



CEM d'une alimentation impulsionnelle 25 KV / 1600 A Cpmmutant A 1 MV/ μ S

Daniel Chatroux, Jean-François Villard, Yvan Lausenaz, Laurent Garnier

► To cite this version:

Daniel Chatroux, Jean-François Villard, Yvan Lausenaz, Laurent Garnier. CEM d'une alimentation impulsionnelle 25 KV / 1600 A Cpmmutant A 1 MV/ μ S: EMC of a 25 kV / 1600 A pulse power supply switching 1 MV/ μ s. CEM Expo - Congrès international d'électromagnétisme, Oct 1999, Paris, France. cea-03293726

HAL Id: cea-03293726

<https://cea.hal.science/cea-03293726>

Submitted on 21 Jul 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CEM D'UNE ALIMENTATION IMPULSIONNELLE 25 KV / 1600 A COMMUTANT A 1 MV/ μ S

EMC of a 25 kV / 1600 A pulse power supply switching 1 MV/ μ s

Daniel CHATROUX

Jean-François VILLARD

Yvan LAUSENAZ

CEA VALRHO

DCC/DTE/SLC/LETC

BP 111

26702 PIERRELATTE (France)

Tel : 04.75.50.75.63

Fax : 04.75.50.49.62

Daniel.Chatroux@CEA.fr

Laurent GARNIER

CENTRALP ENERTRONIC

ZI Tharabie, rue du ruisseau

38290 St QUENTIN FALLAVIER (France)

Tel : 04.74.95.40.25

Fax : 04.74.95.40.29

L.Garnier@ENERTRONIC.fr

Résumé :

Dans le cadre du projet SILVA d'enrichissement de l'uranium par lasers, le Laboratoire d'Electronique de Puissance du C.E.A. PIERRELATTE a développé depuis plusieurs années des alimentations impulsionnelles de forte puissance destinées aux lasers à vapeur de cuivre. Ces alimentations utilisent une technologie innovante de commutateurs rapides haute tension, composés de mises en matrice de composants standard de l'Electronique de Puissance. Toute une gamme de commutateurs complémentaires a ainsi été développée, et trouve aujourd'hui des applications de plus en plus nombreuses dans divers secteurs industriels, grâce au partenariat étroit mis en place avec la société CENTRALP ENERTRONIC.

Le produit le plus industrialisé issu de ces recherches est une alimentation impulsionnelle 25 kV / 1600 A commutant en 20 ns, ce qui correspond à une vitesse de chute de la tension de 1 MV/ μ s. La maîtrise de la CEM d'un tel produit est une absolue nécessité pour son bon fonctionnement. Si l'ordre de grandeur des perturbations existant dans une telle alimentation est nettement supérieur à ceux couramment rencontrés, les moyens de s'en prémunir et les règles de CEM appliquées sont identiques.

Le savoir-faire acquis sur ces alimentations, dont la CEM est un élément, permet aujourd'hui d'afficher une fiabilité exemplaire, avec des temps de fonctionnement dépassant 70.000 heures sans panne.

CEM D'UNE ALIMENTATION IMPULSIONNELLE 25 KV / 1600 A COMMUTANT A 1 MV/ μ S

Daniel CHATROUX, Jean-François VILLARD,
Yvan LAUSENAZ
CEA VALRHO - DCC/DTE/SLC/LETC
BP 111
26702 PIERRELATTE
04.75.50.75.63

Laurent GARNIER
CENTRALP ENERTRONIC
Établissement de l'Isle d'Abeau
Rue du Ruisseau
38290 SAINT QUENTIN FALLAVIER
04.74.95.55.21

1. SILVA : UN MOTEUR POUR L'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE

1.1. Un défi technologique

Le Commissariat à l'Energie Atomique a en charge la recherche dans le domaine nucléaire en France. Une de ses missions, définie contractuellement avec l'Etat, consiste en la mise au point d'un nouveau procédé d'enrichissement de l'uranium.

L'objectif de ce procédé est d'augmenter la teneur de l'uranium naturel en isotope 235, avec des coûts réduits par rapport au procédé actuel utilisant la diffusion gazeuse.

Ce procédé, SILVA, de Séparation Isotopique par Laser de la Vapeur Atomique d'uranium, consiste en une photoionisation sélective de l'isotope 235 de l'uranium sous forme vapeur à l'aide de faisceaux lasers (cf. figure 1). L'uranium sous forme métallique est vaporisé à l'aide du faisceau d'un canon à électrons. La vapeur extraite est éclairée par un faisceau laser accordé sur la fréquence d'excitation des atomes d'uranium 235. L'isotope ionisé est ensuite extrait par un champ électrique et recueilli sur les plaques collectrices du séparateur.

Le faisceau laser est créé par des lasers à colorants, pompés optiquement par des lasers à vapeur de cuivre. Ces derniers nécessitent des alimentations électriques particulières.

