



HAL
open science

Présentation d'interrupteurs haute tension rapides et de leurs applications

Daniel Chatroux, Jean-François Villard, Dominique Lafore, Jean-Michel Li,
Laurent Garnier

► To cite this version:

Daniel Chatroux, Jean-François Villard, Dominique Lafore, Jean-Michel Li, Laurent Garnier. Présentation d'interrupteurs haute tension rapides et de leurs applications. PSA 98 - Plasma Surfaces Adhésion, Dec 1998, Toulouse, France. cea-03293810

HAL Id: cea-03293810

<https://cea.hal.science/cea-03293810v1>

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.

PRESENTATION D'INTERRUPTEURS HAUTE TENSION RAPIDES ET DE LEURS APPLICATIONS

Daniel CHATROUX, Jean-François VILLARD

CEA VALRHO - DCC/DTE/SLC/LETG
BP 111 - 26702 PIERRELATTE
04.75.50.75.63

Dominique LAFORE, Jean-Michel LI

CEGEMA / ESIM
13451 MARSEILLE Cedex 20

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 projet, 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 Fig.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 par des lasers à vapeur de cuivre. Ces derniers nécessitent des alimentations électriques particulières.

L'usine en projet devrait permettre de réduire les coûts d'enrichissement d'un facteur 2 ou 3 par rapport à aujourd'hui. Elle devrait voir le jour à l'horizon 2010.

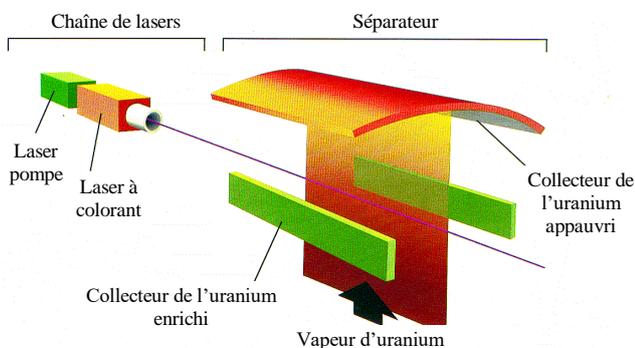


Figure 1 : Schéma de principe de SILVA

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** et l'**École Supérieure des Ingénieurs de Marseille** est 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 2 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 standards. La mise en série de composants très rapides, tels que les transistors MOS et les transistors bipolaires à grille isolée (IGBT), 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 standards

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 standards, 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 (jitter < 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.

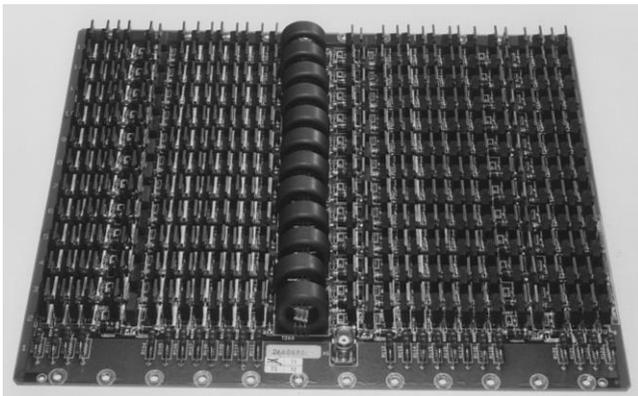


Figure 2 : Carte interrupteur 5 kV, 800 A, de 350 MOS

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 Fig.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 200 cartes ont été produites à ce jour.

