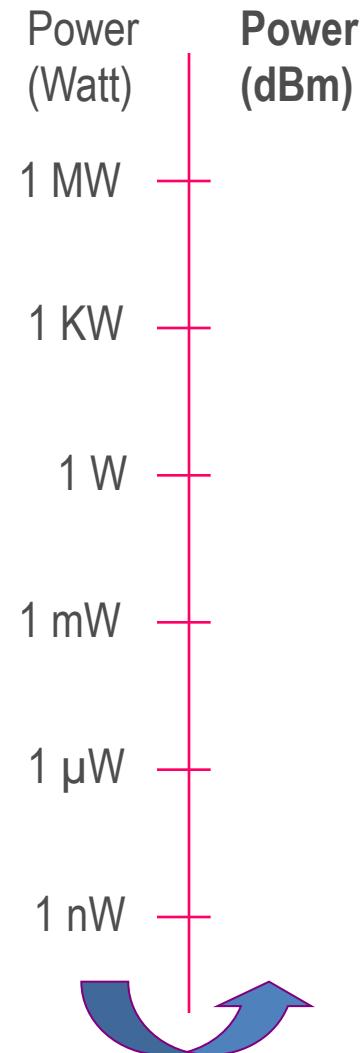
L'unité de puissance la plus répandue est le “dBm”
(dB milli-Watt)

$$P_{dBmW} = 10 \times \log\left(\frac{P_W}{1mW}\right) = 10 \times \log(P_W) + 30$$

Exercice: Unités spécifiques

$$1 \text{ mV} = \underline{\quad} \text{ dBμV}$$

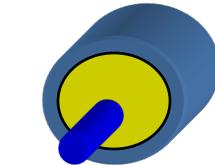
$$1 \text{ W} = \underline{\quad} \text{ dBm}$$



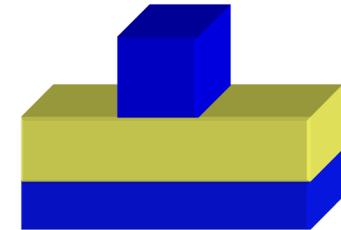
CONDUCTOR IMPEDANCE OR CHARACTERISTIC IMPEDANCE Z_0 :

- Du point de vue Electromagnétique

$$Z_0 = \frac{E}{H}$$



Coaxial line



Microstrip line

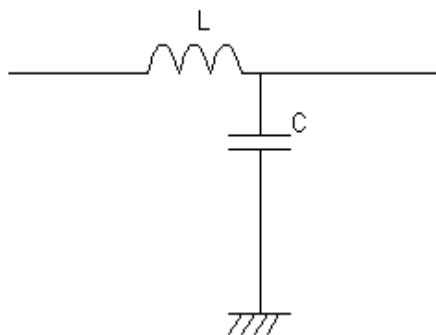
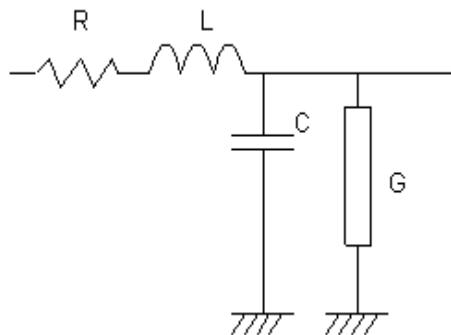
Lié à la géométrie du conducteur et de son isolation et aux matériaux

- Du point de vue électrique

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + jL\omega}{G + jC\omega}}$$

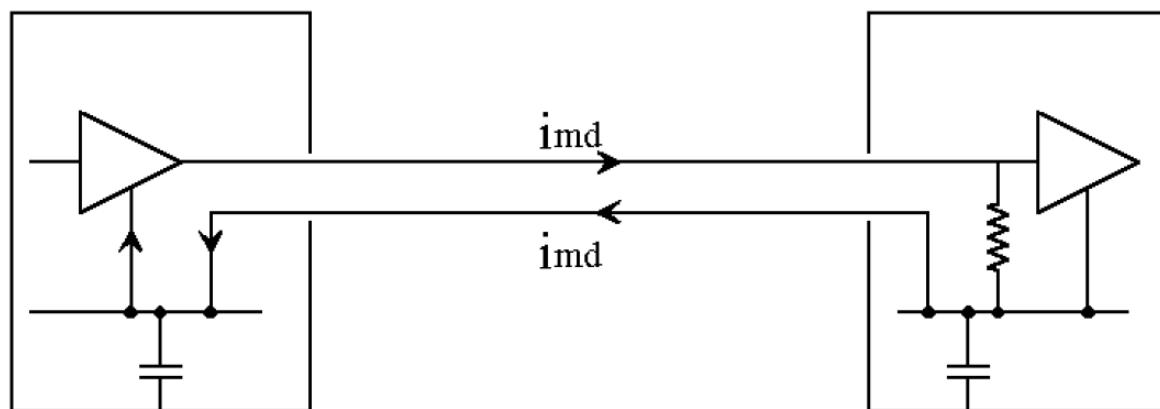
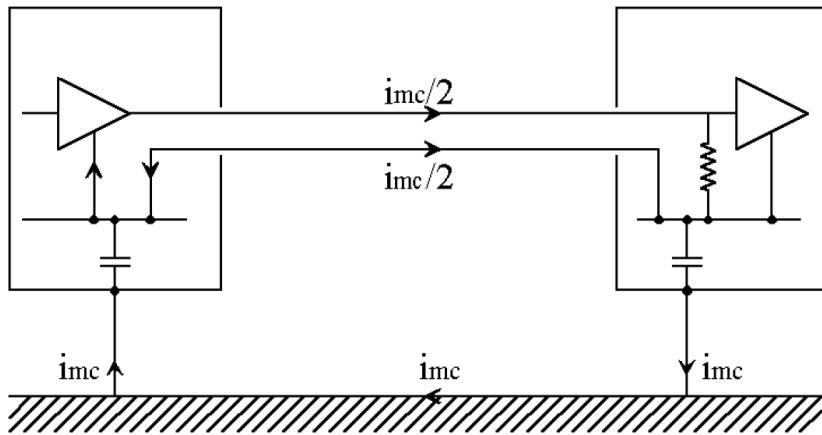
Ligne sans pertes