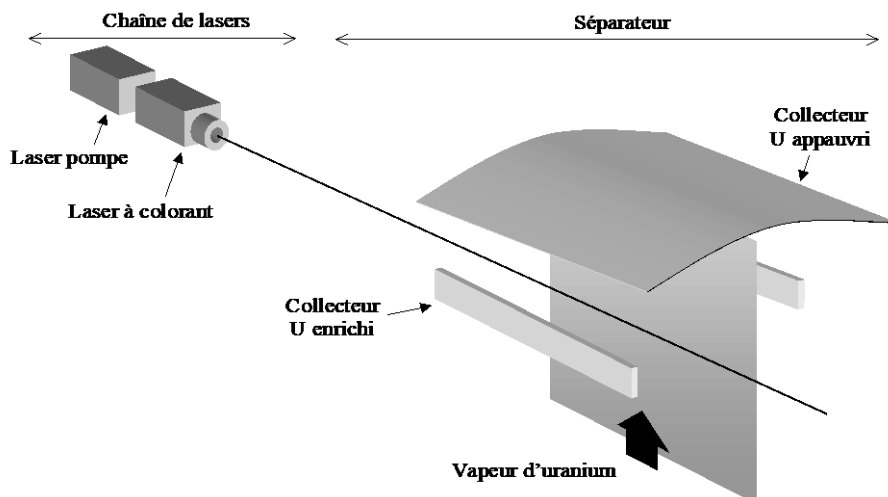


Figure 1 : Schéma de principe de SILVA

1.2. Des besoins spécifiques en électronique de puissance

Les besoins spécifiques à SILVA en électronique de puissance concernent principalement trois types d'alimentations :

- les alimentations pulsées pour lasers à vapeur de cuivre ;
- les alimentations continues pour séparateurs ;
- les alimentations continues pour canons à électrons.

Les alimentations pour lasers à vapeur de cuivre (LVC) ont donné lieu à d'importants développements dans le domaine de la mise en série de composants de puissance [1]. Par exemple, le cahier des charges d'une alimentation d'un LVC de 100 W optiques était de fournir des impulsions de 1600 A sous 25 kV pendant 200 ns, à la fréquence de répétition de 5 kHz.

Le but des recherches menées conjointement par le **Laboratoire Électrotechnique et Technologie des lasers à vapeur de Cuivre (LETC)** et l'**École Supérieure des Ingénieurs de Marseille (ESIM)** était de remplacer les tubes à vide ou à gaz précédemment utilisés, qui posaient de sérieux problèmes de fiabilité et de durée de vie (1000 heures pour les thyatron, 8000 heures pour les tétrodes). Le choix s'est orienté vers des composants semi-conducteurs.

1.3. Les choix dans la mise en série

Très tôt, un choix a dû être fait entre les deux manières naturelles de réaliser la mise en série de semi-conducteurs : l'utilisation d'un petit nombre de composants haute tension, ou d'un grand nombre de composants faible ou moyenne tension.

Pour l'application aux lasers à vapeur de cuivre, les critères essentiels sont la vitesse de commutation, la fréquence de récurrence élevée et le faible rapport cyclique ($\alpha \sim 0,1\%$). Les composants haute tension (au-delà de 2000 V par composant) se révélèrent alors inadaptés, en raison des difficultés d'évacuation des charges électriques stockées et des pertes, induisant une diminution des vitesses de commutation et une augmentation des problèmes thermiques.

Notre choix s'est alors porté sur l'association de composants semi-conducteurs standard. La mise en série de composants très rapides, tels que les transistors MOSFETs et les transistors bipolaires à grille isolée (IGBTs), dans les gammes de tension 500 à 1000 V, fut activement étudiée dès le début des années 90 [2], pour aboutir aux produits industriels actuels.

La philosophie adoptée dans ces mises en série consiste à ne pas rechercher à tout prix l'équilibrage des tensions, mais à assurer plus simplement que la tension individuelle de chaque élément demeure dans la zone de sécurité du composant. Les commandes, très rapides, sont réalisées par un transformateur dont le primaire est constitué d'un câble haute tension. Ces principes, particulièrement bien adaptés à nos conditions de fonctionnement (haute fréquence et petit rapport cyclique), ont guidé la conception de nos produits.

2. LES RESULTATS CONCRETS DES COMMUTATEURS UTILISANT LA MISE EN SERIE DES MOS

2.1. Le faible coût des matrices de composants standard

Les principes de conception adoptés pour réaliser la fonction de commutation haute tension se révèlent particulièrement judicieux en terme de réduction des coûts :

- association de petits composants standard, sans test individuel ;
- réalisation sur circuit imprimé (PCB) ;
- conception modulaire sous forme de cartes de 3 à 5 kV, que l'on peut associer en série pour atteindre plusieurs dizaines de kilovolts, et permettant l'industrialisation ;
- isolation par transformateur entre les signaux de commande et la puissance ;
- circuit de commande synchrone par mise en série des primaires (gigue < 2 ns) ;
- confinement des tensions individuelles par écrêtage, soit en utilisant la capacité d'avalanche du dispositif lui-même, soit par écrêtage, actif ou passif ;
- pas de radiateur, dans la mesure du possible ;
- refroidissement réparti, soit en convection forcée, soit dans l'huile.

