HAL
open science

Champ électrique pulsé haute tension pour le traitement de l'eau et la conservation des aliments

D. Chatroux, Y. Lausenaz, J-F Villard, R. Milly, L. Garnier, P. Baraton, D. Lafore

To cite this version:

D. Chatroux, Y. Lausenaz, J-F Villard, R. Milly, L. Garnier, et al.. Champ électrique pulsé haute tension pour le traitement de l'eau et la conservation des aliments. GEVIQ2000 - Colloque National Génie Electrique Vie et Qualité, Mar 2000, Marseille, France. cea-03293723

HAL Id: cea-03293723

https://cea.hal.science/cea-03293723

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.

Champ électrique pulsé haute tension pour le traitement de l'eau et la conservation des aliments

D. Chatroux, Y. Lausenaz, J-F. Villard
CEA VALRHO - DCC/DTE/SLC/LETC BP 111 - 26702 PIERRELATTE
Tel : 04.75.50.75.63 Email : daniel.chatroux@cea.fr

R. Milly, L. Garnier
Centralp Enertronic Rue du Ruisseau, Zone industrielle tharabie
38290 SAINT QUENTIN FALLAVIER
Tel : 04.74.95.55.21 Email : l.garnier@enertronic.fr

P. Baraton
EDF DER Laboratoire de Génie Electrique - Division Recherche et Développement
Les Renardières BP1 77250 MORET SUR LOING
Tel : 01.60.73.70.18

D. Lafore
CEGEMA / ESIM Technopôle de Château Gombert 13451 MARSEILLE Cedex 20
Tel : 04.91.05.45.23 Email : lafore@esim.imt-mrs.fr

Résumé – Les cellules biologiques sont constituées d'un cytoplasme qui est conducteur électrique, entouré d'une membrane, qui est isolante électriquement. L'application d'un champ électrique pulsé permet de percer la membrane de la cellule de manière réversible ou mortelle. Nous présenterons les applications de cette électroporation dans les domaines du génie génétique, de l'extraction de composés, de l'agroalimentaire et du traitement des eaux, puis nous décrirons les deux technologies de générateurs électriques pulsés pour le traitement des eaux et l'agro-alimentaire développés par Centralp Enertronic, en collaboration avec le CEA et l'ESIM, pour EDF – DER (Département Etude et Recherche) et pour l'Unité de Biochimie - Technologie alimentaire de Montpellier [1]. Un générateur bipolaire basé sur un nouveau commutateur à matrice de transistors MOS supportant le court-circuit en haute tension est décrit.

Mots-clés – champs électriques pulsés, puissance pulsée, traitement de l'eau.

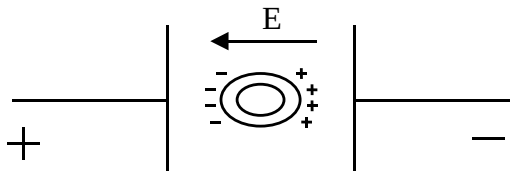
1 INTRODUCTION

Les cellules biologiques sont constituées d'un cytoplasme entouré d'une membrane. Le cytoplasme est conducteur électrique. La membrane constituée d'une double couche lipidique peut être considérée comme un isolant. L'application d'un champ électrique à une cellule biologique, dans un milieu conducteur électriquement, crée une polarisation de la membrane de la cellule. Si ce champ électrique est d'amplitude suffisante, la tenue diélectrique de la membrane peut être dépassée, il y a apparition d'un trou dans la membrane. C'est l'électroporation de la cellule [2]. Si le trou est de petite taille, la cellule peut survivre et réparer la lésion. Si ce trou est de taille suffisante, cette électroporation est mortelle pour la cellule.

