

## Chapitre 3

### CEM Normes et Mesures

### 3.1 Introduction

Depuis ces dernières années, la compatibilité électromagnétique est devenue réglementaire avec l'apparition de nombreuses normes nationales et internationales qui fixent les niveaux d'émission et de susceptibilité que doit respecter un appareil électrique.

Au niveau de la Communauté Economique Européenne (CEE), la réglementation est élaborée par les différents Comités Techniques (TC) du Comité Européen de Normalisation en électrotechnique (CENELEC).

### 3.2 Définitions et objectifs des normes CEM

La CEM concerne tous les secteurs de l'électronique et de l'électricité Elle est concernée par toutes les fréquences, du continu au GHz.

Tous les dispositifs électroniques, équipement ou système, exemple dans un PC, il faut rappeler que chaque composant devra être compatible au niveau CEM, que le PC en soit devra être compatible et que, dans un réseau constitué de plusieurs PC et plusieurs équipements électroniques, l'ensemble devra satisfaire aux normes de CEM.

L'objectif principal des normes est de caractériser aussi précisément que possible l'environnement de mesure en conduit et en rayonné, les conditions de mesure (longueur des câbles, distance des antennes, hauteur, angle, etc..), la calibration et le réglage des appareils de mesure utilisés, ceci dans le but d'effectuer des mesures reproductibles et fiables. Nous distinguons ainsi, deux principales catégories de normes existent : celles qui définissent les niveaux tolérés d'émission conduite ou rayonnée, et celles qui définissent la susceptibilité électromagnétique d'un équipement, à savoir sa tolérance aux agressions électromagnétiques.

### 3.3 Les Normes

Les exigences sur la limite des perturbations provoquées par un équipement électrique sont représentées par les normes CEM. Ces normes sont, au plan international, formulées par le Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques (CISPR).

### 3.3.1 Définitions

Une norme est un recueil de règles, de descriptions, de méthodologies qu'un constructeur peut utiliser comme référence lorsqu'il définit et teste un de ses produits.

Il existe 3 types de normes CEM:

- 1) Les normes fondamentales,
- 2) Les normes génériques, donnant les limites et méthodes de base applicable de manière générale à tous les équipements,
- 3) Les normes de produits ou de familles de produits.

**Les normes génériques:** Ce sont des normes ou guides définissant de manière générale les prescriptions relatives à la CEM (phénomènes, essais ...). Elles sont applicables à tous les produits et servent de référence, notamment aux comités devant élaborer des normes spécifiques. Les normes fondamentales ne seront pas harmonisées au niveau Européen.

**Les normes génériques:** Ces normes définissent les exigences essentielles en terme de niveau à tenir par type d'essai empruntés aux normes fondamentales. En l'absence de norme de produits ou famille de produits, elles s'appliquent à tout produit installé dans un environnement défini.

**Les normes de produits ou de familles de produits:** Ces normes définissent, pour des produits ou familles de produits donnés, les dispositions constructives, caractéristiques, méthodes et niveaux d'essais applicables. Lorsqu'elles existent, ces normes ont préséance sur les normes génériques.

### 3.3.2 Les organismes normalisateurs

Au niveau de la Communauté Economique Européenne (CEE), la réglementation est élaborée par les différents Comités Techniques (TC) du Comité Européen de Normalisation en Electrotechnique (CENELEC). La Directive européenne n°89/336/CEE stipule que dans tous les états membres de la CEE, les appareils susceptibles de générer des perturbations électromagnétiques ou dont le fonctionnement peut être affecté par ces perturbations ne peuvent être commercialisés dans les pays de la CEE que s'ils sont conformes aux spécifications en matière de CEM. Cette directive est rentrée en application le 28 octobre

1992. 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.

**CISPR** : Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques,

**CEI** : Commission Electrotechnique Internationale à Genève,

**CENELEC** : Comité Européen de Normalisation Electrotechnique à Bruxelles.

### **3.3.3 Exemples de publications CISPR**

**CISPR 11-1990** Limites et méthodes de mesure des caractéristiques de perturbations électromagnétiques des appareils industriels, scientifiques et médicaux (ISM) à fréquence radioélectrique.

