

Date : 05 Décembre 2002

Réf : DAPNIA-02-373

OBJET : Note sur l'utilisation de cavités supraconductrices pour la radiographie éclair

**Sujet : Commentaires relatifs à la proposition de J.-M. Lagniel, du 21/11/2002
"Radiographie éclair, solution RF utilisant un cryomodule LEP,
Atouts, étude de faisabilité"**

Sur l'utilisation de cavités supraconductrices pour la réalisation d'un accélérateur linéaire radiofréquence d'énergie 40 MeV, formé de trains d'impulsions d'environ 54 ns comprenant 20 paquets d'électrons de 200 nC.

1. Faisabilité

L'idée d'utiliser un accélérateur linéaire comprenant des cavités radiofréquence (RF) paraît tout à fait séduisante eut égard aux nombreux avantages cités, principalement la maîtrise plus aisée du faisceau et la souplesse de fonctionnement. Ces arguments sont tout à fait pertinents et justifient pleinement l'examen approfondi de cette solution. Pour les besoins de cette application de radiographie éclair, la puissance instantanée nécessaire à fournir au faisceau devient gigantesque (40 J en 54 ns, soit l'équivalent de 740 MW instantanés par cavité !!). Il va sans dire que cette énergie sera simplement prise au champ radiofréquence stocké. La perte d'énergie correspondante est comblée lors du temps libre entre deux tirs (qui est largement suffisant au remplissage même dans le cas de cavités supraconductrices).

L'utilisation de la supraconductivité est ici mise en avant pour deux raisons : d'une part, les puissances nécessaires pour l'établissement du champ RF sont faibles (des centaines de W comparés à des dizaines de MW pour les structures en cuivre) et donc le coût des sources radiofréquences est singulièrement réduit. D'autant plus que, dans cette application, comme nous allons le voir plus loin, il faudrait autant que faire se peut minimiser au maximum l'impédance shunt (R/Q) des cavités, ce qui peut tout naturellement être fait dans les cavités supraconductrices, mais qui handicape encore plus les structures en cuivre chaudes. D'autre part, il faudra fonctionner à des champs radiofréquence crêtes (maximum sur les parois métalliques) les plus élevés possibles, sans initier d'émission de champ (qui engendre des perturbations sur le faisceau et des claquages). Là encore, les cavités supraconductrices apportent une solution où le faisceau peut être stable et non pollué même à des gradients très élevés (plus de 70 MV/m en crête ont été obtenus en laboratoire).

Comme il a été très justement souligné dans le papier, le premier point délicat de cette machine sera l'injecteur et plus précisément la cathode. En effet, étant donné la très forte charge par paquet (200 nC), la production et le transport à faible énergie sans éclatement du faisceau sont problématiques. Cela plaide en faveur de l'utilisation de fréquences basses et de

fortes accélérations au niveau de la photocathode afin de très rapidement minimiser les effets de la charge d'espace.

L'autre point délicat, particulier à ce type de machine, sera la très forte perturbation engendrée par le passage d'un train d'impulsions dans les cavités RF. En effet, chaque passage va entraîner une perte d'énergie de 40 J par cavité, sur un total de 100 J, soit près de 40%!! En réalité, chaque paquet va non seulement prendre de l'énergie au champ RF précédemment établi, mais également y déposer son propre champ (dit champ de sillage, qui est dans le cas présent significatif et du même ordre de grandeur que le champ établi). L'addition des deux champs va donc influencer sur le paquet qui suit. En particulier, le dernier paquet va "voir" l'influence de tous les paquets précédents, ce qui va fortement perturber sa dynamique. Il y aura donc une interaction forte entre paquets pour un même train d'impulsions.

2. Problèmes spécifiques

2.1 - La RF Supra

L'idée est de "récupérer" les cryomodules du LEP (CERN) pour cette application, ce qui permettra un gain certain en coûts et délais. Ces cavités supraconductrices ont été fabriquées industriellement avec une technologie de dépôt niobium sur cuivre (bien que les vingt premières aient été réalisées en niobium massif). Leur fréquence de résonance est de 352.2 MHz. Cependant, les cavités LEP ont été étudiées pour l'accélération des électrons (et des positrons) dans l'anneau du collisionneur du CERN. N'ayant pas été optimisées pour notre utilisation, il faudra donc bien examiner et quantifier l'effet de la perte induite comparativement à des cavités plus adaptées.