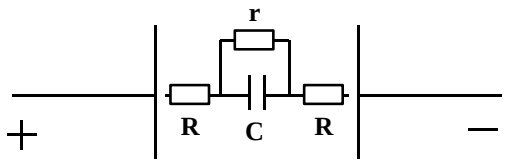
Les applications principales de l'électroporation sont les suivantes :

- En génie génétique, l'électroporation est un moyen d'ouvrir la membrane d'une cellule pour permettre l'introduction de différents vecteurs qui iront agir sur l'ADN de la cellule pour le modifier.
- En agro-alimentaire, en cosmétique et en pharmacie, des principes actifs sont extraits de substances animales ou végétales. L'électroporation des cellules peut être utilisé pour augmenter le rendement d'extraction, en remplacement de substances chimiques par exemple [3].
- En agro-alimentaire, il est possible de réaliser une pasteurisation froide qui consiste à détruire les bactéries, voire les spores, présentes dans cet aliment, par électroporation de ces bactéries. Les champs électriques utilisés sont pulsés et de forte amplitude. L'amplitude du champ permet de détruire les bactéries, la faible durée de l'impulsion permet de ne pas chauffer le milieu et donc de conserver les qualités de l'aliment. La pasteurisation froide par champ électrique pulsé est au stade de pilote industriel pour les aliments liquides, et au stade de la recherche pour les aliments solides. Comme aliment liquide, on peut citer par exemple le lait ou le jus d'orange [4].
- L'électroporation par champ électrique pulsé peut de même être utilisée pour le traitement des eaux potables et industrielles, pour la destruction de bactéries et de micro-organismes présents dans l'eau ainsi que des moules et coquillages pouvant proliférer dans les canalisations [5]. Par rapport à d'autres procédés concurrents, le traitement par champ électrique pulsé présente potentiellement l'avantage de pouvoir tolérer des impuretés dans l'eau ou des eaux non parfaitement transparentes. Il permet de traiter des débits élevés à des coûts de traitement faibles.

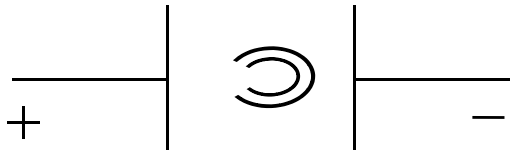
2 ELECTROPORATION D'UNE CELLULE



La membrane d'une cellule placée dans un milieu conducteur se polarise en présence du champ électrique.



La membrane de la cellule peut être modélisée par un condensateur. Le milieu est conducteur. La conductivité du milieu est modélisée par les résistances séries et la résistance en parallèle qui traduit son effet autour de la cellule.



A partir d'une tension électrique sur la cellule de l'ordre du volt, le trou formé peut entraîner la mort de la cellule. Le champ électrique dans le milieu est de l'ordre de quelques milliers à quelques dizaines de milliers de volts par centimètre. Pendant toute la phase d'application du champ, il y a de fortes pertes résistives dans le milieu. Pour minimiser l'échauffement du milieu et avoir un rendement électrique de traitement élevé, il est nécessaire d'avoir des durées d'impulsion de l'ordre de quelques microsecondes ou centaines de nanosecondes. Plus la durée de l'impulsion est courte, plus le champ électrique doit être important pour provoquer l'électroporation, néanmoins, le rendement énergétique augmente avec un optimum aux environ de 100 ns [2]. Il est à noter que les ordres de grandeur cités ci-dessus sont à optimiser en fonction de la résistivité du milieu et du micro-organisme à traiter.

3 COMMUTATEURS HAUTE TENSION

Les ordres de grandeur des tensions et courants à commuter sont de quelques dizaines de milliers de volts, quelques centaines ou milliers d'ampères, pour des durées de quelques centaines de nanosecondes à quelques microsecondes.

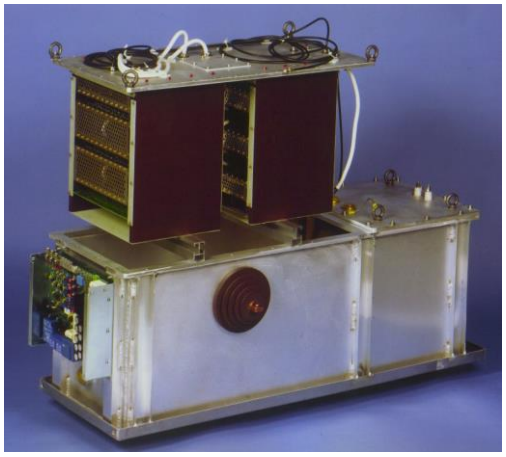
Les commutateurs utilisés traditionnellement pour des impulsions correspondant à ces spécifications sont des thyratrons, qui sont des tubes à gaz. Ces tubes sont des composants chers et de fiabilité limitée, utilisés principalement pour les équipements militaires ou de recherche.