**CISPR 14-1993** Limites et méthodes de mesure des perturbations radioélectriques produites par les appareils électrodomestiques ou analogues comportant des moteurs ou des dispositifs thermiques, par les outils portatifs électriques et par les appareils électriques analogues.

**CISPR 16-1993** Spécifications des méthodes et des appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques, pour la première partie appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques.

### **3.4 Exemples de normes CEM**

D'une manière générale, la caractérisation d'une émission électromagnétique rayonnée consiste à mesurer le niveau de champ électrique et/ou de champ magnétique généré par un dispositif. Elle consiste aussi à identifier le composant le plus perturbateur (rayonnant) sur une victime (circuit imprimé par exemple).

Les moyens et méthodes de caractérisation en CEM sont les outils et les démarches à suivre qui permettent de réaliser une caractérisation en émission et en susceptibilité d'un système ou d'un composant en mode rayonnée ou conduit.

Il existe trois approches dans la littérature pour caractériser une émission électromagnétique rayonnée par un circuit ou un composant électronique intégré [6, 9, 11] :

- ✓ La première consiste à réaliser des calculs numériques sur le composant en utilisant un logiciel de simulation approprié,
- ✓ La seconde, conduit à réaliser des mesures expérimentales sur un dispositif réel,
- ✓ La troisième consiste à modéliser analytiquement le champ électromagnétique rayonné par le dispositif à tester.

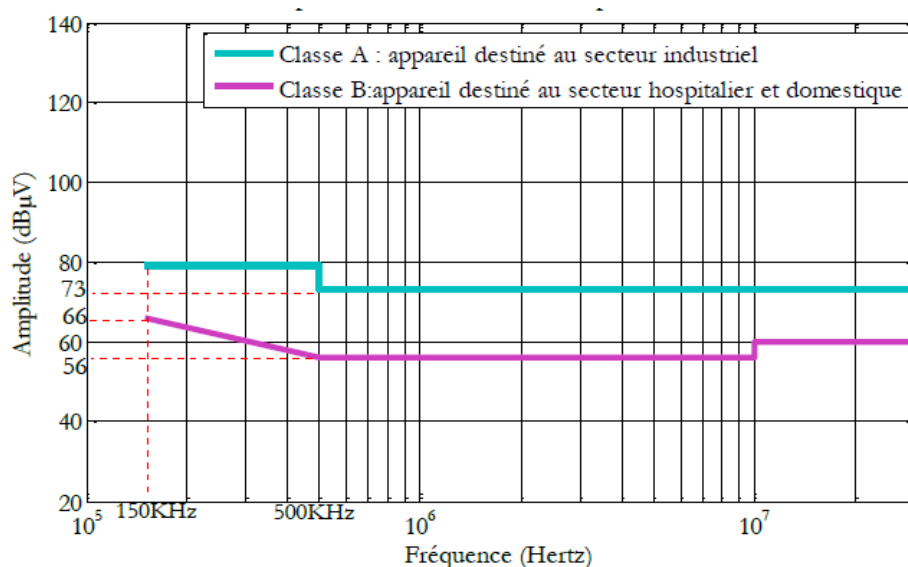
Dans cette section, nous verrons l'exemple de la description des méthodes de mesure pour certaines normes. Considérons la norme 55022 qui concerne une catégorie importante d'appareils électriques, les appareils de traitement de l'information. Cette norme est directement dérivée de la publication n°22 du CISPR et distingue deux classes d'appareils :

- ✓ Les appareils de classe A qui sont destinés à être utilisés en milieu industriel, commercial ou d'affaires ;
- ✓ Les appareils de classe B qui sont destinés à être utilisés dans des locaux d'habitation.

Les niveaux de perturbation sont donnés sur une échelle logarithmique en  $dB\mu V$ .

$$\text{Comme suivant : } dB\mu V(V) = 20 \log\left(\frac{V}{10^{-6}}\right) \quad (3.1)$$

La figure 3.1 [5,7] ci-après présente l'exemple de la norme EN 55022, nous observons ici la Classe B possède un gabarit nettement plus contraignant que celui de la Classe A. Les concepteurs des équipements électriques cherchent à répondre aux critères de la Classe B, ceci leur permettant de couvrir un marché plus vaste, en allégeant les moyens de filtrage, de ne répondre qu'à la classe A.



