

Etude de la possibilité d'accélérer des protons dans le linac de SPIRAL2

D. Uriot

CEA/DSM/DAPNIA/SACM/LEDA Saclay

Le 5 Avril 2006

1. Introduction	3
2. La source	3
3. Le RFQ.....	5
4. Le linac supraconducteur.	7
5. Déviations et correcteurs.....	9
6. Conclusion.....	10

Figure 1: Faisceau de protons extrait.	4
Figure 2: Faisceau de deutons extrait.	4
Figure 1: Evolution de l'enveloppe transverse à travers la LEBT et le RFQ.....	5
Figure 2: Transport multi particulaire à travers la LEBT et le RFQ.....	6
Figure 3: Différents espaces de phase à la sortie du RFQ.....	6
Figure 4: Gain en énergie par mètre pour chaque période du linac (33 MeV).....	7
Figure 5: Evolution des l'enveloppes à travers la MEBT et le linac supraconducteur.	8
Figure 6: Transport multi particulaire à travers la MEBT et le linac supraconducteur.....	8
Figure 7: Différents espaces de phase à la sortie du linac.....	9
Figure 8: Déviation induite par les cavités pour le linac deuton.	10
Figure 9: Déviation induite par les cavités pour le linac proton.	10
Figure 10: Déviation après correction pour le linac deuton.	10
Figure 11: Déviation après correction pour le linac proton.	10

1. Introduction

Le but de cette étude est de vérifier la faisabilité d'accélérer des protons dans le linac de Spiral2. Pour rappel, l'accélérateur de Spiral2 [1] a été défini et optimisé pour des ions de $Q/A=1/3$. La possibilité d'accélérer aussi des Q/A allant de $1/2$ à $1/6$ a également été prise en compte. L'énergie d'entrée est de 20 A.keV, tandis que l'énergie de sortie est fixée à 14.5 A.MeV pour les ions $Q/A=1/3$ et 20 A.MeV pour les deutons [2]. Cette énergie est atteinte sans l'utilisation des 4 dernières cavités de réserve ($\beta=0.12$).

Plusieurs interrogations demeurent concernant la possibilité de transporter des protons:

- Quelles sont les caractéristiques du faisceau de protons si on utilise la source deuton ?
- Le RFQ peut-t-il accélérer des protons dans des conditions acceptables en terme de pertes et de grossissements d'émittances ?
- Les β de transition du linac supraconducteur sont-ils compatibles avec les protons ?
- Peut-on atteindre 40 MeV en sortie du linac ?
- Et enfin, les déviations induites par les cavités quart d'onde ne seront t-elles pas trop importantes pour la dynamique et seront-t-elles corrigées avec les correcteurs magnétiques tels qu'ils ont été définis pour les deuton ?

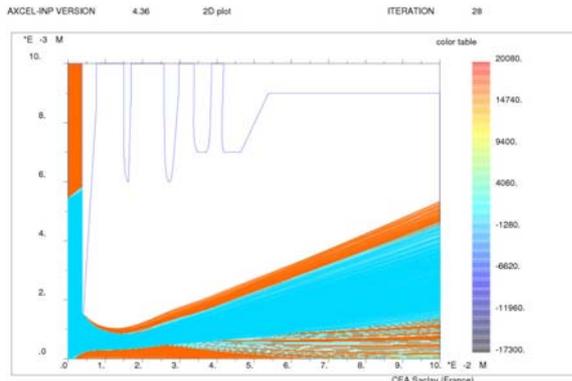
L'étude de ces questions nous a permis de vérifier la possibilité d'accélérer des protons dans Spiral2.

