

---

# Industrialisation et Qualification

---

Travaux Pratiques de  
Compatibilité  
Electromagnétique –  
Conception du circuit imprimé  
du STARCORE

---

Alexandre Boyer

---

**INSA de Toulouse**

**Décembre 2011**

## I. Enoncé du problème

Le STARCORE est un microcontrôleur 16 bits dédié à des applications électroniques embarquées variées. Les caractéristiques de ce composant sont données de l'annexe A.

Afin de développer une brique « intelligente » programmable et modulaire, votre entreprise a décidé de fabriquer une carte fille embarquant un STARCORE monté dans un boîtier QFP64. Les caractéristiques de cette carte sont données dans l'annexe B.

Votre mission est de participer au développement du circuit imprimé du STARCORE, notamment sur les questions de compatibilité électromagnétique (CEM). En effet, afin de garantir la fiabilité de l'application en environnement difficile et afin de respecter les exigences en terme de CEM, il est nécessaire de veiller à cet aspect durant les phases de conception. Une de vos missions concerne le problème d'émission conduite produite par l'activité du composant (cf. annexe C). La contrainte fixée sur le niveau d'émission conduite est la suivante :

- Le niveau d'émission conduite mesuré sur le nœud d'alimentation selon la norme IEC 61967-4 (« mesure 150  $\Omega$  »), doit respecter le niveau maximal 'H8' défini à l'annexe C sur la bande de fréquence [1 MHz – 1 GHz].

Votre travail consistera à :

1. Etablir le budget de capacité de découplage permettant de garantir la contrainte sur le niveau d'émission maximal (nombre et valeurs des capacités de découplage)
2. Réaliser le placement-routage du circuit imprimé, à partir de la schématique initiale et en intégrant les nouvelles capacités.

Pour vous aider dans l'établissement du budget de capacité de découplage, les fabricants du STARCORE vous ont fourni un modèle équivalent de type SPICE (cf. annexe A), qui permet de simuler son activité transitoire. Vous disposez du logiciel IC-EMC (cf. annexe E) pour réaliser l'ensemble des simulations électriques nécessaires à l'établissement du budget de capacité de découplage. Le routage du circuit imprimé sera fait sous le logiciel ALTIUM Designer.

## II. Annexe A – Données sur le STARCORE

Le STARCORE est un microcontrôleur 16 bits, développé en technologie CMOS 0.18  $\mu\text{m}$ . Il existe en différentes versions de boîtier, celui que vous allez utiliser est monté dans un boîtier QFP 64. Ce microcontrôleur embarque plusieurs types de périphériques, et notamment 5 ports digitaux bidirectionnels de 8 bits (PORT\_A à PORT\_E), 8 entrées analogiques (AN0 à AN5), un oscillateur et une PLL intégrée fonctionnant jusqu'à 64 MHz et référencée par un cristal ou quartz externe (connecté entre les broches XTAL et EXTAL).

L'alimentation nominale du composant est 2.5 V. Celle-ci est fournie aux différents blocs par plusieurs paires d'alimentation :

- Vdd1/Vss1 et Vdd2/Vss2 pour le cœur digital du microcontrôleur
- VddIO1/VssIO1 et VddIO2/VssIO2 pour les entrées-sorties bidirectionnelles
- VddPLL/VssPLL pour l'oscillateur et la PLL
- VddA/VssA pour les blocs analogiques

L'initialisation, la programmation et le debug in-situ du microcontrôleur sont commandés par les broches DEBUG et RESET.

### Brochage du circuit

| Numéro des broches | Nom des broches    | Numéro des broches | Nom des broches    |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1 - 8              | PA0 à PA7 (PORT_A) | 33 - 40            | PD0 à PD7 (PORT_D) |
| 9 - 10             | Vdd1 et Vss1       | 41 - 42            | Vdd2 et Vss2       |
| 11 - 18            | PB0 à PB7 (PORT_B) | 43 - 46            | AN0 à AN3          |
| 19 - 20            | VddPLL et VssPLL   | 47 - 48            | VddA et VssA       |
| 21 - 22            | XTAL et EXTAL      | 49 - 52            | AN4 à AN7          |
| 23 - 24            | VddIO1 et VssIO1   | 53 - 54            | VddIO2 et VssIO2   |
| 25 - 32            | PC0 à PC7 (PORT_C) | 55 - 62            | PE0 à PE7 (PORT_E) |
|                    |                    | 63 - 64            | DEBUG et RESET     |

### Configuration du composant pour la simulation

Lors de la simulation du bruit d'alimentation du composant, on considérera l'activité suivante :

- La PLL fonctionne à 64 MHz, elle est dérivée d'un oscillateur fonctionnant à 16 MHz.

- L'horloge du système est dérivée de la PLL et tourne à 32 MHz.
- On considère qu'un seul port d'entrée-sortie commute à 2 MHz.
- L'activité des blocs de conversion analogique numérique est cadencée par une horloge interne de 2 MHz de fréquence

#### Modèle de l'activité du composant :

Des modèles appelés « ICEM » (IEC 62433-2) des différents blocs du STARCORE sont fournis sur le site [www.alexandre-boyer.fr](http://www.alexandre-boyer.fr). Ceux-ci décrivent l'activité transitoire d'un circuit et permettent de simuler le bruit d'alimentation, l'émission conduite et rayonnée issus de celui-ci. Les fichiers suivants sont fournis :

- ICEM\_core.sym : modèle ICEM du cœur digital. Celui-ci tourne à 32 MHz.
- ICEM\_PLL.sym : modèle ICEM de la PLL et de l'oscillateur à quartz. La PLL fonctionne à 64 MHz, l'oscillateur à quartz à 16 MHz.
- ICEM\_ANALOG.sym : modèle ICEM des blocs analogiques
- ICEM\_IO.sym : modèle ICEM d'un port d'entrées-sorties du STARCORE. On chargera les sorties du port par des capacités de 10 pF.