**Figure 3.1:** Niveaux des perturbations conduites fixés par la norme EN 55022

### 3.5 Instrumentation et moyens en CEM

Le respect des réglementations impose des mesures et des essais, eux-mêmes définis par des normes. Le but est de tester un matériel en immunité et en émission dans les modes conduits et rayonnés. Dans ce contexte un certain nombre d'instruments ou moyens s'avèrent nécessaires parmi lesquels on peut citer :

- Les dispositifs d'environnement (champ libre, cage de Faraday, chambre anéchoïque, chambre à brassage de modes, plateaux tournants, ...)
- Le matériel de mesure (analyseur de spectre, wattmètre HF, RSIL, antennes et mesureurs de champ...).
- Les générateurs de perturbations (pistolet à DES, pince capacitive, amplificateur de puissance HF).

En outre Il faut distinguer deux types d'essais que l'on peut réaliser sur un produit à l'aide d'un moyen approprié [12,21].

**a) Les essais de type:** Ce sont des essais que le constructeur réalise pour la qualification de ses produits avant leur commercialisation

**b) Les essais sur site:** Ce sont des essais qui sont réalisés sur l'équipement qui intègre le produit. Ils sont faits sous la responsabilité de l'incorporateur et ont pour but de valider une installation, un équipement ou une machine.

**c) Les moyens d'essais:** Les moyens et les modalités d'application de ces essais sont décrits précisément dans les normes.

#### 3.5.1 Réseau Stabilisateur d'Impédance de Ligne (RSIL)

Le Réseau Stabilisateur d'Impédance de Ligne (RSIL) est un filtre qui est inséré entre le dispositif sous test et le réseau fournissant l'énergie. Son rôle est double. Il doit isoler le réseau, sur lequel peuvent exister des perturbations de mode commun et de mode différentiel, de l'équipement sous test. Cependant, il doit présenter à la fréquence du réseau une chute de tension sortie/entrée inférieure à 5% de la tension nominale lorsqu'il est parcouru par le courant nominal. Cet équipement, quasi-incontournable en CEM, permet une reproductibilité des mesures et de fixer, en partie, les conditions de mesure sur la plage normative de fréquences (150kHz-30MHz). Plusieurs structures de RSIL existent suivant les spécifications des normes [7, 23] La figure 3.2 représente un schéma de principe d'un RSIL monophasé.

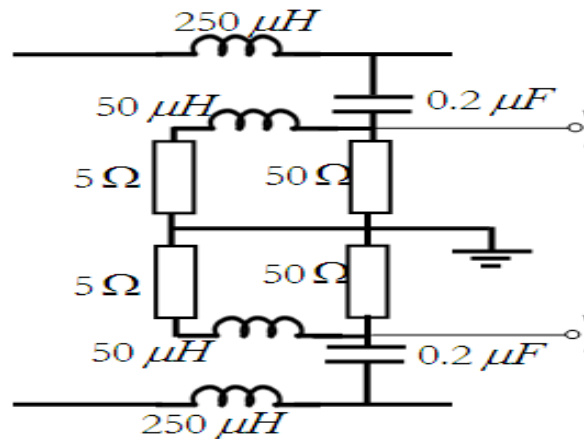


Figure. 3.2. Schéma de principe d'un RSIL monophasé.