2. La source.

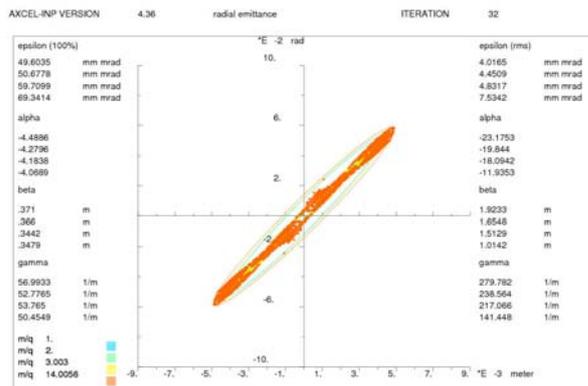
La manière la plus simple de produire un faisceau de protons est d'utiliser la source de deutons en modifiant le gaz injecté. Mais plusieurs difficultés existent. Premièrement, l'énergie d'entrée du RFQ étant fixée à 20 A.keV, accélérer les protons impose de baisser la tension d'extraction de la source deuton de 40 kV à 20 kV. Ce qui signifie qu'il faudra gérer avec le système d'extraction de la source deuton le transport des protons dans des conditions acceptables pour la dynamique de faisceau. Le système d'extraction de la source actuellement construite à Saclay est une extraction à 5 électrodes. Ce qui permet un réglage plus flexible. Des simulations du system d'extraction réalisé par Denis De Menezes (*) avec le code AXEL [3] a permis de vérifier qu'il était possible avec un tel system d'extraction d'obtenir un faisceau de protons très similaire en terme d'emittance de taille et de divergence à celui de deutons simplement en ajustant les tensions des électrodes d'extraction. L'idéal sera de valider ces simulations par un test réel de la source en mode proton. Compte tenu du fait que les études qui suivent sont basées sur des grandeurs mesurées de la source de deutons, les hypothèses suivantes ont donc été considérées:

- Courant de proton identique à celui des deutons, soit 6.5 mA (ce qui implique une force de charge d'espace produisant un effet 2 fois plus importante que celle produite pour des deutons de même intensité).
- Energie de sortie fixée à 20 keV.
- Les paramètres du faisceau protons sont supposés identiques à ceux du faisceau de deutons (tailles, divergences et émittances).

(*) demeneze@dapnia.cea.fr



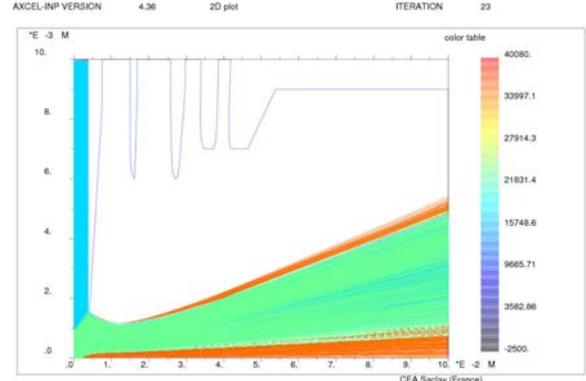
COMMENT: ECR SILHI PHI 3mm - Deutons DATE: 03/03/06 TIME: 09:43:39



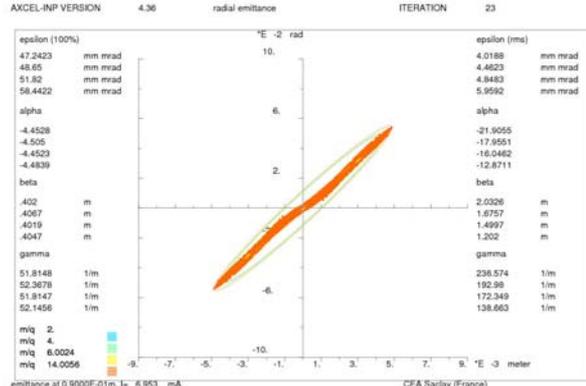
emittance at 0.9000E-01m, I_a 7.043 mA DATE: 04/05/06 TIME: 11:22:01

$$\begin{aligned} \epsilon_{rr'}_{rms} &= 4.01 \mu\text{m.mrad} \\ \beta &= 1.92 \\ \alpha &= -23.1 \end{aligned}$$

Figure 1: Faisceau de protons extrait.