$$Z_0 \approx \sqrt{\frac{L}{C}}$$

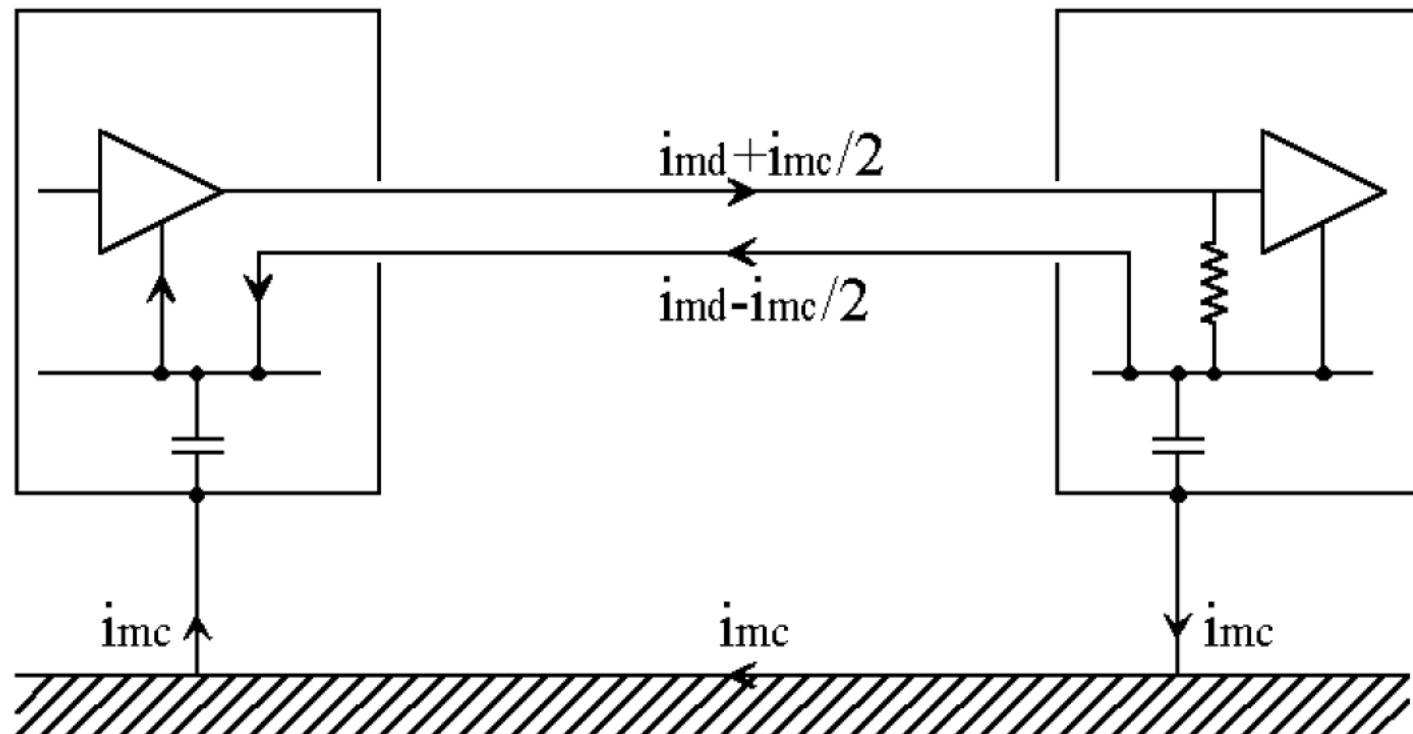


Circuit électrique équivalent

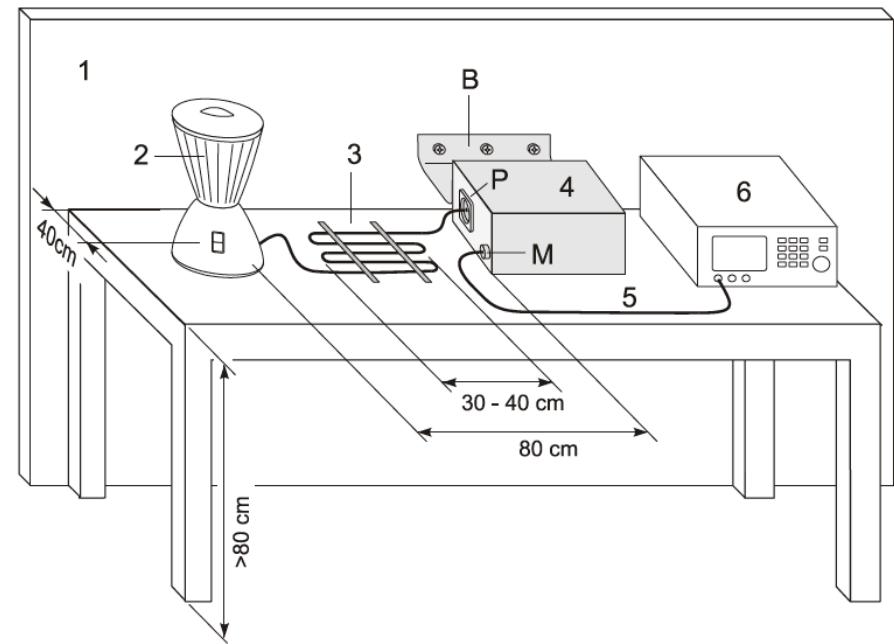
Perturbation conduite, rappels



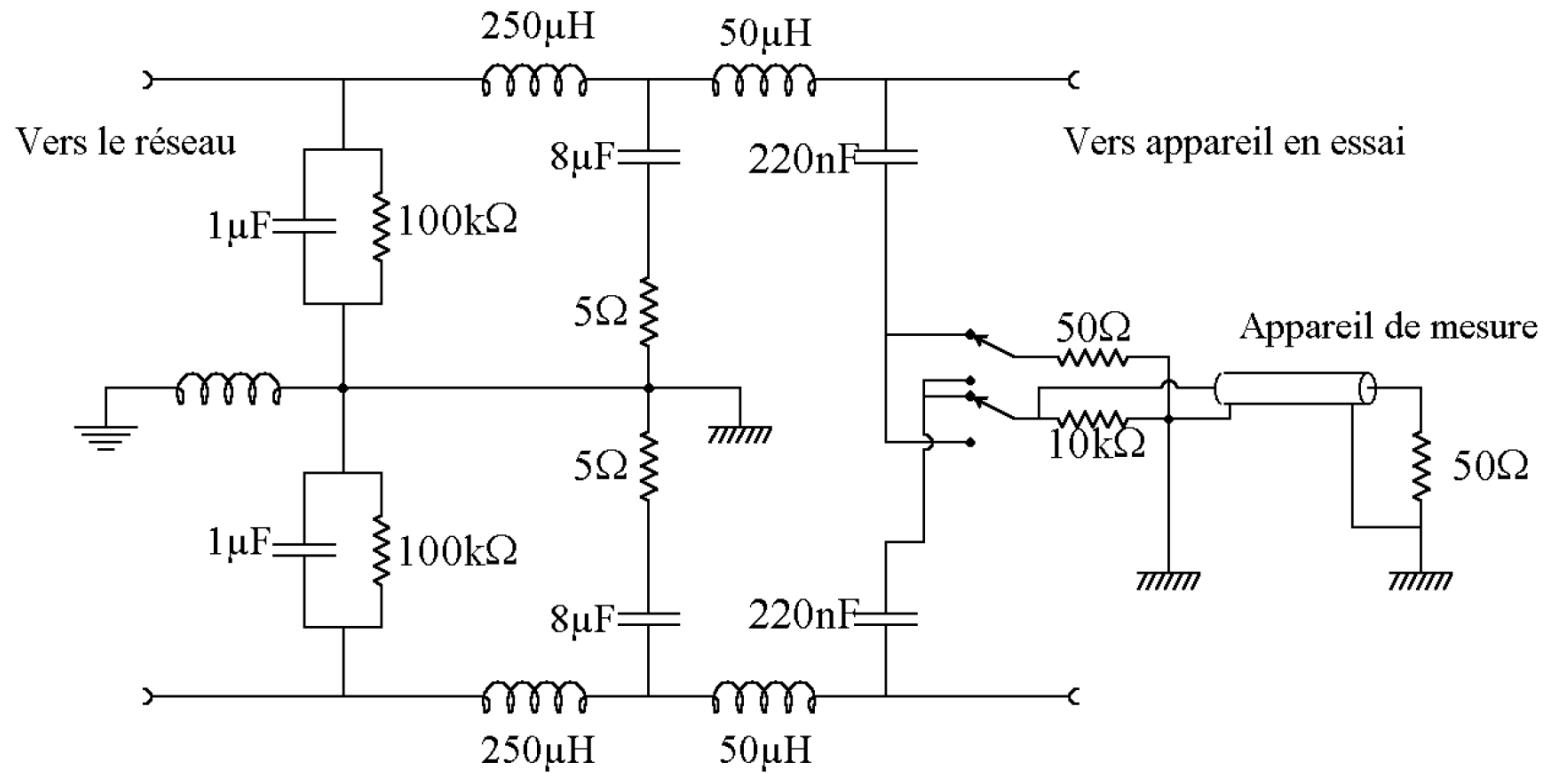
Superposition des modes



Mesure CEM Conduite

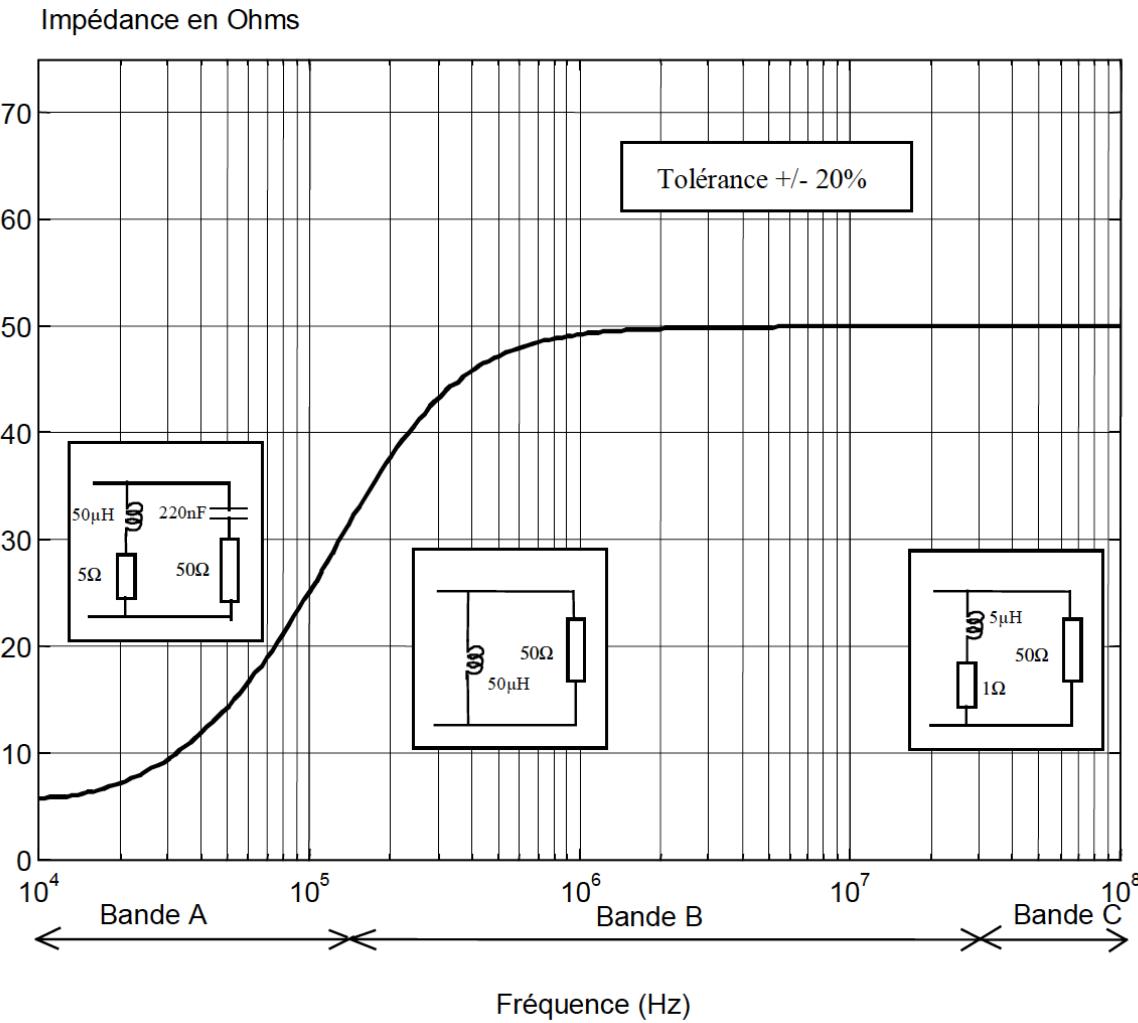


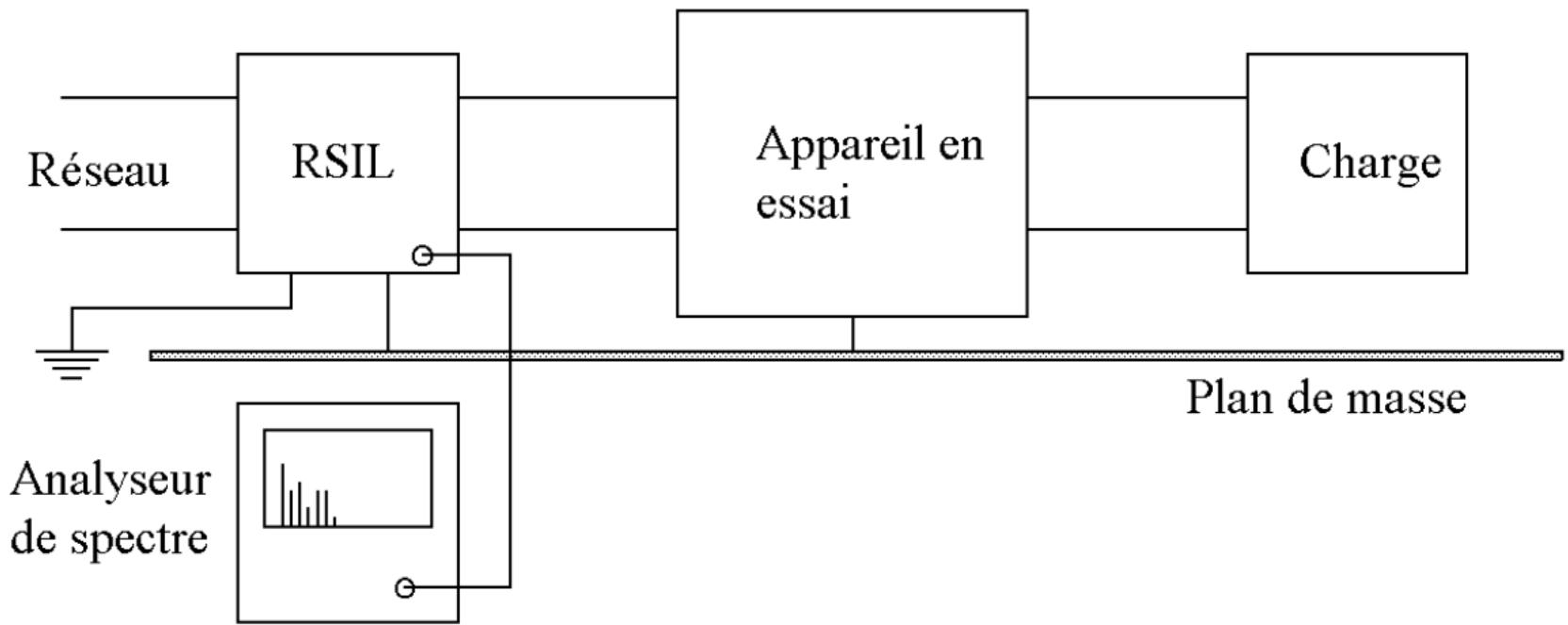
Rappel des fonctions du RSIL

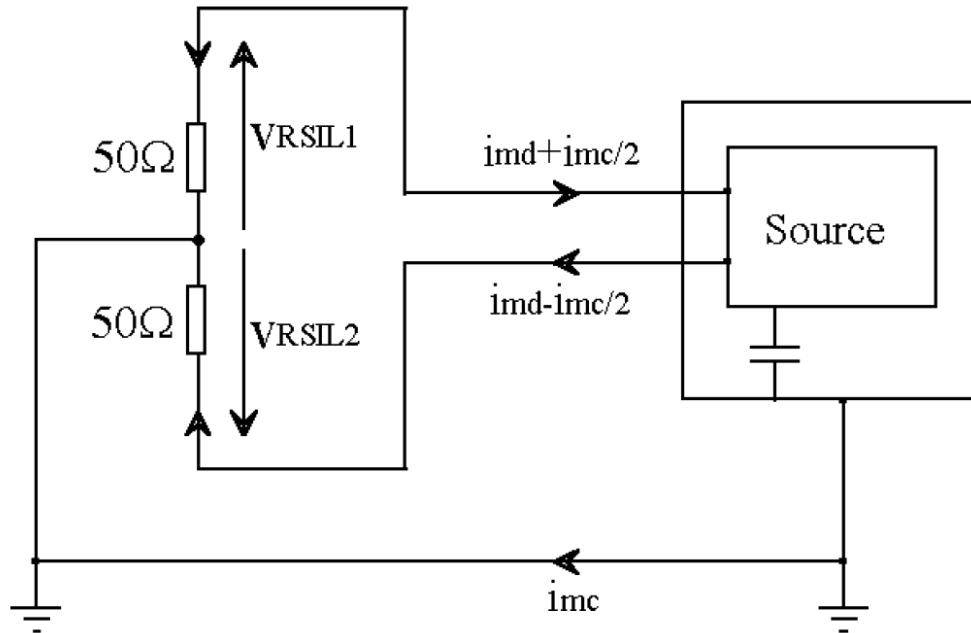


- Transfert de puissance (BF) sans atténuation
- Isoler les perturbations du réseau
- Permettre le couplage des perturbations de l'EST

Impédance d'un RSIL







$$V_{RSIL1} = -50 \cdot (i_{md} + i_{mc} / 2)$$

$$V_{RSIL2} = +50 \cdot (i_{md} - i_{mc} / 2)$$

Normes CEM

Au plan international, la Commission Electrotechnique Internationale (CEI) a créé un comité spécial, le Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques (CISPR) en vue de formuler les normes CEM. Les publications du CISPR sont généralement utilisées par les différents pays comme document de base pour l'établissement de leurs propres normes.