Enfin, il doit présenter une impédance de fermeture constante vis-à-vis des perturbations à haute fréquence émises par le dispositif sous test, tant en mode commun que différentiel, et ceci indépendamment de l'impédance présentée par le réseau d'énergie. Cette impédance est normalisée par le CISPR. La norme définit les limites de variation de cette impédance, mesurée entre une borne de sortie et la terre dans la gamme de fréquence 10 kHz-100 MHz. Cette gamme est divisée en trois bandes (A, B, C). Le schéma équivalent relatif à chaque bande est indiqué la figure 3.3 [15, 42, 43]. Cependant, il existe trois approches

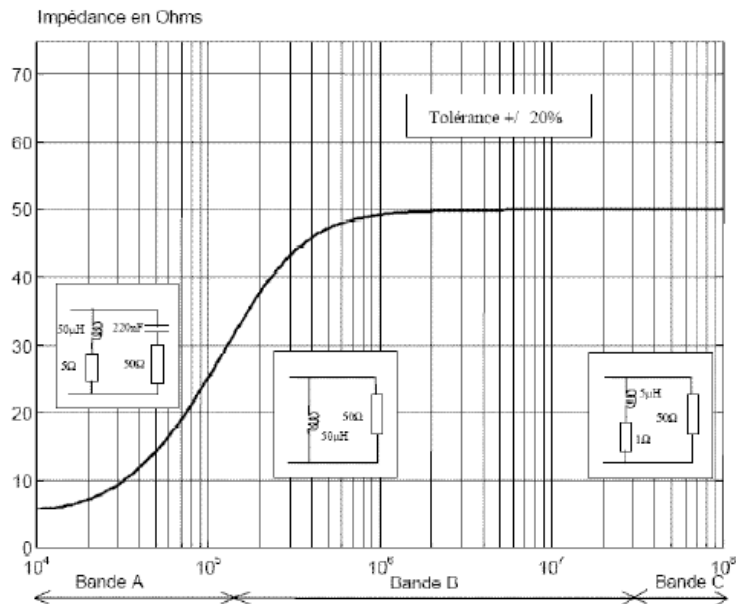


Figure 3.3: Impédance de RSIL monophasé de la figure précédente.

Dans la littérature, il existe plusieurs méthodes et moyens (matériel de mesure) de caractérisation expérimentale, comme: Séparateur de MC/MD, Capteurs de courant, Sondes isotropiques, Analyseur de spectre, Antennes, Cellule TEM, Cellule GTEM : Variante Haute Fréquence de la Cellule TEM

La majorité de ces méthodes sont normalisées par le Comité Electrotechnique International (CEI). Dans ce polycopié, nous nous intéressons précisément aux moyens et méthodes de caractérisation d'émission pour illustrer les mécanismes d'émissions conduites dans les structures électroniques de conversion d'énergie, le cas étudié, qu'on va citer comme un exemple une sources de perturbations conduites en électronique de puissance avec ces troubles liés à la forme d'onde (commutation, synchronisation, etc), qui fait l'objet da la section qui suit.

### 3.6 Electronique de puissance et CEM

Les structures électroniques de conversion d'énergie sont tout à fait adaptées pour illustrer les mécanismes d'émissions conduites. La CEM tend à montrer qu'il est nécessaire de limiter les variations rapides des grandeurs électriques (tension, courant) et électromagnétiques (champs) alors que les structures à découpage génèrent des variations brutales, pour gérer le transfert d'énergie souhaitée à moindre pertes [10, 12, 14, 16, 38,41].

Dans cet exemple nous avons proposé une analyse CEM des structures statiques de puissance, suivant le triptyque classique source-chemin-victime.

Comme le montre la figure 3.4 [10,12], le schéma reflète la richesse spectrale des structures de puissance, des harmoniques de la fréquence du réseau d'alimentation aux fréquences équivalentes des fronts de tensions et de courants engendrés par les commutations.

La cellule de commutation, brique élémentaire des convertisseurs statiques [10], joue le rôle de générateurs. En effet, la cellule de commutation, facilement identifiable dans les structures non isolées, représente l'association de deux interrupteurs commandés ou non. Elle est le siège de forts gradients de tension et de courant. Les formes d'ondes idéalisées, comme le montre la figure 3.5 [10], rendent compte de ces variations brutales.

Les phases de commutation n'auraient qu'un faible impact voire aucun, si il n'existait pas de couplage entre les interrupteurs et l'environnement proche de ces derniers. L'un des couplages les plus néfastes est défini par la capacité parasite reliant le potentiel du dissipateur généralement fixé à la terre au potentiel variable des transistors de la cellule.

