

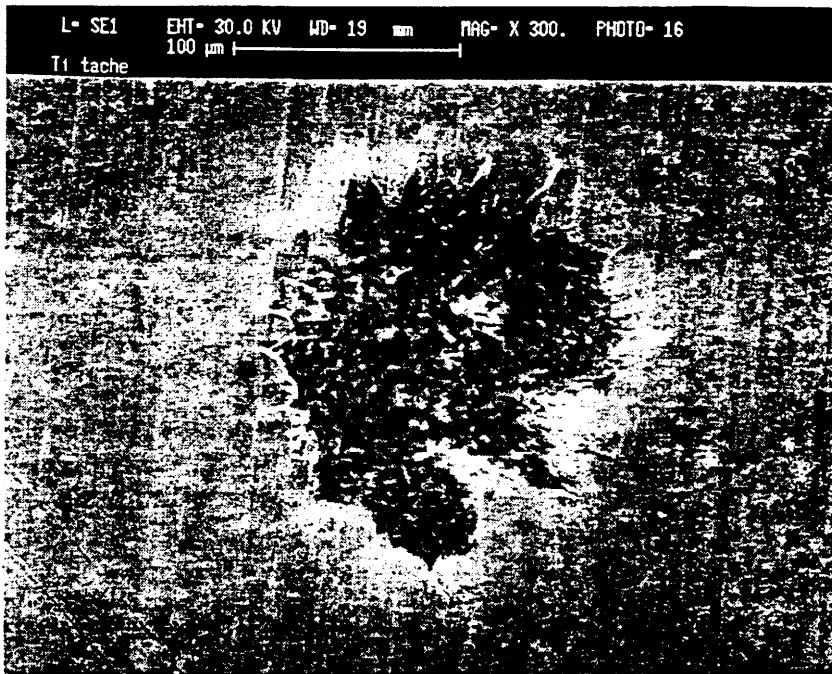
**TENUE HAUTE TENSION DANS LE VIDE POUR DES IMPULSIONS
DE L'ORDRE DE LA NANOSECONDE**

Vincent Baglin*)

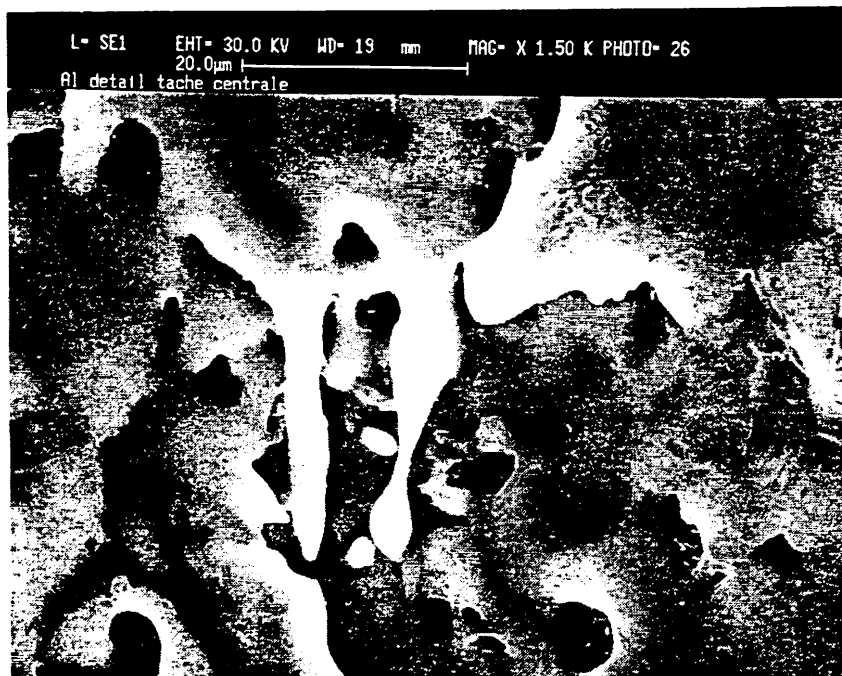
RESUME

Des premiers résultats ont été obtenus pour la tenue des gradients électriques très élevés avec des impulsions de 2 ns de durée. Ces expériences font partie d'une étude sur la faisabilité du principe du "Switched Power Linac" proposé en 1985 par W. Willis. Le but est de produire des gradients pulsés de l'ordre du gigavolt par mètre le long d'une structure accélératrice. Ceci permettrait de réduire la longueur d'un collisionneur linéaire pour leptons d'un facteur de 10 à 20.

*) Etudiant technique DEA de Physique et Technologie des Grands Instruments, Universités de Paris VI, VII et XI - (Responsable J. Knott, PS/Hi)



Un nénuphar sorti tout droit du monde de Lewis Carroll.



Un prototype des célèbres montres molles de Salvador Dali.

(Pour plus d'informations voir page 10 à 12.)

1. Résumé

Ce stage reprend le travail de mes prédécesseurs Philippe Liger [1] et Frédéric Chautard [2,3] respectivement des promotions 1989, 1991 du DEA Physique et Technologie des Grands Instruments. Liger avait réalisé une étude théorique sur les claquages. Chautard avait construit en partie le banc de mesure et fait les premiers essais fin 1991.