	Standards Européens	Titre	Equivalent international
Emission	EN 55011	Exigences sur l'émission des équipements Industriels, Scientifiques et médicaux	CISPR 11
	EN 55013	Exigences sur les récepteurs de radiodiffusion	CISPR 13
	EN55014	Exigences sur l'émission des équipements électroménagers et des outils portatifs	CISPR 14
	EN55015	Exigences sur l'émission des lampes fluorescentes et les luminaires	CISPR 15
	EN55022	Exigences sur l'émission des équipements de traitement de l'information	CISPR 22
	EN60555-1	Définitions des harmoniques, sous-harmoniques et du scintillement	IEC 555-1
	EN60555-2	Perturbations harmoniques provoquées par les équipements électroménagers et similaires.	IEC 555-2
	EN60555-3	Variations de tension provoquées par les équipements électroménagers et similaires.	IEC 555-3

Classes d'équipements

Classe A :

Appareils triphasés équilibrés et tout autre appareils à l'exception de ceux indiqués dans l'une des classes suivantes :

Classe B :

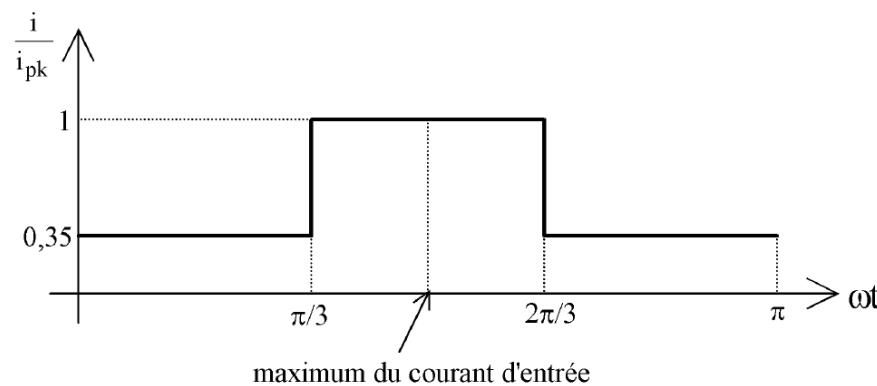
Outils portatifs (Utilisation de courte durée)

Classe C :

Appareils d'éclairage

Classe D :

Appareils ayant un courant d'entrée à forme d'onde durant une demi période du type de celle représentée sur la figure suivante durant au moins 95% du temps et dont la puissance absorbée est inférieure à 600W :



Limites d'émission

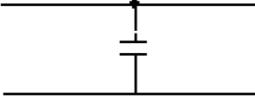
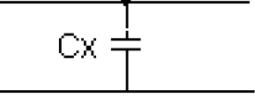
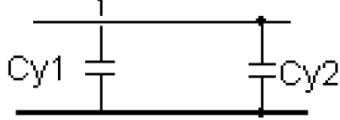
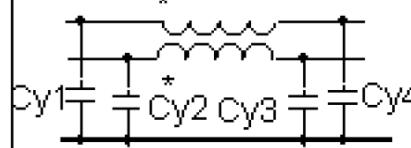
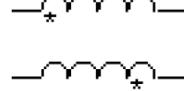
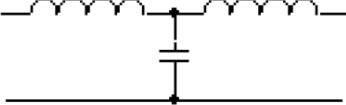
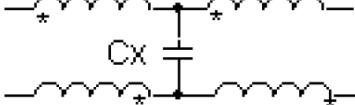
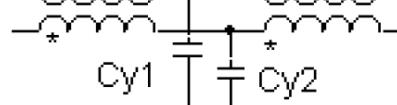
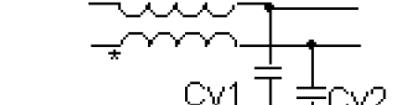
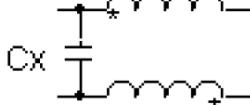
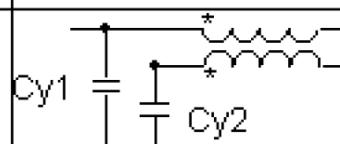
Gamme de Fréquences (MHz)	Limites Quasi-crête dB μ V	Limites Valeur moyenne dB μ V
0.15 à 0.50	79	66
0.50 à 30	73	60

Mesures aux bornes du RSIL classe A

Gamme de Fréquences (MHz)	Limites Quasi-crête dB μ V	Limites Valeur moyenne dB μ V
0.15 à 0.50	66 à 56	56 à 46
0.50 à 5	56	46
5 à 30	60	50

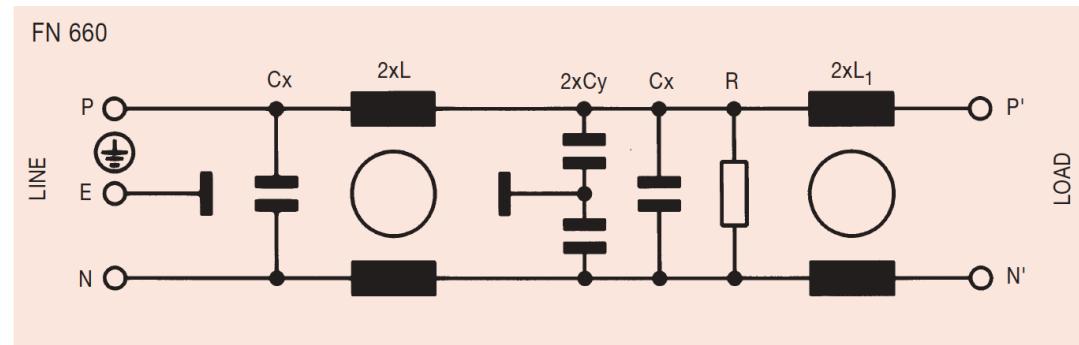
Mesures aux bornes du RSIL classe B

Structures des filtres « secteur »

Impédance de la source	structure typique du filtre	impédance de la charge	filtrage différentiel	filtrage de mode commun
élevée		élevée		
élevée		élevée		
faible		faible		
faible		faible		
faible		élevée		
élevée		faible		

Exemple de filtre

- Fonctions : Transmettre le signal de puissance (BF) et se prémunir des perturbations issues du réseau ou de l'équipement
- Fréquence de coupure déterminée par la valeur des composants
- Pertes d'insertion ou atténuation du filtre $A_{dB} = 20\log_{10}(V2/V1)$



- courants de service de 1 à 20 A
- bonne atténuation en modes différentiel et commun
- quatre types de connexions de sortie
- version pour appareils médicaux en option (type B)

Family	Connections				Current ratings at 40°C (25°) A	Inductance L/L1 mH	Housing	Weight g			
								/03	/06	/07	/10
FN 660 -1 ??	-	/06	/07	-	1 (1.15)	3/3	H21	-	115	125	-
FN 660 -3 ??	-	/06	/07	-	3 (3.4)	2/2	K1	-	170	180	-
FN 660 -6 ??	-	/06	/07	-	6 (6.9)	0.75/0.75	K1	-	170	180	-
FN 660 -10 ??	-	/06	/07	-	10 (11.5)	0.45/0.45	K21	-	230	240	-
FN 660 -16 ??	/03	/06	-	/10	16 (18.4)	0.44/0.44	K2	290	260	-	290
FN 660 -20 ??	/03	/06	-	/10	20 (23)	0.48/0.48	L1	600	590	-	640

Additional specifications

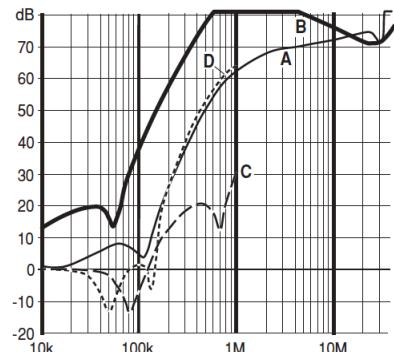
Filter type	Capacitance Cx nF	Capacitance Cy nF	Res. R MΩ	Maximum leakage μA/phase	Maximum operating voltage VAC	Operating frequency Hz	Hipot test voltage PN→E VAC	P→N VAC
Standard types B types (medical)	150	2.2	1 1	190 2	250 50/60	DC to 400	2000	1700
	150	-			250 50/60	DC to 400	2500	1700

MTBF at 40°C, 230V, per Mil-HB-217F: 350,000 hours (for VDE-approved current ratings).