COMMENT: ECR SILHI PHI 3mm - Deutons DATE: 02/28/06 TIME: 12:56:44



emittance at 0.9000E-01m, I_a 6.953 mA DATE: 02/28/06 TIME: 12:56:25

$$\begin{aligned} \epsilon_{rr'}_{rms} &= 4.01 \mu\text{m.mrad} \\ \beta &= 2.03 \\ \alpha &= -21.9 \end{aligned}$$

Figure 2: Faisceau de deutons extrait.

Deux autres alternatives existent. La première est l'utilisation d'une source dédiée aux protons qui utiliserait l'emplacement libre prévu et réservé pour une éventuelle installation future d'une troisième source dans la ligne LEBT. La seconde est l'utilisation de la source ions Q/A=1/3 pour produire le faisceau de proton. Cette seconde option produirait un faisceau nettement dégradé comparé à celui produit par une source dédiée aux ions légers.

3. Le RFQ.

Le RFQ a été optimisé à la fois pour le transport des ions $Q/A=1/3$ et des deutons. Ce qui a conduit à choisir une tension moyenne sur les vannes de 100 kV pour les ions et de 70 kV pour les deutons. Hors charge d'espace, la tension nécessaire pour conduire les protons est de 33 kV. C'est la tension permettant d'obtenir une focalisation longitudinale et transverse équivalentes à celles produites par une tension de 100 kV sur des ions $Q/A=1/3$. Mais compte tenu des effets de charge d'espace il est nécessaire de l'augmenter de manière à compenser ces effets. La tension optimale devient un compromis entre les qualités de transport dans le plan longitudinal et les plans transverses. Cette tension est donc fixée après ajustement à 43 kV. La simulation du RFQ est réalisée à partir un faisceau uniforme issu de la source transporté à travers la LEBT tel que cette ligne avait été définie dans l'APD de Spiral2. Les codes utilisés pour simuler la LEBT et le RFQ sont respectivement TraceWin et Toutatis [4]. TraceWin est utilisé pour les simulations de tout le reste du linac. La Figure 3 montre l'évolution de l'enveloppe transverse à $\sqrt{6}\sigma$ à travers la LEBT et le RFQ. Le Figure 4 présente le même transport mais cette fois issus d'un calcul multi particulaire de 50.000 macro particules (tailles dans les plans X et phase). On peut observer les particules décrochées de l'acceptante longitudinale du RFQ après l'élément 250. Elles seront perdues dans la MEBT qui suit directement le RFQ et représentent 0.1 % de l'ensemble des macro particules injectées dans le RFQ. Durant le transport aucune macro particule n'est perdue sur les parois du RFQ. La Figure 5 représente les principaux espaces de phase à la sortie du RFQ. L'accélération des protons dans le RFQ se déroule dans des conditions parfaitement acceptables, sans aucune perte directe. Les grossissements d'émittances transverses sont de 14 % tandis que l'emittance longitudinale rms normalisée de sortie est de 0.27 $\mu\text{m.mrad}$.