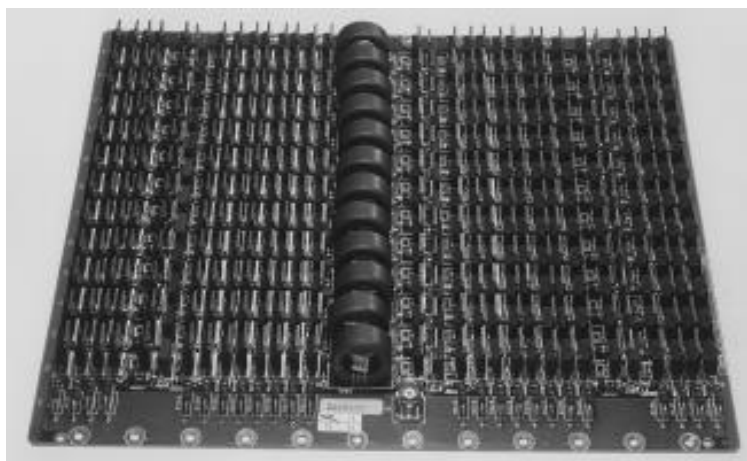


Figure 2 : Carte interrupteur 5 kV, 800 A, de 350 MOS

La première série de produits développés de manière industrielle selon ces principes par notre partenaire, la société **Centralp Enertronic**, est une gamme d'interrupteurs haute tension utilisant des cartes à MOS (cf. figure 2) dont les caractéristiques sont les suivantes :

- 350 MOS de type 500 V, 0,85 Ω , 40 A crête ;
- 5500 V max., 5000 V nom. ;
- 1000 A max., 800 A nom. ;
- chute de la tension en 20 ns.

Plus de 300 cartes ont été produites à ce jour.

2.2. Cuves de commutation 25 kV / 1600 A

Les cartes à MOS sont associées pour constituer une cuve de commutation (cf. figure 3), produit industriel implanté depuis plusieurs années sur les lasers à vapeur de cuivre du CEA, à Saclay et à Pierrelatte. Ses caractéristiques sont :

- 25 kV nom. ;
- 1600 A nom. ;
- chute de tension en 20 ns.

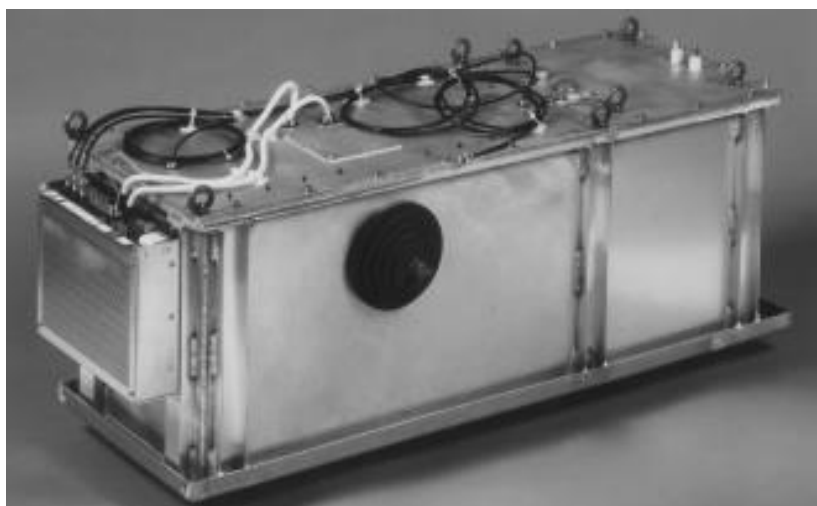


Figure 3 : Cuve de commutation 25 kV, 1600 A, de 3500 MOS

Ces cuves à MOS ont été implantées en lieu et place des cuves à thyratrons précédemment utilisées.

Le prix de ce produit est sensiblement identique à celui des cuves à thyratrons équivalentes, mais il possède une fiabilité très nettement supérieure.

2.3. Redondance : la clef d'une fiabilité exemplaire

Les calculs classiques de fiabilité prennent pour hypothèse que la défaillance d'un composant entraîne par propagation la défaillance des autres composants, et par conséquence la panne de l'équipement.

En réalité, nous avons pu observer [3] que la mise en série, telle qu'elle est réalisée au LETC, répond à un comportement différent : dans une association de N composants en série, si le nombre de composants est supérieur à ce qui serait strictement nécessaire pour tenir la tension, la défaillance d'un composant ne se propage pas aux autres. On se retrouve simplement avec (N-1) composants fonctionnant en série. Le circuit tolère la défaillance d'un certain nombre de composants.

