

Utilisation des MOSFET en mode avalanche

Daniel CHATROUX, Julien CHAUVIN

Université Grenoble Alpes, F-38000 Grenoble, France

CEA, LITEN F-38054 Grenoble, France

RESUME – Le phénomène d’avalanche des MOSFET permet d’écarter la tension par le composant lui-même, plutôt que de lui associer une diode dite Zéner ou une fonction écarteur par le circuit. La présentation est centrée sur l’évolution des spécifications, des méthodes de caractérisation et des performances des composants en avalanche. Une amélioration d’une méthode de caractérisation est proposée. D’autre part l’utilisation de l’avalanche dans des applications est illustrée par un commutateur à MOSFET 100 kV utilisé depuis vingt ans sur le Tokamak Tore Supra à Cadarache et par le développement récent d’un commutateur 10 kA pour le test en court-circuit à durée contrôlée des accumulateurs ou batteries Lithium ion.

Mots-clés—Avalanche, écarteur, MOSFET, mise en série.

1. INTRODUCTION

Très souvent, l’utilisation de l’avalanche des transistors pour écarteur une tension est considérée comme dangereuse, préjudiciable à la durée de vie des composants, et non utilisable pour des transistors en parallèles. Dans les années 2000, le CEA a démontré qu’il était possible d’utiliser des MOSFET caractérisés en courant d’avalanche et montés en parallèle et en série sur des commutateurs de hautes tensions et forts courants avec d’excellentes performances. L’objectif de cette présentation est de faire un état des lieux des connaissances d’aujourd’hui sur l’avalanche, de l’évolution des spécifications et des méthodes de mesures aisément disponibles pour les concepteurs.

2. AVALANCHE DES MOSFET

2.1. Phénomène physique de l’avalanche des composants

L’avalanche correspond au passage de courant lors de l’atteinte d’une tension correspondant au champ électrique critique dans la jonction tenant la tension, avec maintien de la tension aux bornes.

C’est ce phénomène qui est utilisé dans les diodes dites Zéner, ainsi que les diodes écarteuses de puissance comme les Transils®. L’effet Zener est un écarteur à un seuil de quelques volts seulement. Au-delà, l’écarteur s’effectue par l’effet d’avalanche. Pour des tensions voisines de 5-6V ces effets à coefficients de température opposés coexistent et permettent une diminution de la dérive en température qui est connue. Pour les diodes écarteuses de puissance, il n’y a pas de spécification de niveau maximum de courant d’avalanche. Par contre, les contraintes thermiques imposent une énergie maximale pour les durées courtes et une puissance maximale que peut dissiper le composant pour les durées longues.

La physique de l’avalanche des MOSFET est aujourd’hui bien décrite dans certaines notes d’applications [1]. Pour les MOSFET, la diode interne est en fait un transistor bipolaire interne dont la base et l’émetteur sont court-circuités. En mode avalanche, il existe un risque qui est d’amorcer localement le transistor par le phénomène de second claquage, ce qui conduirait à sa destruction par point de fusion localisé. C’est donc le dépassement d’un niveau de courant qui donne lieu à la destruction, selon la qualité de maintien du court-circuit sur toute la surface du composant.

2.2. Evolutions des spécifications au cours du temps

Les MOSFET n’étaient classiquement pas spécifiés en mode avalanche, ou spécifiés en énergie d’avalanche pour des niveaux de courants faibles, bien inférieurs aux besoins des applications. Il y a vingt ans, les travaux du CEA sur les commutateurs de haute tension ont montré que le critère dimensionnant était le niveau de courant [2]. Par exemple, pour des durées d’avalanche de 200 ns et 1µs, les composants cassaient exactement au même niveau de courant d’avalanche. Cela signifie bien que l’énergie (qui variait alors d’un facteur 5) n’est pas le critère pertinent. C’est le niveau de courant qui est le paramètre limitant. D’autre part, c’est le design du composant qui assure un bon court-circuit base émetteur du transistor parasite du MOSFET. Les travaux visaient à sélectionner et qualifier une référence de composant d’un fournisseur, puis à utiliser les composants sans aucun tri individuel. Il fallait par contre surveiller que le design n’évolue pas chez le fabricant au cours du temps.

Ceci avait permis de tracer l’aire de sécurité avec l’avalanche de l’IRF840 de IR, qui est un MOSFET 8A 500V.