Ces fichiers peuvent être importés sous IC-EMC à l'aide de la commande « Insert > User Symbole (.SYM) ».

### III. Annexe B – Données sur le circuit imprimé

La carte de circuit imprimé que vous devez réaliser aura les dimensions suivantes : 60 × 60 mm. Elle sera développée en FR4 4 couches. Ci-dessous, une description de l'empilement des 4 couches.

| Couches      | Signaux         | Type   | Epaisseur (mm) | Conductivité / Constante diélectrique |
|--------------|-----------------|--------|----------------|---------------------------------------|
| Top          | Ground + Signal | Cuivre | 0.035          | 57 MS / 0                             |
| Diélectrique |                 | FR4    | 0.4            | 0 / 4.5                               |
| GND          | Ground          | Cuivre | 0.035          | 57 MS / 0                             |
| Diélectrique |                 | FR4    | 0.7            | 0 / 4.5                               |
| POWER        | Power           | Cuivre | 0.035          | 57 MS / 0                             |
| Diélectrique |                 | FR4    | 0.4            | 0 / 4.5                               |
| BOTTOM       | Signal + Ground | Cuivre | 0.035          | 57 MS / 0                             |

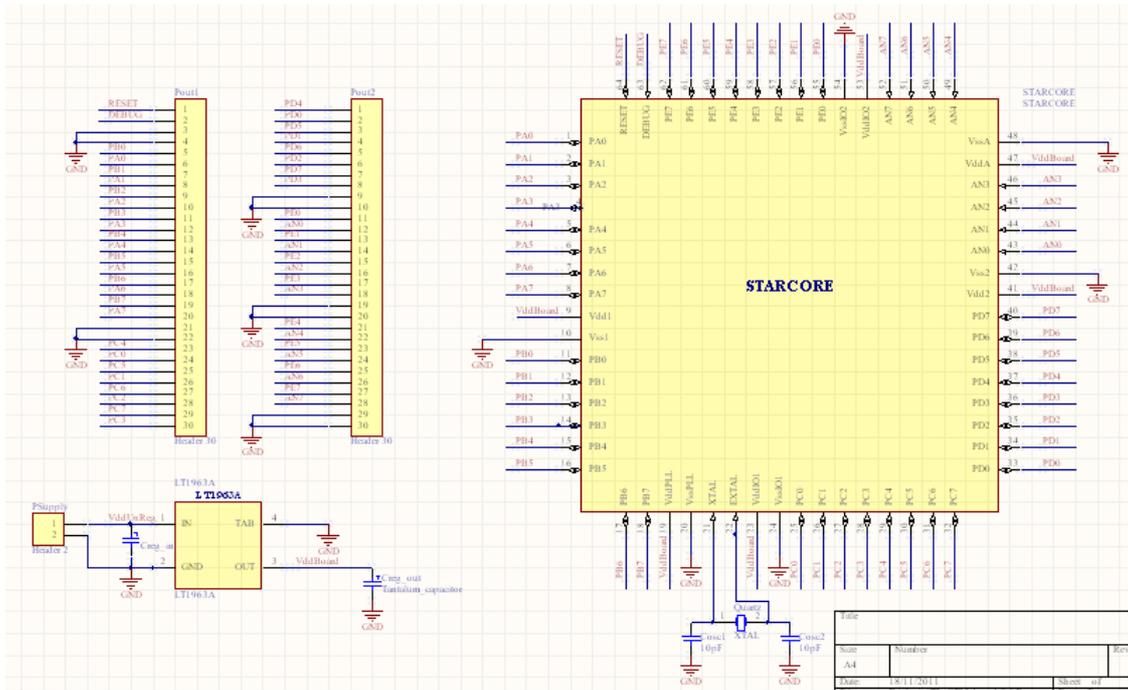
Tous les composants sont montés en surface. Par convention, le STARCORE sera monté sur la couche TOP.

#### **Modèle équivalent du plan d'alimentation**

Le plan d'alimentation POWER et le plan d'alimentation GND forment une cavité résonante, qui influe sur le niveau d'émission conduite. Le modèle équivalent de ce plan d'alimentation est donné par le fichier Board\_model.sym.

#### **Schématique**

La schématique est disponible sur le site [www.alexandre-boyer.fr](http://www.alexandre-boyer.fr), dans le fichier TP\_CEM\_board.SchDoc. Celle-ci a été créée à partir du logiciel ALTIUM DESIGNER. L'ensemble des composants et empreintes sont disponibles dans la librairie Lib\_TP\_CEM.LibPck.



## Règles de routage

La carte sera réalisée en classe 4. Voici les contraintes sur les dimensions minimales :

- Clearance min = 0.2 mm
- largeur de piste minimale = 0.2 mm
- Diamètre de via minimal = 0.762
- Diamètre de trou minimal = 0.3 mm

## Alimentation de la carte

L'alimentation 2.5 V, notée VddBoard, de la carte est fournie par un régulateur LDO de type LT1963A. L'alimentation du régulateur, notée VddUnReg, et la référence de masse, notée Gnd, sont fournies par l'intermédiaire du connecteur noté Psupply. L'alimentation VddUnReg est filtrée sur la carte par une capacité tantale de 10 µF. Une seconde capacité tantale de 10 µF est placée en sortie du régulateur pour améliorer sa stabilité et filtrer le bruit en sortie du régulateur.

Le modèle du régulateur est donné par le fichier Model\_LDO.sym. La capacité tantale de 10 µF est affectée d'une inductance série de 3 nH et d'une résistance série de 80 mΩ.