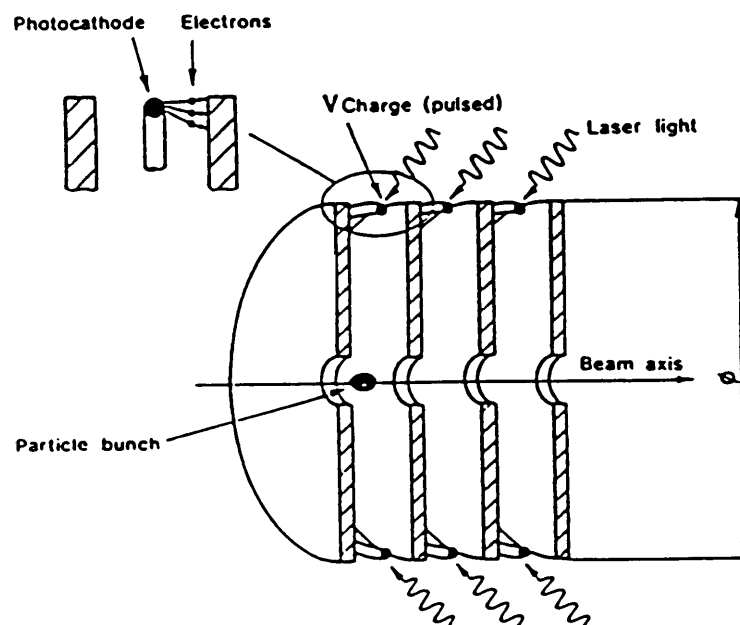
Mon travail consiste à effectuer des mesures systématiques de tenue haute tension sur différentes cathodes. Ces essais doivent permettre de trouver le meilleur matériau possible pour la réalisation d'un switched power linac, et éventuellement, confirmer les processus de claquages proposés par F. Rohrbach et G.A. Mesyats.

2. Introduction

La réalisation de ce stage est basée sur la proposition par W. Willis [4] d'un switched power linac (SPL).

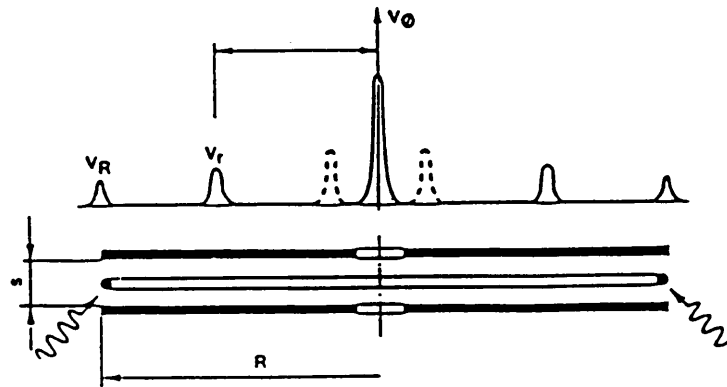
C'est une nouvelle structure accélératrice basée sur le principe de la transformation de champ. Ces sections accélératrices devraient permettre d'atteindre des champs accélérateurs jusqu'à 1 GV/m. On pourrait donc construire un collisionneur linéaire électrons-positrons 1 Tev contre 1 Tev sur une longueur de 2x1 km seulement.

Le schéma ci-dessous représente une telle section.



Les photocathodes préalablement chargées sont déclenchées très rapidement par une impulsion laser. Une impulsion de quelques picosecondes sera alors créée puis amplifiée en se propageant vers le centre du disque par effet de transformateur radial.

Le schéma suivant montre la manière dont est amplifié le signal.



Le gain d'une telle structure est donné par la formule suivante:

$$\frac{V_0}{V_r} = 2 \sqrt{\frac{2R}{(s + c \times t_r)}}$$

avec :

- V_0 : tension au centre du disque.
- V_r : tension au point de déclenchement.
- s : distance entre les disques.
- c : vitesse de la lumière.
- t_r : temps de montée de l'impulsion.
- R : rayon d'un disque.

Par exemple pour : $R=120$ mm, $s=1$ mm et $t_r=5$ ps, on a un gain de l'ordre de 20. Donc si on peut charger la photocathode à 50 kV, on obtiendra 1 GV/m au centre. Ceci n'est possible que si l'on peut tenir de tels gradients sur la périphérie et au centre de la structure.

La faisabilité de l'effet de transformateur radial a été démontrée par le groupe PS/HI au CERN [5] sur un modèle agrandi avec $R=120$ cm, $g=1$ cm. En simulant la décharge de la photocathode avec des impulsions synthétisées et réelles un gain de 8 a été mesuré pour des temps de montée de 310 ps. Ces résultats sont en accord avec une formule obtenue empiriquement où $c \times t_r$ est remplacé par $\lambda/2$ (les séries de Fourier nous apprennent que: $c \times t_r \sim 1.4 \times \lambda/2$).