L'exemple des transistors MOSFET de puissance présenté dans la figure 3.6 [10], en boîtier TO220 est caractéristique puisque la face arrière métallique de ces derniers est au potentiel du drain du composant. L'épaisseur et la permittivité du film isolant (exemple:Mylar,  $\xi_r = 2.5$ ) entre ce substrat métallique et le radiateur détermine alors cette capacité parasite qui offre un couplage privilégié en mode commun.



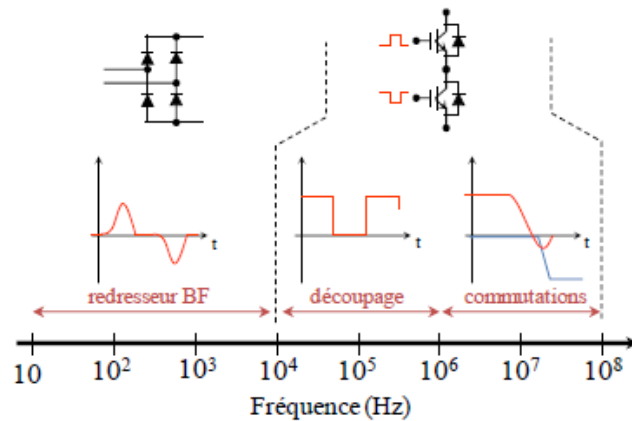


Figure 3.4: Plage spectrale usuelle associée aux structures électroniques de puissance.

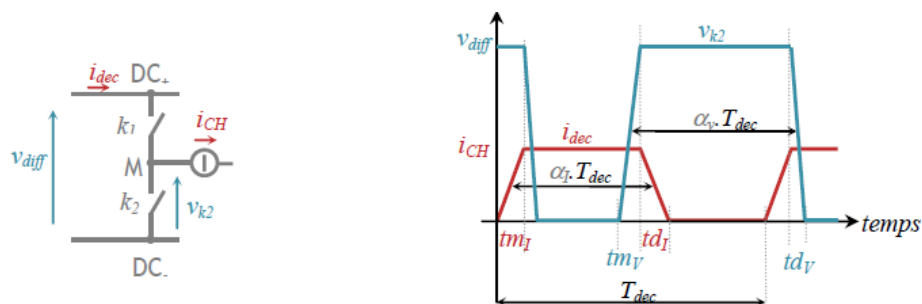


Figure 3.5 : Cellule de commutation et formes d'ondes théoriques associées.

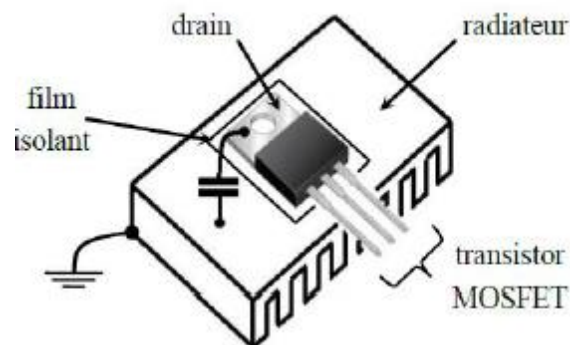


Figure 3.6: Couplage capacitif transistor - radiateur.

### 3.6.1 Analyse d'une cellule de commutation en mode commun

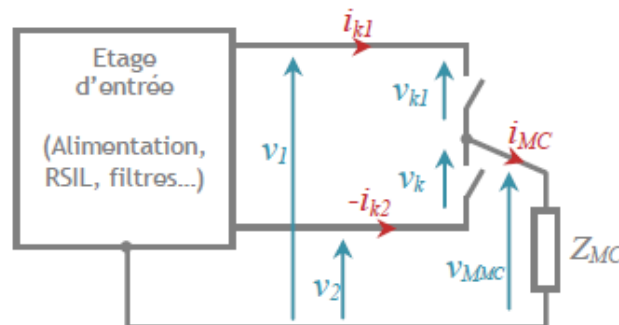
Pour estimer les émissions conduites, nous nous assurons un passage par une représentation particulière, pour laquelle les interrupteurs en commutation sont remplacés par des générateurs localisés [1, 10, 12], dont les tensions et courants produits se propagent par différents chemins de mode commun et/ou de mode différentiel.