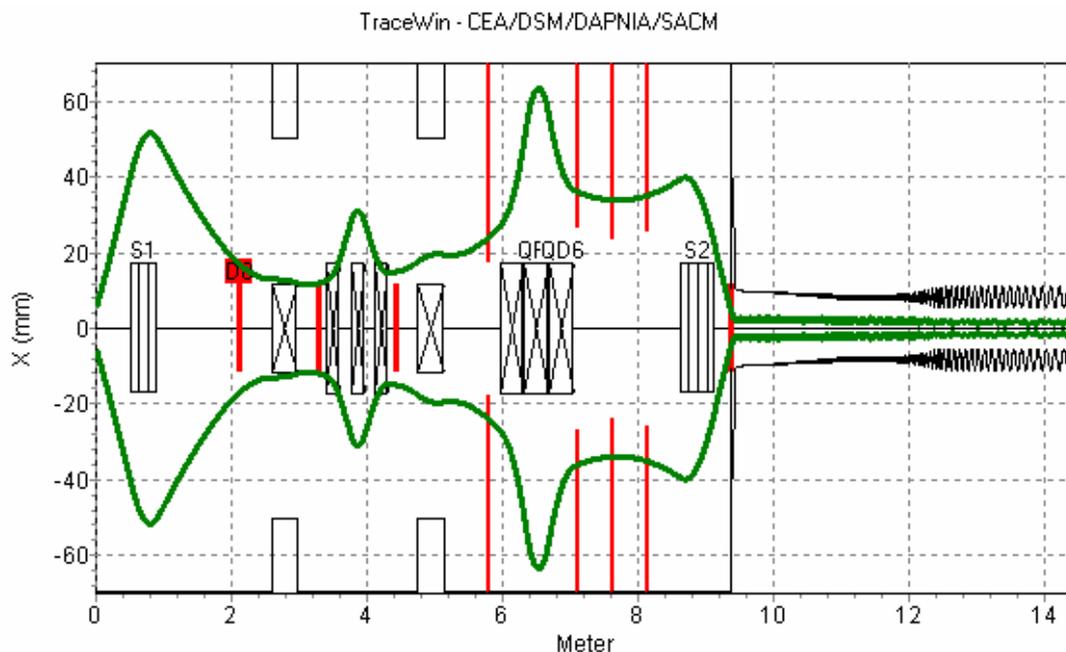


Figure 3: Evolution de l'enveloppe transverse à travers la LEBT et le RFQ.

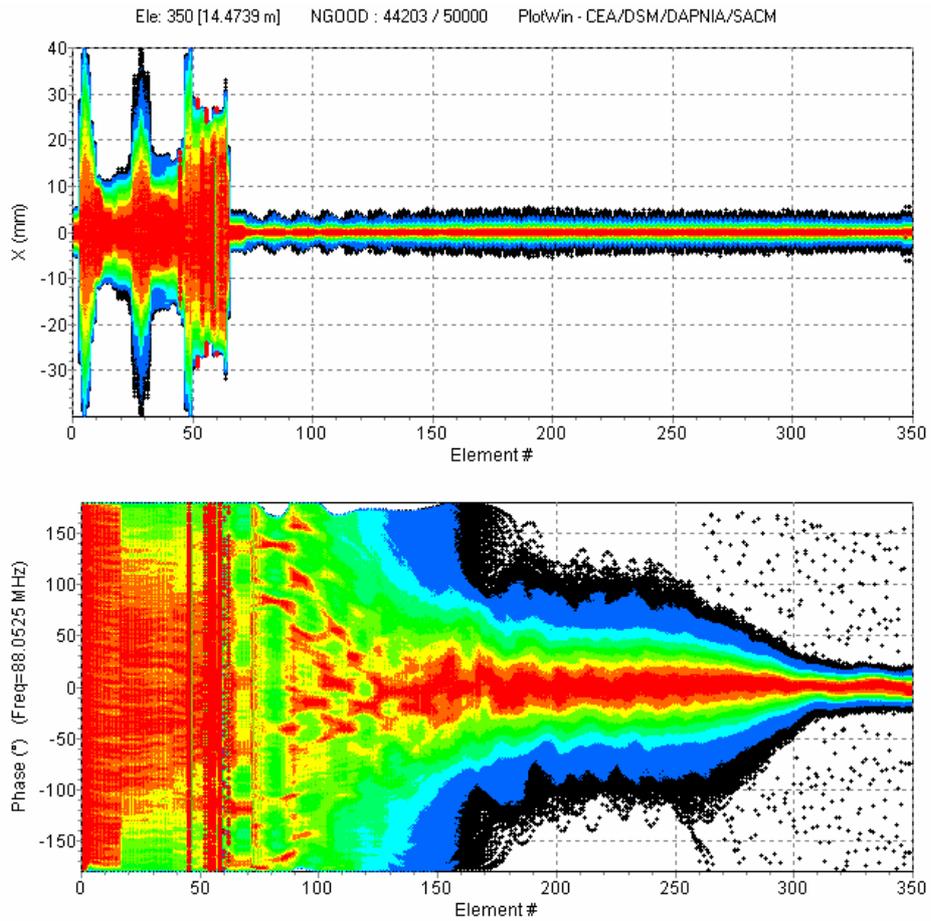


Figure 4: Transport multi particulaire à travers la LEBT et le RFQ.