## Connexion des broches XTAL et EXTAL

Les broches XTAL et EXTAL sont connectées à un quartz externe de 4 MHz, notée Quartz, et à 2 capacités céramique Cosc1 et Cosc2 de 10 pF.

## Connecteur de sortie

Les broches du microcontrôleur (mis à part les broches d'alimentations, XTAL et EXTAL) sont accessibles sur deux connecteurs appelés Pout1 et Pout2, formés de deux rangées de 15 broches.

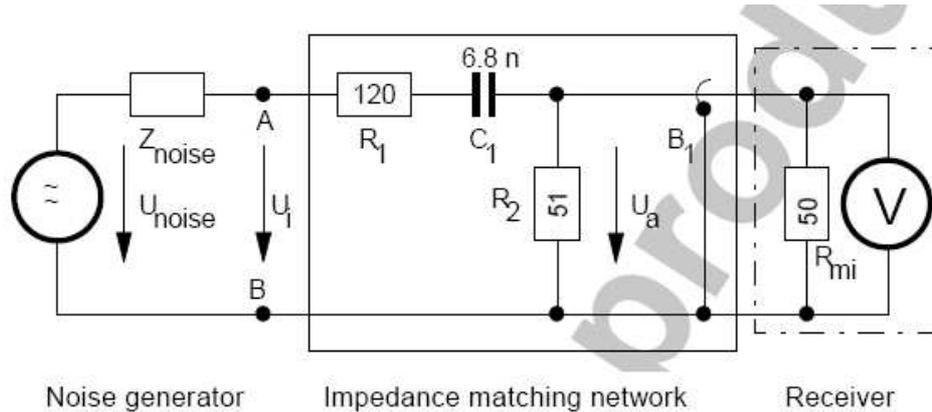
### **Capacité de découplage**

On utilisera des condensateurs de type X7R – 50 V montés en boîtier 0603 pour le découplage des alimentations. Afin de déterminer les modèles électriques de ces condensateurs, on utilisera l'outil en ligne SimSurfing fourni par le fabricant de composants passifs Murata (<http://ds.murata.com/software/simsurfing/en-us/index.html>).

On supposera que les pads et les vias employés pour connecter les capacités de découplage aux plans d'alimentation et de masse ajoutent une inductance parasite de 1.5 nH.

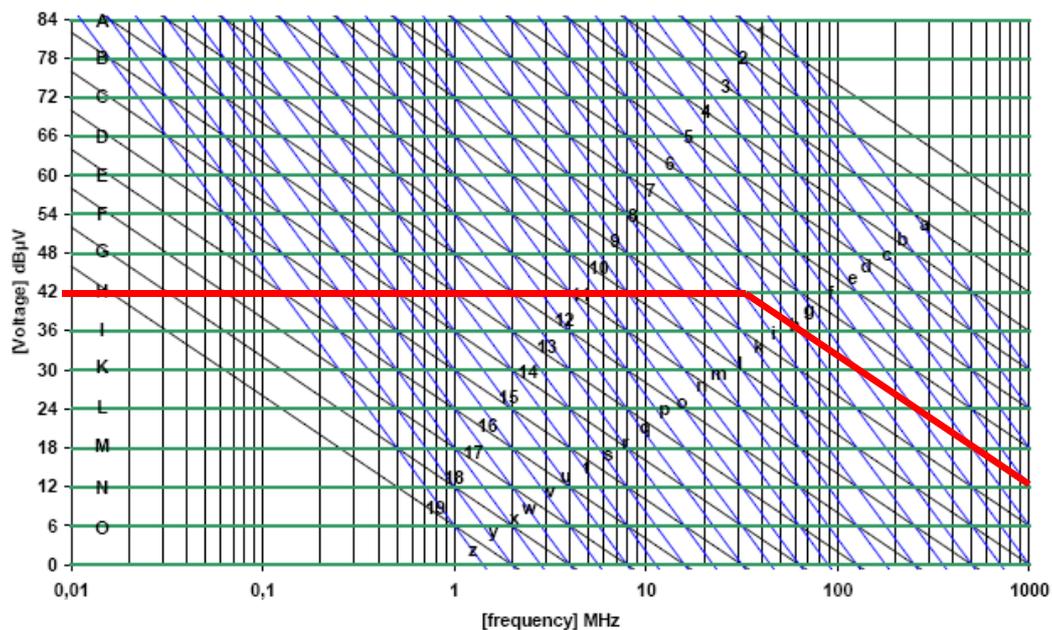
## IV. Annexe C - IEC 61967-4 - Mesure 150 ohms

La norme IEC61967 définit des méthodes de qualification CEM des circuits intégrés sur la bande 150 KHz – 1 GHz. La norme IEC61967-4 définit deux méthodes de caractérisation de l'émission électromagnétique conduite des circuits. Parmi les méthodes que la norme propose, nous utiliserons la méthode dite 150  $\Omega$ . Celle-ci consiste à réaliser une mesure de la tension sur une broche donnée du circuit (sortie, alimentation) en plaçant en sortie de celle-ci la sonde suivante :



**Sonde 150  $\Omega$  (IEC 61967-4)**

La norme définit aussi des gabarits donnant les limites d'émission d'un composant. Le STARCORE doit respecter la limite d'émission définie par le gabarit H8.

