

Etude sur la modification du RFQ d'IPHI pour le projet SPL

Romuald DUPERRIER

Laboratoire de Modélisation des Accélérateurs et Aimants
DSM/DAPNIA/SACM

16 avril 2002

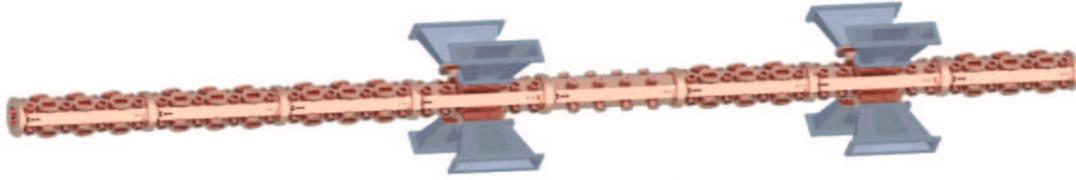


FIG. 1 – Vue 3D de la cavité RFQ du projet IPHI.

Introduction

Dans le cadre de la collaboration CERN/CEA pour le projet IPHI (Injecteur de Protons de Haute Intensité), il est étudié la possibilité de modifier le Quadripôle Radio Fréquence (RFQ) pour satisfaire les besoins du projet SPL (Super Proton Linac). Ces besoins se traduisent par la construction d'un démonstrateur basse énergie incluant une ligne de transport avec hacheur. La structure modulaire du RFQ d'IPHI permet l'insertion de cette ligne hacheur avec réaccélération du faisceau jusqu'à 5 MeV (RFQ1+ligne hacheur+RFQ2).

Le choix de l'énergie de cette ligne hacheur est fonction de plusieurs paramètres comme la rigidité du faisceau, la charge d'espace (de 25 à 100 mA), l'activation des structures, le design du bloc d'arrêt du faisceau dévié. Cette liste n'est, bien sur, pas exhaustive. L'énergie de sortie du RFQ d'IPHI est de 5 MeV. Cette énergie est trop haute pour un hacheur fonctionnant à des tensions inférieures à 1 kV, le faisceau, trop rigide, ne pouvant être dévié de manière efficace. Une énergie comprise dans l'intervalle de 1 à 3 MeV permet de s'affranchir de ce problème. Une énergie plus basse n'est pas permise compte tenu de l'emplacement des entrées radio fréquences dans ce RFQ (quatrième et septième tronçons). La figure 1 montre la segmentation du RFQ d'IPHI. La cavité est composée de 8 tronçons de 1 m formant 4 segments radio fréquences de 2 m. Les trois premiers tronçons n'étant pas alimentés, la première coupure possible est à quatre mètres, ce qui correspond à une énergie d'environ 1 MeV. Le gradient accélérateur moyen étant de 1 MV/m, il est également possible de considérer des coupures à 5 et 6 m soit à 2 et 3 MeV respectivement. Cette étude consiste en un inventaire non exhaustif des inconvénients et avantages de chacune de ces options après un bref rappel sur le RFQ du projet IPHI. Cet inventaire s'appuie sur des simulations de chaque option pour un courant de 25 mA, le cas 100 mA n'étant qu'un découpage du RFQ d'IPHI.

Paramètre	Valeur
Fréquence	352,21 MHz
Longueur totale	8.0086 m
Nombre de cellules	611
ouverture minimum a	3.56-4.129 mm
Modulation	1-1.7372
ouverture moyenne R_0	3.69-5.27 mm
tension sur les pôles	87.32-122.84 kV
champ crête	1.7 kilpatrick, 33 MV/m

TAB. 1 – Paramètres du design

Paramètre	Valeur
α_t en entrée	1,67
β_t en entrée	7,44 cm/rad
ε_t rms en entrée	0.25π .mm.mrad
courant en entrée	100 mA
α_x en sortie	-2,9
β_x en sortie	52,7 cm/rad
ε_x rms en sortie	0.26π .mm.mrad
α_y en sortie	2.4
β_y en sortie	41,4 cm/rad
ε_y rms en sortie	0.26π .mm.mrad
α_z en sortie	0,28
β_z en sortie	594 deg/MeV
ε_z rms en sortie	0.16 deg.MeV
courant en sortie	99,2 mA

TAB. 2 – Paramètres du faisceau en entrée et en sortie de RFQ (95 keV - 5 MeV).