Le problème de remplacement des thyratrons par des commutateurs électroniques à semi-conducteurs a été traité par le Commissariat à l'Energie Atomique dans le cadre du développement du procédé d'enrichissement par laser SILVA. Le laser à vapeur de cuivre développé comme laser de pompe des lasers à colorants du procédé SILVA utilisait des thyratrons. Pour un laser de 100 watts optiques, l'alimentation électrique a une puissance de 10 kilowatts, générées sous forme d'impulsions de 25 kV, 1600 A pendant 200 ns. Le commutateur utilisait deux thyratrons en parallèle, pour un coût de 50 kF avec une durée de vie de 1000 heures, soit un mois et demi de fonctionnement 24 heures sur 24. Le coût de maintenance très élevé a justifié les études de remplacement de ces tubes.

Aujourd'hui, les lasers à vapeur de cuivre du procédé SILVA utilisent des commutateurs à semi-conducteurs. Les thyratrons des lasers de 100 watts ont été remplacés par des commutateurs utilisants 3500 transistors MOS qui sont 200 fois plus fiables que les thyratrons [6]. Tous les lasers ont été équipés par ce commutateur qui s'installe en lieu et place de l'ancien. Sur le parc de commutateurs installé sur les lasers en exploitation, le temps de fonctionnement cumulé est de 150 000 heures sans panne.

Cette fiabilité exceptionnelle est due à la redondance naturelle des cartes à transistors MOS [7]. La défaillance d'un composant ou de quelques composants est tolérée, le commutateur continue à fonctionner imperturbablement. Il est à noter que cette redondance naturelle n'a donné lieu à aucun surdimensionnement particulier, donc aucun surcoût. Le retour sur investissement dans le cas des lasers à vapeur de cuivre est inférieur à 4 000 heures, c'est à dire 6 mois de fonctionnement 24 heures sur 24.

Pour information, le remplacement des commutateurs à thyratrons par les commutateurs à MOS pour SILVA a utilisé plus de 100 000 transistors.



Les recherches sur la mise en série et sur la mise en matrice de composants semi-conducteurs ont été menées en collaboration entre le Commissariat à l'Energie Atomique et l'Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Marseille [8].

Les travaux de développement et la réalisation des commutateurs s'est effectuée en collaboration avec Centralp Enertronic.

Les travaux de recherches ont été étendus à d'autres matrices de semi-conducteurs et ont donné lieu à un portefeuille de douze brevets CEA-COGEMA sur ces technologies. Centralp Enertronic est licencié pour ces brevets. La gamme en courant va de quelques ampères à 10 000 ampères. La gamme en tension dépasse 50 000 volts.

Les principes de conception adoptés pour réaliser la fonction de commutation haute tension se révèlent

particulièrement judicieux en terme de performances techniques et réduction des coûts [9] :

– 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.

Pour le traitement de l'eau ou des aliments par champ électrique pulsé, la fiabilité du commutateur n'est pas à priori un avantage déterminant dans la phase de mise au point de la technologie. Par contre, c'est un élément clé pour la phase industrielle ou même préindustrielle. En effet, dans le domaine des énergies pulsées, la fiabilité limitée des commutateurs à gaz induit un coût de fonctionnement élevé, incompatible avec de nombreuses applications industrielles.

Comme pour le procédé SILVA, en phase industrielle, le traitement par champ électrique pulsé n'est rentable économiquement que si le commutateur est très fiable.

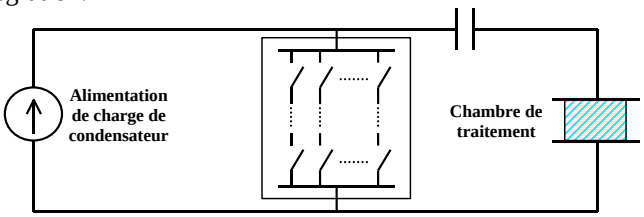
Il est à noter que les commutateurs à MOS sont d'autant plus intéressant économiquement que le débit de liquide est important. En effet, en premier lieu, l'augmentation de débit ne se traduit pas par une augmentation du commutateur à matrice de transistors MOS, qui est dimensionné en fonction du courant et de la tension commutée, mais par une augmentation de la fréquence de récurrence des impulsions électriques. Le commutateur n'est pas modifié, seules les alimentations électriques continues et le circuit de refroidissement du commutateur doivent être dimensionnés en conséquence.