D'autre part Charles Bamber [6] de l'université de Rochester a obtenu des gradients de 44 MV/m à partir de photodiodes semi-conductrices déclenchées par laser. Cependant il n'a obtenu qu'un gain relativement faible de 3 à 4: il a accéléré des électrons seulement jusqu'à 11 kV sur une seule section. Selon Bamber cela peut être dû à une mauvaise adaptation en impédance et à une mauvaise attention apportée à la conception du disque.

En conséquence pour la réalisation d'un tel projet il nous reste encore à étudier:

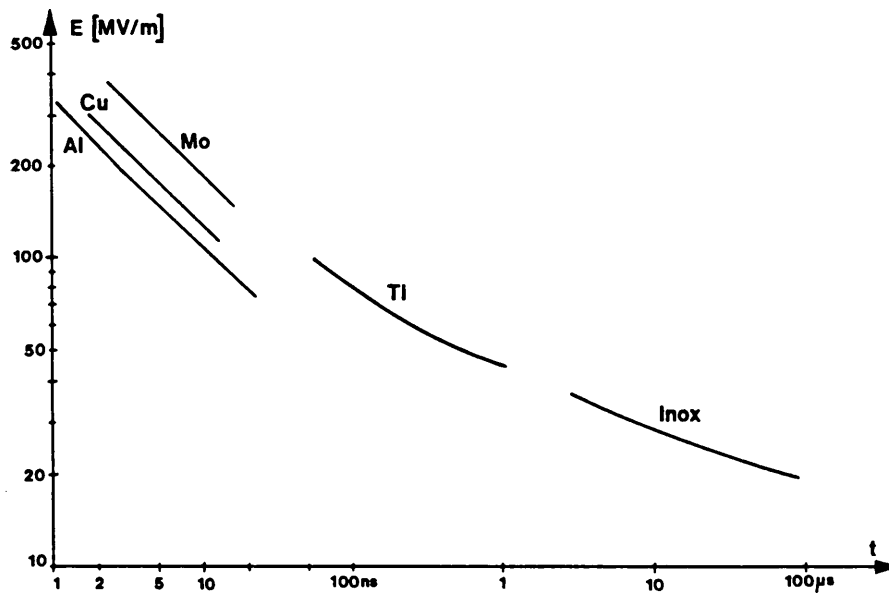
- la tenue haute tension.
- la technologie de déclenchement des photocathodes.
- la réalisation de structures alignées.

3. Etude du phénomène de la disruption électrique pour des impulsions courtes

Notre étude a pour but de mieux comprendre la tenue haute tension pour des impulsions de très courte durée. Ceci pour connaître les limites au niveau de la photocathode puis, en extrapolant, les performances possibles au centre de la structure accélératrice.

Nous n'avons pour l'instant qu'une petite idée sur le mécanisme de la disruption, car la littérature relative à ce sujet est très limitée. Notre étude repose sur les mesures préliminaires de F. Rohrbach (CERN) [7,8], G.A. Mesyats (Russie) [9] et B. Jüttner et al. (ex-RDA) [10]. Leur méthode de mesure est basée sur la détermination du temps de retard à la disruption. Rohrbach a travaillé avec des impulsions de l'ordre de la microseconde et des électrodes planes. Les auteurs des deux autres références utilisent des impulsions de l'ordre de la nanoseconde mais des électrodes pointues. Donc aucune méthode n'est directement applicable à notre problème. Néanmoins leurs théories nous ont été extrêmement utile pour notre étude et pour comprendre plusieurs phénomènes inattendus.

On trouve ci dessous un schéma compilant leur mesures.



Pour de courtes distances, Mesyats et Rohrbach s'accordent pour dire que le claquage se fait par initiation cathodique.

Sous l'effet des forces électrostatiques les pointes de la cathode émettent des électrons. Ceux-ci chauffent alors la pointe qui se vaporise recréant ainsi de nouveaux centres émetteurs. Les électrons accélérés dans la gap frappent l'anode créant là aussi un chauffage anodique surfacique donc apparition de pointes et arrachage possible de microparticules. Les électrons ionisent aussi le gaz résiduel créant un plasma qui par désexcitation donne la lueur de l'arc correspondant à la commutation du courant de décharge.

Il faut noter qu'il y a d'autres processus d'amorçage de l'étincelle. Nous venons de parler de processus basé sur l'émission de champ et conduisant à une vaporisation cathodique ou anodique. On trouve également des mécanismes basés sur l'existence de microparticules détachées des électrodes par suite des forces électrostatiques. Ces microparticules bombardent la contre-électrode et conduisent à la création d'une bulle de vapeur dans laquelle l'étincelle prend naissance. Enfin il y a des mécanismes basés sur l'échange cumulatif de particules chargées.

Nos études devraient permettre une meilleure compréhension des phénomènes fondamentaux pour la tenue haute tension. Nos impulsions sont limitées à la nanoseconde et on utilise des électrodes planes, de grande surface afin de s'approcher de la structure réelle d'un SPL.