Le RFQ d'IPHI

Dynamique du faisceau[1]

Le RFQ d'IPHI a été conçu dans le but premier de minimiser les pertes de particules pour un faisceau de protons de 100 mA. Cette approche vise à atteindre le meilleur rendement pour la structure afin de maximiser l'opérabilité en régime continu (minimum de claquage induit) et une maintenance simplifiée par une minimisation des pertes au delà de 2,16 MeV seuil d'activation du cuivre par des protons [2]. La minimisation des pertes dans le RFQ permet également de soulager la source SILHI. Le tableau 1 détaille plusieurs des paramètres du design.

Les paramètres du faisceau en entrée et en sortie de RFQ sont donnés dans le tableau 2. La figure 2 montre la distribution de protons dans l'espace des phases.

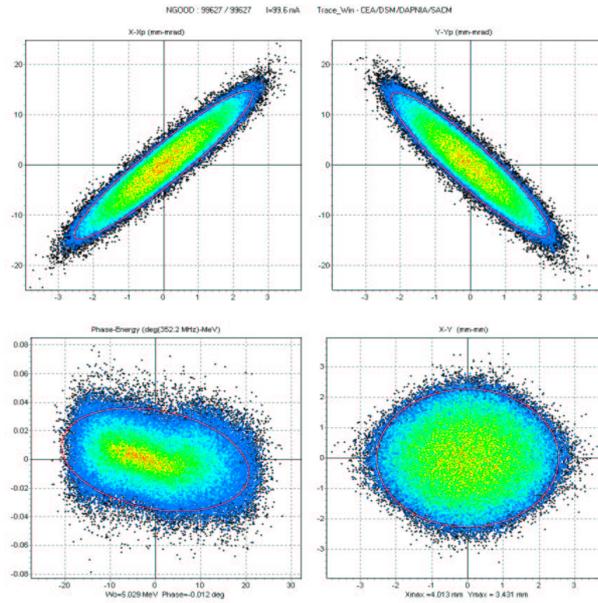


FIG. 2 – Distribution des protons dans l’espace des phases à 5 MeV.

	0 à 4 m	4 à 5 m	5 à 6 m	6 à 8 m	Total
cavité	389,3 kW	140,7 kW	152,8 kW	284.8 kW	967.6 kW
faisceau de 100 mA	90 kW	100 kW	100 kW	200 kW	490 kW

TAB. 3 – Consommation de puissance le long de la cavité.

La cavité radio fréquence[1]

La cavité RFQ est de type quatre lames (“vanes”). Sa longueur électrique est de 9.42λ , la longueur d’onde à 352.21 MHz valant 0.85m et la structure faisant 8.0086 m de long. Elle est divisée pour des raisons mécaniques en 8 tronçons de 1 m et pour des considérations hyperfréquences en 4 segments résonnants de 2 m. Cette segmentation minimise l’influence de perturbations radio fréquence sur la loi de tension. L’obtention de la loi de tension dans le RFQ dépend de la loi de fréquence locale de coupure [3]. Cette loi locale a été obtenue par des calculs SUPERFISH en faisant évoluer le fond de cavité le long du RFQ. Il en résulte une consommation en puissance radio fréquence décrite par le tableau 3. Ces valeurs sont calculées uniquement pour la cavité, c’est à dire qu’elle ne tiennent pas compte des pertes entre les klystrons et les iris du RFQ.

Paramètre	Valeur
α_x en sortie	1,5
β_x en sortie	10,8 cm/rad
ε_x rms en sortie	0.26π .mm.mrad
α_y en sortie	-1,95
β_y en sortie	13,3 cm/rad
ε_y rms en sortie	0.26π .mm.mrad
α_z en sortie	0,02
β_z en sortie	843 deg/MeV
ε_z rms en sortie	0.14 deg.MeV
courant en sortie	25 mA

TAB. 4 – Paramètres du faisceau en sortie de RFQ (1 MeV).

	RFQ1	RFQ2	Total
cavité	389,3 kW	578,3 kW	967.6 kW
faisceau de 25 mA	22,5 kW	100 kW	122,5 kW
faisceau de 100 mA	90,5 kW	400 kW	490,5 kW

TAB. 5 – Consommation de puissance pour les deux cavités.