4 GENERATEUR UNIPOLAIRE

Centralp Enertronic a fourni un banc d'essais complet à l'Université des Sciences et Techniques de Montpellier, à l'Unité de Biochimie - Technologie Alimentaire. Le schéma est identique à celui utilisé pour les lasers à vapeur de cuivre, le commutateur utilisé est celui à base de transistors MOS qui a montré un fonctionnement cumulé de 150 000 heures sans panne.

L'impulsion électrique générée sur la chambre de traitement est unipolaire, d'amplitude 25 kV.

Il est à noter que les longueurs de câblage conditionnent la vitesse des signaux électriques. Le commutateur à MOS se met en conduction en 20 ns. La vitesse de croissance du courant et de la tension aux bornes de la charge dépendent de l'inductance de câblage. Pour obtenir des signaux très rapides sur la charge, il faut intégrer le commutateur très près de la chambre de traitement. Une très bonne collaboration client-fournisseur est indispensable pour cette intégration.



Ce circuit électrique est issu des commutateurs à thyratrons. Il permettait que le filament de chauffage de celui-ci soit côté masse.

Le commutateur à MOS est optimisé pour une mise en conduction rapide et n'est pas prévu pour bloquer le courant. A la mise en conduction, le commutateur se ferme et toute l'énergie du condensateur est transmise à la charge. L'interrupteur se bloque lorsqu'il n'y a plus d'énergie dans le circuit.

Le commutateur à MOS utilisé dans ce montage supporte parfaitement les courts-circuits dus aux arcs dans la chambre de traitement. En cas d'arc, le courant croît très rapidement jusqu'au courant d'autolimitation des transistors MOS. Ce phénomène physique limite le courant de courant et dissipe l'énergie du condensateur. Le générateur est bloqué un certain temps pour laisser à l'arc le temps de s'éteindre et pour ne pas dépasser la limite thermique des commutateurs à MOS, si l'arc est répétitif.

On peut aussi remplacer le condensateur par un câble coaxial ou une ligne, adaptée en impédance à celle de la charge, si on veut une impulsion de tension rectangulaire unipolaire aux bornes de la charge. Par contre, dans ce cas, la tension aux bornes de la charge n'est plus que la moitié de la tension commutée. De plus, l'impulsion n'est plus rectangulaire si l'impédance de la charge varie.

5 GENERATEUR BIPOLAIRE

Pour les phases de recherche, il est nécessaire de faire varier les paramètres expérimentaux de manière très rapide. Une forme de tension rectangulaire est préférable à priori à une tension amortie car le champ électrique est connu et constant au cours du temps. Dans le cas d'une tension amortie, une partie de l'impulsion n'est pas efficace, car elle correspond à un champ électrique trop faible.

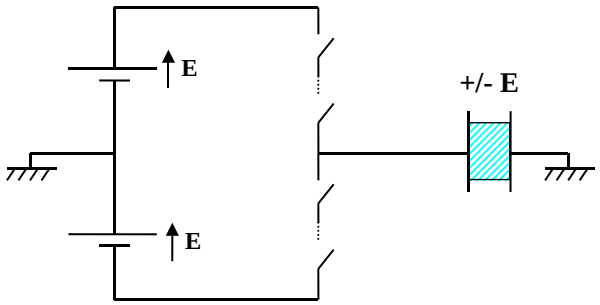
Un générateur bipolaire permet d'avoir une composante de courant moyen nul dans la charge et donc de limiter

l'usure électrolytique des électrodes. De plus, d'après certaines publications, une forme de tension bipolaire serait plus efficace puisque le front de commutation de la tension est doublé.

Il est à noter que le paramètre de dimensionnement des condensateurs de décharge est l'amplitude du front de tension et non uniquement la valeur maximale de cette tension. Une inversion de tension de +V à –V est beaucoup plus contraignante qu'une commutation de +V à 0. On dimensionne alors le condensateur en tension en tenant compte de la tension double 2V.

Si on fait l'analogie avec le biologique, il apparaît tout à fait possible que le bipolaire soit plus efficace car il permet un front de tension d'amplitude 2V.