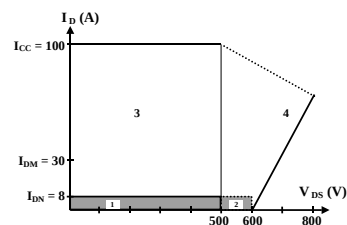


Figure 1: Aire de sécurité de l’IRF840

Le composant supportait 60A en avalanche. L’aire de sécurité est très étendue, mais il restait encore une zone où il peut être détruit, par exemple pour l’ouverture d’un courant de court-circuit supérieur à 60A. Une limitation de la tension de grille à 10 volts permettait de rester dans cette aire.

Aujourd'hui, les spécifications des MOSFET en avalanche ont beaucoup évoluées. Certains composants sont spécifiés en mono-coup, mais aussi en mode répétitif pour un courant d'avalanche semblable à leur courant nominal. Lors de la conception, il faut alors seulement ajouter les pertes en phase d'avalanche, lors du calcul des pertes de commutation.

2.3. Caractérisation des composants en mode avalanche

Historiquement au CEA, la caractérisation en avalanche des MOSFET se faisait à courant constant. Ce courant carré facilitait les interprétations. Par contre le banc de test (Figure 2) nécessite une alimentation et un interrupteur électronique de haute tension associés à une résistance non inductive de forte énergie.



Figure 2 : Banc de test en avalanche à courant constant

Pour les spécifications actuelles des MOSFET, le montage de test utilise l'ouverture d'un courant d'un circuit inductif [1], Figure 3.

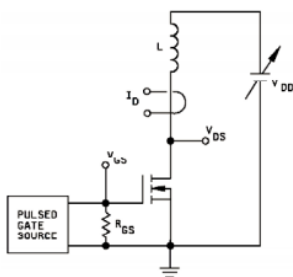


Figure 3: Test d'un MOSFET en avalanche avec forme de courant triangulaire.

Si la mesure de courant ne pose pas de problème de métrologie (sondes à effet Hall sur oscilloscopes), une mesure de tension fidèle, précise et rapide aux bornes du MOSFET est délicate à partir de quelques centaines de volts. La solution proposée est d'utiliser un diviseur entre une résistance 4950 ohms (constituée de résistances couche métalliques en séries pour tenir la tension à l'ouverture), placées en série avec un câble 50 ohms chargé par 50 ohms sur l'entrée de l'oscilloscope (Figure 4). Les mesures basses impédances, de l'ordre de 5 kilohms, sont connues dans le domaine des hautes tensions pulsées lorsqu'on veut étudier des impulsions ou des fronts rapides. Cette technique est ici utilisable du fait de la faible tension d'alimentation. Le concepteur peut alors étudier aisément le comportement en avalanche des composants, rechercher les limites en courants et pour certains composants observer leur tendance à osciller spontanément, qui induit un risque fort de casse en utilisation.

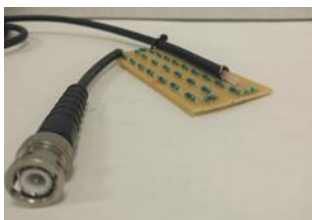


Figure 4 : sonde 5 kohm sortie 50 ohms

Du fait de la sortie en 50 ohms, la bande passante de la sonde réalisée peut être caractérisée en utilisant la sortie de calibration d'un analyseur de spectre (Figure 5).

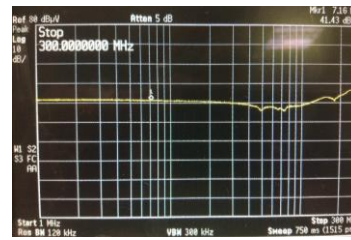


Figure 5 : comportement fréquentiel de la sonde réalisée

3. EXEMPLES DE REALISATION

3.1. Interrupteur haute tension 100 kV à base de MOSFET en série

Pour les besoins d'augmenter la fiabilité et de baisser le coût de fonctionnement de lasers impulsionnels devant fonctionner en continu pendant des années, le CEA a développé, il y a vingt ans des commutateurs électroniques de haute tension (25 kV) fort courant (2kA) commutant en 20 ns utilisant 3500 MOSFET en série et parallèle [2]. Du fait d'une commande de fort courant permettant de commander les composants d'un étage malgré un MOSFET en défaut, la technologie développée est tolérante à la panne et permet une durée de vie de 30 ans, sans besoin d'intervention [3].