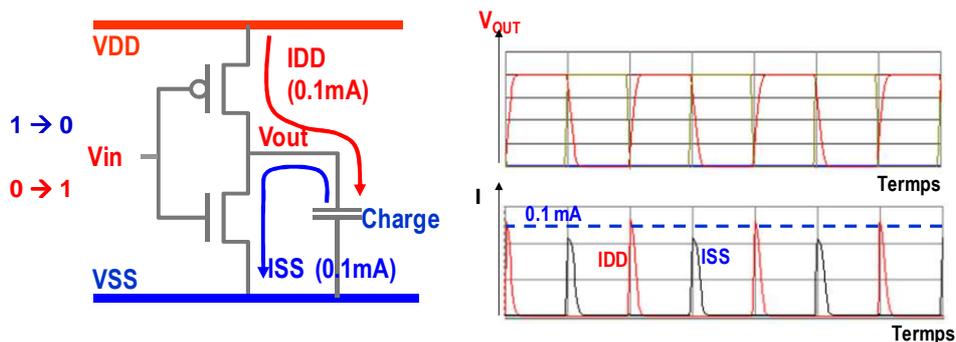


**Limites d'émission définies par la norme IEC 61967-4**

## Annexe D – Emission électromagnétique

L'émission électromagnétique d'un composant électronique trouve son origine dans les fluctuations de tension (principalement d'alimentation et de masse) produites par son activité. Celle-ci est dite conduite lorsque celles-ci se propagent le long d'interconnexions, rayonnée lorsqu'elles excitent une antenne parasite du système électronique et produisent un rayonnement électromagnétique. Dans les deux cas, un circuit dit émetteur est capable de perturber tout composant situé à proximité (voire lui-même).

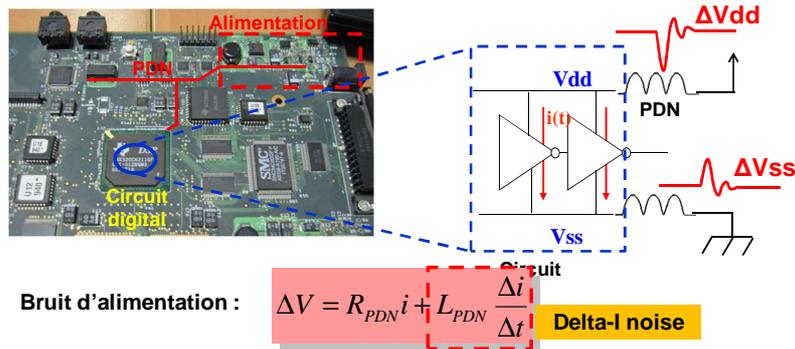
Prenons un circuit numérique simple : un inverseur. Celui-ci est connecté à une charge capacitive, représentant l'entrée d'un autre circuit digital. Chaque changement d'état de l'entrée de l'inverseur conduit à l'apparition d'un courant transitoire entre l'alimentation et la masse à travers la capacité de charge. Ce courant correspond au transfert de charge, lié à la charge ou à la décharge de la capacité de sortie. Ainsi, tout circuit en commutation est à l'origine l'apparition d'un courant transitoire entre l'alimentation et la masse : circuits digitaux synchrones, entrée-sortie digitale (E/S), convertisseur de tension, driver de puissance ...



### Courant transitoire produit par l'activité d'un inverseur

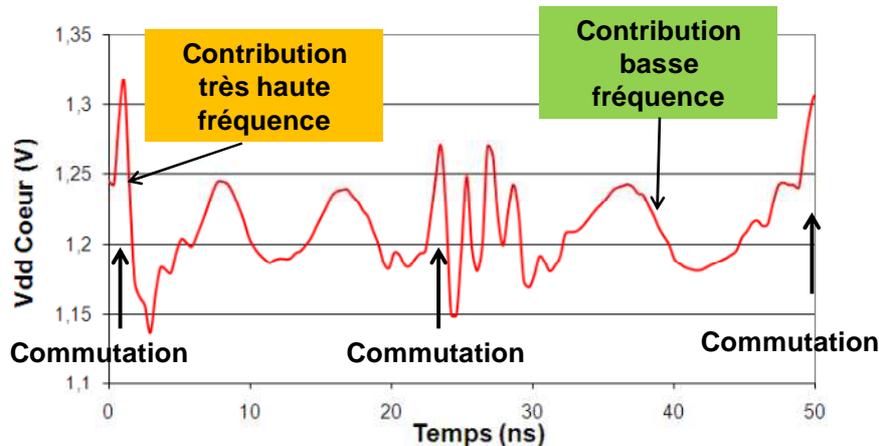
Tant que l'on considère une alimentation ou une référence de masse idéale connectée à ce circuit, aucun problème d'émission ne peut apparaître puisqu'il ne peut y avoir de fluctuations des niveaux d'alimentation ou de masse. Cependant, un circuit n'est jamais connecté directement à la source d'alimentation (batterie, régulateur de tension ...). Un ensemble d'interconnexions relie les broches d'alimentation et de masse d'un circuit aux références d'alimentation et de masse, qu'on appelle réseau de distribution d'alimentation (Power Distribution Network PDN).

L'impédance du PDN n'est malheureusement pas nulle. La circulation du courant transitoire créée par l'activité du circuit le long des interconnexions du réseau de distribution de l'alimentation est à l'origine de fluctuations des tensions d'alimentation et de masse appliquées au circuit. Ce réseau est composé de résistances et d'inductances distribuées. Les résistances sont à l'origine d'une chute de potentiel constante (on parle d'IR drop) et les inductances d'une fluctuation rapide liée aux variations de courant (delta I noise). C'est ce dernier phénomène qui produit la variation la plus importante.