Le champ accélérateur dans les cavités du type LEP est de l'ordre de 6 MV/m. Le coefficient de surtension à 6 MV/m est de $3 \cdot 10^9$. Il est à noter que celui-ci s'écroule dès que le champ augmente, caractéristique bien connue de la technique de dépôt niobium/cuivre (pente de Q en fonction de E). Pratiquement, ceci exclut l'utilisation de ces cavités à des champs très intenses. Soulignons que dans notre cas particulier, le problème des pertes cryogéniques dynamiques est complètement négligeable vu les fréquences de tirs (le cycle utile étant extrêmement faible, on peut considérer que les pertes dynamiques sont quasiment nulles. Seules les pertes statiques domineront). Par contre, comme nous le verrons, il est important de pouvoir tenir des champs intenses.

La limitation en champ sera d'ordre magnétique (et non électrique). Typiquement, la technique du dépôt Nb/Cu autorisera un fonctionnement standard et régulier à $B_{pic} = 20$ mT, et atteindra pratiquement sa limite à 50 mT. En laboratoire, le maximum de champ atteint sur une cavité (quoique de surface significativement plus réduite, car il s'agissait d'une monocellule à 1500 MHz, présentant une aire plus de 17 fois plus petite) fut de 80 mT ($Q < 10^9$ à $T = 2$ K). C'est un résultat exceptionnel et non reproductible. Il serait donc déraisonnable en situation réelle d'espérer faire fonctionner les dépôts niobium sur cuivre au-delà de 40 mT. Par contre, le niobium massif pourra supporter des champs supérieurs à 100 mT (maximum en laboratoire de 170 mT) et ceci en maintenant des coefficients de surtension très élevés et non dégradés ($Q > 10^{10}$ à $T = 2$ K). Le handicap du niobium massif est son coût élevé à faible fréquence (beaucoup de matière) et la mécanique de rigidification (bien que diverses techniques soient possibles, disponibles ou en cours de développement).

En résumé, la technique CERN du dépôt Nb/Cu se prête bien à l'utilisation et ne réclame pratiquement aucun développement tant que le champ requis reste raisonnable ($B_{pic} < 40$ mT au maximum). S'il s'avérait que les exigences de la machine requerraient des

champs crêtes supérieurs (par exemple 80 à 100 mT), nous serions obligé de recourir à du niobium massif, rigidifié si nécessaire.

2. 2 - La forte charge (par bunch)

Cette problématique est pratiquement identique à celle abordée lors des études sur les collisionneurs à muons : Un train d'impulsions comprenant une charge très importante traversant une cavité radiofréquence avec une fréquence de répétition extrêmement lente.

L'objectif ici est de trouver des cavités qui minimisent l'influence des champs de sillage afin de réduire la perturbation apportée par un paquet. En effet, comme nous l'avons précédemment noté, la puissance instantanée est telle que le passage du train de paquets sera quasiment déterminant.

L'énergie fournie au faisceau (particule sur la phase crête) est

$$W_b = V q$$

$V = E_{acc} \cdot L$, tension vue par la charge lors de la traversée de la cavité.

D'autre part, l'énergie induite par une charge q sur la cavité est

$$W_{ind} = \frac{1}{2} \left(\frac{R}{Q} \right) \omega q^2$$

(R/Q) impédance shunt, ω pulsation.

Il est à noter ici que l'énergie totale induite est la somme sur tous les modes de la cavité, y compris (et surtout) les modes supérieurs. Toutefois, dans un premier temps, pour simplifier, nous ne calculerons ici que celle induite sur le mode fondamental (ici TM010). Un calcul exhaustif devra être fait sur tous les autres modes, certains pouvant se révéler être très dangereux (noter que W_{ind} est proportionnel à la fréquence). D'ailleurs l'effet des modes supérieurs sera déterminant dans l'analyse dynamique. Il conviendra donc de ne pas le négliger. Cependant, l'analyse qui suit sera intégralement extrapolable sur les modes supérieurs.