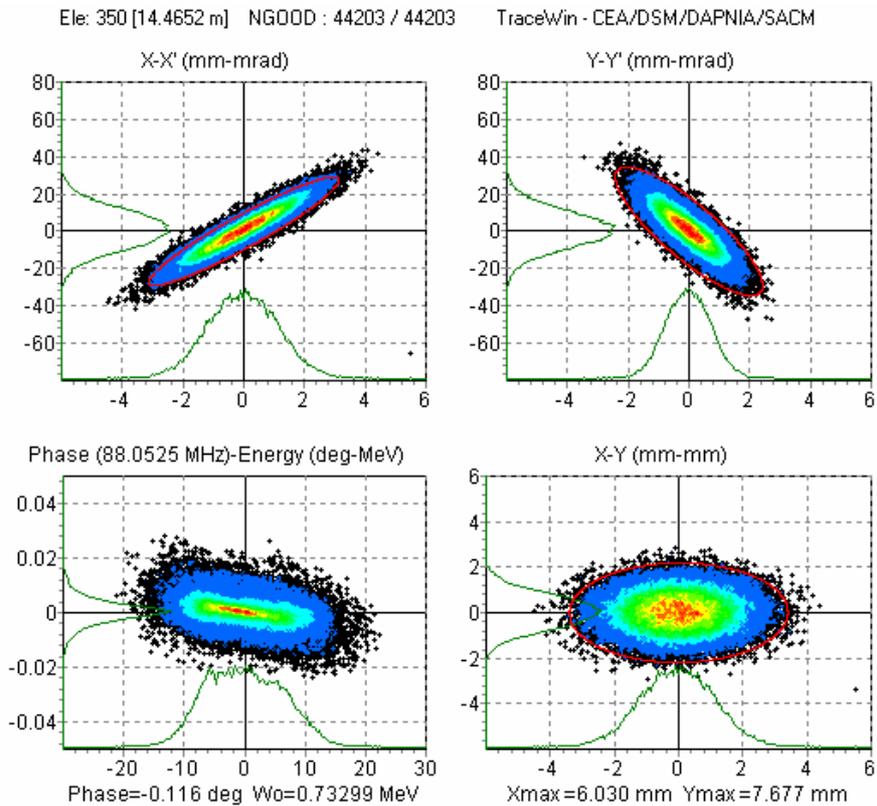


Figure 5: Différents espaces de phase à la sortie du RFQ.

4. Le linac supraconducteur.

Accélérer des protons implique de réajuster le champ accélérateur de l'ensemble des cavités constituant le linac de manière à obtenir la meilleure efficacité possible tout en conservant les marges définies pour la conduite dans de bonnes conditions des deutons (phase synchrones et avance de phase longitudinale). Cette optimisation est réalisée à l'aide du code GenLinWin et détermine donc la loi de champ accélérateur ainsi que l'énergie de sortie de la machine dans ces conditions. L'énergie de sortie atteinte est 33 MeV. Il existe 2 solutions pour obtenir l'énergie total de 40 MeV atteinte en deuton. Soit on augmente le champ accélérateur maximum fixé actuellement à 6.5 MV/m à 8.5 MV/m, soit on utilise 2 des 4 cavités prévues en réserve à la fin du linac. La Figure 6 montre l'évolution de l'efficacité en accélération du linac ou « Real state gradient » et on remarque que les premières cavités sont très peu efficaces. En fait la première cavité n'est utilisée qu'à 12 % de ces possibilités alors que seulement 2 des 12 cavités de la première famille peuvent être réglées avec le champ accélérateur maximum. Malgré cette faible efficacité la première famille de cavité permet au faisceau d'atteindre l'énergie minimum acceptable dans la seconde famille en dessous de laquelle il n'est plus possible d'être accéléré par des cavités à $\beta=0.12$.