4. Dispositif expérimental

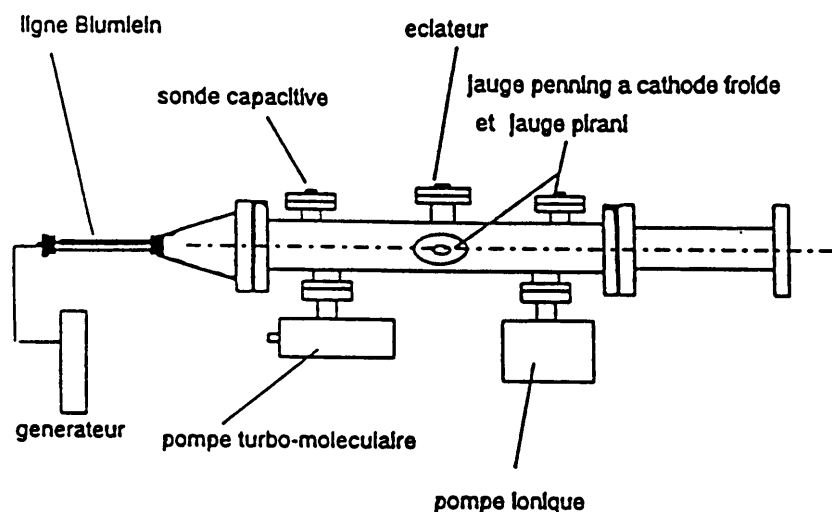
Aspect général

L'éclateur de test est installé dans une ligne coaxiale parfaitement adaptée en impédance afin d'assurer la transmission correcte des impulsions rapides. La ligne est constituée de deux tubes. Le tube extérieur servant d'enceinte ultravide. Le pompage est assuré par une pompe turbomoléculaire pour amorcer et une pompe ionique pour le vide opérationnel.

Les impulsions haute tension sont créées par un chargeur "lent" qui alimente un générateur rapide de type Blumlein produisant des impulsions d'une longueur de 2 ns et des amplitudes jusqu'à 10 kV.

La ligne prolongée d'un mètre dans l'air demeure adaptée en impédance. Ceci afin d'éviter que des réflexions dues à une terminaison imparfaite se superposent au signal des claquages.

La figure ci-dessous montre le schéma de l'ensemble.

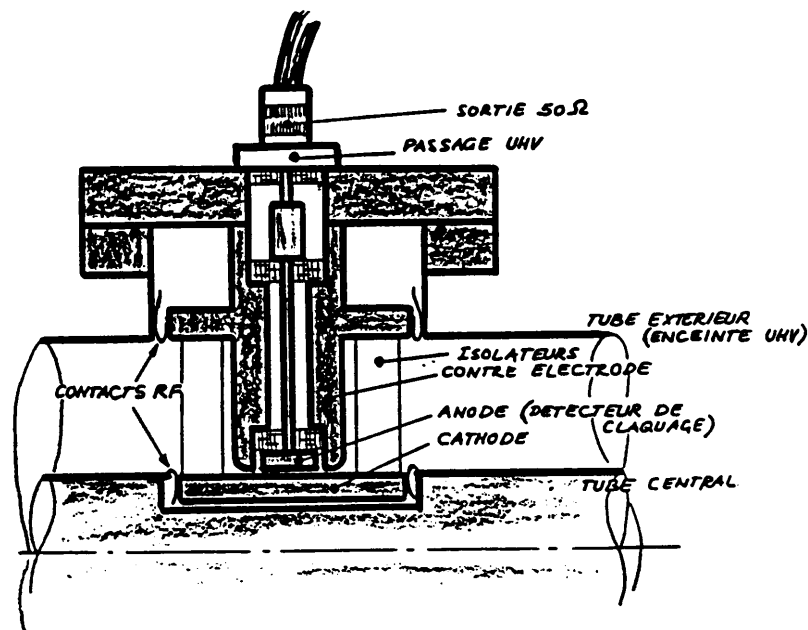


Le capteur de claquages

L'éclateur est un système pré-assemblé qui s'insère dans la ligne coaxiale. L'anode est solidaire de la bride UHV et la partie centrale est isolée pour capter directement le courant de la décharge par une sortie également adaptée en impédance (50Ω).

La cathode est isolée par deux supports en porcelaine et entre en contact avec le conducteur central grâce à des contacts haute fréquence.

La surface disponible pour détecter des décharges représente environ 1 cm^2 . L'écartement entre les deux électrodes peut être ajusté par pas de $10 \mu\text{m}$. La précision est suffisante pour permettre de vérifier la linéarité des gradients dans la gamme $10 \mu\text{m}$ - $30 \mu\text{m}$. Selon Mesyats ceci devrait être valable pour des écarts jusqu'à 1 mm , distances relevantes au SPL.



L'ajustage

La mesure du gap entre les électrodes se fait à l'aide de jauges qui servent également à caler l'ensemble. L'ajustage fin est obtenu par un serrage judicieux.

Il faut quand même souligner la difficulté à ajuster un gap de $10 \mu\text{m}$. Non seulement il faut trouver la bonne hauteur de cales mais, de plus, la mesure avec une feuille de $10 \mu\text{m}$ n'est pas aisée. Bien souvent elle laisse après son passage des copeaux, produisant des courts-circuits, ou même se casse. On doit donc faire pour le réglage un important travail de micromécanique.