L'option à 1 MeV

Dynamique du faisceau

Dans ce cas, le RFQ se termine abruptement au niveau d'un gap de couplage. C'est à dire que le dernier élément est une cellule RFQ incomplète et qu'aucune section d'aide à l'adaptation du faisceau à la ligne hacheur n'est présente. Un gap entre l'électrode et la plaque de fin de 5 mm a été rajouté pour éviter tout claquage (~ 20 MV/m). Les paramètres du faisceau de protons de 25 mA à 1 MeV sont rassemblés dans le tableau 4. La transmission est excellente, le courant n'étant plus que de 25 mA. La figure 3 représente la distribution des particules dans l'espace des phases.

Aspects radio fréquence

La distribution de la puissance pour cette configuration dans les deux cavités est donnée par le tableau 5. Il peut être noté que les puissances totales nécessaires pour des faisceaux de 25 mA et 100 mA sont de 411,8 kW et 479,3 kW respectivement pour la première cavité (sans intégrer les pertes entre source et cavité et dans les extrémités). Pour la deuxième cavité, les puissances totales nécessaires pour des faisceaux de 25 mA et 100 mA sont de 678,3 kW et 978,3 kW respectivement. Le cas à 100 mA est intéressant car il permet de tester l'injecteur sur une large gamme.

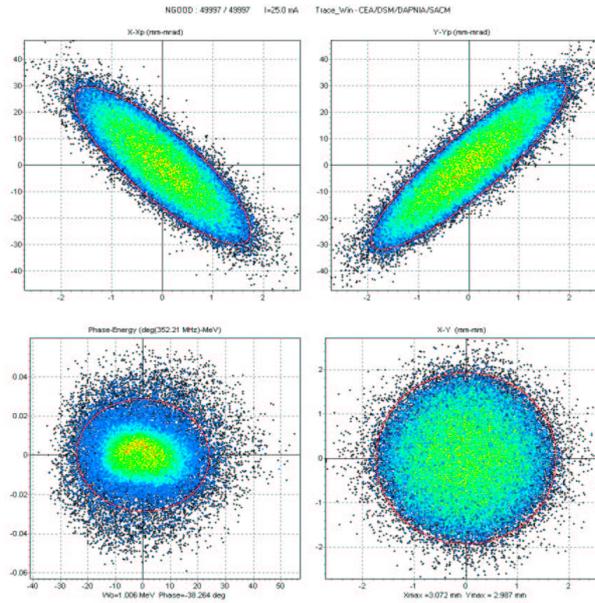


FIG. 3 – Distribution des protons dans l'espace des phases à 1 MeV.

Conclusion pour l'option à 1 MeV

La faisabilité de cette option est conditionnée par plusieurs paramètres dont la capacité des klystrons de 1,3 MW à fonctionner au maximum de leur possibilité si l'on suppose 30 % de pertes additionnelles ($978,3 \times 1,3 = 1271,8$ kW). Cette capacité est à évaluer en régime pulsé (14%, SPL) jusqu'au régime continu pour les besoins d'autres applications. Si le démonstrateur est restreint à un courant de 25 mA, cette difficulté est levée. Mais cette restriction ampute la gamme d'applications dont IPHI est le banc d'essai. Du point de vue de la dynamique du faisceau, ce cas est le plus favorable en ce qui concerne la rigidité. La vitesse est 33 % et 50 % plus faible par rapport à 2 et 3 MeV respectivement. Ceci relâche fortement les contraintes sur le hacheur (tension de déviation plus faible). Par contre, la conduite d'un faisceau de 1 MeV allant jusqu'à 100 mA dans la ligne de transport pourrait poser problème. Le niveau de compensation de charge d'espace dans cette ligne est une inconnue (influence du champ hacheur). Quelques calculs pourraient donner quelques éléments de réponse. Un dernier point à évaluer est l'impact sur le plan longitudinal de la scission de la cellule 1 MeV. Celle-ci est en partie à la fin de la première cavité et la partie restante au début de la deuxième. Le gain en énergie qu'apportait cette cellule sera très probablement à compenser à l'aide des groupeurs dans la ligne hacheur. Une simulation de bout en bout (RFQ1+ligne hacheur+RFQ2) permettrait de quantifier cet impact. Enfin, il peut être noté que cette option permet d'éviter l'activation de la première cavité RFQ et de la ligne hacheur.

