



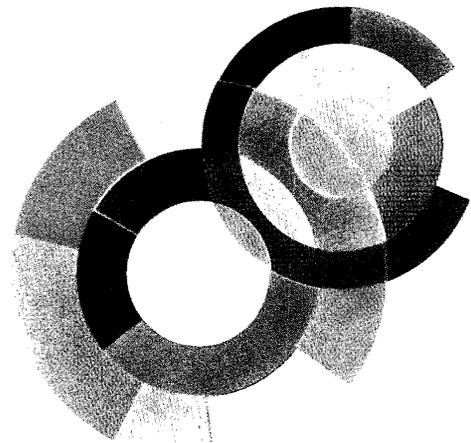
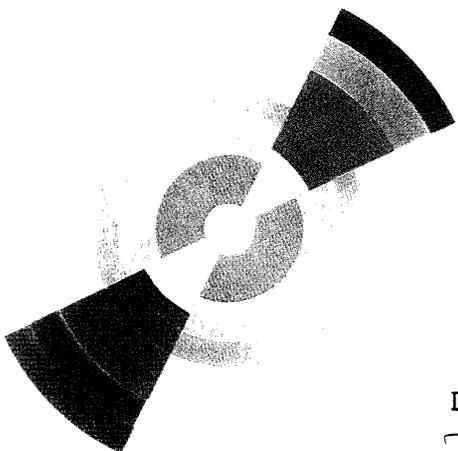
C.E. SACLAY
DSM

SERVICE D'ÉTUDE DES ACCÉLÉRATEURS

DAPNIA - SEA - 93 - 12



6



DAPNIA/SEA 93 12

08/1993

ROLE DE LA CONTAMINATION DANS LES CAVITES
POUR ACCELERATEURS DE PARTICULES

C.Z. Antoine, B. Bonin, M. Jimenez,
B. Mahut, J.P. Poupeau

DAPNIA

Le DAPNIA (Département d'Astrophysique, de physique des Particules, de physique Nucléaire et de l'Instrumentation Associée) regroupe les activités du Service d'Astrophysique (SAp), du Département de Physique des Particules Élémentaires (DPhPE) et du Département de Physique Nucléaire (DPhN).

Adresse : DAPNIA, Bâtiment 141
CEA Saclay
F - 91191 Gif-sur-Yvette Cedex

Communication à :

Contamin expert 93

Hotel Pullman Saint-Jacques, Paris, France.

du 30 novembre au 2 décembre 1993

ROLE DE LA CONTAMINATION DANS LES CAVITES POUR ACCELERATEURS DE PARTICULES

C. Z. ANTOINE, B. BONIN, M. JIMENEZ, B. MAHUT, J.P. POUPEAU
C. E. SACLAY, FRANCE

Abstract

Contamination is responsible from accelerating field limitations in radiofrequencies accelerators, but also in the general case were a metallic surface is submitted to electrical field. The role of particulate contamination and a systematic study about the nature of the particles and/or the substrate are here briefly described. We also present some improvements that we are testing (chemical treatment facility) or hoping (new assembling procedures) for safer surface treatment of RF cavities.

I) INTRODUCTION

Les accélérateurs de particules sont d'un usage de plus en plus général : on les retrouve désormais dans des domaines aussi divers que la médecine ou la biologie, dans l'industrie agro-alimentaire ou la micro électronique, et bien sûr dans les laboratoires de recherche. De plus, la taille des accélérateurs nécessaires pour la physique nucléaire et la physique des particules ne cesse de croître.

La plupart des grands accélérateurs fonctionnent grâce à des cavités accélératrices hyperfréquences. Le principe de fonctionnement des cavités accélératrices H.F. peut être décrit simplement (voir figure 1). Sous l'effet d'un champ électrique oscillant dans la cavité, une particule chargée arrivant en phase avec l'onde H.F. sera accélérée pendant toute la durée de la demi-période de l'onde H.F.. Si de plus, le temps de transit dans une cavité correspond exactement à la durée d'une demi-période, la particule arrivera dans la cavité suivante de nouveau en phase et sera par conséquent re-accelérée et ainsi...tant qu'il y aura des cavités !