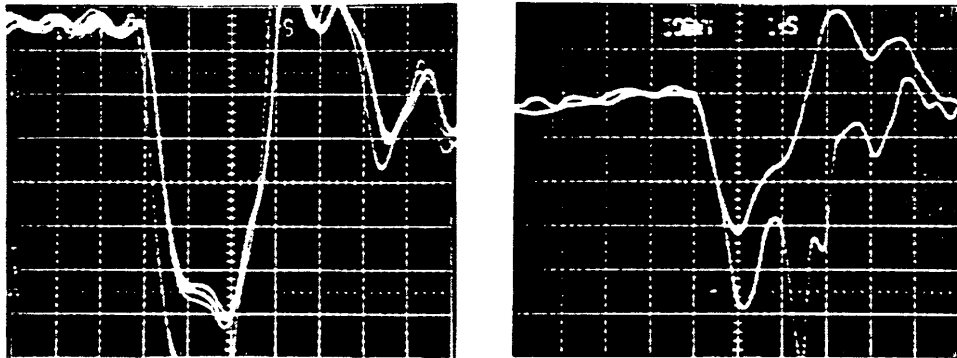
On peut simplement remarquer que la méthode de mesure capacitive, qui a été utilisée pour amener d'une façon bien contrôlée l'écartement de 500 à 50 μm , ne donne pas assez de précision autour de 10 μm .

Nous étudions actuellement la conception d'une mécanique améliorée afin de rendre cet ajustage plus facile. Ceci comprend également la recherche de méthodes alternatives pour mesurer des faibles distances.

Le système de mesure

La collection de l'information d'amplitude se fait grâce à des sondes capacitives. Ces sondes doivent posséder une grande capacité afin d'avoir une bonne atténuation. De cette manière on obtient des atténuations de l'ordre de 10^4 ce qui amène le signal à un niveau acceptable pour l'oscilloscope rapide.

Les deux photographies ci-dessous représentent le signal issu du générateur Blumlein (à gauche) ainsi que le signal avec et sans claquage (à droite).



On utilise généralement le signal Blumlein pour déterminer l'amplitude de l'impulsion injectée. Sur la sonde de claquage on observe le signal Blumlein différentié, même lorsqu'il n'y a pas claquage. Cela est dû à un très fort couplage capacitif entre les deux électrodes.

Les différentes formes du signal observées permettent de déterminer si il y a eu claquage ou non. Le trigger de l'oscilloscope permet de discriminer des tensions inférieures à un certain seuil. C'est ainsi que l'on obtient une précision de 1 kV à 2kV suivant l'échelle de mesure.

L'observation différentielle utilisée dans un premier temps n'est plus exploitée. En effet nous savons maintenant déceler les claquages par expérience.

L'étude de méthodes complémentaires d'analyse n'a pas encore débutée. Le travail ayant été axé, jusqu'à maintenant, sur l'acquisition de données sur un maximum d'échantillons.

5. Mesures

Préparation et conditionnement initial

Nos électrodes n'ont jamais subi une préparation poussée. Nous avons seulement effectué un polissage simple et dégraissé les électrodes dans un bain ultrasonique, solvant freon, alcool ou perchloréthylène. Il n'y a pas eut de polissage à l'alumine, d'étuvage, de rabotage des couches superficielles comme le préconise Rohrbach. L'étuvage sera sûrement fait dans une deuxième étape.

Lorsque le champ électrique est appliqué pour la première fois entre les électrodes on distingue une période de conditionnement au bout de laquelle on atteint la résistance optimale au claquage. Ce temps peut varier de quelques minutes à quelques heures en fonction du matériau et suivant la préparation des électrodes.

Durant le conditionnement on observe un dégazage des électrodes. Ce dégazage est visible à l'oeil nu par l'arc qu'il produit et par la montée de pression qu'il provoque. Au cours du conditionnement la surface est microscopiquement nettoyé (dégazage) et polie (vaporisation des pointes, arrachage des impuretés faiblement accrochées à la surface).

Selon Rohrbach la tension de conditionnement ne doit pas être choisie ni trop faible ni trop forte. En effet, trop faible: on ne nettoie ni polit rien, trop fort: il y a des disruptions trop fréquentes et risque de destructions. Nous n'avons pas encore vérifié cette proposition, nous tenterons de le faire dans la deuxième série de mesures.

Comme Rohrbach et Mesyats, nous n'avons noté aucune variation de la tension de disruption suivant la pression dans la gamme de l'ultravide. Leur variation de pression était de quatre ordre de grandeur, la notre n'étant que de deux (nous travaillons entre 10^{-7} et 10^{-5} torr).

Premiers résultats

Le tableau suivant résume les tensions limites obtenues pour différents matériaux en fonction de la distance des électrodes. Le gradient donné correspond toujours au cas le plus défavorable.

Le temps de conditionnement est celui nécessaire pour obtenir les performances indiquées. Suivent enfin, d'éventuelles valeurs de référence trouvées par les auteurs cités ci-devant, entre parenthèses celles des mesures de Rohrbach pour des impulsions de l'ordre de la microseconde. Elles sont extrapolées sur trois ordres de grandeur et n'ont ainsi qu'une valeur indicative.