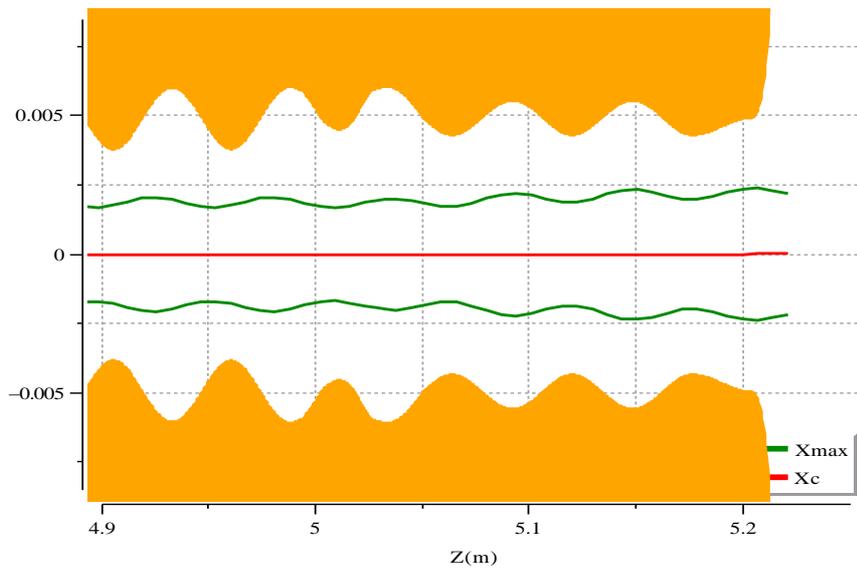


FIG. 4 – Géométrie des pôles à la transition.

L'option à 2 MeV

Dynamique du faisceau

Cette coupure ne correspond pas à un gap de couplage radio fréquence du RFQ d'IPHI. Il est donc nécessaire d'usiner un décochement d'au moins 10 cm pour permettre un gap magnétique avec la plaque d'extrémités. Ceci implique, au niveau de la zone utile, de rajouter plusieurs cellules. La continuité en énergie entre les deux structures impose que ces cellules rajoutées n'accélèrent pas. Une cellule de transition est donc nécessaire pour passer la phase synchrone de -35 degrés à -90 degrés tout en assurant la continuité de l'avance de phase par mètre. La figure 4 montre cette transition.

Un gap entre l'électrode et la plaque de fin de 5 mm a également été rajouté pour éviter tout claquage (~ 20 MV/m). Cette section de fin pourrait être optimisée en fonction des besoins de la ligne hacheur. Les paramètres du faisceau de protons de 25 mA à 2 MeV sont rassemblés dans le tableau 6. La figure 5 représente la distribution des particules dans l'espace des phases.

Aspects radio fréquence

La distribution en puissance pour cette configuration dans les deux cavités est donnée par le tableau 7. Il peut être noter que les puissances totales nécessaires pour des faisceaux de 25 mA et 100 mA sont de 577,5 kW et 720,5 kW respectivement pour la première cavité (sans intégrer les pertes entre source et cavité et dans les extrémités). Pour la deuxième cavité, les puissances totales nécessaires pour des faisceaux de 25

Paramètre	Valeur
α_X en sortie	1,7
β_X en sortie	25,1 cm/rad
ε_X rms en sortie	0.27π .mm.mrad
α_Y en sortie	-0,95
β_Y en sortie	15,5 cm/rad
ε_Y rms en sortie	0.27π .mm.mrad
α_Z en sortie	0,17
β_Z en sortie	457 deg/MeV
ε_Z rms en sortie	0.14 deg.MeV
courant en sortie	25 mA

TAB. 6 – Paramètres du faisceau en sortie de RFQ (2 MeV).