Ainsi, avec une marge de sécurité normale sur le nombre de composants utilisés, le montage supporte la perte d'un certain nombre d'entre eux. Sur nos cartes, une marge de sécurité de quelques MOS nous permet donc de supporter la défaillance d'un nombre équivalent de composants.

Ce comportement confère aux cuves de commutation une très grande fiabilité sans aucun surcoût. Le temps cumulé de fonctionnement des cuves dépasse aujourd'hui 70.000 heures sans aucune panne des commutateurs à MOS.

3. UNE GAMME DE COMMUTATEURS COMPLEMENTAIRES

Parallèlement au développement de la carte à MOS, déjà présentée, un certain nombre d'autres produits ont été réalisés, et sont aujourd'hui disponibles de manière industrielle [4].

3.1. Carte à IGBTs

Ce produit utilise la même carte à circuits imprimés que la carte à MOS, sur laquelle les transistors MOSFETs sont directement remplacés par des IGBTs. Les caractéristiques de ce produit sont les suivantes :

- 350 IGBTs de type 600 V 30/40 A ;
- 5500 V max., 5000 V nom. ;
- 4000 A max., 3000 A nom. ;
- Chute de tension en 50 ns (délai + temps de chute).

3.2. Carte à thyristors

Des études menées depuis plusieurs années sur la mise en parallèle de thyristors nous ont permis d'optimiser les paramètres de commande [5], afin d'assurer une excellente simultanéité des mises en conduction.

Les composants utilisés sont de petits thyristors 12 A en boîtier TO220, qui permettent d'obtenir des croissances de courants très importantes, lorsqu'on les pilote avec des courants de gâchette d'amplitude suffisamment élevée (plusieurs ampères).

La carte à thyristors possède les caractéristiques suivantes :

- 150 thyristors de type 1000 V 12 A dc, 10 en parallèle, 15 en série ;
- 10 kV nom. ;
- 10 kA pour 100 μ s d'impulsion, 1 kA pour 10 ms ;
- 1 kA/ μ s < dI/dt < 10 kA/ μ s ;

Une des applications de cette carte a consisté en la fabrication d'un Crowbar 20 kV, 10 kA, réalisé à partir de deux cartes à thyristors.

Parmi les diverses cartes de commutation développées par le LETC et commercialisées par CENTRALP, un vaste choix est donc offert. Le type de composant à utiliser dépend essentiellement de la durée des impulsions voulue :

- jusqu'à 1 ou 2 μ s : MOSFETs ;
- de 1 μ s à 10 ou 20 μ s : IGBTs ;
- au-delà de 10 μ s : Thyristors.

3.3. Carte à diodes

Le laboratoire a étudié la tenue en avalanche des diodes standard de l'électronique de puissance, ce qui a ensuite permis de réaliser leur mise en série et en matrice sans aucun autre composant, ni d'équilibrage, ni d'écrêtage.

Les composants choisis sont des diodes standard, sur lesquelles on ne pratique pas de tri individuel.

Les cartes à diodes réalisées ont les caractéristiques suivantes :

- 150 diodes 1200 V 8 A, 10 en parallèle, 15 en série ;
- 15 kV nom. ;
- 1000 A crête.

Ces cartes peuvent elles-mêmes être associées. Une diode haute tension fonctionnant sous 60 kV et 1000 A pendant 50 ns a ainsi été réalisée.

Ces modules de 2 cartes à diodes sont notamment implantés en série avec les commutateurs à MOS dans les alimentations des lasers à vapeur de cuivre. Ces modules fonctionnent sous ± 30 kV et 800 A pendant 300 ns.

4. CEM DES ALIMENTATIONS IMPULSIONNELLES 25 KV / 1600 A

4.1. Ordre de grandeur des perturbations

Les hautes performances en commutation des alimentations réalisées laissent évidemment présager du niveau élevé des perturbations rencontrées. Examinons à travers quelques exemples leurs ordres de grandeur.

Les impulsions générées par les cuves de commutation 25 kV / 1600 A alimentant les lasers à vapeur de cuivre possèdent un temps de chute de la tension d'environ 20 ns pour 25 kV d'amplitude. Ce front de tension possède un dV/dt supérieur à 1 MV/ μ s.

De même, dans nos conditions de fonctionnement, on observe un di/dt supérieur à 30 kA/ μ s.

Ces niveaux de perturbation dépassent de plusieurs ordres de grandeur ceux classiquement rencontrés dans les équipements électroniques.

Un exemple des effets de ces variations intenses est le niveau des courants perturbateurs mesurés sur les câbles de commande des cartes à MOS, à l'intérieur des cuves de commutation.

La commande des cartes est en effet réalisée par un transformateur dont le primaire est un unique câble de commande traversant successivement les tores de ferrites implantés sur chaque étage des matrices de MOS (cf. figures 4 et 5). Ce dispositif garantit en particulier une excellente synchronisation de la fermeture des composants.