Cathode	10 μm [kV]	20 μm [kV]	E [MV/m]	Temps. condit. [min]	Mesyats (Rohrbach) [MV/m]
Ti	>9	-	900	20	(~800)
Inox(304L)	>8	-	800	20	(~900)
W	>8	-	800	160	-
Nb	>7	-	700	180	-
Mo	>6,5	-	650	40	>400
Al(Antico)	>5	>9	500	15	230
Cu	>3	6,3	300	40	290
Ta	>1,3	4,6	130	50	-

On constate que nos résultats sont généralement plus élevés que ceux de nos prédécesseurs.

Cette différence peut s'expliquer par le fait que Mesyats et Jüttner ont travaillé avec des pointes. Le champ disruptif est très sensible au rayon de la pointe (elles ne mesurent que quelques micromètres). Or, l'excès d'énergie emmagasinée peut contribuer à la déformation ou à la destruction des pointes. Ceci par échauffement ou même par fusion de ces dernières.

D'autre part la durée de notre impulsion est mesurée à mi-hauteur. Donc le temps d'exposition de nos électrodes est inférieur à 2 ns, valeur prise en considération pour la comparaison de nos données avec nos références.

Nous sommes convaincus de ne pas faire une erreur grossière :

- chaque fois que nous faisons une mesure, nous vérifions que la cale d'épaisseur supérieure ne passe pas .
- on vérifie la linéarité chaque fois que les capacités du générateur nous le permettent (fait pour Al, Cu et Ta).
- on s'est assuré dès le départ de la reproductibilité de l'ajustage en effectuant une série de mesure sur une cathode en inox.
- nous faisons une mesure directe de la tension avec des électrodes planes et avec des impulsions de durée bien déterminées.

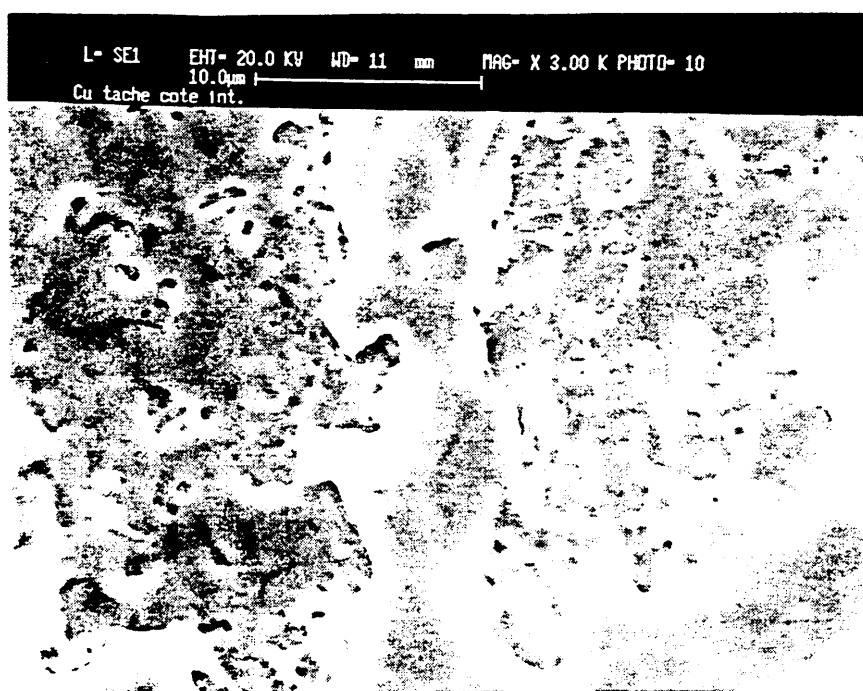
Etude au microscope électronique

Pour mieux comprendre le mécanisme de claquage et pour comparer avec d'autres mesures, il faut étudier la structure des cathodes au microscope électronique. Nous essayerons ensuite de faire une analyse pour voir si il y a émission de champ. Ceci s'inspire de la démarche suivie par Rohrbach lors de son étude.

On trouve ci-dessous une sélection de photographies.

Dès le départ on remarque que les états de surface sont différents suivant la tenue en tension.