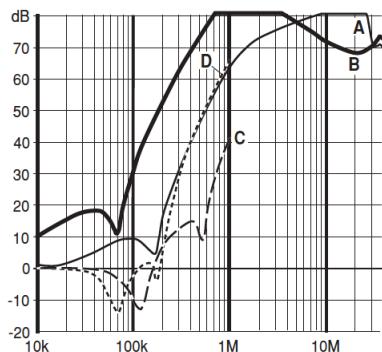
FN 660 insertion loss

Per CISPR 17; A = $50\Omega/50\Omega$ sym, B = $50\Omega/50\Omega$ asym, C = $0.1\Omega/100\Omega$ sym, D = $100\Omega/0.1\Omega$ sym

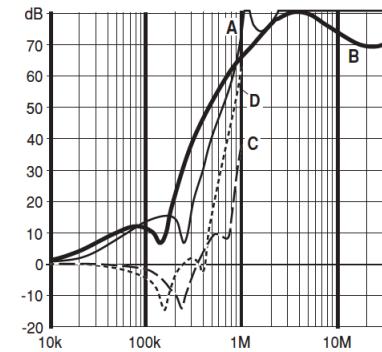
1 amp types



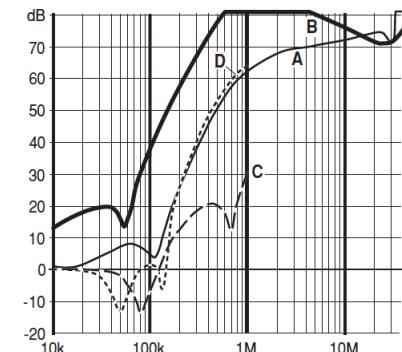
3 amp types



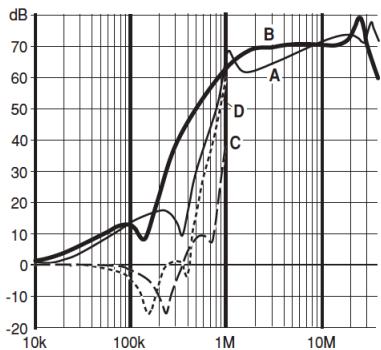
6 amp types



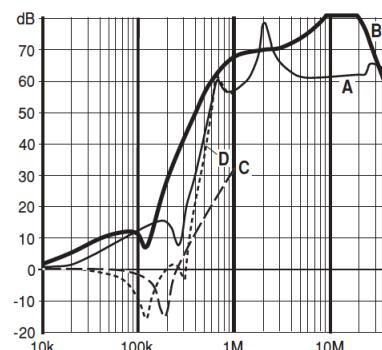
10 amp types



16 amp types



20 amp types



Protection Foudre

- Choc de foudre direct
- Choc de foudre indirect
- Varistances (MOV)
- Eclateurs
- Diodes à avalanche contrôlées

DOMMAGES DÙS A LA FOUDRE

■ COUP DIRECT SUR LA STRUCTURE => Cas majorant:

- Claquages et destruction des systèmes électriques par passage de très forts courants.
- Remontées de très hauts potentiels à la base des bâtiments, pylônes, tours,
- Phase ATTACHEMENT : Impulsions de courant: Quelques 10 KA
Champ électrique: Quelques 100 KV/m
- Phase ARC EN RETOUR : Impulsions de courant: 50 à 300 KA
Champ électrique et magnétique

■ COUPS DE PROXIMITE => environ 5Kms du coup direct

- Champ électrique E de quelques KV/m,
- Gros champs magnétiques induits H dans les boucles de masses de quelques centaines A/m,
- Le haut gradient de courant dans la terre développe de fortes ddp sur le sol (qqs 1000V)
=> Engendre un courant de sol,

LES EFFETS POTENTIELS

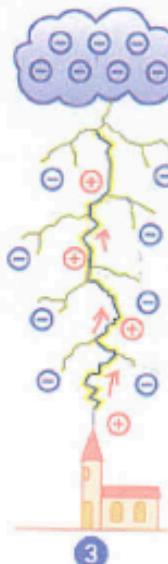
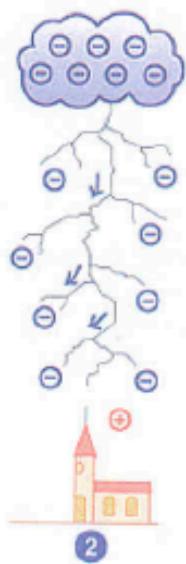
Foudre : effets directs

- **MECANIQUE:**
 - Onde de choc**
 - délamination des composites
 - Magnétostriiction**
 - déformation de pièces métalliques
- **THERMIQUE:**
 - Effet joule**
 - perforation des métaux
 - pyrolyse des composites
- **Etincelage dans les réservoirs**
- **Claquage sur des joints**

LES EFFETS POTENTIELS

- Couplage électromagnétique du courant de foudre avec les câbles, masses communes => Tension et courants induits sur les équipements
 - Même préoccupation que pour les HIRF
 - Endommagements => Coup sévère
 - Dysfonctionnement => Multiple « stroke » et « burst »

PHENOMENOLOGIE DU FOUDROIEMENT



2 CAS

- Nuage ↔ Sol
- Nuage ↔ Nuage

NUAGE ORAGEUX

CREATION DE CHARGES ELECTRIQUES

Convection

Gravité

SEPARATION DES CHARGES

Claquage

Avalanche e-

FORMATION DE TRACEURS

ARC EN RETOUR

Coup de foudre négatif descendant et précédé d'une première décharge (le traceur)

Décharge qui s'accroît et formation d'effluves au sol avec champ E de 400 à 500 KV/m

Point de rencontre entre le traceur descendant et l'effluve montante => Production d'une décharge de grande intensité (Arc en retour)

PHENOMENOLOGIE DU FOUDROIEMENT

■ Niveau Kéraunique: Nombre de jours par an où le tonnerre a été entendu



10 à 40 en France (20 en moyenne)

100 en Floride

200 en Indonésie

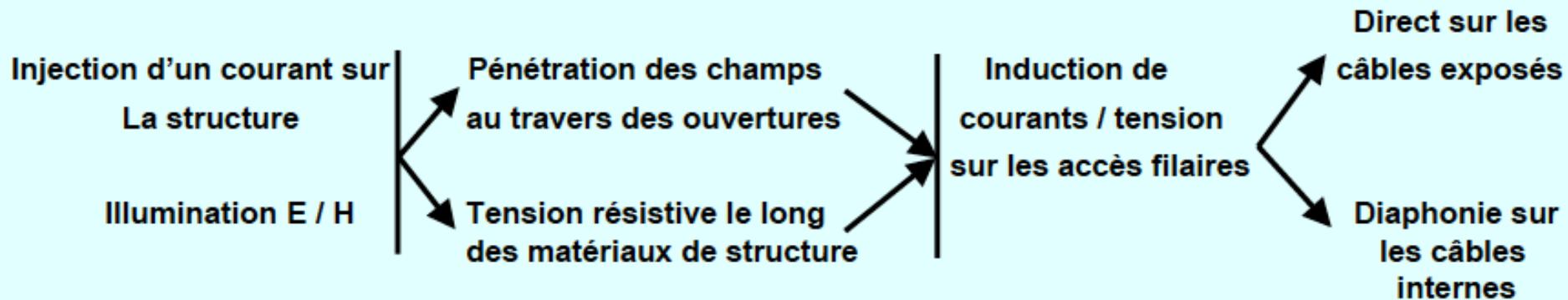
STRATEGIE DE PROTECTION

Effets Directs

- ELOIGNER LA MENACE => PARATONNERRE
- DETERMINER LES ZONES A RISQUE ET
 - PROTEGER LES MATERIAUX
 - ECOULER LES COURANTS
 - EVITER LES ETINCELAGES
- Exemple en aéronautique:
 - Définition des zones à risques
 - Continuité électrique des structures
 - Protection des surfaces composites par un maillage de bronze
 - Bandes de métallisation pour écouler le courant dans les zones à faible conductivité (radôme)
 - Traitement anti-étincelage des réservoirs toujours localisés en zone à faible risque d'attachement

STRATEGIE DE PROTECTION

Effets Indirects



PROTECTION DES CABLAGES

- Disposition
- Nature des liaisons
- Ecran
- Blindage

COMPROMIS

- Coût / masse
- Fiabilité / Maintenabilité

PROTECTION DES EQUIPEMENTS

- Ecrétage
- Filtrage
- Logiciel (Filtrage, codage)

■ LES CAUSES:

- Enclenchement ré-enclenchement d'une ligne,
- Coupures ou déclenchements de courants inductifs ou capacitifs (moteurs, fours,),
- Arrachage d'arc (soufflage, fusion,...),
- Commutation électronique de puissance (thyristors, triacs,...),
- Apparition, disparition de défaut,
- Perte de charge ou variations brutale de charge.

■ LES EFFETS:

Apparition de surtensions internes transitoires dépendant du réseau électrique, de la génération et de la charge. (Effets de décharge > effets de rebond).

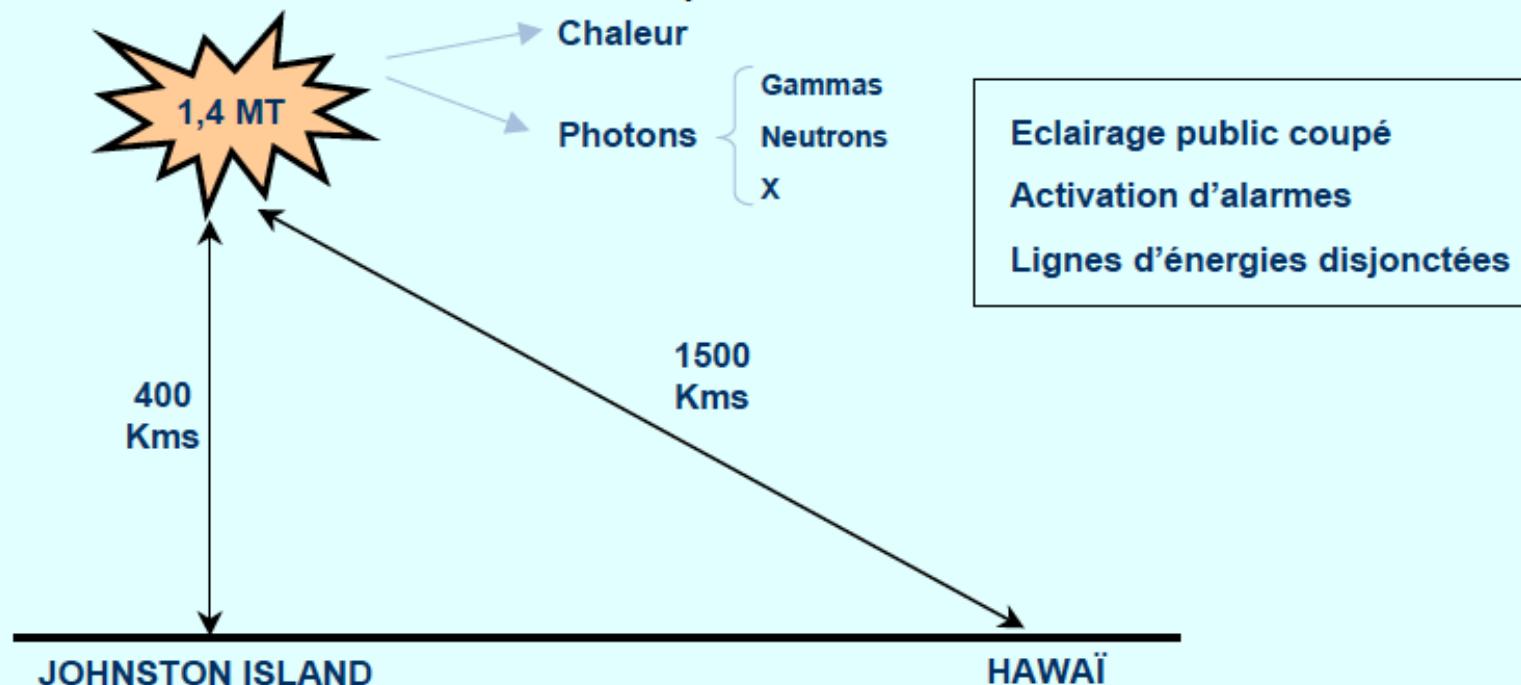
■ SENSIBILITE DES VICTIMES:

- Dépend du comportement de l'impédance victime dans la plage de fréquence agressée,
- D'où les essais en Tension (injection capacitive) et les essais en Courant (injection selfique),
- Système digital => Importance de l'amplitude,
- Système analogique => Importance du nombre d'impulsions (intégration),
- Circuits TTL => Importance de la raideur du front,
- Circuits C-MOS => Importance de l'énergie de l'impulsion