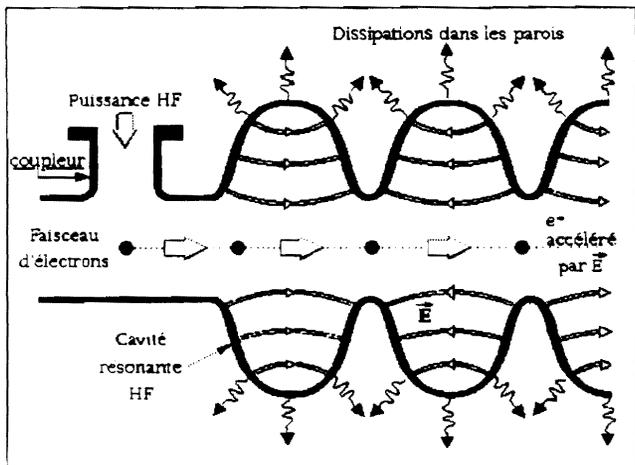


Figure 1 : principe de fonctionnement d'une cavité Hyper-Fréquence

Dès lors, le paramètre le plus important d'un accélérateur de particules devient le pouvoir accélérateur des cavités que l'on souhaiterait être le plus élevé possible. Or, en présence d'un champ électrique intense, dans notre cas celui qui règne sur la surface interne de la cavité, des électrons peuvent sortir du métal. Ce phénomène, connu sous le nom d'émission électronique par effet de champ, est un précurseur au claquage de la surface et est à l'origine des limitations des performances des cavités H.F..

L'objet de cet article est de montrer l'importance de l'état de surface des cavités, le rôle de la contamination, et les moyens employés pour la combattre. En effet, la maîtrise de la contamination doit maintenant passer de l'échelle du laboratoire à une organisation quasi industrielle, car il existe plusieurs grands projets d'accélérateurs en cours de construction ou à l'horizon de l'an 2000, qui comporteront depuis une centaine jusqu'à environ 20 000 cavités.

II) L'EMISSION DE CHAMP : UN PHENOMENE LIE A LA CONTAMINATION

Mais quels sont exactement les origines de l'émission d'électrons par effet de champ ?

L'émission électronique par effet de champ est un phénomène connu depuis le début du siècle et un modèle théorique (théorie de Fowler et Nordheim [1]), décrivant la traversée des électrons par effet tunnel à travers la barrière de potentiel qui les enferme dans le métal, a même été établi. Cependant, bien que ce modèle présente de bonnes conformités avec l'expérience dans le cas de l'émission d'une surface métallique parfaite, il n'est pas vérifié dans le cas particulier de l'émission d'une surface étendue et de qualité "industrielle" comme par exemple celle des cavités H.F.. En effet, cette théorie prévoit des champs seuils d'émission de quelques milliers de mégavolts par mètre (MV/m) alors qu'en pratique, dans les cavités H.F., de l'émission électronique est observé pour des champs de quelques mégavolts par mètre. On savait jusqu'ici que cette émission avait lieu sur de petits "défauts" de la surface mais la nature et l'origine de ces défauts restaient à élucider.

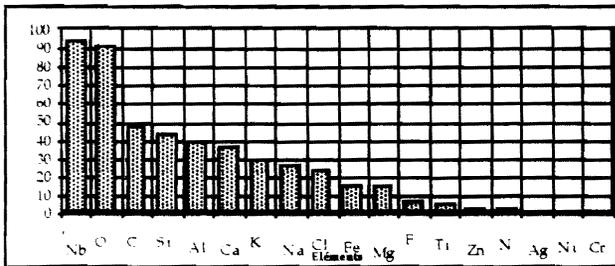
Or des études systématiques ont montré l'influence néfaste de la contamination particulaire. Nous avons pu montrer que des particules de taille micrométrique déposées sur une surface métallique, oxydée ou non, se comportaient comme des sites émetteurs d'électrons. Les particules métalliques ou conductrices semblent être particulièrement

émisives -et donc dangereuses pour le fonctionnement des cavités.

Analyse de la contamination naturelle

Les cavités subissent un traitement de surface soigné : décapage acide dans un mélange HF, HNO₃, H₃PO₄, rinçages à l'eau Ultra-Pure, Ultra-Filtrée, séchage en salle blanche sous flux laminaire classe 100.

Les particules de contamination, que l'on rencontre plus fréquemment, peuvent avoir quatre origines différentes: le métal lui-même -dans notre cas du niobium- (voir tableau analyse), l'acide utilisé pour l'attaque chimique, l'eau de rinçage ou l'air (manipulations en ou hors salle blanche). Au cours de cette étude, nous n'avons étudié que l'effet global de ces quatre origines différentes de contamination.