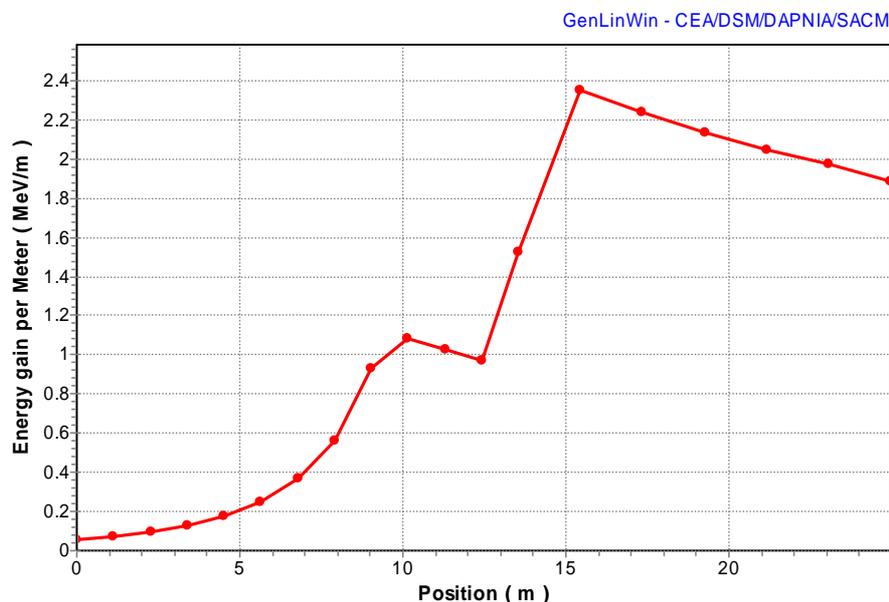


Figure 6: Gain en énergie par mètre pour chaque période du linac (33 MeV).

Le faisceau extrait du RFQ a donc été transporté dans la MEBT permettant d'adapter le faisceau à l'entrée du linac puis dans celui-ci afin de qualifier son transport. La Figure 7 montre l'évolution des enveloppes transverse (x) et longitudinale (phase) à 4σ à travers la MEBT et le linac. La Figure 8 présente le même transport mais cette fois issu d'une simulation multi-particulaire de 50.000 macro-particules. La Figure 9 représente les principaux espaces de phase à la sortie du linac. On remarque 0.4 Watt de perte faisceau situé dans un des quadripôles de la première famille (voir cercle rouge). Les pertes sont pour la plupart évitées en utilisant 2 scrapers dans la MEBT pour réduire le halo du faisceau. Les grossissements d'émittances sont respectivement de 70 % dans les plans transverses et 44 % dans le plan longitudinale. Les émittances rms normalisées de sortie sont 0.26 $\mu\text{m.mrad}$ (plan transverse) et 0.39 $\mu\text{m.mrad}$ (plan longitudinale). Malgré l'effet de la charge d'espace important comparé au cas deuton, le transport des protons conduit à des pertes de faisceau du même ordre de grandeur que celles observées pour les deutons.