IEMN : Impulsion Electromagnétique Nucléaire

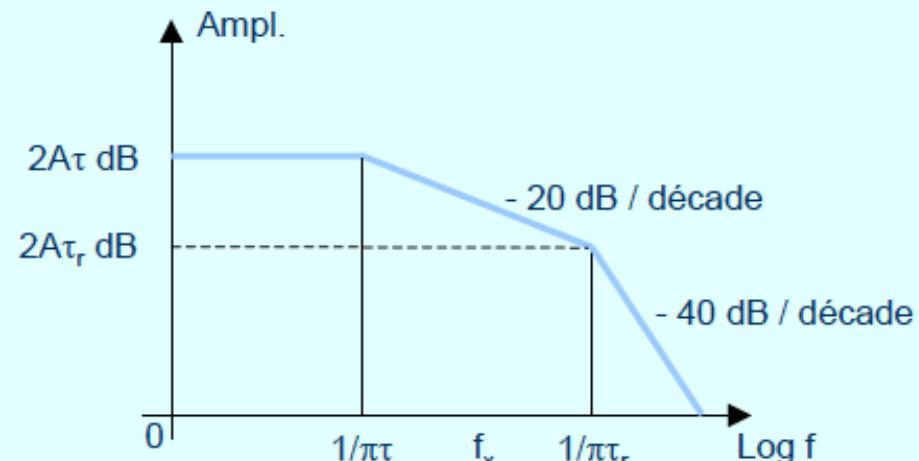
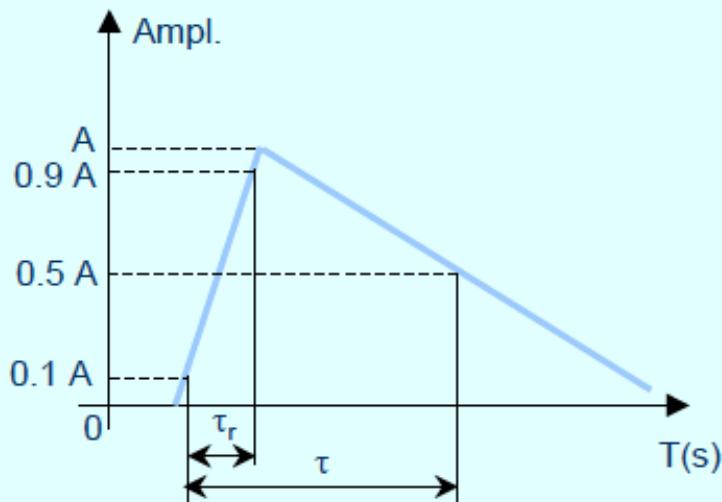
- Impulsion électromagnétique de forte amplitude produite lors de l'explosion d'une bombe nucléaire.
 - Deux types d'impulsions:
 - BA (Basse altitude au niveau du sol) => Effet de souffle, effet thermique et rayonnement ionisants
 - HA (Haute altitude) nommée IEMN-HA => Effets destructeurs inexistant au niveau du sol, par contre dommages importants aux systèmes de production et de distribution d'électricité, ainsi qu'aux systèmes de communication et de télécommunication

EXPERIENCE HARDTACK USA: 2 explosions nucléaires à 700 Miles d'Hawaï en 1958



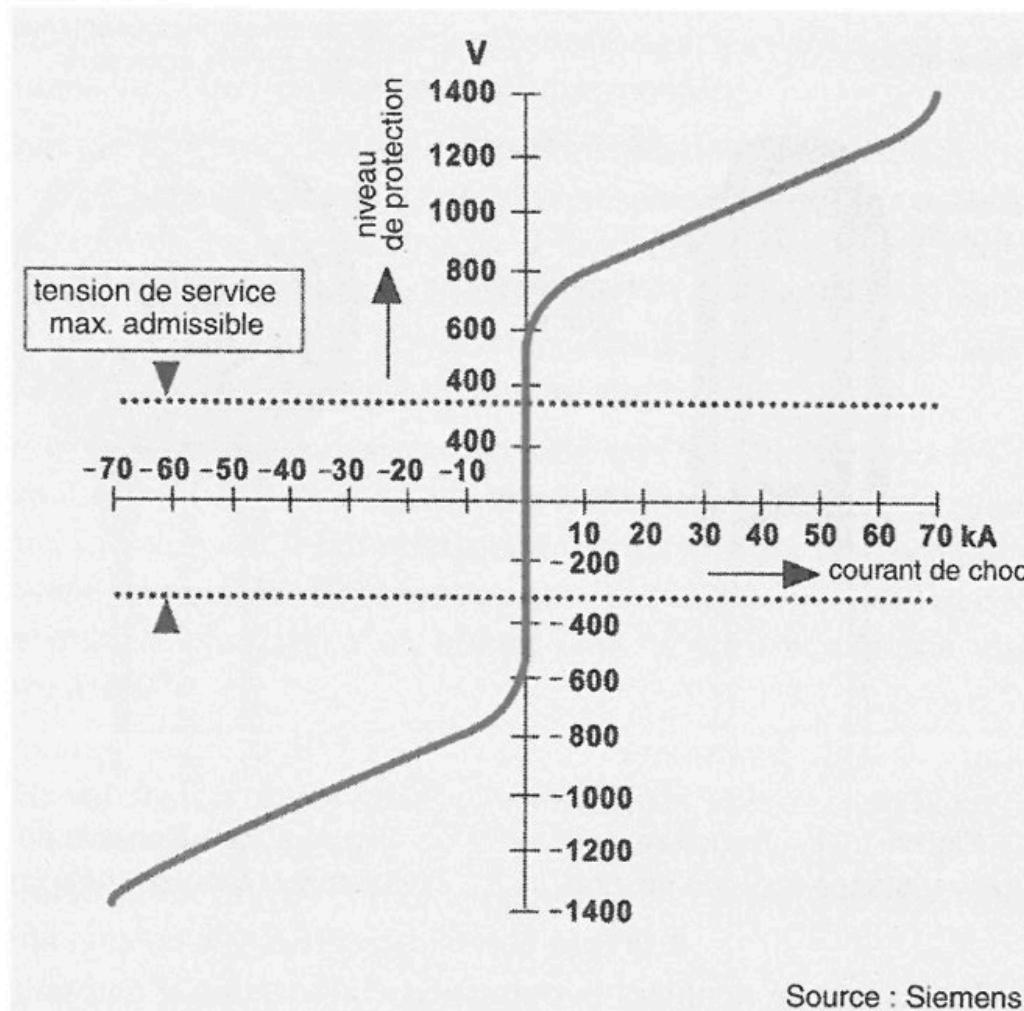
Comparaison des sources de surtensions

■ FOUDRE – IEMN – DES - SDM:



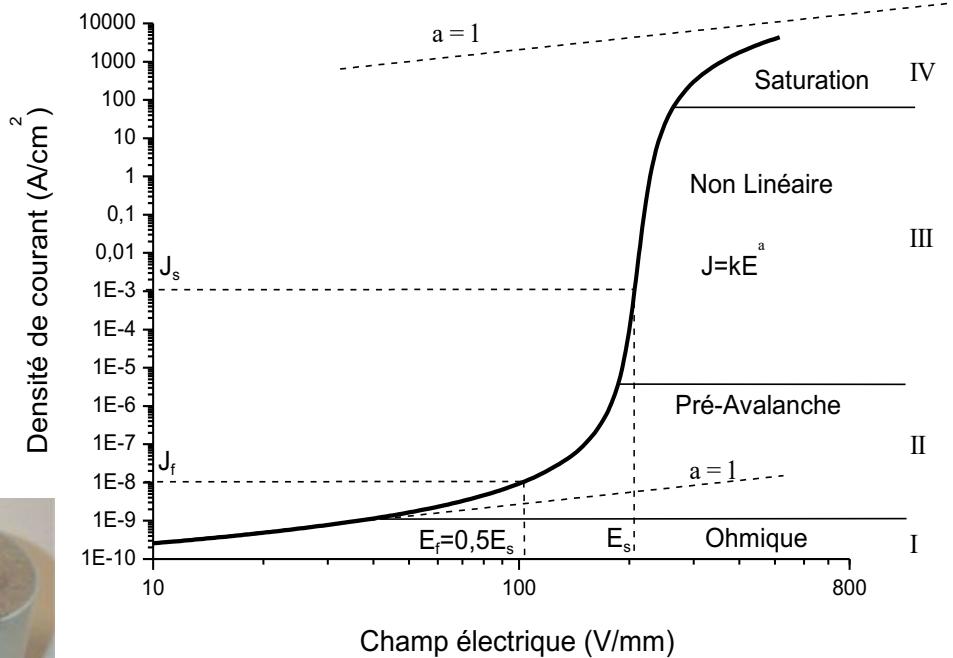
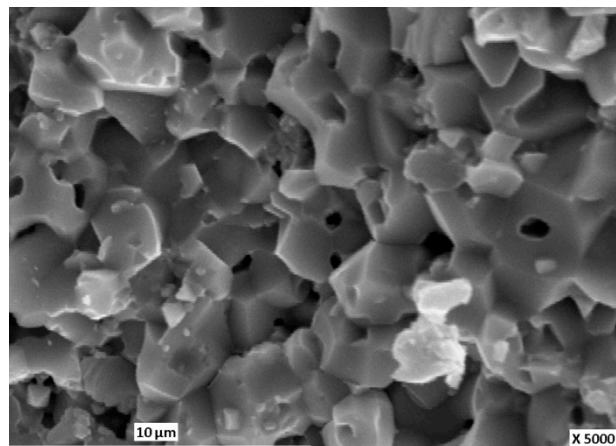
	τ_r	τ	$1/\pi\tau$	$1/\pi\tau_r$	A	$2A\tau$
Foudre	1,25 μ s	50 μ s	6,5 KHz	250 KHz	50 KA	5KA/KHz
IEMN	10 ns	250 ns	1,3 MHz	32 MHz	100 KV/m	50V/m/MHz
DES	10 ns	25 ns	13 MHz	32 MHz	1200 V/m à 30 cm	30V/m/MHz
SDM	5 ns	50 ns	6,4 MHz	64 MHz	4 KV	0,4V/KHz

Caractéristique $V(I)$

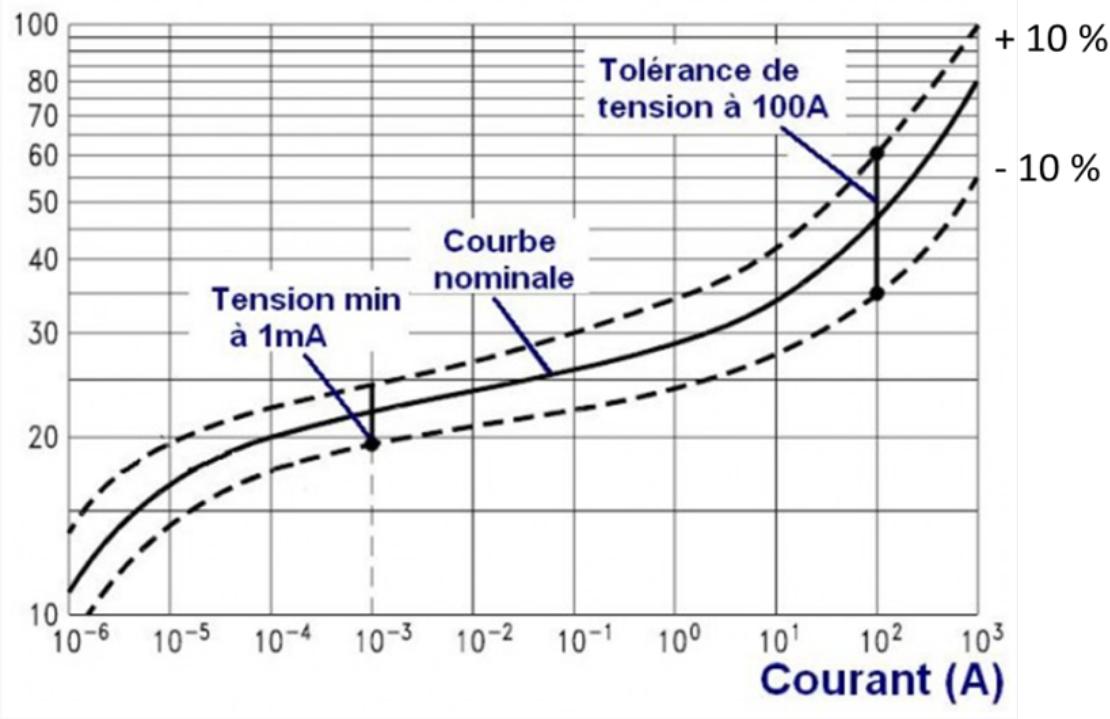


Source : Siemens

Disk varistors, monolithic, leaded



Tension (V)