L'étude du schéma générique d'une structure non isolée avec une cellule de commutation, présenté à la figure 3.7.

L'étage d'entrée est volontairement non défini, seul le fonctionnement de la cellule de commutation et la tension de mode commun qu'elle génère nous intéresse. Pour simplifier son étude et déterminer le générateur équivalent de mode commun quelques hypothèses sont nécessaires [10, 12, 14, 28, 29, 30]:

- Les modes différentiel et commun sont totalement découplés, il n'y a pas de conversion de l'un vers l'autre,
- Le couplage principal en mode commun est uniquement défini par une impédance  $Z_{MC}$  entre le point milieu de la cellule de commutation et la terre (la charge du convertisseur ne propose pas de chemin de propagation plus simple au courant de mode commun),
- Les tensions  $v_1$  et  $v_2$  entre le bus continu et la terre sont défini indirectement par l'étage d'entrée de la structure, elles sont liées à la topologie de cette partie du système.

Comme le montre le schéma général de la figure 3.7. Les courants et tensions notés ( $i_{k1}$ ,  $i_{k2}$ ) et ( $v_{k1}$ ,  $v_{k2}$ ) décrivent l'état électrique des deux interrupteurs quelle que soit leur technologie (diode, transistor). Cette représentation volontairement idéalisée permet une mise en équation simple et abordable [10, 25, 26, 27].



**Figure 3.7:** Cellule de commutation en mode commun.

La première étape consiste à exprimer la tension entre le point milieu de la cellule dont le potentiel est fortement variable et la terre en fonction des autres tensions de la cellule. Cette expression de tension entre le point milieu de la cellule lors de la commutation du MOSFET donnée par l'équation (3.2):

$$v_{M_{MC}} = \frac{v_1 + v_2}{2} + \frac{v_{k1} + v_{k2}}{2} \quad (3.2)$$

Les différentes tensions découpées présentent aux bornes des interrupteurs, sont définies par la tension de mode différentiel  $v_{diff}$ . Cette dernière correspond par définition à la tension du bus continu toutefois prise aux bornes de la cellule. La prédétermination rigoureuse de cette tension n'est pas aisée puisqu'elle dépend des chutes de tension liées aux courants parasites circulant dans les impédances du bus d'alimentation. Cette interaction, qualifiée en générale du second ordre, ne peut être prise en compte en utilisant le modèle simplifié proposé dans cette ressource ; seul un modèle mettant en œuvre une résolution itérative permet d'en tenir compte.

$$v_{M_{MC}} = \frac{v_1 + v_2}{2} + \frac{2 \cdot v_{k2} - v_{diff}}{2} \quad (3.3)$$

$$\text{Avec: } v_{diff} = v_1 - v_2 \quad (3.4)$$

Nous savons aussi que  $v_{k2}$  est définie en fonction de la stratégie de commande de la structure représentée par la fonction de modulation  $f_{sw}$  comme l'indique l'équation (3.5) et de la tension aux bornes des deux interrupteurs  $v_{diff}$  comme présenté par l'équation (3.6).

$$f_{SW} = \begin{cases} 1 & \text{Pour } k_1 \text{ fermé, } k_2 \text{ ouvert} \\ 0 & \text{Pour } k_1 \text{ ouvert, } k_2 \text{ fermé} \end{cases} \quad (3.5)$$

$$v_{k2} = f_{SW} \cdot v_{diff} \quad (3.6)$$

Le courant de mode commun  $i_{MC}$  exprimé aisément en fonction de l'admittance relative à  $Z_{MC}$  notée  $Y_{MC}$ , comme l'indique l'équation (3.7), est issu de la contribution de deux tensions particulières : la première représente, par définition, la tension de mode commun du bus continu au plus près de la cellule, et la seconde fait clairement apparaître le découpage puisqu'elle dépend directement de la loi de commande des interrupteurs.