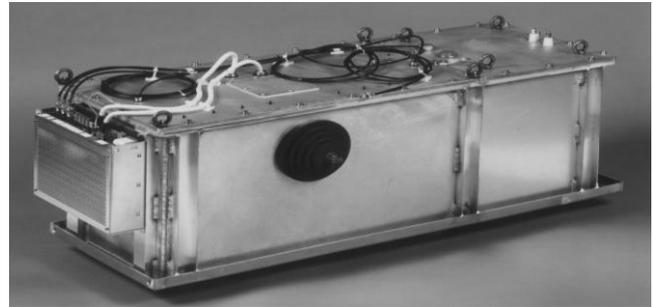


Figure 3 : Cuve de commutation 25 kV, 1600 A, de 3500 MOS

Ces cartes sont associées pour constituer une cuve de commutation (cf Fig.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.

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

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

2.2. Fiabilité : les atouts de la redondance

2.2.1. Des résultats au-delà des estimations

Après plusieurs années d'utilisation en milieu industriel des modules utilisant la mise en série des MOS, les premiers retours d'expérience nous offrent des résultats concrets sur la fiabilité des produits réalisés.

Les calculs prévisionnels effectués lors de la conception donnaient une estimation du temps moyen de bon fonctionnement (MTBF) de l'ordre de 20.000 heures.

Or les produits implantés se révèlent avoir une fiabilité supérieure. En effet, le prototype installé sur un laser au CEA Pierrelatte fonctionne depuis 20.000 heures sans panne des cartes à MOS, et le temps cumulé de fonctionnement des cuves atteint aujourd'hui 60.000 heures sans aucune panne des commutateurs à MOS.

Ces excellents résultats, supérieurs aux premières estimations, s'expliquent notamment par le phénomène de redondance.

2.2.2. Redondance : la clef d'une fiabilité exemplaire

Les calculs prévisionnels avaient été réalisés avec l'hypothèse que la défaillance d'un composant entraînait par propagation la défaillance d'autres composants, et par conséquence la panne de l'équipement.

En réalité, nous avons pu observer [3] que la mise en série 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. La défaillance est donc tolérable.

Ainsi, avec une marge de sécurité 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.

2.2.3. La fiabilité maîtrisée

Dans nos conditions d'utilisation, la défaillance des composants électroniques peut être considérée comme purement aléatoire. En effet, les phénomènes de vieillissement demeurent inobservables avec nos échelles de temps, car la commutation de faibles énergies à haute fréquence de répétition, pendant de longues durées de fonctionnement, nous préserve du cyclage thermique [3]. Le taux de défaillance d'un composant est donc indépendant du temps. Celui-ci conserve la même probabilité de défaillance quelque soit sa durée d'utilisation.

Ainsi, **s'il n'y a pas de redondance**, la défaillance est aléatoire et aucune maintenance préventive des équipements électroniques n'est possible.

Grâce à la redondance, la mise en série, quant à elle, tolère la défaillance d'un certain nombre de composants. Un choix nouveau s'offre alors à l'utilisateur :

- soit il ne fait aucune maintenance préventive, et dans ce cas, la fiabilité du système est environ 5 fois supérieure à celle calculée sans redondance ;
- soit il réalise une maintenance préventive, que la redondance rend possible. Cette maintenance peut par exemple consister en une vérification périodique, **à l'échelle de quelques années**, de la valeur de la tension d'écrêtage de la carte à MOS, ce qui indique immédiatement le nombre de composants défaillants, sans qu'aucune panne ne soit apparue.

Le Laboratoire Électrotechnique et Technologie des lasers à vapeur de Cuivre du CEA (Pierrelatte), en collaboration avec L'ESIM (Marseille), poursuit les recherches sur la fiabilité, en vue d'une meilleure caractérisation des comportements des associations de composants.

3. PRODUITS INDUSTRIELS : LES FRUITS DE LA RECHERCHE

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 Adc, 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 standards 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 standards, sur lesquelles on ne pratique pas de tri individuel.

Les cartes à diodes réalisées ont les caractéristiques suivantes :

- 150 diodes 1200 V 8 Adc, 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 6 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. APPLICATION AUX TRAITEMENTS DE SURFACES

A son tour, le domaine des traitements de surface bénéficie aujourd'hui de ces technologies. Une alimentation pulsée pour four à plasma, utilisant une association de composants semi-conducteurs standards, est en effet commercialisée par la société Centralp Enertronic.