**Origine du bruit d'alimentation d'un circuit**

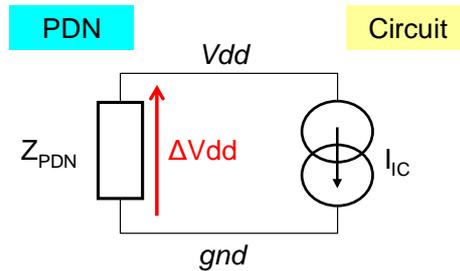
La figure ci-dessous présente un exemple de mesure du bruit lié à la commutation d'un circuit digital synchrone, réalisé sur sa ligne d'alimentation. A chaque période d'horloge, le circuit génère un appel de charges, qui produit un courant transitoire très rapide, donc présentant un spectre riche en harmoniques. Lorsque ce courant excite des résonances associées aux inductances de ces différentes interconnexions et à la capacité que représente le circuit en commutation, la fluctuation de tension est amplifiée. Sur la figure ci-dessous, on peut voir 2 contributions, une basse fréquence (une période proche de 10 ns), une autre haute fréquence (une période proche de 1 ns), liée à des résonances circuit-boîtier-PCB différentes.



**Exemple de mesure du bruit d'alimentation d'un circuit**

Comment réduire l'émission électromagnétique produite par un circuit intégré ? Une des solutions consiste à faire passer le courant transitoire par un chemin de faible impédance. Considérons le schéma de principe ci-dessous. Le circuit est modélisé par un simple générateur de courant  $I_C$ , représentant les appels en courant liés à l'activité du circuit. Les deux terminaux de ce générateur sont respectivement les potentiels d'alimentation et de masse. L'alimentation Vdd et la masse gnd sont fournies à travers un réseau de distribution d'alimentation relativement complexe, qu'on représente par une impédance équivalente  $Z_{PDN}(f)$ , connectée entre Vdd et gnd. Cette impédance est une grandeur complexe dépendante de la fréquence. Dans le domaine fréquentiel, la fluctuation de tension  $\Delta V_{dd}$  produite par le passage du courant du circuit à travers le réseau de distribution d'alimentation est égal à :

$$\Delta V_{dd}(f) = Z_{PDN}(f) \times I_{IC}(f)$$

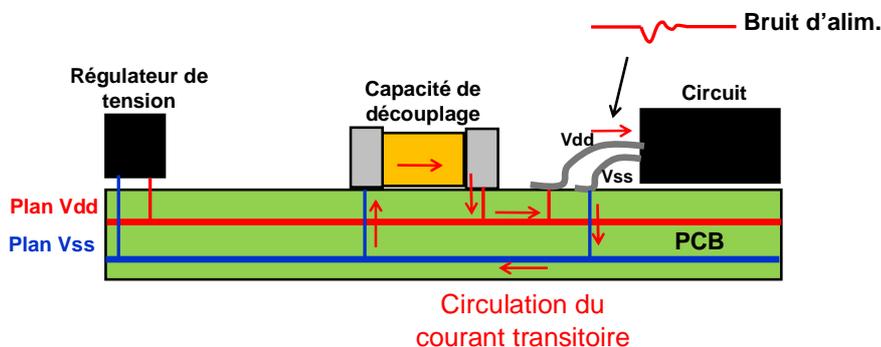


Pour réduire la fluctuation de tension d'alimentation et donc l'émission conduite, il est nécessaire de réduire l'impédance du réseau de distribution d'alimentation. On peut définir le concept d'impédance cible  $Z_T$  qui fixe l'impédance maximale que doit présenter le PDN pour garantir une fluctuation de tension d'alimentation inférieure à une limite donnée  $\Delta V_{dd_{max}}$ , connaissant la valeur maximale  $\Delta I$  du courant transitoire appelé par le circuit :

$$Z_{PDN}(f) < Z_T = \frac{\Delta V_{dd_{max}}(f)}{I_{IC}(f)}$$

Comment s'y prendre, sachant que celle-ci est liée aux caractéristiques des géométries des interconnexions, des plans d'alimentation ... ? La solution réside dans l'utilisation de capacité de découplage, placée entre l'alimentation et la masse. Celle-ci peut être vue de 2 manières :

- Dans le domaine temporel, une capacité de découplage sert de réservoir local de charges qui doit fournir rapidement du courant au circuit en commutation.
- Dans le domaine fréquentiel, une capacité de découplage constitue une faible impédance placée entre l'alimentation et la masse ( $Z = 1/(jC\omega)$ ), donc en parallèle de  $Z_{PDN}$ . Si l'impédance équivalente de la capacité de découplage est inférieure à  $Z_{PDN}$ , alors elle court-circuite le courant transitoire produit par le circuit.



### Capacité de découplage

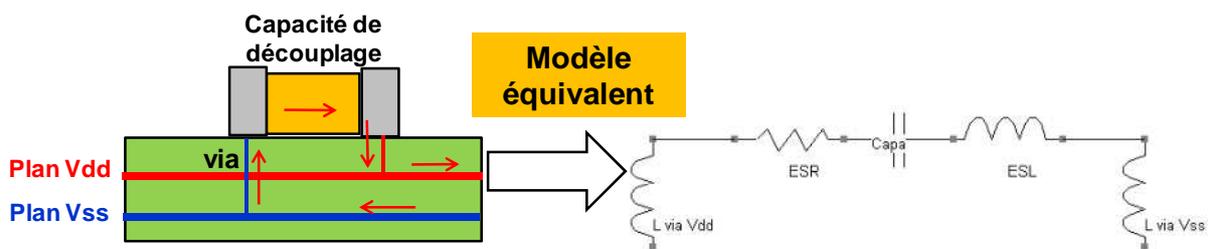
Un autre intérêt réside dans la réduction de la surface de la boucle suivie par le courant transitoire. En effet, celle-ci constitue une antenne parasite capable de produire une émission

électromagnétique rayonnée. La réduction de l'émission électromagnétique rayonnée justifie de placer les capacités de découplage au plus près du composant à découpler. En outre, cela réduit la longueur du chemin parcouru par le courant et donc les inductances et résistances parasites qui produisent les fluctuations de tension.