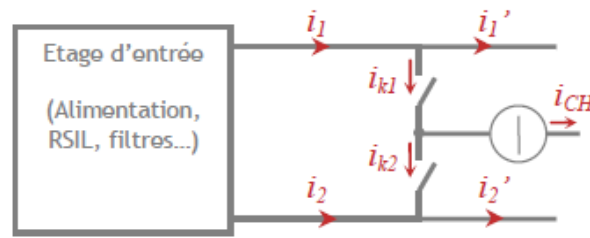
$$i_{MC} = Y_{MC} \left( \frac{v_1 + v_2}{2} - f_{MC} \cdot v_{diff} \right) \quad (3.7)$$

En suivant une démarche similaire, l'analyse des courants sur le bus continu en amont de la cellule, permet d'identifier un courant circulant en mode différentiel (figure 3.8).

Pour cela l'hypothèse de découplage de ce mode est encore nécessaire et suppose que seuls les courants de mode différentiel existent.

Sachant que:

$$i_{MD} = \frac{i_1 - i_2}{2} \quad (3.8)$$



**Figure 3.8:** Cellule de commutation en mode différentiel.

En appliquant l'équation (3.8) le courant  $i_{MD}$  est donné par la relation (3.9).

$$i_{MD} = \frac{i_1' - i_2'}{2} + \frac{i_{k1} + i_{k2}}{2} \quad (3.9)$$

Les courants des interrupteurs sont naturellement complémentaires et s'expriment en fonction du courant  $i_{CH}$ . L'expression du courant  $i_{MD}$  s'écrit, de ce fait, en fonction de  $i_{CH}$  par l'expression de l'équation :

$$i_{MD} = \frac{i_1' - i_2'}{2} + \frac{2i_{k1} + i_{CH}}{2} \quad (3.10)$$

Cette démonstration permet de donner des conclusions similaires au courant de mode différentiel circulant sur le bus continu à l'instar de la tension de mode commun.

Il se caractérise par la contribution de deux termes : l'un représente le courant de mode différentiel en aval de la cellule et le second est défini par le courant commuté puisqu'il s'écrit à l'aide du courant d'un interrupteur. Pour simplifier cette expression, et obtenir une relation finalement évidente, on remarque que le terme en aval de la cellule peut également s'écrire en fonction du courant de charge  $i_{CH}$ , comme montre l'équation (3.11).

L'expression (3.10) se simplifie considérablement par l'équation (3.12).

$$i_1' + i_2' = -i_{CH} \quad (3.11)$$

$$i_{MD} = i_1' + I_{K1} \quad (3.12)$$

Le courant dans l'interrupteur est directement lié au courant de charge  $i_{CH}$  par l'intermédiaire de la fonction de modulation  $f_{sw}$ .

L'équation (3.13) donne finalement la relation entre le courant recherché et le découpage du courant de charge:

$$i_{MD} = i_1' + f_{SW} i_{CH} \quad (3.13)$$

### 3.6.2 Modélisation d'une cellule de commutation\*

Comme montre les expressions principales (3.7) et (3.13), l'étude des émissions conduites d'une structure dans laquelle la cellule de commutation est clairement définie peut être abordée de manière relativement simple. Il s'agit finalement d'établir un schéma linéaire équivalent sur lequel les interrupteurs n'apparaissent plus. Ces derniers sont tout simplement remplacés par des sources localisées permettant de vérifier sur ce schéma les courants  $i_{MD}$  et  $i_{MC}$ .

L'équation (3.7) est relativement simple à interpréter et à retranscrire par un schéma équivalent comme montre, la figure (3.9). En s'imposant aux bornes de  $Y_{MC}$ , la différence entre la tension de mode commun en amont de la cellule et la tension produite par un générateur équivalent se substituant à la cellule, engendre le courant  $i_{MC}$ . Ce schéma équivalent bien qu'extrêmement simple impose que le reste de la structure soit également modélisé en mode commun et ne laisse pas la possibilité d'intégrer facilement le mode différentiel. Pour résoudre ce problème, il s'agit d'écrire différemment l'équation donnant le courant de mode commun, comme le montre l'équation (3.14).