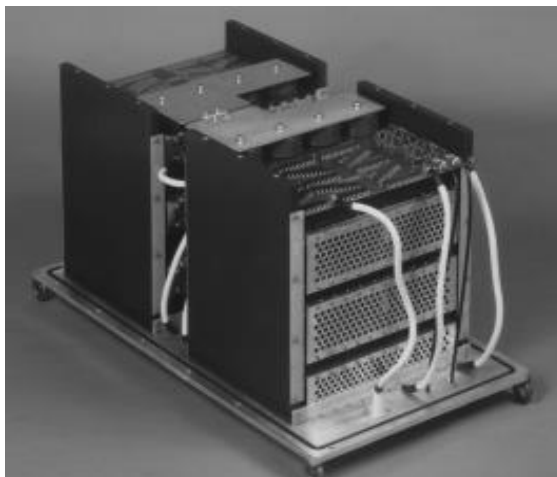


Figure 4 : Photographie de la cuve de commutation ouverte

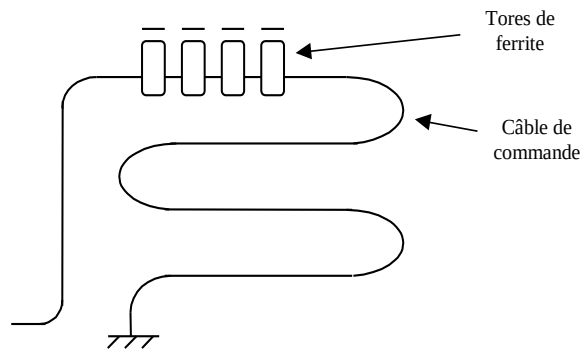


Figure 5 : Schéma de principe de la commande des cartes à MOS

Le courant de déclenchement servant à commander les composants possède une amplitude de 20 A. Or, en raison de la capacité parasite entre le câble et l'interrupteur et des variations de tensions particulièrement élevées, le courant perturbateur mesuré sur le câble de commande au moment des commutations atteint 200 A. Il est donc dix fois supérieur au courant utile. Ce courant est oscillant, de haute fréquence, et s'atténue en quelques dizaines de nanosecondes.

Pour éviter la destruction prévisible de l'interrupteur de commande, il s'est avéré nécessaire d'ajouter, en parallèle avec cet interrupteur, un moyen d'écrêtage capable de supporter le passage du surcourant (cf. figure 6). Grâce à cette protection, et malgré un courant perturbateur particulièrement élevé, le dispositif de commande des cartes à MOS conserve un fonctionnement optimal.

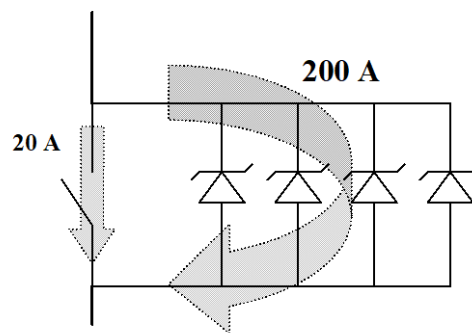


Figure 6 : Protection de l'interrupteur de commande contre les courants perturbateurs

De la même façon, les importantes variations de courant génèrent de fortes tensions de mode commun entre les sous-ensembles. Ainsi, une tension de mode commun impulsionnelle de 1000 V a pu être mesurée entre la masse de la cuve de commutation et celle du laser (cf. figure 7).

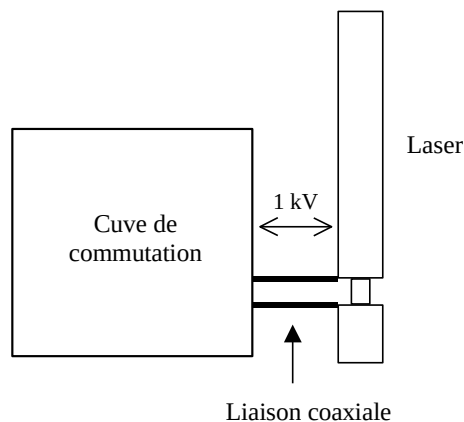


Figure 7 : Tension de mode commun entre la cuve de commutation et le laser

4.2. Application des règles classiques de la CEM

Si les ordres de grandeur des perturbations générées dans nos alimentations impulsionnelles diffèrent de ceux classiquement rencontrés, les moyens de s'en prémunir font appel aux mêmes règles de CEM [6].

Quelques démarches, en particulier, peuvent être appréhendées comme des exemples significatifs des principes de CEM appliqués lors de la conception des cuves :

- la recherche de l'équipotentialité en haute fréquence entre les sous-ensembles ;
- l'utilisation d'inductances de mode commun ;
- la gestion de la circulation des courants haute fréquence.