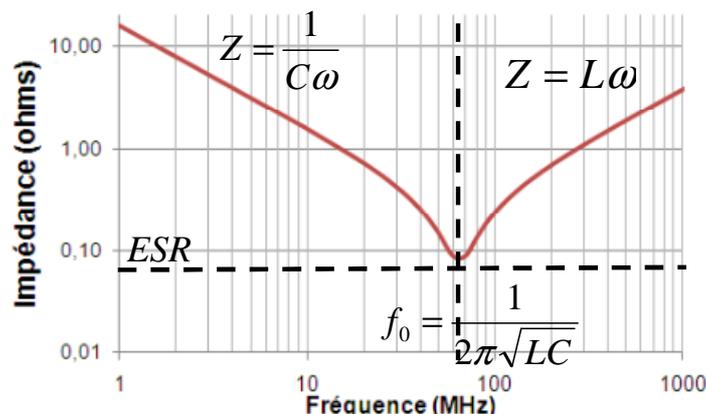
Comment choisir une capacité de découplage. Celle-ci doit être capable de réagir rapidement à un appel de charge, c'est-à-dire fournir suffisamment de courant sans induire de fluctuation de potentiel à ses bornes. Soit  $\Delta V_{dd\max}$  la fluctuation maximale de tension tolérée,  $\Delta I$  le pic de courant produit par la commutation du circuit et  $t_r$  la durée de ce pic de courant, la capacité de découplage doit présenter une valeur supérieure à la valeur ci-dessous :

$$C_{dec} \geq \frac{\Delta I \times t_r}{\Delta V_{dd\max}}$$

Malheureusement, ce raisonnement ne tient pas compte du caractère non idéal de toute capacité. En effet, celle-ci est affectée de résistances et d'inductances parasites. Une capacité réelle peut être modélisée par le modèle ci-dessous.

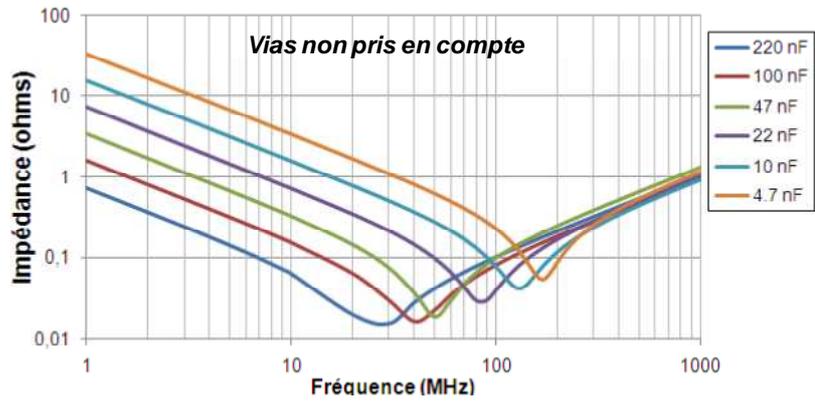


Le profil d'impédance d'une capacité réelle est donné ci-dessous. Celle-ci se comporte comme une capacité jusqu'à une certaine fréquence de résonance entre la capacité et l'ensemble des inductances parasites. Ce condensateur sera une capacité de découplage efficace que sur une plage de fréquence sur laquelle elle présente une faible impédance (là où l'impédance de la capacité est inférieure à  $Z_{PDN}$ ).

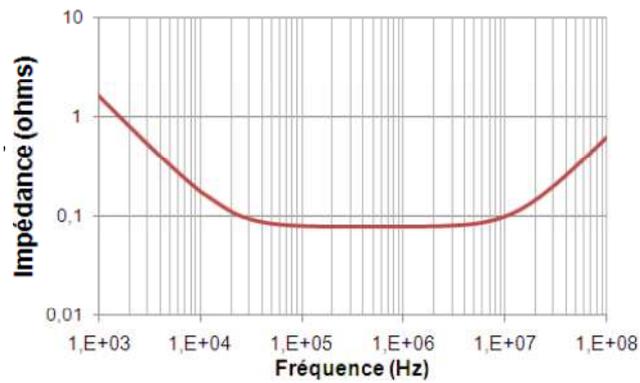


**Profil d'impédance d'une capacité de découplage**

Ci-dessous deux exemples de mesures d'impédance de capacité céramique X7R de différentes valeurs et une capacité électrolytique de 100  $\mu F$ .



**Profil d'impédance de capacités céramiques X7R (source : Murata)**



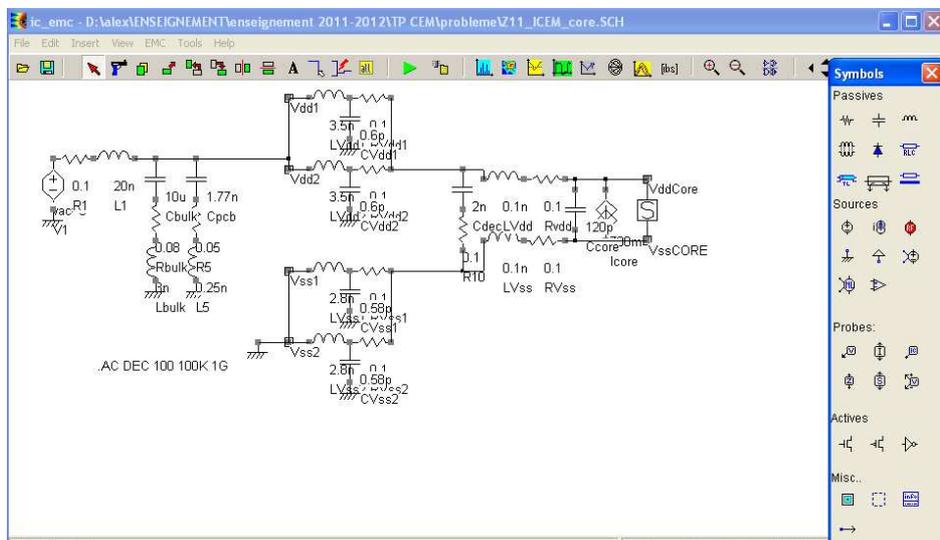
**Profil d'impédance d'un condensateur électrolytique de 100  $\mu$ F**