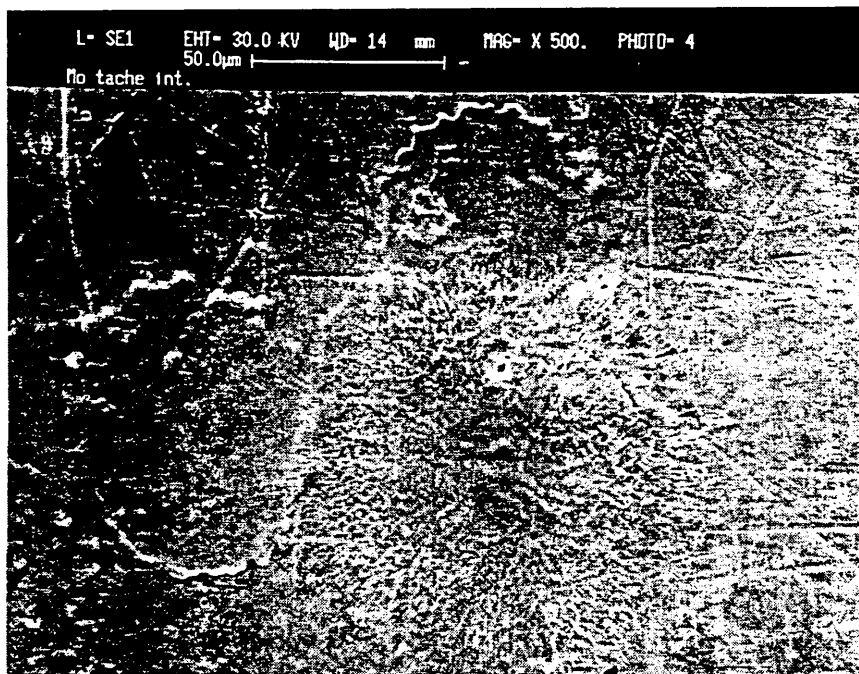
Pour la cathode en cuivre, on peut remarquer qu'il y a eut comme un arrachement de matière par plaques. Les inclusions sont certainement attaquées préférentiellement. On distingue aussi la présence de microcratères.



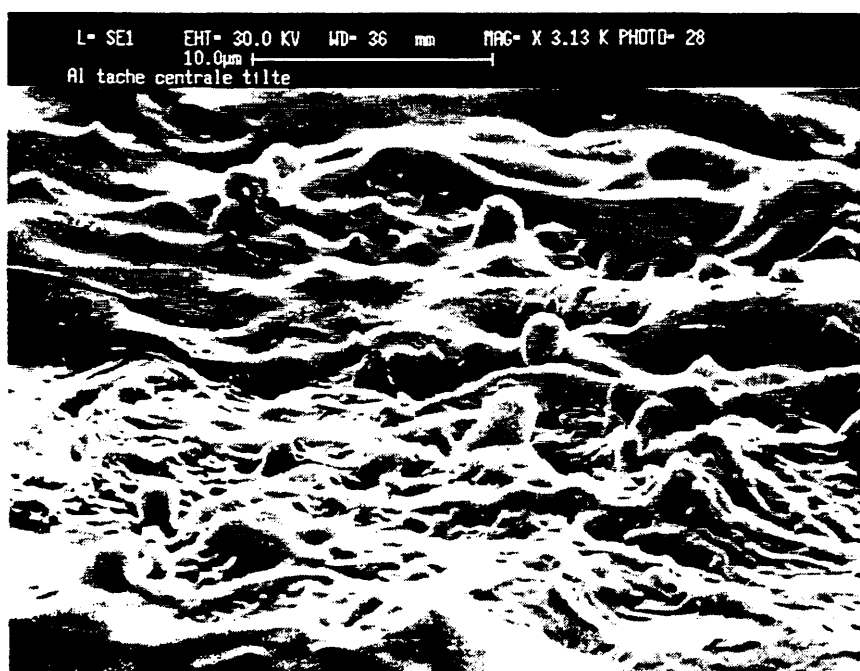
Un autre type d'attaque est montré sur la cathode en molybdène. On distingue deux formes différentes.

Tout d'abord on aperçoit une tache avec des pointes. C'est probablement un centre émetteur. Ces taches se retrouvent un peu partout sur la surface de la cathode.

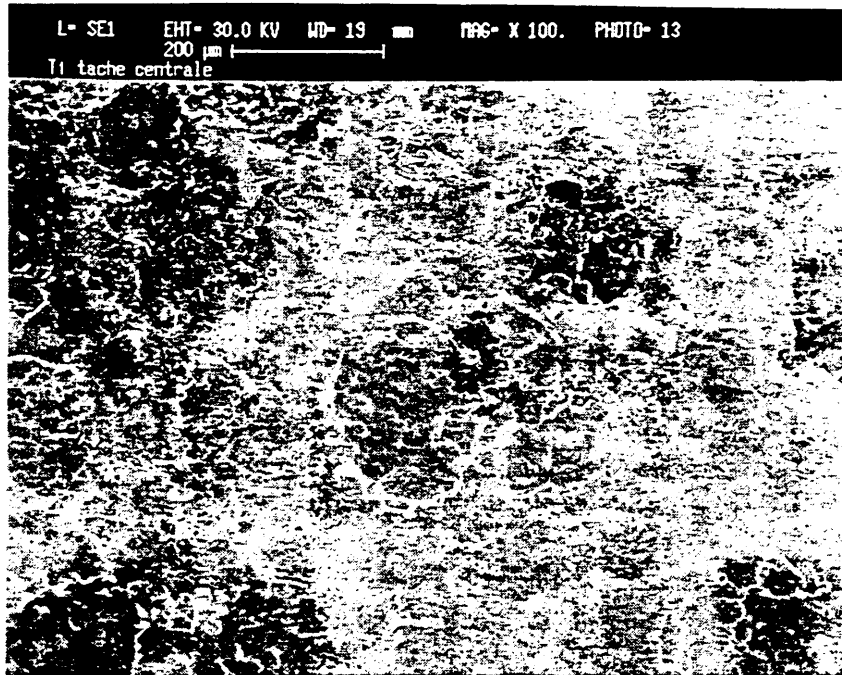
Ensuite il y a deux cercles. Nous ne savons pas à l'heure actuelle si ces cercles sont dus à l'explosion d'une bulle de vapeur ou à l'arrivée de microparticules anodiques. Une analyse métallurgique de la constitution de la cathode permettrait peut-être de trancher.