L'énergie induite est à comparer à l'énergie stockée, soit

$$W = \frac{V^2}{2 \omega \left(\frac{R}{Q} \right)}$$

Le rapport de ces deux énergies (W_{ind}/W) fournira une mesure de la perturbation. On pourra exprimer ce rapport par le carré d'un ratio valant

$$\alpha = \frac{\omega q \left(\frac{R}{Q} \right)}{V}$$

Notons que le rapport de l'énergie fournie au faisceau à l'énergie électromagnétique stockée s'exprime alors simplement par

$$\frac{W_b}{W} = 2 \alpha$$

Plus ce ratio α sera faible, plus la perturbation sera faible. Le rapport entre l'énergie déposée par le faisceau et l'énergie stockée pourra s'exprimer comme le carré de ce ratio. Ainsi un ratio α de 0.10 voudra dire que la tension induite par le faisceau sur le mode fondamental sera de 10% (en opposition de phase).

Remarquons immédiatement que, pour une charge donnée (ici $q = 4 \mu\text{C}$), l'on cherchera à minimiser le ratio α en

- 1) Diminuant la fréquence (ω faible)
- 2) Diminuant l'impédance shunt (R/Q)
- 3) Augmentant la tension d'accélération V

On retrouve ici le fait de vouloir travailler à fréquence faible (1). La fréquence des cavités LEP est de 352.2 MHz. C'est un bon compromis entre des dimensions physiques de l'objet qui deviennent très vite monstrueuses et le besoin de descendre en fréquence (en réalité, le ratio α ci-dessus augmente comme le carré de la fréquence car la tension d'accélération V augmente également comme l'inverse de la fréquence). Ce besoin impérieux de fréquence la plus basse possible a même poussé le choix pour les collisionneurs à muons à descendre jusqu'à 200 MHz, quitte à essayer de fabriquer (essais au CERN) des cavités très imposantes (1.4 m de diamètre !).

Une fois le choix de la fréquence effectué, la tension V (3) sera limitée par les champs pics de surface que la cavité peut supporter (voir précédemment). Ici, c'est la technologie choisie qui va dicter le choix maximal du champ accélérateur (par exemple niobium massif à comparer au film mince). Comme indiqué précédemment, ce sera le champ magnétique de surface qui va limiter V .

Enfin, il reste l'impédance shunt (R/Q), qu'il faut minimiser (2). C'est essentiellement sur ce point, me semble-t-il, que les efforts peuvent porter.

Si l'on choisit une fréquence de 352.2 MHz et une tension V de 10 MV, le ratio peut être calculé comme

$$\alpha = \frac{\left(\frac{R}{Q} \right)}{1130}$$

Il convient donc d'obtenir des (R/Q) significativement faibles comparés à 1130 Ω .

Notons au passage que pour les cavité LEP, pour lesquels (R/Q) = 232 Ω , le ratio α vaut 0.205. L'on retrouve à la fois que l'énergie prise à la cavité est de $2\alpha = 41\%$ et que la perturbation due au faisceau est significative (tension induite de 20.5% sur le fondamental, sans compter les modes supérieurs). Ce ratio sera probablement intolérable, et les "astuces", par ailleurs fort utiles, préconisées dans le papier pour réduire le problème de la dispersion en énergie (déphasages alternés entre deux cavités successives, tensions équilibrées entre le premier et le dernier paquet) ne prennent pas en compte ce phénomène.

Une autre approche que je suggérerais pourrait être d'essayer de minimiser (R/Q) en modifiant la géométrie de la cavité. On pourrait le faire par exemple en travaillant sur des modes différents (du type TM01p). On pourrait même l'obtenir sur le mode fondamental TM010. Voici comment: L'idée proposée ici serait de réaliser une cavité avec suffisamment d'énergie stockée comparativement à celle fournie au faisceau, quitte à perdre en efficacité d'accélération (E_{acc} plus faible). Il faut préciser que dans notre cas, vu l'énergie totale requise (de seulement 40 MeV), la longueur d'accélération n'a pas vraiment d'importance. Dans notre

application, les champs élevés seront uniquement requis pour augmenter V (et donc diminuer α) – et non pour réduire la longueur du linac, comme c'est usuellement le cas.