Un exemple de mode de réalisation d'un générateur bipolaire est le demi-pont ci-dessous :



Par contre ce montage est très contraignant pour les commutateurs de haute tension :

- Pour générer une tension de valeur crête E, les deux interrupteurs doivent être dimensionnés pour 2E,
- Les deux interrupteurs doivent être commandés à l'ouverture et à la fermeture,
- Les deux interrupteurs doivent ouvrir un fort courant sous haute tension,
- Les deux interrupteurs doivent supporter le court-circuit imposé par un arc au niveau de la charge,
- Les deux interrupteurs doivent pouvoir ouvrir sur court-circuit.

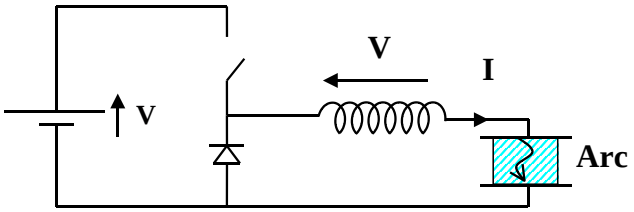
La mise en conduction des semi-conducteurs et des mises en série des semi-conducteurs est maîtrisée et n'est pas un problème trop complexe. Différents composants peuvent être utilisés. Le point principal est d'avoir une commande rapide et énergique pour assurer une bonne synchronisation des mises en conduction des composants.

Le blocage des semi-conducteurs et des mises en série des semi-conducteurs est un problème ardu. Les aires de sécurité au blocage des composants sont limitées et doivent être respectées à tout instant.

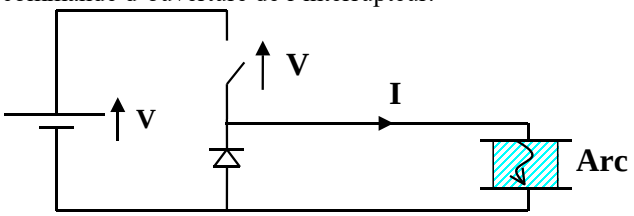
La tenue au court-circuit des commutateurs haute tension est un problème très difficile. En cas d'arc, le courant croît très vite car l'inductance du circuit est très faible. Cette très faible inductance est indispensable pour avoir un circuit rapide.

6 COMMUTATEUR HT SUPPORTANT LE COURT-CIRCUIT

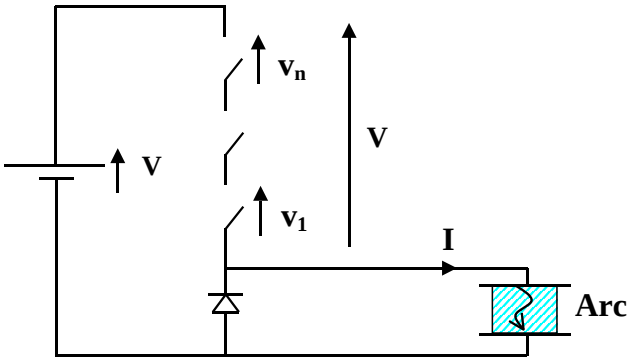
On rencontre deux types de court-circuit. Le court-circuit de type 1 correspond à une inductance de circuit élevée par rapport à la vitesse du commutateur. En cas de court-circuit en sortie du montage, la tension s'applique sur l'inductance qui définie la vitesse de croissance du courant. L'interrupteur s'ouvre avec un surcourant et doit être dimensionné en conséquence. Le courant d'autolimitation du composant n'est pas atteint.



Le court-circuit de type 2 correspond à un montage où l'inductance est plus faible. Le courant croît et atteint le courant d'autolimitation des composants avant la commande d'ouverture de l'interrupteur.



Lorsque l'interrupteur limite le courant, la tension de sortie est tenue à ses bornes. Lors du blocage, le composant aura tendance à bloquer très rapidement le courant. La surtension au blocage peut être destructrice si elle n'est pas maîtrisée.



En haute tension pulsée, la rapidité des signaux impose une inductance réduite au minimum.

L'autolimitation des composants se traduit par l'application de la tension d'alimentation aux bornes de la mise en série. Du fait de la très faible inductance, le front d'application de cette tension est très rapide. A tout instant, chacun des composants doit rester dans son aire de sécurité.

Le blocage du courant est très rapide en mode autolimitation, de même chacun des composants doit rester dans son aire de sécurité.