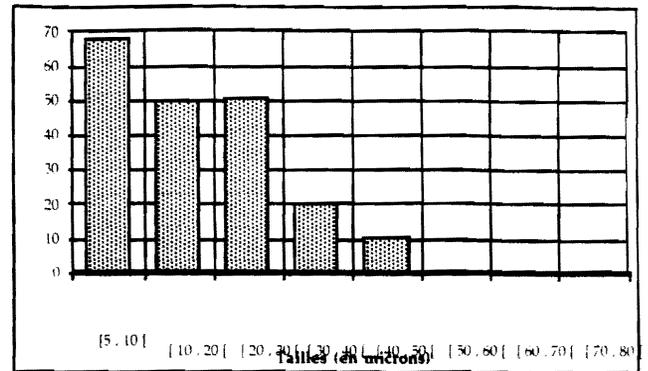


Histogramme 1 : fréquence d'apparition des différents éléments dans la composition des particules de contamination.

C	O	F	Na	Mg	Al	Si	Nb	Cl	K	Ca	Ti	Fe	Taille (µm)	Charge	Posée/Incluse	Champ seuil (MV/m)
	X				X	X	X						30	m	P	40
	X				X	X	X						20	N	P	40
	X				X	X	X						16	O	P	40
	X			X	X	X					X		16	N	P	40
	X		X	X	X	X			X	X			9	N	P	40
	X	X			X	X			X	X			7	N	P	100
	X		X		X	X			X	X			40	m	P	70
	X				X	X		X	X	X			10	m	P	76
	X				X	X		X				X	20	N	P	20
	X				X	X				X			20	N	P	56
X	X				X	X		X	X				30	m	P	74
X	X				X	X		X		X			20	m	P	100
X	X		X		X	X		X					10	m	P	100
X	X			X	X	X			X	X		X	20	N	P	100
X	X				X	X			X	X		X	30	N	P	48
X	X		X			X		X					20	m	P	72

Tableau 1 : Récapitulatif de la composition chimique élémentaire, de la taille, de la charge, du contact particule/surface et du champ seuil des 16 particules émettrices. La particule se charge (O) sous le faisceau électronique, ne se charge pas (N) ou se charge un peu (m).

Les résultats montrent que la quantité de particules diminue lorsque leur taille augmente ce qui peut être attribué à l'efficacité des différents



Histogramme 2 : distribution des tailles des particules de contamination naturelle.

Les histogrammes 1 et 2 montrent respectivement la distribution en composition et en taille des particules étudiées (environ 250 particules). L'analyse étant faite par rayons X, la composition la plus fréquente est évidemment celle du niobium à cause de l'échantillon qui est en niobium. En effet, la taille de la poire d'interaction est dans la majorité des cas supérieure à la taille des particules d'où la présence des raies caractéristiques du niobium. Dans tous les cas, nous avons pris soin de ne prendre en considération dans nos statistiques, que les pics significatifs de chaque spectre (hauteur de pic supérieure à 5 % du pic le plus haut) abandonnant volontairement les traces d'autres éléments qui peuvent avoir pour origine de nombreux artefacts. De plus, nous n'avons étudié que les particules dont les tailles étaient supérieures à 5 microns.

filtrages utilisés pour purifier l'eau pour le rinçage.

La distribution en taille montre une émission importante des particules dont la taille est voisine de

20 microns. La distribution en champ, elle, ne montre aucun champ seuil préférentiel ni même une quelconque corrélation entre le champ seuil d'émission des particules et leurs tailles respectives.

Le tableau 1 ne montre aucune corrélation entre la composition chimique élémentaire et l'aptitude à émettre ou non des électrons. De plus, bien qu'il soit difficile de l'affirmer avec certitude, il semble néanmoins que toutes les particules émettrices soient posées et non incluses dans la surface. Dans la majorité des cas, les particules émettrices ne sont à l'origine d'aucun contraste de potentiel au microscope électronique à balayage, ce qui prouve qu'elles ne se chargent pas ou très peu (15 particules sur 16) sous le faisceau primaire d'électrons. Ceci traduit un caractère relativement conducteur d'un point de vue électrique car elles permettent l'écoulement des charges de la particule vers le substrat.

Afin d'affiner les résultats obtenus sur les particules de contamination naturelle dont les statistiques souffrent énormément du manque de reproductibilité, il nous a semblé indispensable d'étudier sélectivement chaque famille de sites émetteurs en maîtrisant davantage la nature, la taille, la forme et la nature du contact entre les particules et la surface.