Cet équipement (cf Fig.4) est capable de commuter jusqu'à 1000 Vdc et de transférer jusqu'à 30 kW de puissance avec un rendement supérieur à 95 %.

Il se présente sous la forme d'un rack de 19 pouces refroidi par convection forcée (cf Fig.5).

Deux modes de fonctionnement sont possibles :

- mode pulsé :

Tension maximum	:	1000 Vdc
Fréquence	:	5 kHz à 70 kHz
Rapport cyclique	:	15 % à 85 %
Amplitude du courant	:	60 A ($\alpha = 50$ %)

- mode continu :

Tension maximum	:	1000 Vdc
Courant maximum	:	30 A

Cette alimentation possède en outre une protection extrêmement rapide en cas de court-circuit, puisque le temps de réponse en cas d'arc est inférieur à 1 μ s. Le niveau du courant d'arc peut être adapté au process, entre 6 A et 70 A.

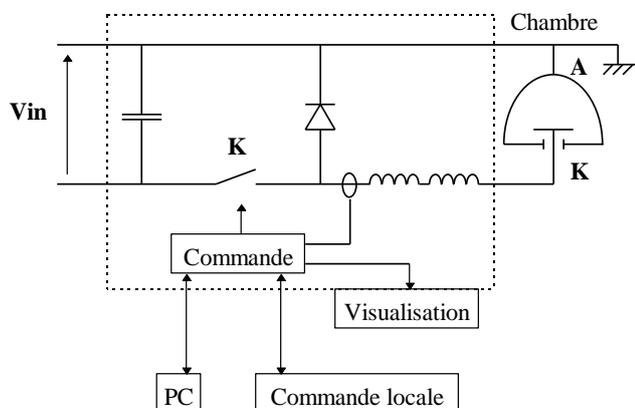


Figure 4 : Diagramme électrique de l'alimentation pour four à plasma

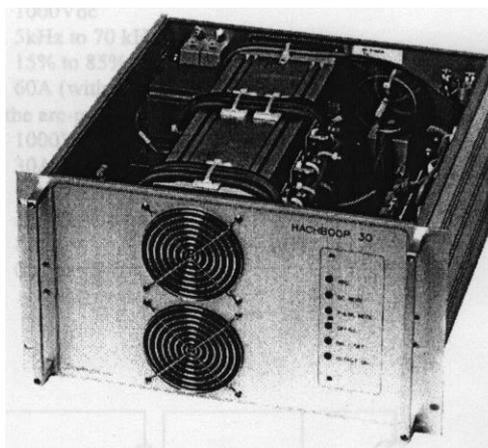


Figure 5 : Alimentation Hachboop 30 pour four à plasma

5. CONCLUSION : UNE COLLABORATION INDUSTRIELLE PRIVILEGIEE

Les recherches menées au CEA dans le domaine de l'électronique de puissance nous ont permis d'apporter des solutions innovantes et fiables. Le Laboratoire Électrotechnique et Technologie des lasers à vapeur de Cuivre a ainsi déposé à ce jour 13 brevets relatifs aux technologies mises en œuvre, avec une moyenne de trois brevets par an.

La société Centralp dispose d'une licence sur ces brevets, et développe des produits issus de ces technologies.

Cette entreprise dispose d'une unité de fabrication de très grande qualité avec une ligne CMS, du fait de son activité dans l'automatisme. Elle possède une grande compétence en électronique de puissance, grâce à son activité dans le domaine des alimentations à découpage.

Centralp est directement impliquée dans nos recherches, et cofinance deux doctorats du laboratoire.

A ce jour, plus de 100 000 MOS ont été assemblés dans son usine, pour la production des cuves de commutation.

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