En pratique, en haute tension, le court-circuit de type 2 n'est pas toléré par les commutateurs. L'inductance ne peut pas être utilisée puisqu'elle ralentit les signaux. La solution traditionnelle utilisée est alors une résistance.

Cette solution oblige un surdimensionnement important du commutateur et du montage. Par exemple, pour générer V et I à une charge R, on utilise en série une résistance de

valeur R et on part d'une tension 2V. En fonctionnement normal le rendement est de 50%, la moitié dans la résistance, la moitié dans la charge utile. Le commutateur est dimensionné en tension pour 2V. En cas de court-circuit, l'interrupteur ne doit pas limiter le courant, c'est la résistance qui limite le courant à 2I. Ainsi, pour générer V et I à une charge R, il faut un interrupteur dimensionné pour 2V et 2I, et une résistance qui dissipe autant que la charge. De plus toute variation d'impédance de la charge se traduit par une variation de tension à ses bornes.

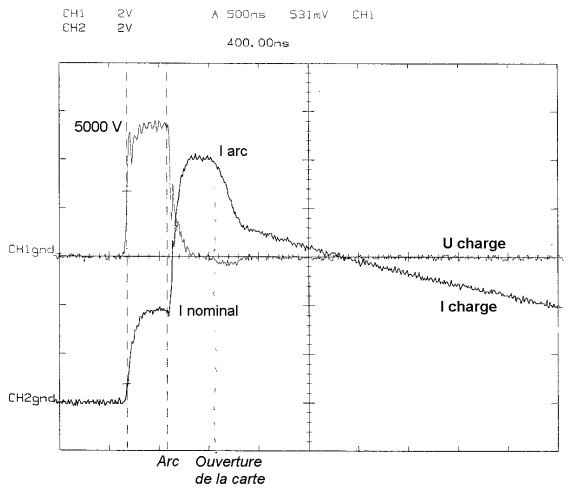
Cet exemple illustre un cas réellement observé. En fait, si on veut perdre moins de puissance en fonctionnement normal dans la résistance, il faut surdimensionner d'autant l'interrupteur. Si on veut limiter les pertes à 10% de la puissance, l'interrupteur devra être dimensionné pour 10 fois le courant nominal.

Le fait de ne pouvoir tolérer le court-circuit de type 2 pour les commutateurs de haute tension rapides oblige à un surdimensionnment important du générateur et des interrupteurs, tout en limitant les performances de rendement.

7 TEST D'UNE CARTE 5 KV 500 A EN COURT-CIRCUIT.

Nous avons travaillé deux ans sur le développement d'une carte 5 KV 500 A supportant parfaitement le court-circuit [10]. Fin 1999, nous avons testé et caractérisé une carte maquette de 250 A. Début 2000, nous avons validé les premières cartes industrielles 5 KV 500 A.

Ces cartes fabriquées par Centralp Enertronic ont été testées dans une structure demi-pont. La charge est une charge résistive. Le court-circuit est provoqué par un arc dans un éclateur à écartement réglable placé au plus près du commutateur.



Les courbes ci-dessus correspondent à la tension sur la charge et au courant dans celle-ci lors d'un test de court-circuit sous une tension de 5000 volts. Le courant croît rapidement à 1000 ampères puis est limité par l'autolimitation des transistors MOS. On observe le plateau d'autolimitation pendant 500 ns, puis l'ouverture de l'interrupteur. Le courant observé est celui de la charge qui était le plus facile à observer. On voit une chute lente du courant de la charge alors que l'interrupteur est ouvert. En fait le courant de la charge roue-libre à travers l'arc.

8 GENERATEUR BIPOLAIRE POUR TRAITEMENT DE L'EAU

En réponse à un besoin de EDF-DER (Division Recherche et Développement, Laboratoire de Génie Electrique), Centralp Enertronic réalise un premier prototype de générateur bipolaire pour traitement de l'eau.

Par principe, la structure en pont utilisé permet de régler l'amplitude du créneau de tension positif, ainsi que l'amplitude du créneau négatif. Les créneaux de tension fournis sont de durées réglables.

Le produit se présente sous forme d'une baie double contenant les alimentations continues, la cuve de commutation de la haute tension et le contrôle commande.