Les transitoires très rapides générées à l'intérieur des cuves de commutation nous ont obligés à rechercher la meilleure équipotentialité possible entre les différents éléments qui les composent. La conception d'un maillage efficace en haute fréquence est un facteur déterminant dans le choix de la géométrie interne des cuves. Le principe de base fut d'intégrer la notion de plan de masse, non seulement au niveau de la conception des cartes électroniques (cartes à MOS et cartes de contrôle-commande), mais aussi dans le placement et la connexion de ces cartes à l'intérieur de la cuve, ainsi que dans le cheminement des différentes liaisons. Le but était de se rapprocher systématiquement d'un plan de masse. Le châssis métallique de la cuve constitue en lui-même une tôle de référence de potentiel.

Une telle démarche permet d'une part de conserver une très bonne équipotentialité en haute fréquence, à travers la limitation des inductances entre masses, et d'autre part améliore, par effet réducteur, l'immunité des câbles proches de la tôle de référence de potentiel.

La connexion entre les châssis des différents sous-ensembles (alimentation HT, cuve de commutation, laser, etc.) se fait à l'aide de plaques larges (20 cm de largeur au minimum). Ces liaisons peu inductives, réalisées au plus court, garantissent une bonne équipotentialité entre les masses des sous-ensembles, en particulier en haute fréquence.

De même, lorsque les liaisons sont effectuées par des câbles coaxiaux, en particulier pour la transmission d'impulsions rapides, la connexion de masse est réalisée par des liaisons peu inductives directement sur le châssis des sous-ensembles.

Une application significative est la liaison de puissance existant entre la cuve de commutation et la charge. Dans le cas d'un laser de faible puissance, cette liaison est effectivement réalisée par un câble coaxial transportant l'impulsion haute tension. La tresse du câble est connectée grâce à des colliers, d'une part au couvercle de la cuve, d'autre part au châssis du laser (cf. figure 8).

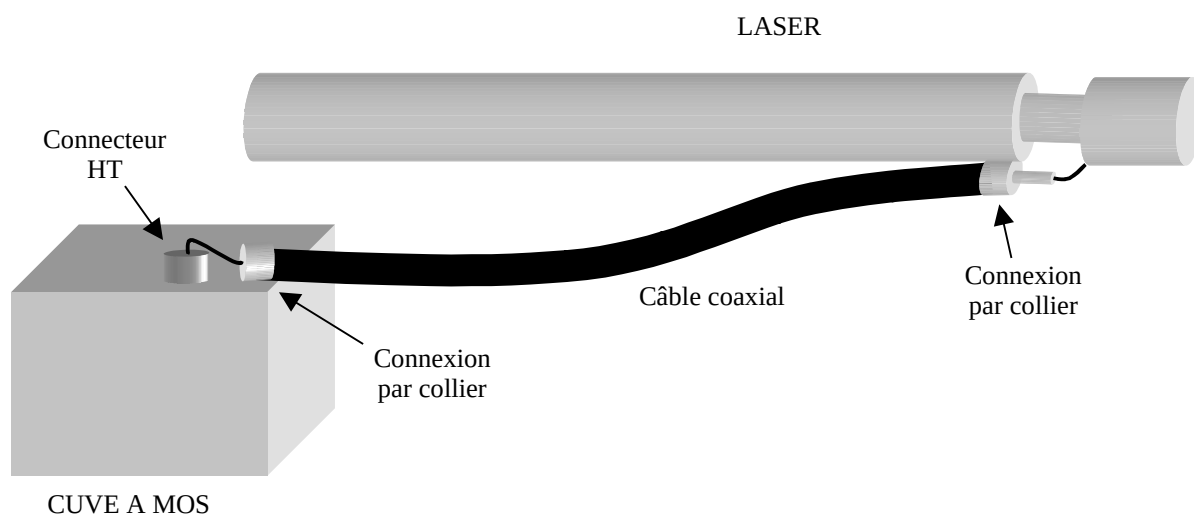


Figure 8 : Transport de l'impulsion haute tension de la cuve au laser

Comme nous l'avons déjà évoqué, les cuves de commutations sont par ailleurs soumises à de fortes tensions de mode commun. Afin d'y remédier, nous avons placé des inductances de mode commun sur tous les câbles accessibles, et en particulier :

- sur les fils transportant la puissance ;
- sur les câbles coaxiaux transportant les signaux de contrôle et de commande.

Ces inductances de mode commun sont réalisées à l'aide de tores de ferrite enfilés autour des câbles. Lorsque cela est possible, le câble est enroulé plusieurs fois autour du tore, de manière à former de une à cinq spires. Un nombre de spires supérieur n'apporte pas de gain notable et augmente significativement la capacité propre du câble. Lorsque le câble ne peut être enroulé autour du tore, on peut placer plusieurs tores sur un même câble (cf. figure 9).