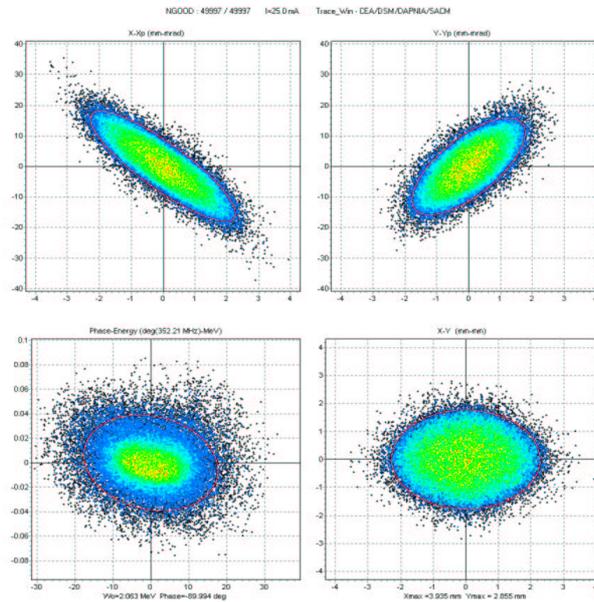


FIG. 5 – Distribution des protons dans l'espace des phases à 2 MeV.

	RFQ1	RFQ2	Total
cavité	530 kW	437,6 kW	967.6 kW
faisceau de 25 mA	47,5 kW	75 kW	122,5 kW
faisceau de 100 mA	190,5 kW	300 kW	490,5 kW

TAB. 7 – Consommation de puissance pour les deux cavités.

25 mA et 100 mA sont de 512,6 kW et 737,6 kW respectivement. Cette répartition de la puissance dans les deux cavités laisse des marges appréciables.

Conclusion pour l'option à 2 MeV

Cette option est celle qui présente les meilleurs compromis : la rigidité est relativement faible, l'énergie choisie permet d'éviter toute activation de RFQ1 et de la ligne hacheur, la puissance déposée sur le bloc d'arrêt faisceau semble gérable (de 50 kW à 200 kW), le réusinage de pôles permet de créer une section de fin de RFQ1 et d'entrée dans RFQ2 facilitant l'adaptation du faisceau à la ligne hacheur. Ce dernier point présente le principal inconvénient de cette option. Cet usinage d'extrémités implique un extra coût. Ce coût, compte tenu de la faible longueur de ces sections (10 à 20 cm) devrait cependant être acceptable.

L'option à 3 MeV

Dynamique du faisceau

Dans ce dernier cas, le RFQ se termine abruptement au niveau d'un gap de couplage. Ceci présente donc les mêmes inconvénients et avantages que pour l'option 1 MeV. C'est à dire que le dernier élément est une cellule RFQ incomplète et qu'aucune section d'aide à l'adaptation du faisceau à la ligne hacheur n'est présente. Le même gap entre l'électrode et la plaque de fin de 5 mm a été rajouté. Les paramètres du faisceau de protons de 25 mA à 3 MeV sont rassemblés dans le tableau 8. La figure 6 représente la distribution des particules dans l'espace des phases.

Aspects radio fréquence

La distribution en puissance pour cette configuration dans les deux cavités est donnée par le tableau 9. Il peut être noté que les puissances totales nécessaires pour des faisceaux de 25 mA et 100 mA sont de 755,3 kW et 973,3 kW respectivement pour la première cavité (sans intégrer les pertes entre source et cavité et dans les extrémités). Pour la deuxième cavité, les puissances totales nécessaires pour des faisceaux de 25 mA et 100 mA sont de 334,8 kW et 484,8 kW respectivement. Cette répartition de

Paramètre	Valeur
α_x en sortie	1,7
β_x en sortie	25,2 cm/rad
ε_x rms en sortie	0.26π .mm.mrad
α_y en sortie	-1,89
β_y en sortie	25,6 cm/rad
ε_y rms en sortie	0.26π .mm.mrad
α_z en sortie	-0,04
β_z en sortie	370 deg/MeV
ε_z rms en sortie	0.14 deg.MeV
courant en sortie	25 mA

TAB. 8 – Paramètres du faisceau en sortie de RFQ (3 MeV).