## V. Annexe E – Prise en main du logiciel IC-EMC



IC-EMC (Integrated Circuit Electromagnetic Compatibility) est un logiciel gratuit dédié à la modélisation et à la simulation des problèmes d'émission électromagnétique et de susceptibilité des circuits intégrés. Celui-ci est téléchargeable sur la page [www.ic-emc.org](http://www.ic-emc.org). L'outil fonctionne avec le simulateur WinSPICE ([www.winspice.com](http://www.winspice.com)). IC-EMC propose un éditeur de schématique SPICE et tout un ensemble d'outils permettant la construction de modèles électriques et d'analyse des résultats.

Cette annexe décrit les principales étapes et les commandes associées qui vous aideront durant ce TP. La figure ci-dessous présente l'écran principal du logiciel, qui permet la saisie de schématiques électriques (fichiers .sch), qui seront converties en netlist SPICE (fichiers .cir). A gauche de l'écran se trouve une palette de symboles aidant à la construction de schémas électriques. En haut de l'écran se trouvent le menu principal et un ensemble d'icônes décrites dans le tableau ci-dessous.



**Ecran principal d'IC-EMC**

|  |                       |  |                            |
|--|-----------------------|--|----------------------------|
|  | Open schematic (.sch) |  | Build SPICE netlist (.cir) |
|  | Save schematic (.sch) |  | Spectrum analysis          |
|  | Delete symbols        |  | Near field emission simu.  |
|  | Copy symbols          |  | Immunity simulation        |
|  | Move symbols          |  | Time domain analysis       |
|  | Rotate symbols        |  | Impedance simulation       |
|  | Flip symbols          |  | S parameter simulation     |
|  | Add Text line         |  | Ibis file editor           |
|  | Add a line            |  | Parametric analysis        |
|  | View electrical net   |  | Symbol palette             |
|  | Zoom in/out           |  | View all schematic         |

**Principales icônes et commandes associées**

Les schémas électriques sont construits en sélectionnant des composants de la palette et en les faisant glisser sur l'écran principal. En cliquant sur les symboles placés, il est possible de modifier leurs propriétés. Les principaux symboles dans la palette que vous utiliserez sont donnés dans le tableau ci-dessous. En outre, vous serez amenés des sous-circuits (fichiers .sym) contenant les modèles ICEM des différents blocs du STARCORE. Pour cela, cliquez dans le menu sur la commande **Insert > User Symbol (.SYM)**.

|   |                         |   |  |
|---|-------------------------|---|--|
|  | Résistance              |  | Générateur de tension (pulse, sinus, PWL)      |
|  | Capacité                |  | Générateur de courant (pulse, sinus, PWL)      |
|  | Inductance              |  | Sonde de tension (sur un nœud)                 |
|  | Référence de tension DC |  | Sonde de courant (à l'intérieur d'une branche) |
|  | Référence de masse      |  | Port – Mesure de paramètres S et d'impédance   |

**Principaux symboles utilisés dans ce TP**

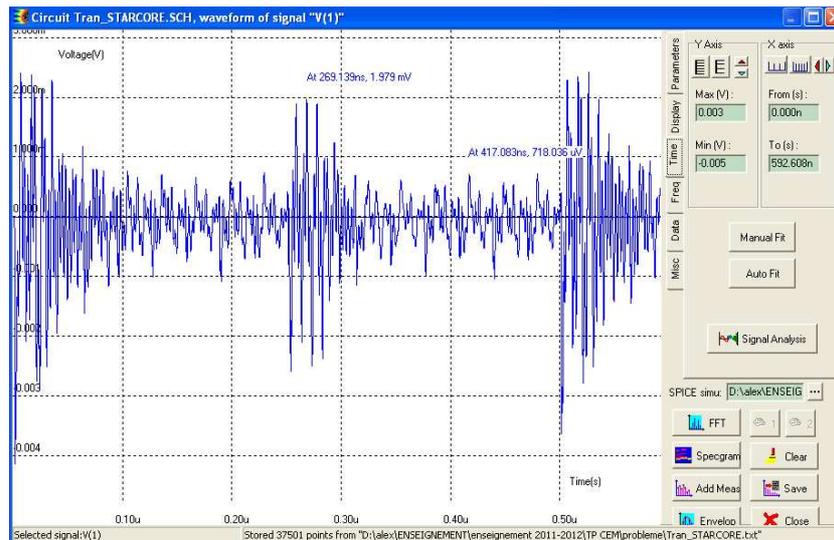
Une fois une schématique saisie et sauvegardée, il est nécessaire de configurer une simulation SPICE. Pour cela, il est nécessaire d'inclure une ligne de commande sur la schématique en cliquant sur l'icône **A** puis en cliquant sur l'écran de la schématique. Le tableau ci-dessous donne les principales commandes de simulation (transitoire, DC, AC).