Nous avons pris une photographie avec la cathode d'aluminium penchée. On reconnaît des pointes émettrices. On voit aussi combien la surface est tourmentée.



Enfin une allure générale de la cathode en titane. On remarque des auréoles, sans savoir pour l'instant à quel phénomène elles correspondent.



L'étude au microscope électronique vient juste de commencer. Une analyse plus poussée sera faite les prochaines semaines avec le service métallographie.

6. CONCLUSIONS

Aujourd'hui nous avons déjà des données sur un large éventail de cathodes . Les premiers résultats sur la tenue haute tension sont supérieurs à ceux escomptés et donc très encourageants. Nous pouvons espérer améliorer ceux-ci en prenant plus de précautions quant à la préparation des cathodes.

Prochainement nous allons réaliser une nouvelle série de mesures afin de confirmer la reproductibilité des données. Les cathodes seront cette fois étuvées afin de voir l'influence sur la durée du conditionnement et sur la tenue haute tension.

Un jeu de cathodes galvanisées à support en inox (Au, Ag, Ni, Cu, Cr, avec des épaisseurs allant jusqu'à 10 µm) est actuellement en test . Nous envisageons également des essais avec des cathodes évaporées, par exemple avec une couche de CsI, photoémetteur utilisé pour des essais du CLIC (Cern LInear Collider).

Nous envisageons de réaliser une analyse précise sur l'initiation cathodique et anodique afin de pouvoir éventuellement conclure sur un processus quelconque de décharge.

Le système de mesure a jusque là bien fonctionné. Bien que récemment nous ayons rencontré des problèmes au niveau du générateur d'impulsions longues ainsi que pour la ligne Blumlein. Ces difficultés dues au vieillissement des composants ont été maîtrisées avec l'aide de l'atelier mécanique.

Et, afin d'augmenter la tension disponible, la Blumlein devrait être amélioré soit en la mettant sous pression soit en agrandissant le diamètre. Les avantages et inconvénients de chaque méthode sont à déterminer afin d'orienter notre choix.

7. REMERCIEMENTS

Je remercie MM H. Haseroth, chef de groupe, et D.J. Warner, chef de section ainsi que tout le groupe HI pour avoir accepté ma venue au CERN.

Je tiens à remercier ensuite Jurgen Knott pour sa grande gentillesse et son entière disposition. C'est un plaisir de travailler dans de telles conditions. Je remercie aussi toutes les personnes qui ont travaillées directement ou indirectement à la réalisation du tube à savoir Ph. Liger, F. Chautard ainsi que tous les anciens apprentis du CERN. Ils ont laissés derrière eux un travail impeccable.

Ces remerciements s'adressent aussi à M J.L. Loquet et à ses apprentis. Ils sont prêts à nous servir et ce dans les plus brefs délais.

8. REFERENCES

- [1] Ph. Liger, Etude des disruptions d'impulsions haute tension ultra courtes dans l'ultra vide pour le projet d'un "switched power linac". Rapport de stage au CERN PS/HI. Avril-juin 1989. DEA physique et technologie des grands instruments, Paris.
- [2] F. Chautard, Etude de la tenue en tension sous ultra vide pour le projet d'un "switched power linac" Instrumentation et calibration. Rapport de stage au CERN division PS groupe HI. Avril-juin 1991. DEA physique et technologie des grands instruments, Paris.
- [3] F. Chautard, Tenue haute tension sous ultra vide d'impulsions de 2 ns pour un futur SPL. CERN/PS/HI/note 91-10, 1991.
- [4] W. Willis, "Switched Power Linac", proc. of the CAS-ECFA-INFN workshop, CERN 85-7, 1985.
- [5] J. Knott, Feasibility Studies for the Switched Power Linac. CERN/PS 87-64 (LI), 1987.
- [6] Ch. Bamber, A Pulsed Power Electron Accelerator using Laser Driven Photocathodes Switches. UR-1237,ER-13065-689, 1991.
- [7] F. Rohrbach, Isolation sous vide. CERN 71-5, 1971.
- [8] F. Rohrbach, Sur les mécanismes qui conduisent à la formation de l'étincelle électrique à très haute tension et sous ultra vide par la mesure du temps de retard à la disruption. CERN 71-28,1971.
- [9] G.A. Mesyats, Pulsed Electrical Discharge in Vacuum. Springer Verlag Berlin/Heidelberg, 1989.
- [10] B. Jüttner, W. Rohrbeck, H. Wolf, Beiträge zur Plasmaphysik, 10, p.383, 1970.