Cette technologie utilise l'avalanche de MOSFETs qui sont non spécifiés pour cet usage, mais dont la référence a été caractérisée en courant d'avalanche, sans tri individuel.

Des références de diodes ultrarapides ont été caractérisées en avalanche. Le critère choisi a priori pour l'utilisation en série et matrice était que la diode supporte son courant nominal en avalanche. L'expérience a montré par la suite la pertinence de ce choix.

Le commutateur 25kV 2kA utilisait deux blocs en parallèles constitués de cinq cartes 5kV 1kA, mises en séries.



Figure 6 : Carte 5 kV 1kA

Les cartes étaient placées au sein d'une cuve à huile minérale avec une circulation d'huile et échangeur externe huile/eau. Le commutateur était installé en lieu et place des commutateurs à gaz (thyatron) utilisés précédemment. Ces tubes avaient une durée de vie limitée à 1000 heures.

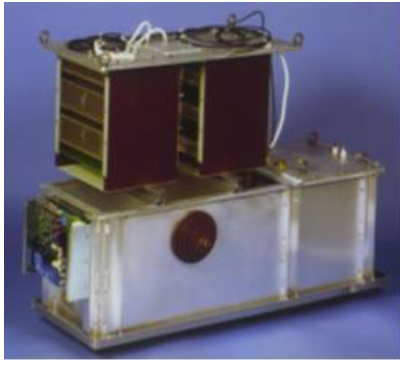


Figure 7 : commutateur 25 kV 2 kA ouvert

Les éléments clés de cette technologie sont :

- Pour la mise en série, il n'est pas nécessaire de réaliser un équilibrage en tension des étages, il faut simplement maintenir les composants dans leur aire de sécurité par écrêtage.
- Pour certaines références de composants, l'écrêtage peut s'effectuer par avalanche des composants.
- Le critère pertinent pour l'avalanche est le courant maximum autorisé et non l'énergie comme cela peut être spécifié.
- Selon le niveau de courant à écrêter des diodes écrêteuses de puissance (Transils®) peuvent être utilisées en complément.
- Pour les transistors en série, une très bonne synchronisation des commandes est nécessaire. Pour cela une commande par transformateur d'impulsion peut être utilisée. Le primaire est un câble haute tension traversant des tores de ferrite. Le secondaire étant constitué d'une spire autour d'un tore de ferrite, le tore et la spire étant référencée au potentiel de l'étage de la mise en série à commander.
- La commande utilise une structure darlington avec écrêtage de la tension sur le bus de commande. Sur la carte de la figure 3, il y a trois secondaires d'une spire sur le tore. Chacune de ces spires pilote un des trois MOS de commande. Chacun d'eux est monté en darlington, avec écrêtage de la tension fournie, pour commander quatre Mos à droite et quatre MOS à gauche. Cette commande permet une synchronisation des MOSFET en parallèle avec un décalage de l'ordre de la nanoseconde. En cas de défaillance d'un MOS, la tenue en tension de son étage est perdue. Par contre, comme la commande est apte à piloter les autres MOS malgré le MOS en défaut, et comme celui-ci a une résistance en défaut voisine de sa $R_{ds(on)}$, la répartition du courant est conservée et l'interrupteur continue de fonctionner. Un dimensionnement classique avec 20% de marge en tension amène à une tolérance à la panne pendant trente ans, avec la possibilité de réparation pendant cette période.
- Deux générations de cartes ont été développées, l'une pour la décharge de condensateurs dans les lasers, l'ouverture se faisant à énergie nulle, l'autre permettant les deux commutations ON et OFF et la tenue au court-circuit par mémorisation de l'ordre sur les MOS de commande.
- Pour les tensions de l'ordre de 100 kV, les tores sont cascades et systématiquement référencés en potentiel au sein de la mise en série : un câble 100 kV traverse des premiers tores, le secondaire étant constitué d'un câble 20 kV, ce câble 20 kV traverse les tores des cartes à commander pour la partie qui le concerne.

- Du fait des niveaux de tension, une réalisation sous huile est nécessaire. En air, la génération d'ozone est dangereuse pour les personnels et les équipements.
- Avec une circulation d'huile pour évacuer les pertes par exemple par un échangeur huile eau, le transfert thermique entre le MOSFET et l'huile autorise le refroidissement de ces composants sans aucun dissipateur, donc à coût minimal.