Effet de la nature des particules

Les études sur les particules de contamination naturelle ont montré clairement une corrélation entre le caractère conducteur ou non des particules et leur aptitude à émettre ou non des électrons. Aussi, nos études de contamination [2] sélective ont porté sur trois familles d'éléments : les particules isolantes (Al_2O_3 , SiO_2), les particules métalliques possédant une surface conductrice (Au, Ag, Fe, Ni) et les particules métalliques ayant une couche naturelle d'oxyde isolante (Nb, Ti). Toutes ces particules ont été étudiées sur un substrat de niobium.

Cas des particules isolantes. Excepté 2 particules sur 47 testées pour Al_2O_3 et 11 pour SiO_2 , aucune émission n'a été constaté sur ce type de particules pour des champs inférieurs à 140 MV/m. La silice utilisée provient de deux sources, une poudre commerciale (pureté : 97%) et du Pyrex broyé. Ce dernier type, bien que possédant une proportion plus importante d'impuretés ne semble pas pour autant être un meilleur émetteur.

Cas des particules métalliques possédant une surface conductrice. Les particules utilisées (Au, Ag, Fe, Ni) ont pour origine des poudres commerciales de pureté supérieure à 99%. L'étude du comportement de ces particules sous l'effet d'un champ électrique a montré une émission très intense à partir de champs supérieurs ou égaux à 20 MV/m sans toutefois que l'on puisse établir une différence de comportement en fonction de la

nature des particules. Cependant, le taux de particules émettant pour des champs inférieurs à 100 MV/m, supérieur à 90 % est très élevé en comparaison avec celui observé sur les particules de contamination naturelle (5 à 10 %).

Effet de la taille. Nos études ont porté sur des particules dont la taille variait entre 4 et 30 microns. Dans cette gamme de taille, il ne semble pas exister de corrélation entre la taille et le champ seuil d'émission. De plus, l'étude de plusieurs particules de tailles supérieures à une centaine de microns n'a montré aucun rôle particulier de l'effet de taille.

Effet de forme. Ce paramètre est beaucoup plus délicat à étudier car la forme des particules est aléatoire. Ainsi, la seule alternative possible a consisté en une comparaison de particules de formes aléatoires avec des sphères du même matériau et évidemment de même taille. Cette comparaison confirme le rôle de la forme de la particule et renforce donc le modèle géométrique. En effet, les particules de forme sphérique n'émettent pas pour des champs inférieurs à 120 MV/m. Ce résultat n'est guère surprenant car le facteur de renforcement¹ du champ électrique sur une sphère est voisin de 3 alors qu'un facteur voisin de 100 serait le plus probable dans le cas des particules de forme aléatoire.

Nature du contact. Les mêmes études que celles décrites précédemment ont été réalisées sur un substrat en or de façon à s'affranchir d'un éventuel rôle de la couche d'oxyde naturel. En effet, sur un substrat en or, seul peut intervenir une faible couche de contamination par hydrocarbures (cette couche de contamination est toujours présente quelle que soit la nature du substrat). Mais en réalité, aucune différence ne semble exister entre les résultats obtenus sur ces deux types de substrats. Il ne faut cependant pas perdre de vue que la forme aléatoire des particules entraîne une dispersion importante des résultats.

Afin de confirmer ou d'infirmer un éventuel rôle de l'oxyde présent sur le substrat, nous avons étudié le rôle d'une interface d'oxyde épais (oxyde anodique) entre le substrat et la particule. Seul dans le cas de l'alumine (Al_2O_3), très isolant, nous avons pu établir un effet notoire de l'oxyde sur les champs seuils d'émission. En effet, les champs seuils se retrouvent décalés vers des valeurs plus élevées du champ électrique. Dans le cas de particules de niobium une petite tendance comparable à celle de l'alumine semble se dessiner.