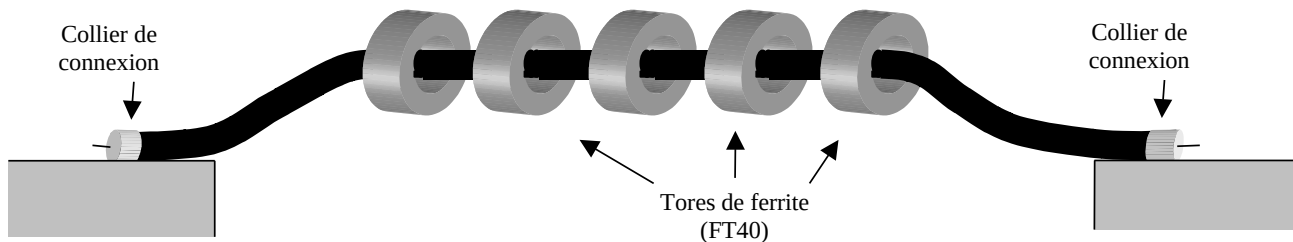


Figure 9 : *Exemple d'inductance de mode commun sur une liaison coaxiale*

La gestion de la circulation des courants haute fréquence est également un aspect déterminant pour le bon fonctionnement des cuves à MOS.

Cela est particulièrement sensible pour la carte de commande, dont le rôle est de fournir les impulsions de commande aux cartes à MOS. Cette carte gère en effet à la fois des signaux de type TTL et les impulsions de commande de type 1 kV / 30 A avec des courants perturbateurs de l'ordre de 200 A. Il est donc indispensable de parfaitement maîtriser l'écoulement des signaux haute fréquence sur cette carte.

Les grands principes appliqués pour la conception de cette carte sont les suivants :

- La carte de commande est vissée sur de courtes colonnettes métalliques à un plan de masse de grande taille (cf. figure 10). Ces colonnettes, placées stratégiquement sur la carte, sont utilisées pour reboucler les courants haute fréquence directement au plan de masse. Ces liaisons peu inductives permettent en effet la circulation des courants HF.
- Le design des pistes de la carte est réalisé de manière à ce que les signaux de puissance ne puisse pas donner lieu à des courants perturbateurs dans la partie commande bas niveau.

Ces deux principes sont intimement liés. Le placement des colonnettes est en effet un élément du design de la carte.

- Une isolation par transformateurs d'impulsion est réalisée sur la carte, entre les signaux bas niveau et la génération des impulsions de commande. Un soin particulier est apporté à la maîtrise des capacités parasites entre primaire et secondaire des transformateurs, ainsi qu'à la circulation des courants au secondaire des transformateurs. Le but est évidemment d'éviter de transmettre des signaux haute fréquence intenses à travers les transformateurs. Ces derniers sont réalisés par nos soins à l'aide de tores de ferrite.
- Tous les signaux de commande et de puissance sont connectés à la carte de commande à travers des inductances de mode commun.

Si ces principes sont respectés, selon le savoir-faire connu [6], la proximité des signaux haute fréquence intenses et de signaux bas niveau peut se faire en parfaite harmonie.

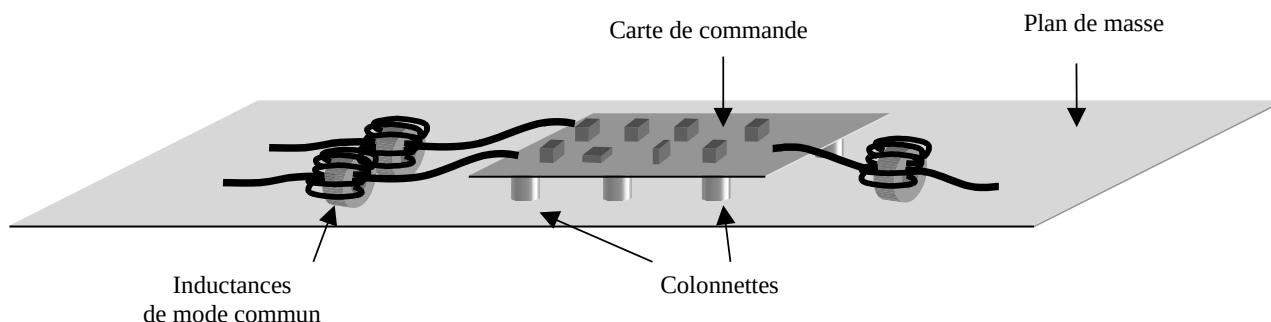


Figure 10 : *Quelques aspects de l'environnement de la carte de commande*

4.3. Mise en œuvre des mesures

La mise en œuvre des mesures était également un point délicat dans la conception de l'alimentation impulsionnelle.

Examinons l'exemple de la mesure du courant de puissance.

Ce courant possède une amplitude de plusieurs centaines d'ampères, et les perturbations haute fréquence générées par le commutateur donnent naissance sur les câbles de mesure à des tensions de mode commun pouvant atteindre le millier de volts.

En présence de telles perturbations, l'erreur à ne pas commettre serait de vouloir à tout prix générer des signaux de mesure bas niveau, de l'ordre de la dizaine ou de la centaine de millivolts. Il convient au contraire de conserver un rapport signal/bruit qui permette la transport et l'utilisation du signal dans de bonnes conditions. Dans notre cas, seul un signal utile de plusieurs dizaines de volts pouvait être transporté et filtré de manière saine vers la carte de commande.