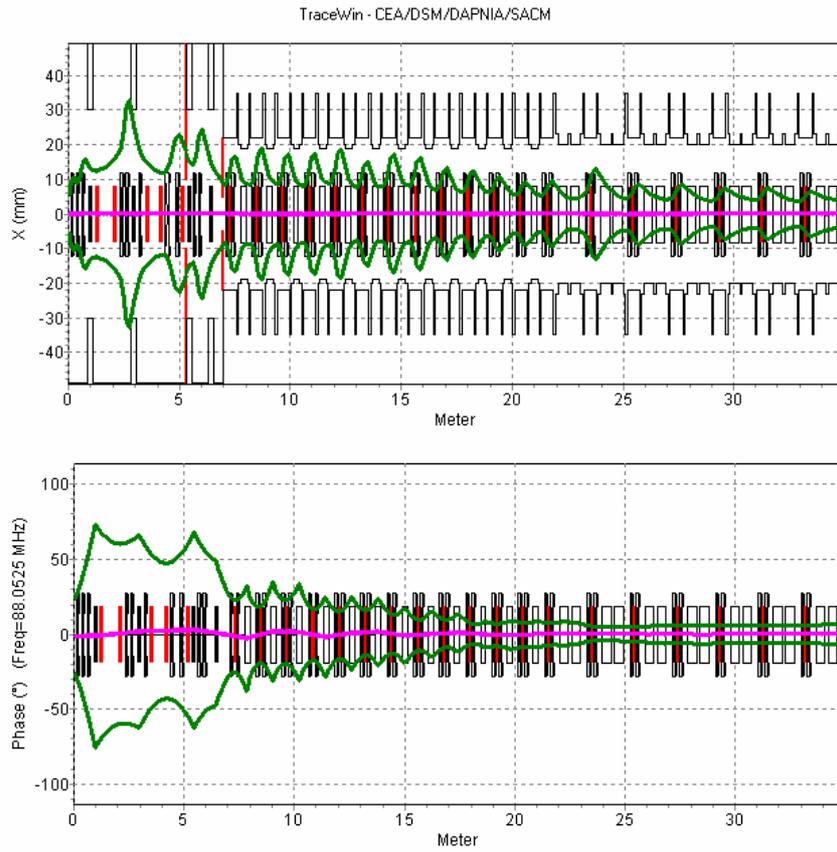


Figure 7: Evolution des l'enveloppes à travers la MEBT et le linac supraconducteur.

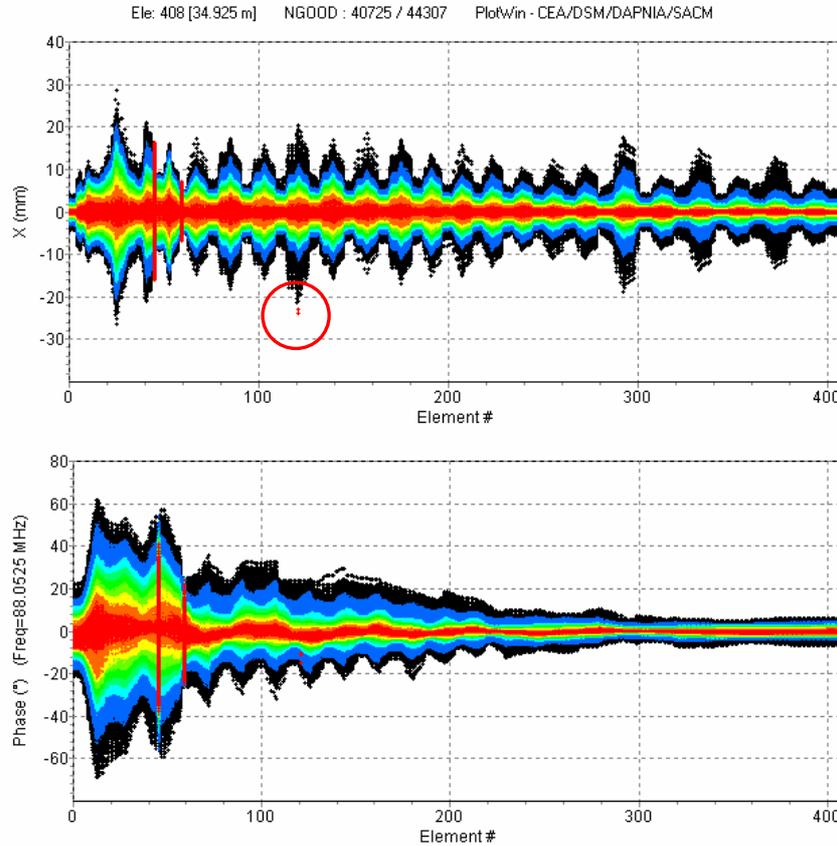


Figure 8: Transport multi particulaire à travers la MEBT et le linac supraconducteur.