$$i_{MC} = \frac{Y_{MC}}{2} v_1 + \frac{Y_{MC}}{2} v_2 - 2 \cdot \frac{Y_{MC}}{2} v_{gMC} \quad (3.14)$$

$$\text{Avec: } v_{gMC} = f_{MC} \cdot v_{diff}$$

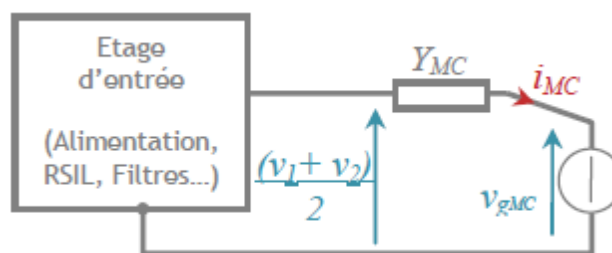


Figure 3.9: Schéma équivalent en mode commun.

Le schéma équivalent qui résulte de cette écriture fait de nouveau apparaître le bus continu et le reste de la structure sans modification, comme illustré dans la figure (3.10).

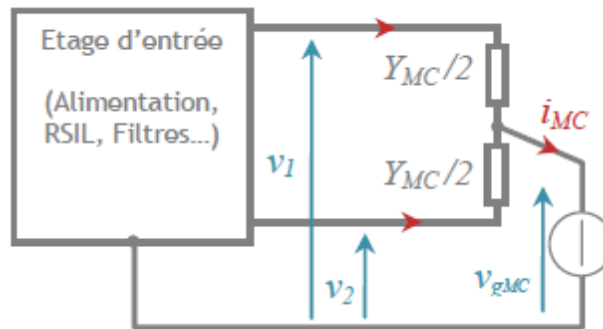


Figure 3.10: Schéma équivalent en mode commun distribué.

La définition retenue pour la fonction de modulation implique que l'interrupteur  $k_1$  est commandé et que la charge se reboucle sur  $k_2$ .

Le courant  $i'$  est par définition nul. L'interprétation de l'équation (3.12) relative au courant de mode différentiel devient encore plus simple puisque le générateur équivalent de mode différentiel est égal au courant de charge commuté selon l'équation (3.15).

$$i_{gMC} = f_{MC} i_{CH} \quad (3.15)$$

La superposition des deux modes, rendue possible par l'hypothèse du découplage des sources de perturbations, permet d'obtenir le schéma CEM équivalent de la cellule de commutation est représentée dans la figure (3.11).

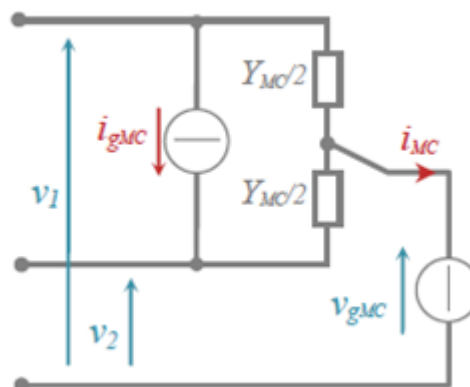


Figure 3.11: Modèle équivalent de la cellule de commutation.

### 3.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons proposé des rappelles et quelques multiples normes européennes et internationales imposées pour la commercialisation d'un équipement électrique, ainsi les tests et les moyens d'essais appliqués CEM dans le cadre de mesures normalisées.

Nous avons ensuite détaillé d'une manière générale, la caractérisation d'une émission électromagnétique rayonnée consiste à mesurer le niveau de champ électrique et/ou de champ magnétique généré par un dispositif.

Les structures électroniques de conversion d'énergie sont tout à fait adaptées pour illustrer les mécanismes d'émissions conduites et apporter les briques élémentaires de la modélisation de ces phénomènes. Nous avons également effectué, lors de cet analyse en exemple (électronique de puissance et CEM) pour, la maîtrise de la compatibilité électromagnétique des convertisseurs électroniques de puissance comme un réel enjeu, ces dispositifs s'incrant dans la majeure partie des systèmes électriques.

Les performances CEM doivent être anticipées et réfléchies dès la phase de conception. Le détail les techniques de protection en CEM et les moyenne de réduire les perturbations électromagnétiques, fait l'objet du chapitre suivant.