Pour la mesure du courant de puissance traversant cinq cartes à MOS placées en série, les ordres de grandeurs sont significatifs. Ce courant, d'une amplitude nominale de 800 A, est mesuré à travers une résistance de $1/24 \Omega$, constituée de 24 résistances de 1Ω connectées en parallèle. Le signal utile possède donc une amplitude de 33 V. Dans notre environnement, un tel signal peut être transporté proprement jusqu'à la carte de commande, à condition de filtrer les perturbations de mode commun à l'aide des classiques inductances du même nom. Des reprises de masse entre le câble et le châssis de la cuve permettent le rebouclage des courants perturbateurs directement au châssis, et évite leur remontée jusqu'à la carte de commande. Ces reprises de masse sont parfois doublées.

Ainsi réalisée (cf. figure 11), la mesure du courant de puissance se fait de manière très saine.

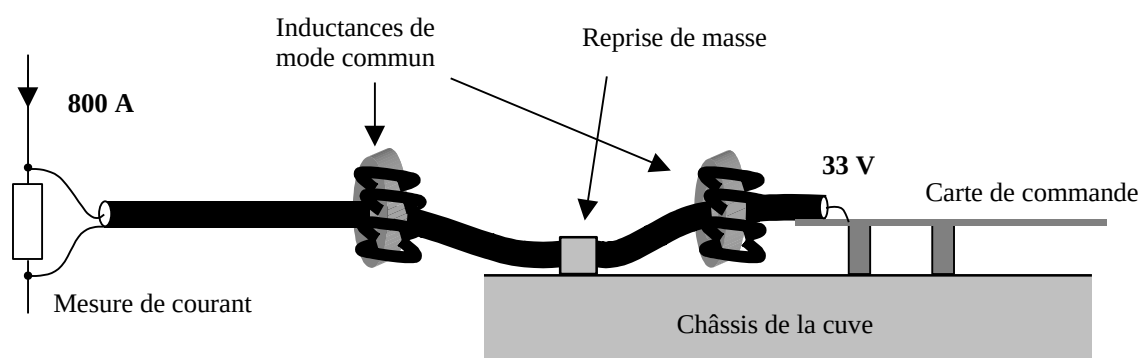


Figure11 : *Mesure du courant de puissance*

5. CONCLUSION

Les alimentations impulsives 25 kV / 1600 A développées par le Laboratoire Électrotechnique et Technologie des lasers à vapeur de Cuivre du CEA PIERRELATTE constituent des produits industriels fiables et performants.

Conçus pour l'alimentation des lasers à vapeur de cuivre, ces commutateurs sont aujourd'hui commercialisés par la société CENTRALP pour des applications de plus en plus nombreuses, allant de l'alimentation de fours à plasma à la génération de champs électriques pulsés pour la destruction de bactéries en agroalimentaire.

S'il est vrai que les ordres de grandeur des perturbations auxquelles sont soumises ces alimentations diffèrent de ceux habituellement rencontrés, les règles de CEM mises en œuvre restent les mêmes.

Parmi les préceptes les plus éloquents, citons :

- l'équipotentialité de tous les éléments et l'interconnexion des sous-ensembles par des plaques larges ;
- l'utilisation d'inductances de mode commun sur les liaisons de puissance et de commande ;
- la maîtrise de la circulation des courants haute fréquence ;
- la conservation de rapports signal/bruit compatibles avec le transport des signaux dans de bonnes conditions, en fonction des perturbations environnantes.

Dans le domaine des énergies pulsées, les niveaux des perturbations électromagnétiques peuvent être très élevés. Néanmoins, l'application des grands principes de CEM permet la résolution des problèmes et la conception de produits sains et fiables.

6. REFERENCES

- [1] D. CHATROUX, D. LAFORE, Interrupteurs rapides haute tension, application dans le domaine du nucléaire. *EPF'96*, Grenoble, 16-18 décembre 1996, pp 139-143
- [2] R. GUIDINI, Interrupteurs rapides haute tension réalisés par mise en série de composants semi-conducteurs pour convertisseurs de forte énergie. Thèse de doctorat, USTL, 1995
- [3] Y. LAUSENAZ, Etude de fiabilité des mises en série de composants MOSFETs. Rapport de DEA, GE Marseille / ESIM, 1997
- [4] D. CHATROUX, Y. LAUSENAZ, J-F. VILLARD, D. LAFORE, High voltage fast switches for nuclear applications. *EP² Forum 98*, Grenoble, 21-22 octobre 1998, pp 51-58
- [5] J-F. VILLARD, Etude et mise en parallèle de thyristors pour des commutations de forts courants. Rapport interne, CEA Pierrelatte, 1995
- [6] A. CHAROY, Parasites et perturbations des électroniques. Règles et conseils d'installation. DUNOD Editeur.