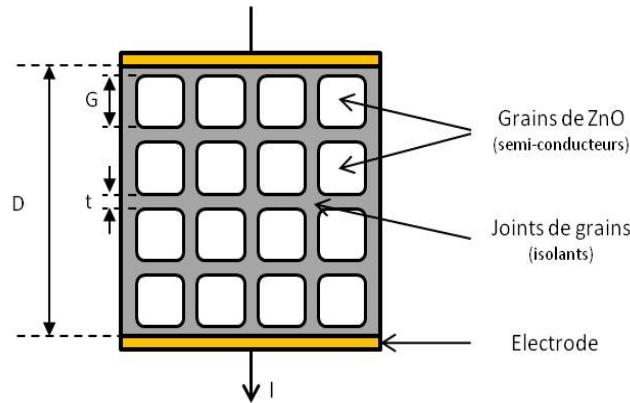


	Maximum Rating (85°C)					Characteristics (25°C)				
	Continuous		Transient			Varistor Voltage at 1mA DC		Maximum clamping voltage (8-20μs)		Typical capacitance
SIOV	V_{RMS} [V]	V_{DC} [V]	I_{max} (8/20μs) [A]	W_{max} (2ms) [J]	P_{max} [W]	V_v (1mA) [V]	ΔV_v (1mA)	V_c max (ic) [V]	I_c [A]	C_{typ} (f=1MHz) [pF]
S14K14	14	18	1000	4	0,1	22	+/- 10%	43	10	9950

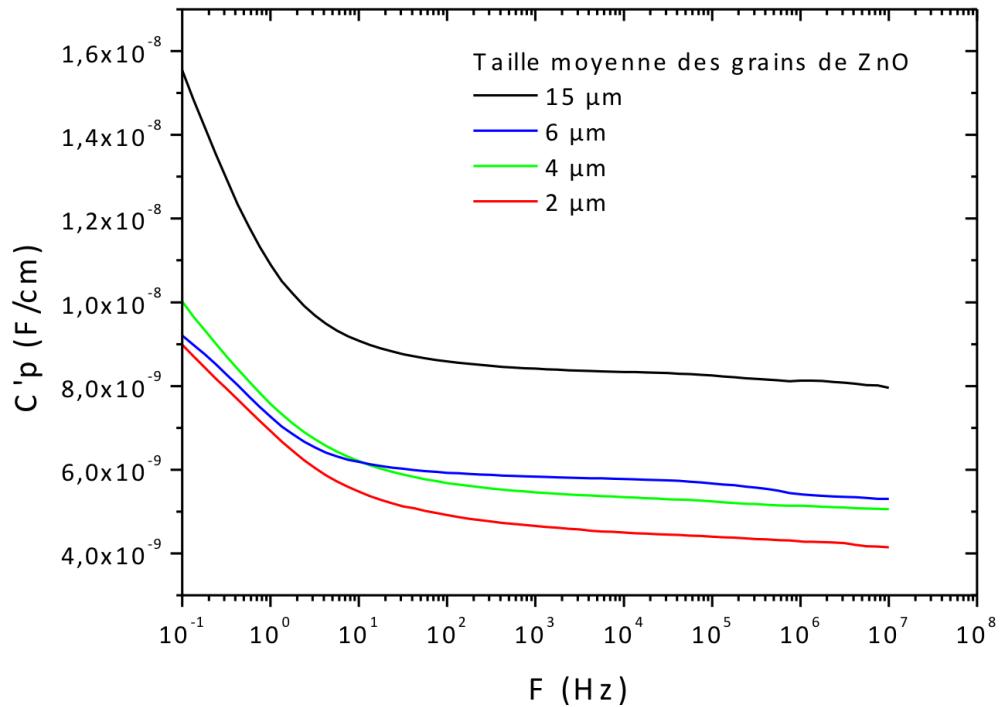
Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-1 : Paramètres électriques issus des

datasheets varistance EPCOS S14K14

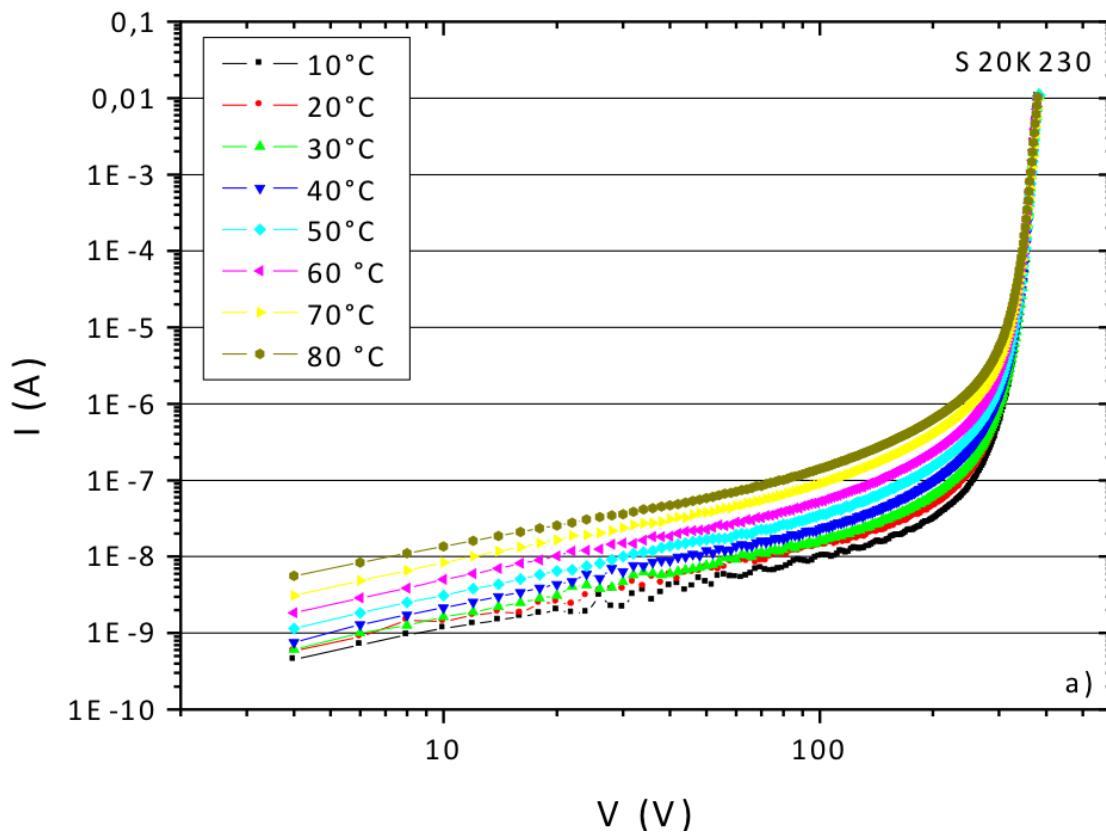
Capacité « parasite »



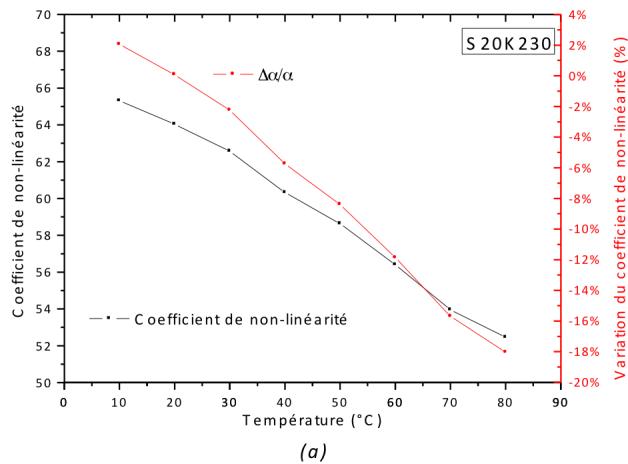
$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_{jg} \frac{G \cdot S}{t \cdot D}$$



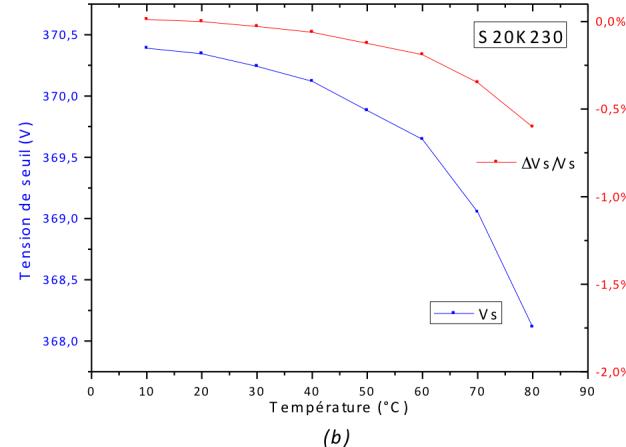
Effet de la température



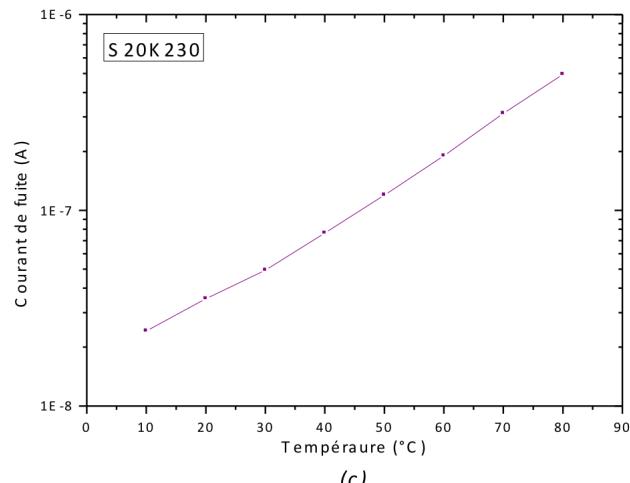
Variations des paramètres...