La cuve de commutation utilise 24 cartes à MOS supportant le court-circuit. L'inductance de câblage du circuit a été minimisée. Comme pour les autres produits utilisant nos technologies de commutation de haute tension rapide, la Compatibilité Electro-Magnétique a été particulièrement étudiée.

Le produit est dimensionné pour un débit d'eau traité de 10 litres par seconde.

9 CONCLUSION

Un champ électrique pulsé peut percer les cellules biologiques placées dans un milieu conducteur électrique. Le champ d'application possible des applications de ce procédé est très vaste (génie génétique, assistance à l'extraction, pasteurisation froide, traitement de l'eau, soit pour détruire des bactéries, soit pour éviter la prolifération d'organismes comme les moules dans les canalisations). Ces techniques sont annoncées comme très efficaces et rentables énergiquement. Par contre, la fiabilité et le coût d'exploitation des équipements traditionnels à thyratrons ne sont pas compatibles avec une exploitation industrielle. Le Commissariat à l'Energie Atomique a développé des commutateurs à matrice de transistors MOS, très industriels, qui ont montré dans le cas du procédé SILVA une fiabilité 200 fois supérieure à celle des thyratrons pour un coût de commutateur identique. Centralp Enertronic est licencié pour ces technologies qui sont protégées par un portefeuille de douze brevets CEA-COGEMA.

Un premier équipement utilisant les commutateurs à MOS existants a été fourni à l'université de Montpellier. Il s'agit d'un générateur unipolaire.

Un second équipement est en cours de réalisation pour EDF-DER. Ce générateur est bipolaire et fournit des signaux de forme rectangulaire. Il utilise une nouvelle génération de cartes à MOS qui sont commandées à la fermeture, commandées à l'ouverture et supportent le court-circuit de type 2, à front raide en cas d'arc.

Il est à noter que les commutateurs à MOS sont d'autant plus intéressant économiquement que le débit de liquide est important. En effet, en premier lieu, l'augmentation de débit à traiter ne se traduit pas par une augmentation du commutateur à matrice de transistors MOS, qui est

dimensionné en fonction du courant et de la tension commutée, mais par une augmentation de la fréquence de récurrence des impulsions électriques.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Barsotti L., Merle P., Cheftel J.C., ‘‘Traitement des aliments par champs électriques pulsés’’, Aspects physiques, Sci. Aliments, 1998

[2] Schoenbach K.H., Abou-Ghazala A., Vithoulkas T., Alden R.W., Turner R., Beebe S., ‘‘ The effect of pulsed electrical fields on biological cells’’, 11th IEEE International Pulsed Power Conference

[3] Knorr D., Geulen M., Grahl T., Sitzmann W., ‘‘Food application of high electric field pulses’’, Trends Food Sci. Techno., 1994

[4] Qiu X ;, Sharma S., Tuhera L., Jia M., Zhang Q.H., ‘‘An integrated PEF Pilot Plant for continuous nonthermal pasteurization of fresh orange juice’’

[5] Bustritskii V.M., Wood T.K., Yankelevich Y., Chauhan S., Yee D., Wessel F., ‘‘Pulsed power for advanced waste water remediation’’, 11th IEEE International Pulsed Power Conference

[6] Lausenaz Y., ‘‘Etude de la fiabilité des mises en série de composants MOSFETs’’, rapport de DEA Génie Electrique / ESIM, Faculté des Sciences & Techniques de St Jérôme, Marseille, 1997

[7] Chatroux D., Lausenaz Y., Villard J.F., Garnier L., Lafore D., Li J.M., ‘‘Fiabilité des commutateurs 25 kV, 1600 A utilisant 3500 MOS’’, EPF’98, Belfort, 16-18 décembre 1998.

[8] Guidini R., ‘‘Interrupteur rapide haute tension réalisé par mise en série de composants semi-conducteurs pour convertisseurs de forte énergie’’, Thèse de Doctorat, Université de Montpellier, janvier 1995.

[9] Chatroux D., Lausenaz Y., Villard J.F., Garnier L., Lafore D., ‘‘Power switch : the standard small components strategy.’’, PCIM’99, Nuremberg, 22-24 juin 1999.

[10] Lausenaz Y., Chatroux D., Villard J.F.,Lafore D., Li J.M., Garnier L., ‘‘Serial connected active voltage clamping’’, EPE’99, Lausanne, 7-9 septembre 1999.