¹ Effet de "pointe"

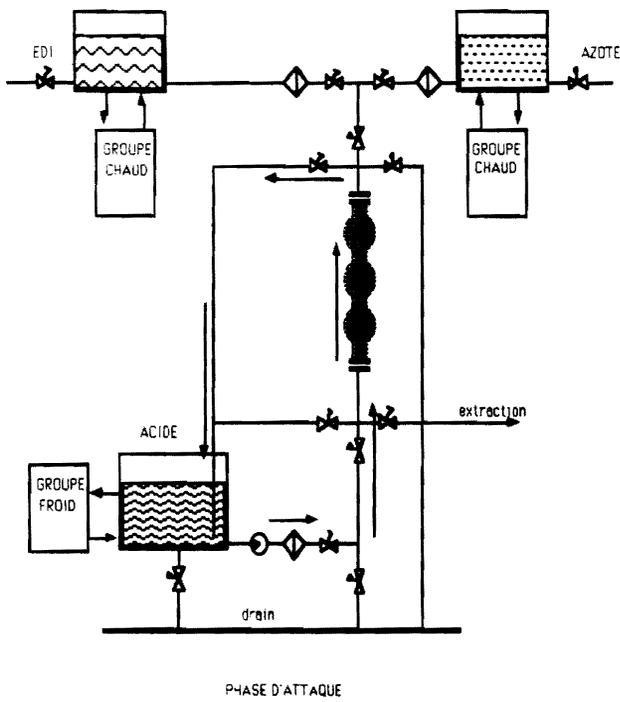


Figure 2a : Circulation continue d'acides filtrés et thermostatés (réaction exothermique). L'acide est rapidement vidangé en fin de traitement.

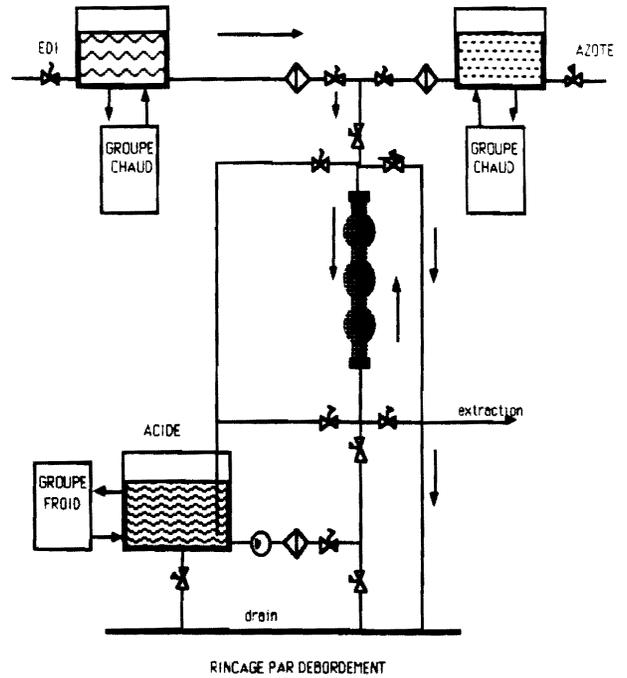


Figure 2c : Deuxième phase du rinçage, mesure de résistivité

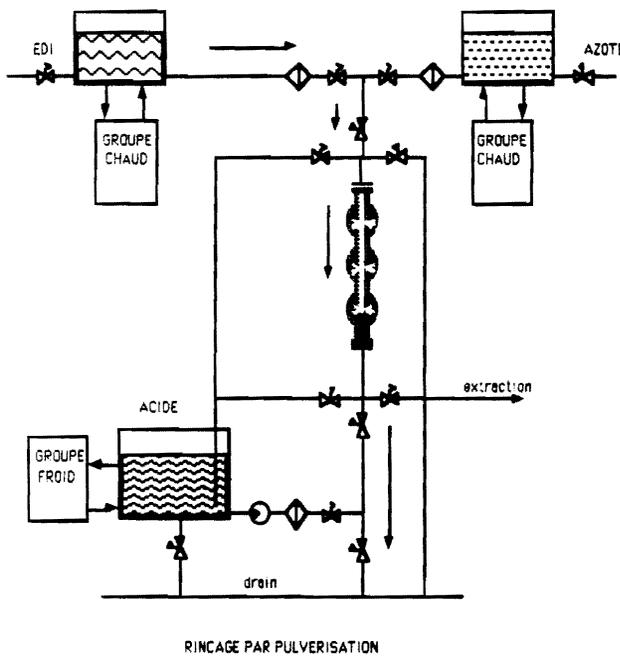


Figure 2b : Premier rinçage à l'eau DI chaude, sous forme de spray pour une meilleure dissolution du film acide.