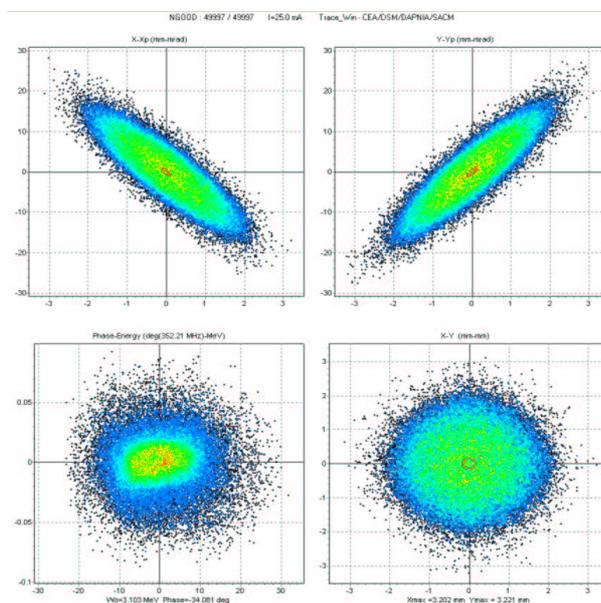


FIG. 6 – Distribution des protons dans l'espace des phases à 3 MeV.

	RFQ1	RFQ2	Total
cavité	682,8 kW	284,8 kW	967.6 kW
faisceau de 25 mA	72,5 kW	50 kW	122,5 kW
faisceau de 100 mA	290,5 kW	200 kW	490,5 kW

TAB. 9 – Consommation de puissance pour les deux cavités.

la puissance dans les deux cavités sollicite grandement le klystron alimentant la première cavité. C'est la situation "symétrique" au cas 1 MeV qui sollicite fortement le deuxième klystron.

Conclusion pour l'option à 3 MeV

Tout comme l'option à 1 MeV, la faisabilité de cette option est conditionnée par la capacité des klystrons de 1,3 MW à fonctionner au maximum de leur possibilité si l'on suppose 30 % de pertes additionnelles ($973,3 \times 1,3 = 1252,9$ kW). Encore une fois, restreindre IPHI à un courant de 25 mA ampute sa gamme d'applications dont il est le banc d'essai. Du point de vue de la dynamique du faisceau, ce cas est le moins favorable en ce qui concerne la rigidité. Ceci implique des contraintes sur le hacheur (tension de déviation la plus élevée). De manière identique à l'option 1 MeV, la cellule localisée à la coupure est fortement amputée. Ceci pourrait être très probablement compensé à l'aide des groupeurs dans la ligne hacheur. Enfin, il peut être noté que cette option ne permet pas d'éviter l'activation de la première cavité RFQ et de la ligne hacheur.

Conclusion

Cette étude montre que le cas 2 MeV est le plus favorable en ce qui concerne la distribution de puissance. Aucun klystron n'est sollicité au maximum de ces possibilités si l'on souhaite faire fonctionner l'injecteur au maximum de ces possibilités. Pour la rigidité et la puissance déposée sur le bloc d'arrêt, ce cas est évidemment intermédiaire entre les cas 1 et 3 MeV. Cette option permet également d'éviter l'activation de RFQ1 et de la ligne hacheur. La maintenance et la disponibilité de l'injecteur sont alors grandement facilités, dans une première phase, où seuls ces deux éléments seraient présents (pas de RFQ2). Dans une deuxième phase, l'installation de RFQ2 permettrait la validation de la ligne hacheur en réaccélérant le faisceau jusqu'à 5 MeV. Il serait alors possible de réutiliser la ligne diagnostics d'IPHI conçu par l'IPN d'Orsay. Le principal inconvénient de cette option est le coût supplémentaire qu'elle génère par le réusinage d'extrémités aux deux cavités. Ce réusinage permet cependant de créer une section de fin qui facilitera l'adaptation du faisceau à la ligne hacheur. Des simulations de bout en bout (RFQ1+ligne hacheur+RFQ2) pour des courants allant de 25 à 100 mA complèteraient avantageusement cette étude. Des fichiers de distributions de macro

particles au format dst (LANL codes) sont disponibles.

Bibliographie

- [1] R. Ferdinand et al., “Le RFQ du projet IPHI”, rapport interne DSM/DAPNIA/SEA/IPHI 99/62
- [2] rapport interne DCEA-S/UGSP/SPR/SRI-T/98-1294
- [3] P. Balleyguier, “Obtention de la loi de tension dans le RFQ d’IPHI”, rapport interne n 54/99