Cette technologie a été réutilisée pour les interrupteurs de sécurité du Tokamak Tore Supra à Cadarache, rebaptisé WEST. En cas de court-circuit dans l'un des Klystrons qui fournissent des microondes pour chauffer le plasma, l'interrupteur 100 kV 20A ouvre le courant de défaut [4].



Figure 8 : Ensemble des Klystrons et des leurs interrupteurs associés

Vingt ans plus tard, certains des équipements développés sont encore utilisés, comme celui présenté ci-dessus (Figure 8).

3.2. Commutateur basse tension 10 kA pour test de batteries Lithium-ion

Le CEA mène des recherches sur les batteries Lithium-ion depuis les matériaux jusqu'aux applications transport, c'est-à-dire la conception des batteries répondant aux besoins des véhicules électriques routiers, maritimes ou aériens. Pour l'étude de la sécurité de ces batteries, qui est un des points durs de la technologie, le CEA s'est muni de plates-formes de tests abusifs. Pour ces besoins de tests, un commutateur de mise en court-circuit a été développé pour un courant maximum de 10 kA.

Pour cette application, du fait du niveau de courant, le principal problème à traiter est l'énergie des quelques mètres de câblage entre la batterie en test et l'interrupteur électronique. Le risque de feu impose une distance minimale de 1,50 mètre. Malgré un câblage conçu pour être faiblement inductif, l'énergie des câblages à absorber est de 50 Joules. La résistance équivalente doit être inférieure au milli-ohm.

Plutôt que d'utiliser des composants de plus haute tension associé à un écrêteur, il a été choisi d'optimiser le système en utilisant 100 interrupteurs MOSFET 100 V en parallèle et d'écrêter l'énergie dans l'ensemble de ces composants.

Une première phase a permis de vérifier la tenue en courant d'avalanche de trois MOSFET en parallèle. Ensuite une carte 2 kA a été réalisée :

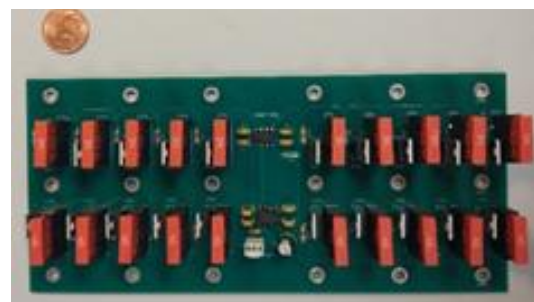


Figure 9 : Carte 2 kA constituée de 20 MOSFET

Les fusibles en série avec chaque MOSFET permettent d'ouvrir son courant en cas de défaillance de celui-ci.

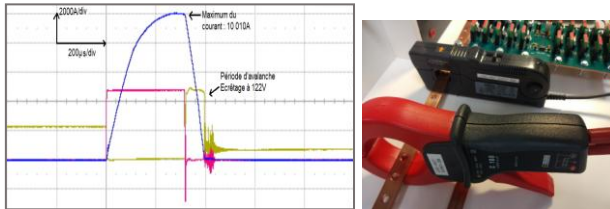


Figure 10 : test à 10 kA

La figure 10 présente le test d'ouverture à 10 kA avec avalanche à la tension de 122V dans l'ensemble des MOSFET. Pour cette réalisation, les composants sont utilisés en respectant leur spécification de courant d'avalanche de 100 A. Pour des forts niveaux de courant d'avalanche, la résistance interne apparente équivalente permet une bonne répartition du courant d'avalanche entre les composants en parallèle.

Pour les tests en laboratoire, le courant de 10 kA été généré par une banque de condensateurs. La durée d'impulsion était limitée par l'énergie stockée dans les condensateurs. Le premier test sur un module Lithium-ion a été fait à 6 kA qui était le courant de court-circuit du module.

Nous avons poursuivi les caractérisation en courant d'avalanche du composant utilisé. Il s'agit du IPP023N10N5 qui est spécifié pour 120 ampères, une tension maximale de 100V et une énergie de 1 J pour un courant d'avalanche de 100A.

On observe que ce composant n'est pas spécifié en courant maximum en avalanche, mais que le courant du test en avalanche est élevé, analogue au courant nominal spécifié.