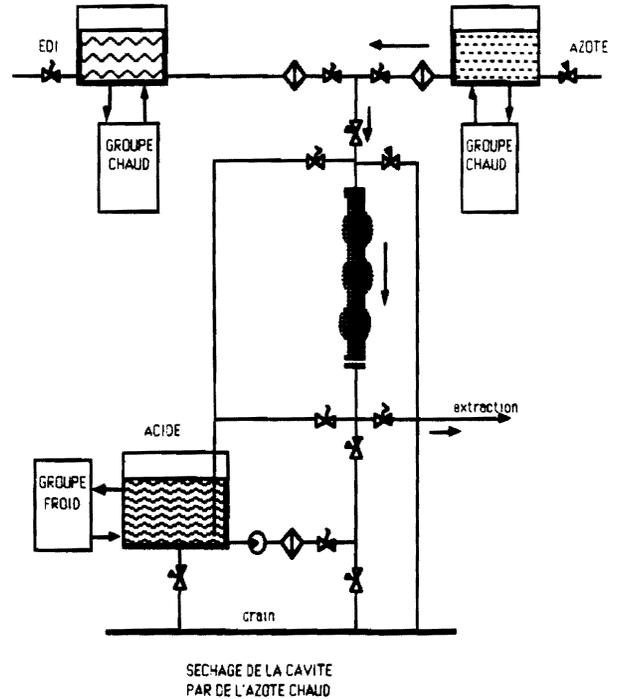


Figure 2d : Le gaz de séchage est également filtré

III) COMMENT COMBATTRE LA CONTAMINATION DE LA SURFACE INTERNE DES CAVITES

Comme nous l'avons déjà indiqué, il est indispensable de débarrasser la surface interne de toute contamination particulaire, mais aussi de rayures, pollution ou tout autre défaut de surface. Pour ce faire, on utilise un bain de polissage chimique à base d'acides concentrés pour dissoudre plusieurs dizaines de microns de la surface du métal. La plupart des laboratoires qui travaillent dans ce domaine réalisent la première phase de cette opération (dégraissage, attaque, séchage) en atmosphère normale et terminent en salle blanche par des rinçages suivis d'un séchage sous flux laminaire, pour effectuer ensuite l'assemblage de la cavité et de ses pièces d'équipement, toujours sous atmosphère contrôlée. Mais cette méthode a le désavantage de ne pas éliminer la contamination apportée par la première phase de traitement : récemment, grâce à des mesures effectuées sur des "wafers" de silicium avec l'aide du laboratoire d'IBM-Corbeil Essonnes, nous avons pu déterminer que la contamination apportée par les premières étapes de préparation de surface (dégraissage, attaque chimique, rinçages), jusque là réalisées en environnement normal, n'était pas éliminée par les rinçages à l'eau ultrafiltrée qui ont lieu ensuite en salle blanche (classe 100) [3].

Traitement de surface automatique

Avec l'aide de l'ASPEC, et plus particulièrement de Mr THEBAULT, nous avons pu redéfinir notre process et concevoir un nouvel appareil capable d'effectuer toutes les opérations de traitement de surface (attaque, rinçage, séchage) en circuit fermé, sans rupture de charge, où tous les fluides sont filtrés en continu (fonctionnement détaillé à la figure 2). En fin de traitement, la cavité propre et sèche est fermée hermétiquement, puis déconnectée du système, et transportée en salle blanche pour la suite des opérations de montage.

L'étude et la réalisation de l'appareil ont été menées par la société française SAPI-Equipement², également inscrite à l'ASPEC. Après une assez longue période de mise au point, nous sommes arrivés à des résultats tout-à-fait honorables puisque récemment nous avons pu - entre autres- obtenir un champ record de 28,5 MV/m dans une cavité traitée par cette voie (les champs typiques obtenus au laboratoire avec un

traitement classique sont plutôt de l'ordre de 20 MV/m, la limite théorique est de 50 MV/m).

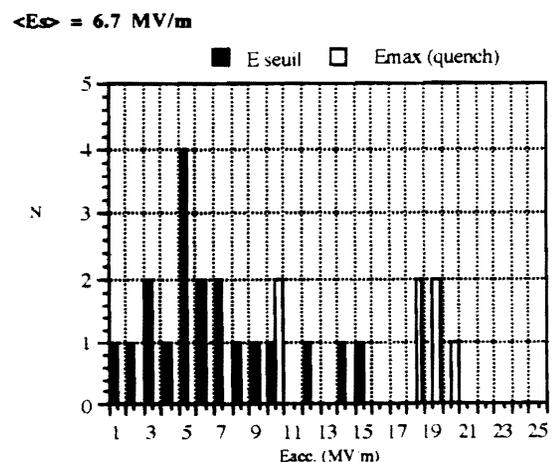
Malheureusement ces excellents résultats n'ont pu être confirmés de façon statistique. Le principal obstacle provient de la phase postérieure au traitement chimique : l'assemblage qui est le dernier point sensible de notre chaîne, et qui reste un problème loin d'être maîtrisé.