Voici un exemple simple d'optimisation du (R/Q) sur le mode TM010 :

Considérons une cavité cylindrique de diamètre ϕ et de longueur L dite "pillbox". La fréquence du mode TM010 est fixée par les dimensions transverses (diamètre de 652 mm pour une fréquence de 352 MHz). Quant au champ accélérateur, il est donné par la relation:

$$E_{\text{acc}} = E_{\text{pic}} \left(\frac{\sin\left(\frac{kL}{2}\right)}{\left(\frac{kL}{2}\right)} \right)$$

L'impédance shunt est

$$\left(\frac{R}{Q}\right) = \frac{\left(\frac{\sin\left(\frac{kL}{2}\right)}{\left(\frac{kL}{2}\right)}\right)}{\pi \xi^2 J_1^2(\xi)} \omega \mu L$$

ξ valant approximativement 2.405 (premier zéro de la fonction de Bessel J_0).

On notera qu'en faisant varier la longueur de la cavité L, on peut modifier le rapport (R/Q). Afin d'obtenir des champs accélérateurs suffisants, il conviendra de se placer le plus près possible des maxima de la fonction ($\sin x / x$) avec ($x = kL/2$). C'est-à-dire, en pratique, des longueurs de cavité L valant quasiment des multiples impairs de ($\lambda/2$). La valeur particulière de $x = \pi/2$, correspondant à ($L = \lambda/2$) donnera le mode π , généralement utilisé pour associer plusieurs cellules dans une cavité. Il faut souligner que plus la longueur L sera choisie grande, plus le ratio α sera favorable (avec cependant corrélativement une perte correspondante en champ accélérateur) [Voir le tableau suivant]. Notons que dans tous les cas, la tension V reste quasiment inchangée pour un même champ de surface.

	$x = (k.L/2)$	$(\sin x / x)$	L	V	Eacc	(R/Q)	α
			(m)	(MV)	(MV/m)	(Ω)	
Mode "classique"	1.57	0.637	0.426	6.77	15.92	97.96	0.128
	4.45	-0.217	1.206	6.54	5.43	32.25	0.044
	7.75	0.128	2.100	6.74	3.21	19.64	0.026
	10.90	-0.091	2.953	6.74	2.28	13.99	0.018

Tableau I – (R/Q) et ratio α pour des cavités de type "pillbox". Les valeurs de champ ont été normalisées pour $E_{\text{pic}} = 25 \text{ MV/m}$.

On pourrait préconiser par exemple de travailler avec $L = 1.206$ m (cavité monocellule quasiment cylindrique). Le ratio α pourra alors être divisé par 3.36, comme l'impédance shunt. L'énergie fournie au faisceau sera réduite à quelques 8.8% de l'énergie stockée. De même, les champs de sillage, y compris sur les modes supérieurs seront réduits d'autant. Bien entendu, le dessin de la cavité devra être réalisé d'une manière mieux définie et plus optimisée qu'une simple "pillbox". La cavité sera par exemple une monocellule (plus facile à fabriquer et plus stable en fréquence), de longueur 1.2 m. On pourra même éventuellement ré-utiliser le même cryomodule que celui du LEP (seules les cavités seraient modifiées).

3. Conclusion

En conclusion, il me paraît tout à fait indiqué d'étudier d'une manière plus poussée une solution linéaire radiofréquence pour la radiographie éclair. Des études sur l'injecteur seront nécessaires pour démontrer l'obtention et l'accélération de paquets comprenant des charges très élevées (200 nC).

L'utilisation de cavités supraconductrices est également une excellente proposition. Le choix de la fréquence de 352.2 MHz ainsi que l'utilisation des cryostats du LEP me paraît également une très bonne option car fournissant un bon compromis entre les performances et les coûts de réalisation.

Mes recommandations seraient les suivantes :

- 1) Une étude approfondie de l'influence d'un paquet sur la cavité (et sur les paquets suivants). En particulier, des évaluations précises des champs de sillage et des modes supérieurs seront indispensables (et probablement dominants).
- 2) Une étude d'évaluation des possibilités de réduction du ratio α , c'est-à-dire de l'impédance shunt (R/Q) en modifiant la géométrie de la cavité. En particulier, des cavités de forme plus simples seraient peut-être plus à même de répondre au problème.

Par ailleurs, un rapprochement pourra éventuellement être envisagé avec les études de cavités supraconductrices proposées dans le cadre des collisionneurs à muons qui se heurtent à la même problématique.