| Simulation command                 | Command line               | Parameters                                 |
|------------------------------------|----------------------------|--|
| <b>Transient simulation</b>        | <b>.tran 0.1n 100n</b>     | <b>step + stop time</b>                    |
| <b>DC simulation</b>               | <b>.DC Vdd 0 5 0.1</b>     | <b>source + start + stop + step</b>        |
| <b>Small signal freq. analysis</b> | <b>.AC DEC 100 1MEG 1G</b> | <b>sampling + nb points + start + stop</b> |

**Principales commandes de simulation**

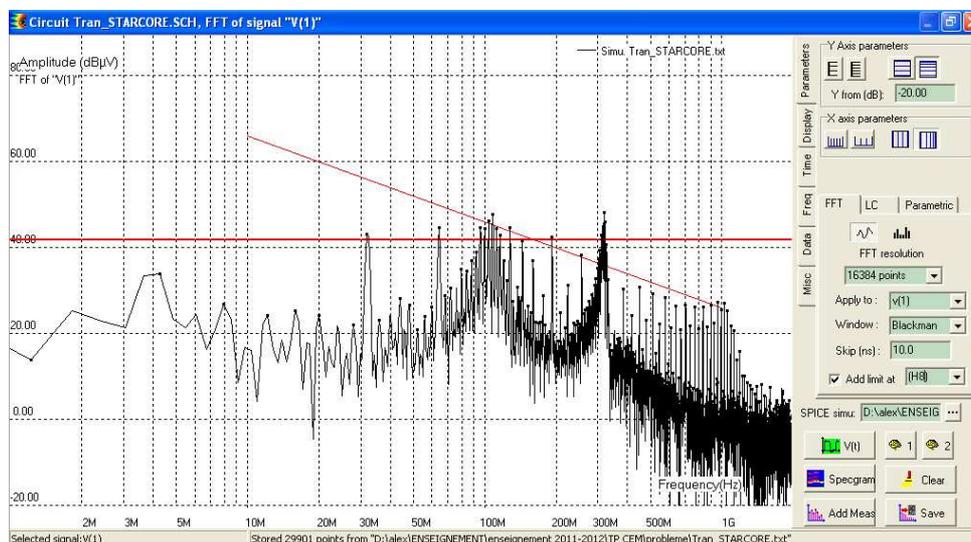
Avant de lancer la simulation SPICE, il est nécessaire de convertir la schématique en netlist compatible avec WinSPICE. Pour cela, cliquez sur l'icône . Si le nom donné au fichier de schématique est nom\_schéma.sch, alors la netlist prendra automatiquement le nom nom\_schéma.cir. Pour lancer la simulation SPICE, il est nécessaire d'ouvrir le simulateur WinSPICE puis de chercher la netlist à simuler (fichier .cir) en cliquant sur **File > Open**. L'interface WinSPICE permet de visualiser l'avancement de la simulation, les erreurs éventuelles et certains résultats de simulation.

Une fois la simulation WinSPICE terminée, les résultats de simulation peuvent être visualisés sur IC-EMC. Vous serez amenés à réaliser deux types de simulation : transitoire et impédance (ou paramètres S). Pour observer le résultat d'une simulation transitoire, cliquez sur l'icône . La fenêtre ci-dessous s'ouvre.



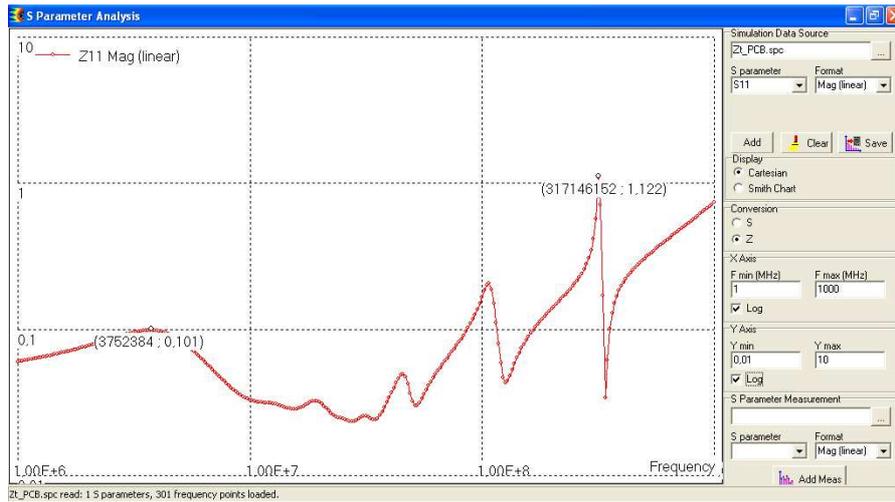
### Visualisation des résultats de simulation temporelle

A partir de cette fenêtre en cliquant sur le bouton  ou directement depuis l'écran principal en cliquant sur l'icône , il est possible de réaliser une transformée de Fourier du résultat de simulation transitoire. La figure ci-dessous présente la FFT du résultat de simulation temporelle présentée ci-dessus. Ce type de résultat permet d'obtenir le spectre de la fluctuation de tension responsable de l'émission électromagnétique et de le comparer par rapport à la limite maximale définie par le standard. En cliquant sur la box **Limit** et en entrant **(H8)**, une limite rouge apparaît sur l'écran, indiquant le niveau maximal d'émission conduite en fonction de la fréquence.



### Transformée de Fourier d'un résultat de simulation temporelle

Pour observer les résultats de simulation d'impédance, cliquez sur l'icône . Les résultats peuvent être affichés sous forme de paramètres S ou Z (impédance). Pour sélectionner le mode d'affichage des résultats, dans le champ **Conversion**, sélectionnez S ou Z. Vous pouvez afficher les résultats dans graphique aux échelles logarithmiques en cliquant dans les boxes **Log**.



***Visualisation des résultats de simulation d'impédance***