Nous avons réalisé des tests à des courant d'avalanche supérieurs jusqu'à destruction et tracé le point sur l'aire de sécurité du composant.

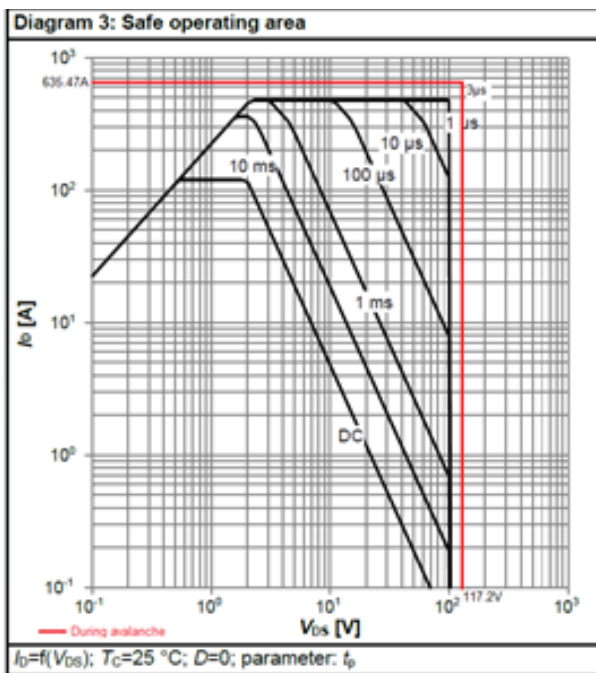


Figure 11 : courant d'avalanche maximum

Ce MOSFET a un courant maximum en avalanche de 630A, qui est 5 fois son courant nominal ; 1,3 fois le courant pulsé maximum spécifié, et 6 fois le courant de test en avalanche.

Dans le cas de MOSFET en parallèle, comme dans notre réalisation, l'équilibrage des courant est défini par la dispersion de la tension d'écrouissage des composants, la résistance série apparente du phénomène d'avalanche et l'évolution de la tension d'avalanche avec la température. Nous avons mené des essais pour mesurer ces paramètres.

En plaçant un MOSFET sur une plaque chauffante régulée en température, on observe que la tension d'avalanche croît de 0.04V/°C.

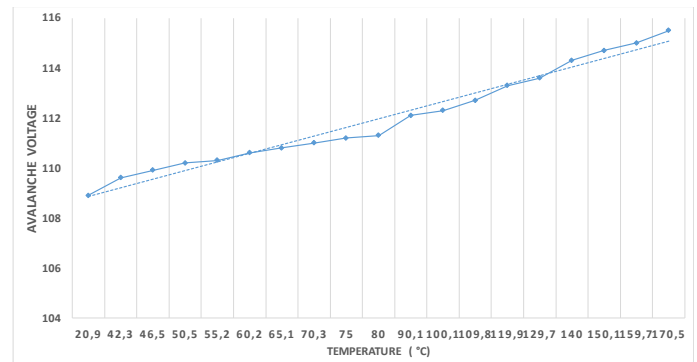


Figure 12 : tension d'écrouissage en fonction de la température

La résistance série du phénomène d'avalanche varie peu, elle est de 50 milliohms pour une température de 25°C et atteint 80 milliohms pour une température de 150°C. Cette valeur est à comparer à la $R_{DS(on)}$ du composant qui est de 2,3 milliohms. La forte résistance série apparente du phénomène d'avalanche tend à équilibrer les courants d'avalanche entre les MOSFET en parallèle.

Pour des composants de plus haute tension, on a pu observer un courant d'avalanche plus limité pour un composant de type CoolMOS, et une tendance à osciller.