(a)

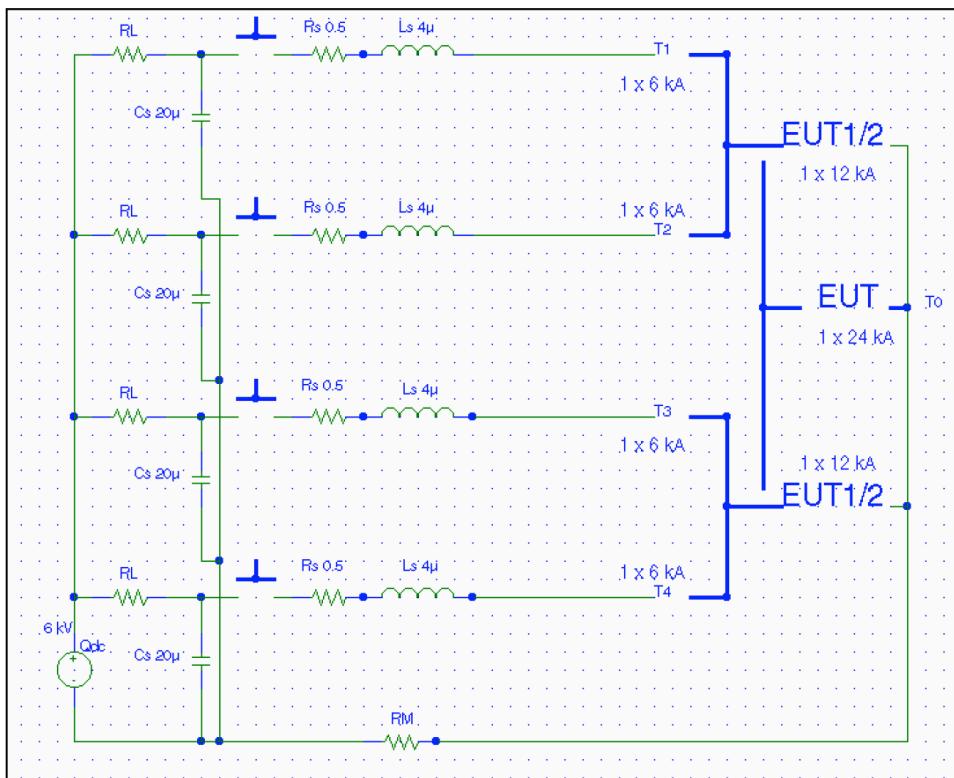


(b)

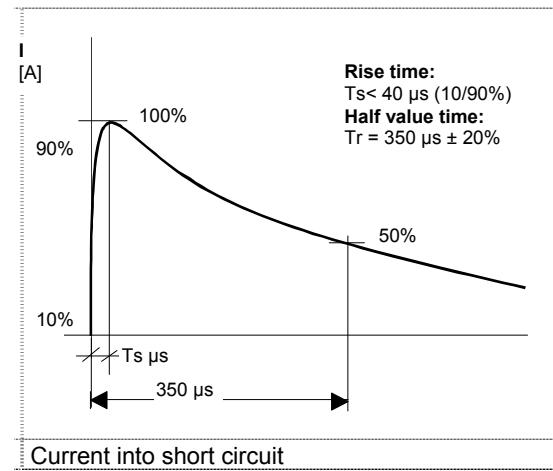
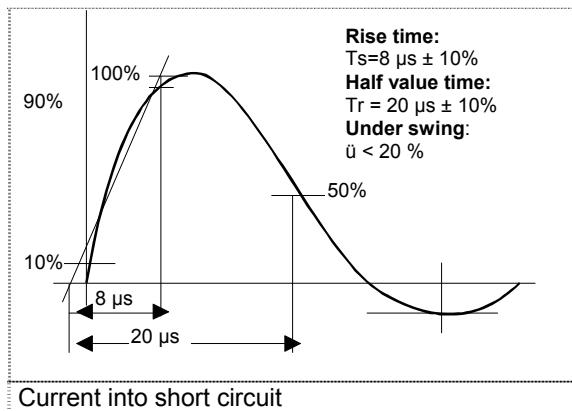


(c)

Générateur de courant



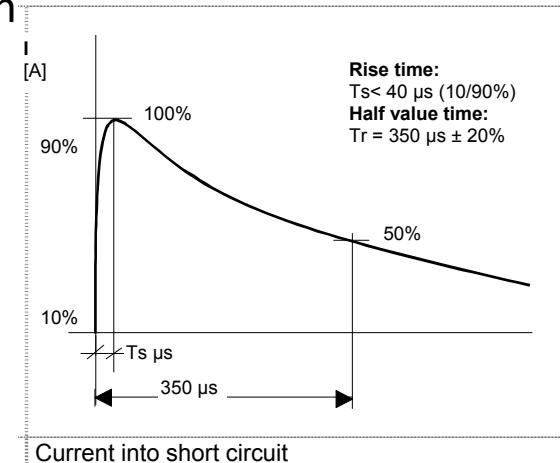
Ondes Bi-exponentielle



10/350 μ s : 2X 4,4 kA ou 8,8kA $\rightarrow I_a=16kJ/Ohm$

8/20 μ s : 2X12kA ou 24kA $\rightarrow I_a=6.5kJ/Ohm$ environ

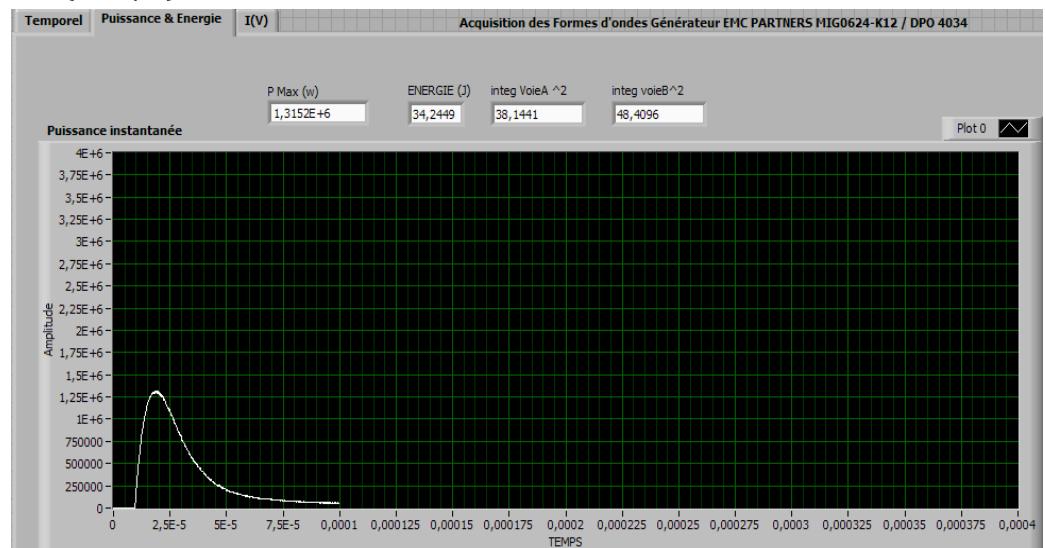
100/1000 μ s : 2X2kA ou 4kA (High range)



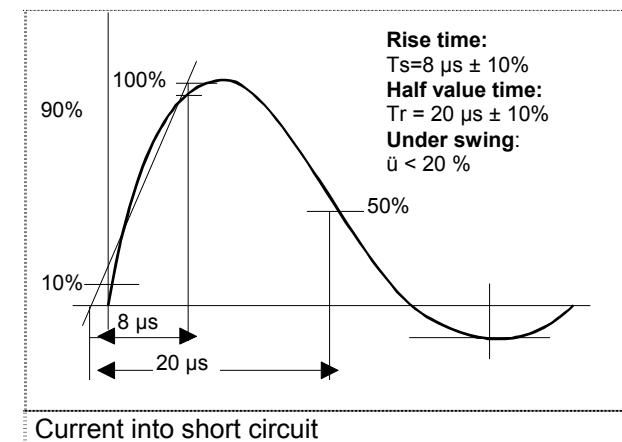
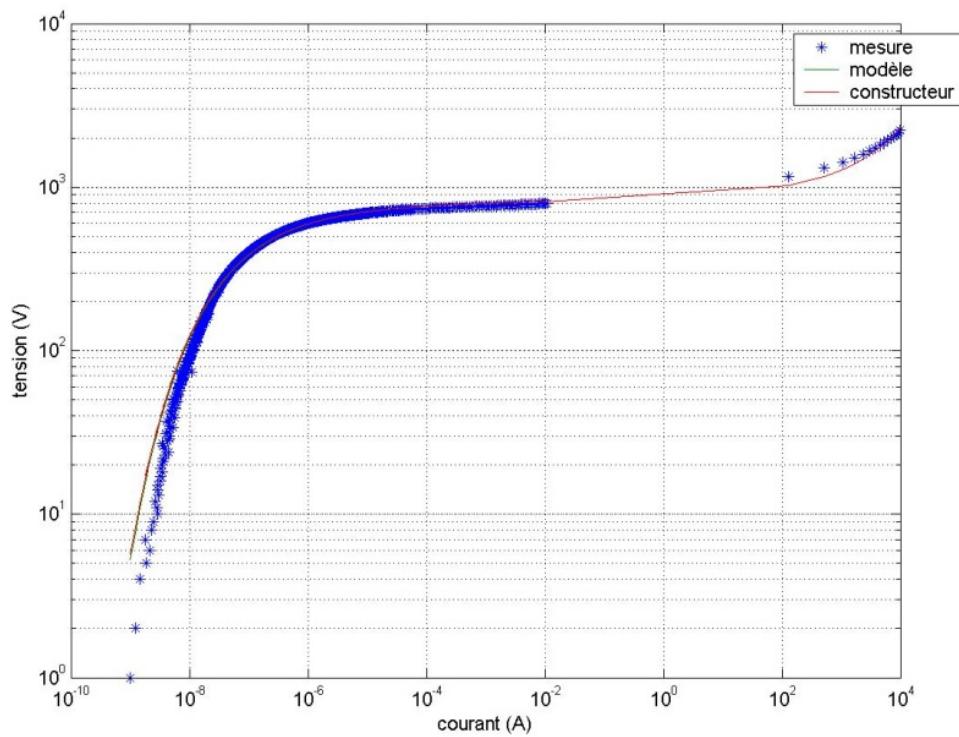
Mesures en TP...



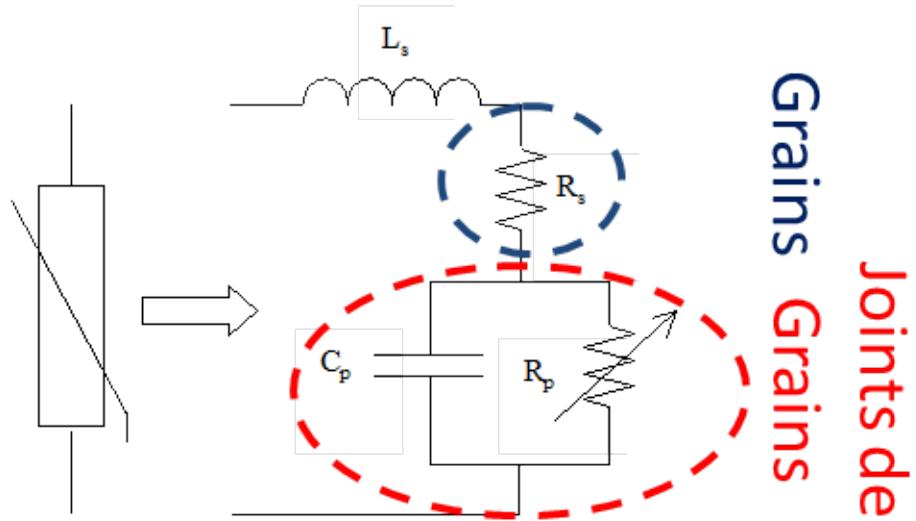
Figure 1 : Voie1 tension (600V/1V) voie 2 courant(2kA/V)