Assemblage en salle blanche : une étape encore sensible

Après son nettoyage, la cavité subit des opérations de montage en salle blanche, mais il est très difficile de dire si ces opérations sont contaminantes. Pour tenter de répondre à cette question, nous avons testé statistiquement un grand nombre de résultats de tests de cavités, en les classant selon deux catégories :

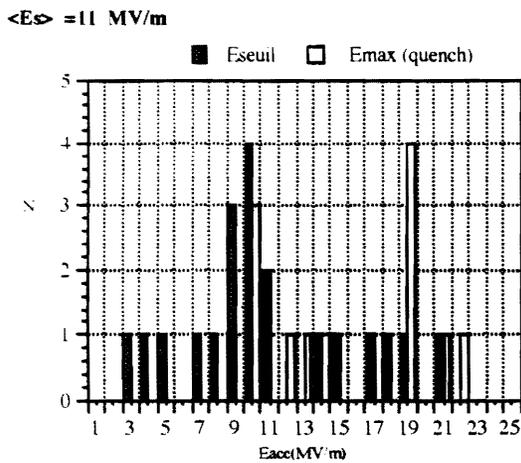
- La première concerne les tests où la préparation des cavités s'est faite sans problème avéré.

- La seconde concerne les tests où l'on a noté un incident durant la préparation, comme par exemple un changement de joint à la suite d'une fuite, ou bien le réglage particulièrement long et délicat d'un nouveau type d'antennes, ou d'une façon générale toute modification de la procédure standard qui entraîne une augmentation de la durée d'exposition de la cavité aux activités humaines. Ainsi qu'on peut le voir sur la figure 5, le seuil d'apparition moyen des électrons est de 4 MV/m plus bas dans le cas où il y a eu problème, ce qui est très limitatif sur le champ accélérateur. Il est assez facile d'expliquer pourquoi c'est un effet moyen et non systématique : en effet, la région où le champ électrique est le plus élevé ne représente qu'une très faible portion de la surface interne des cavités ; les particules "dangereuses" ne se déposeront pas forcément dans cette zone sensible.



Histogramme 3 : Résultats des tests avec problèmes pendant l'assemblage (NB : Emax représente les test où l'on n'a pas détecté d'électrons)

²SAPI-Equipement. 109, Av. des Chutes-Lavie- 13013 Marseille-FRANCE



Histogramme 4 : Résultats des tests sans problèmes pendant l'assemblage

IV) CONCLUSION

Nous voyons donc que les prochains efforts à fournir pour obtenir des champs accélérateurs élevés dans des cavités HF concernent surtout le travail d'assemblage en salle blanche. Il faut non seulement travailler dans des conditions de propreté poussée, mais également découvrir des procédures de montage extrêmement simple et reproductibles, peut-être même fabriquer de nouveaux outils dans des matériaux adaptés, et/ou apprendre à les utiliser différemment.

Si les physiciens des accélérateurs ont pu beaucoup progresser ces dernières décennies, c'est en partie grâce aux recherches fondamentales dans le domaine très spécifique des cavités accélératrices, mais aussi grâce aux collaborations que nous avons pu nouer au travers d'organismes comme l'ASPEC avec des industriels confrontés tous les jours avec des problèmes similaires à grande échelle.

V) REFERENCES

- (1) "Electron field emission from selectively contaminated cathodes" M. JIMENEZ, R.J. NOER, G.JOUVE, C.Z. ANTOINE, B. BONIN, J. JODET, to be published in *J. Appl. Phys. D*
- (2) "Dust contamination during chemical treatment of RF cavities : Symptoms and cures." C. Z. ANTOINE, B. BONIN, J.M. CAVEDON, C. CHIANELLI, J.M. HISLEUR, B. MAHUT, J.P. POUPEAU. Proceedings of the 5th Workshop on RF superconductivity, Aug 19-23 1991 at DESY, HAMBURG, Germany