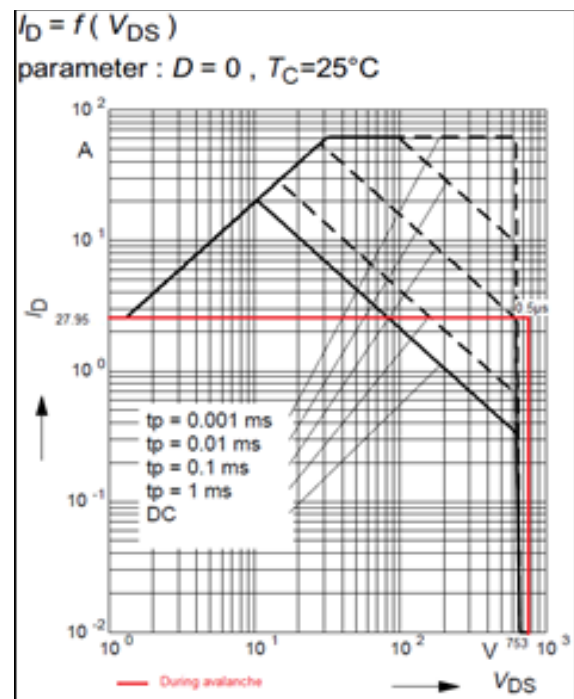


Figure 13 : courant d'avalanche d'un CoolMOS 20A

On a aussi pu observer le très bon comportement d'un MOSFET SiC.

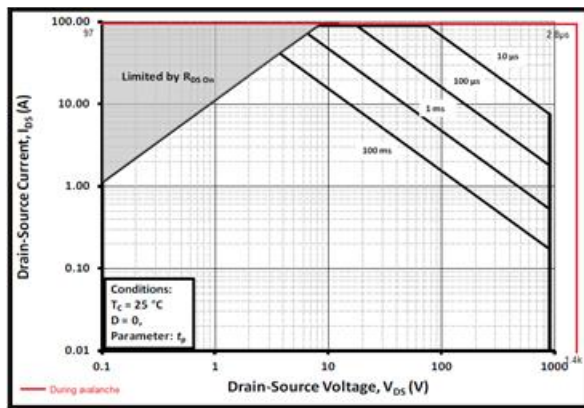


Figure 14 : courant d'avalanche d'un MOSFET SiC

Le MOSFET SiC 900V testé a un courant d'avalanche maximum de 97A, soit 2,7 fois son courant nominal (36A). Il est voisin du courant pulsé maximum spécifié. Ce composant est spécifié pour un courant d'avalanche de test de 22A.

4. CONCLUSIONS

Dans les année 2000, le CEA a développé une technologie de commutateurs de haute tension fort courant et a montré les performances et la fiabilité de cette technologie. Elle utilisait des MOSFET très standards après avoir montré expérimentalement que ces composants avaient un bon comportement en avalanche. Un dispositif selon cette technologie est sur le tokamak du CEA de Cadarache et fonctionne toujours.

A cette occasion, il a été montré que le paramètre pertinent était le courant avec un seuil à ne pas dépasser. La limite en énergie est la conséquence thermique selon la durée de test choisie.

Pour les diodes, il avait été choisi arbitrairement de sélectionner les références de diodes supportant leur courant nominal en avalanche pour l'utilisation en série et en matrice. Ce choix s'est avéré pertinent dans les années qui ont suivi.

Aujourd'hui, les MOSFET ne sont toujours pas spécifiés en courant maximum d'avalanche, mais sont spécifiés en énergie pour des niveaux de courant élevés. Ce niveau renseigne sur la robustesse du composant en avalanche.

Avec les composants spécifiés 100A en avalanche, un interrupteur 10 kA apte à absorber l'énergie des câblages avec un module Lithium à tester a été réalisé.

Au niveau des tests, comme le courant maximum d'avalanche est le paramètre pertinent, un test d'ouverture inductif est suffisant et très simple de mise en œuvre. Une sonde basse impédance 5 kohms a été proposée pour la mesure précise de la tension

L'évolution en température et la résistance apparente équivalente du composant choisi ont été présentés.

Parmi les autres MOSFET de plus haute tension testés, les performances en avalanche d'un premier MOSFET SiC ont été caractérisées démontrant ainsi un bon comportement en avalanche de cette technologie.

5. REFERENCES

- [1] Power MOSFET Avalanche Design Guidelines, AN-1005, Vishay Siliconix
- [2] D. Chatroux, Y. Lausenaz, J.F. Villard, L.Garnier, D.Lafore, Power switch : the standard small components strategy. PCIM'99,
- [3] Y. Lausenaz, Thèse en génie Electrique, Contribution à la fiabilité des interrupteurs haute tension matriciels, soutenue en 2000
- [4] B. Beaumont, E. Bertrand, Brugnetti, D. Chatroux, F. Kazarian, R. Milly, M. Prou, H. Rigole, 100 kV solid-state switch for fusion heating systems. 23rd Symposium of Fusion Technology.