Caractéristique expérimentale et modélisation



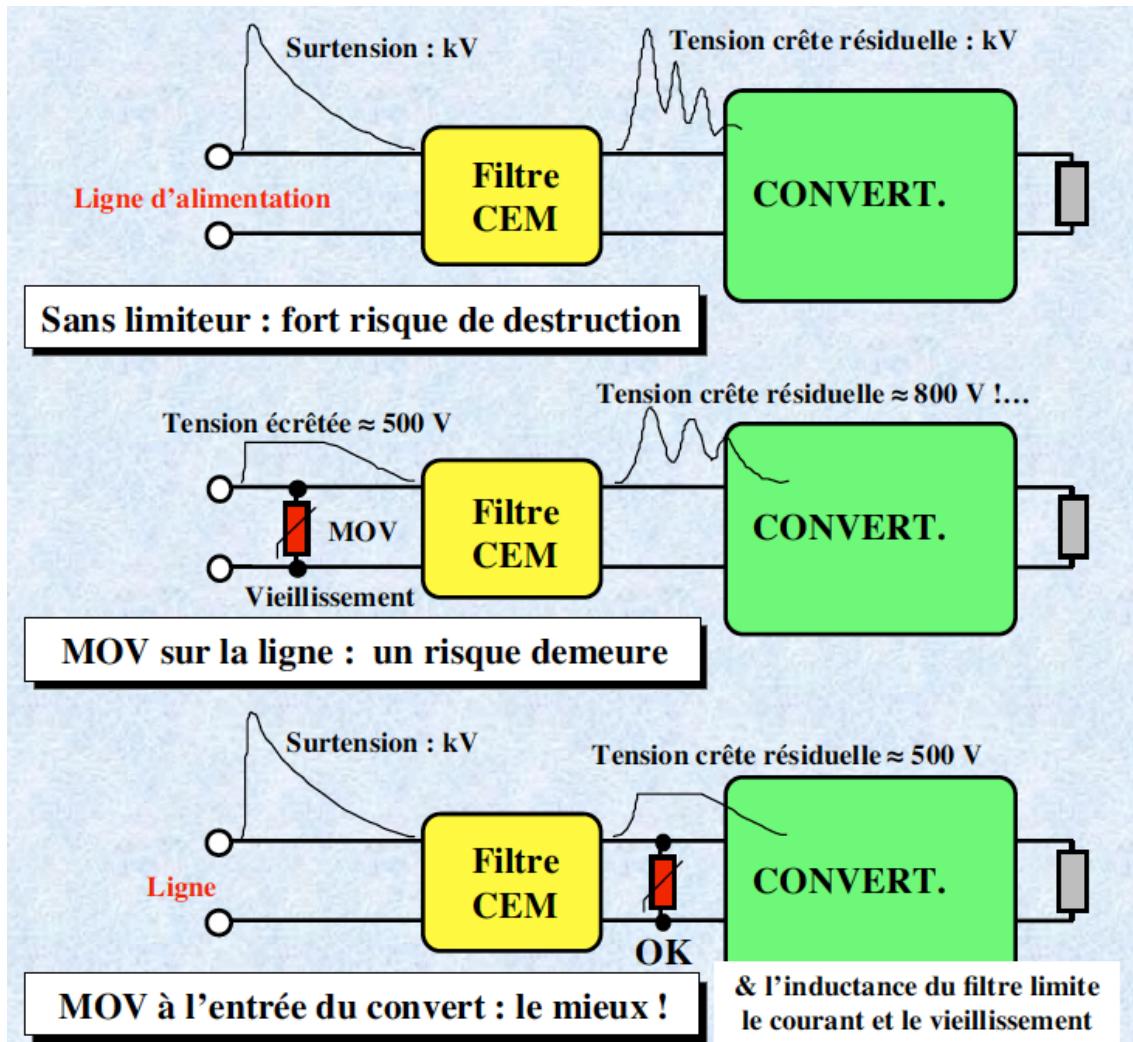
Modélisation « circuit »



$$\log V = b_1 + b_2 \log I + b_3 e^{-\log I} + b_4 e^{\log I}$$

$$V = 10^{b_1 + b_2 \log I + b_3 e^{-\log I} + b_4 e^{\log I}}$$

Positionnement des varistances...

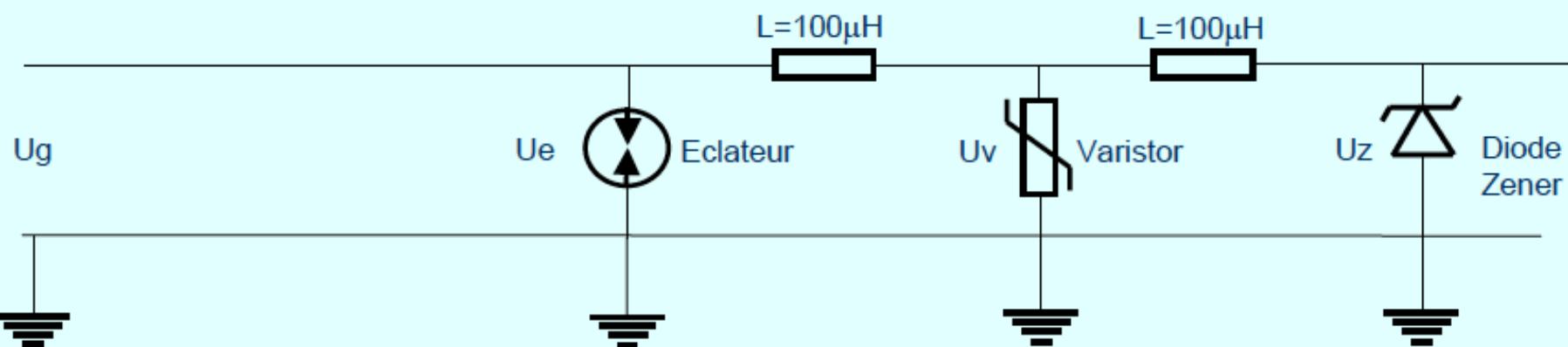
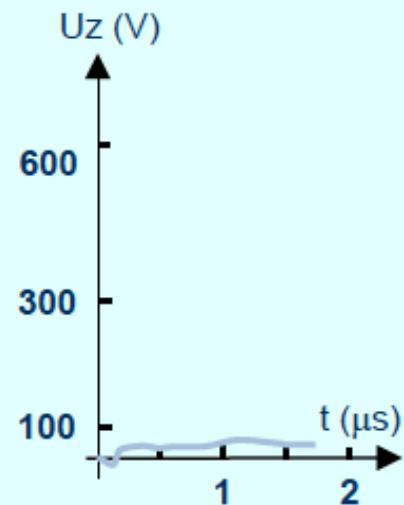
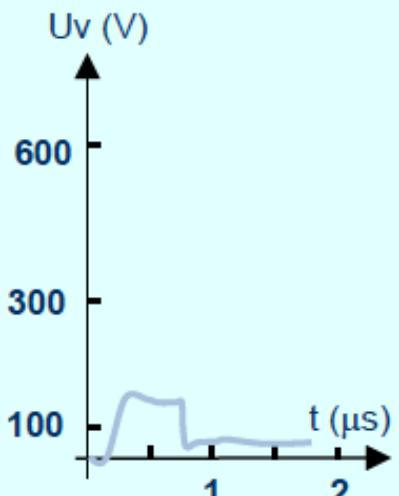
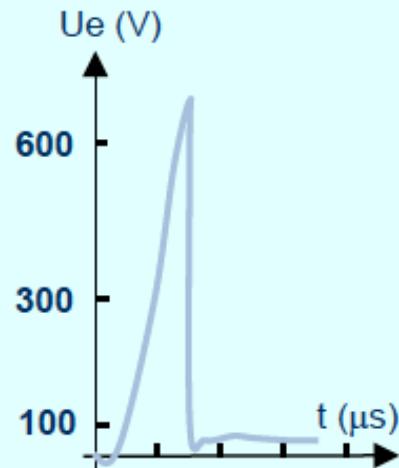
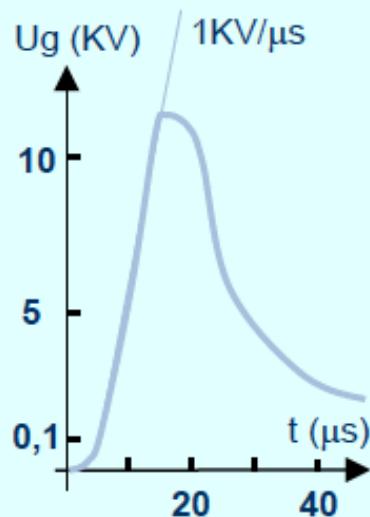


Actions complémentaires...

■ Principe de protection contre les transitoires

- Dérivateurs à décharges
 - Court-circuitent la ligne pendant leur fonctionnement,
 - Restaurent la ligne après extinction,
 - Réponse lente, capacité parasite faible, tolèrent un faible nombre d'opérations.
- Ecrêteurs
 - Pas de puissance dissipée au repos,
 - Fortement conducteurs au dessus de la tension de coude,
 - Généralement réversibles,
 - Réponse rapide, capacité parasite importante, tolèrent un nombre moins élevé d'opérations que les éclateurs.
- Filtres
 - Réduisent le spectre du transitoire,
 - Certains filtres utilisent des matériaux dissipatifs,
 - Un filtre purement réactif réfléchit l'énergie vers la source par désadaptation,
 - Peuvent être détruits par des transitoires d'amplitudes élevées (les structures en T comportant 2 condensateurs et 1 self sont mieux adaptés)
- Séparation galvanique
 - Fibres optiques,
 - Guides d'ondes.

■ Exemple typique de protection contre les transitoires



■ Composants au silicium

- Diodes en direct => Courant de fuite important, Empilage de jonction PN, capacité faible
- Diodes Zener => Suppression des transitoires de faibles niveau, Résistance dynamique variable
- Diodes à avalanches => Spécialement conçue pour les transitoires (Groupe le plus important), jonction PN de grande surface travaillant par avalanche
- TRANZORB, TRANSILS, TAZ
 - Avantages = Temps de réponse court, Stabilité de la tension, impédance dynamique faible, courant de fuite faible, mise en cc possible, gamme de tension (5V à qq 100V)
 - Inconvénients = Capacité de jonction (1000 à 10000 pF), limite en puissance (1,5 KW), maintien de la tension en phase transitoire
- Dispositifs à effet Thyristor => Caractéristique de protection « à R négative »
 - TRISIL, TEDD (concurrent des éclateurs à gaz)
 - Avantages = Haut pouvoir d'écoulement, temps de réponse court, tension aux bornes faible en transitoire, écrêtage indépendant du dv/dt
 - Inconvénients = capacité assez élevée (100 à 300 pF à 1MHz), existence d'un courant de maintient.

■ Varistances

- Varistances carbure de Si (SiC)
- Varistances à l'oxyde de zinc (ZnO)
 - GE MOV, Varistances LCC
 - Avantages = Tensions de protection élevées, forte capacité d'absorption (10 à 500 Joules, 6.5 KA sur choc, 1W permanent), très faible prix.
 - Inconvénients = Tension de clamping, temps de réponse, courant de repos élevé, capacité élevée, dégradation au vieillissement

■ Les éclateurs (dispositifs les plus anciens)

- Eclateurs à gaz => Décharge dans un gaz après amorçage
- Parafoudre à gaz
 - Avantages = Grand pouvoir d'écoulement (qqs KA), Faible capacité équivalente, très faible courant de fuite au repos.
 - Inconvénients = Tension d'amorçage statique élevée (70 à 10000V), tension d'amorçage dynamique fonction du dv/dt, temps d'amorçage assez lent, auto-extinction, durée de vie limitée

■ Les modules de protection

- Optimisation de la protection sur transitoires mais prix élevé et précautions d'emploi et limités en fréquence à environ 50MHz.

Bibliographie - Sources

- [1] Site web de l'AFIS : <https://www.afis.fr>
- [2] Clément Marlier « Modélisation des perturbations électromagnétiques dans les convertisseurs statiques pour des applications aéronautiques ». Thèse de doctorat 2013.
- [3] Les techniques de l'ingénieur d 1300 F.Costa
- [4] Alain CHAROY « CEM des Convertisseurs » société AEMC
- [5] Thomas De Oliveira « Optimisation du routage d'un filtre CEM » Thèse de doctorat