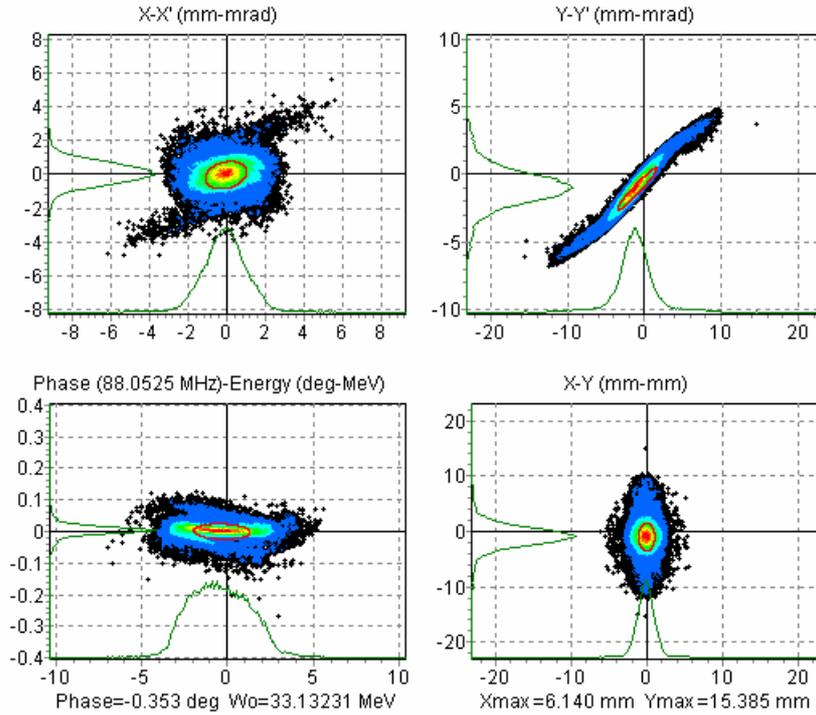


Figure 9: Différents espaces de phase à la sortie du linac.

5. Déviations et correcteurs.

Le transport des protons dans le linac de Spiral 2 est affecté par le comportement des cavités qui induisent une déviation magnétique, $\Delta p_y/p$ dans le plan Y. De précédentes études [5] ont montré qu'elle dépend de la tension sur le stem V , du rapport q/m de la particule ainsi que de sa vitesse relative β , comme définie en eq.(1).

$$\frac{\Delta p_y}{p} \propto \frac{qV}{m\beta} \quad (1)$$

Compte tenu de la relation précédente il apparaît que cette déviation doit être plus importante pour les protons. C'est ce que l'on observe sur la Figure 10 et la Figure 11 montrant les déviations induites sur le faisceau de deutons et de protons par les cavités en l'absence de correction magnétique extérieure. Le facteur 2 des masses est en partie compensé par des tensions plus faibles. La Figure 12 et la Figure 13 montrent ces mêmes déviations après correction par les correcteurs magnétiques intégrés aux quadripôles. Ces correcteurs induisant une correction définie tel qu'en eq.(2) où B représente le champ magnétique. Cette fois pour un même champ magnétique, l'effet des correcteurs est 2 fois plus efficace pour les protons. Ce qui permet de contrebalancer les déviations dues aux cavités sans augmenter la puissance des steerers.

$$\frac{\Delta p_y}{p} \propto \frac{qB}{m\beta} \quad (2)$$

On obtient donc pour le linac proton une déviation après correction 40 % plus importante qu'avec les deutons mais toutefois inférieure au millimètre et parfaitement acceptable compte

tenu de l'ouverture des cavités. De plus, les champs magnétiques des steerers nécessaires pour corriger la trajectoire des protons sont 10 à 20 % plus faibles que ceux nécessaires pour les deutons.

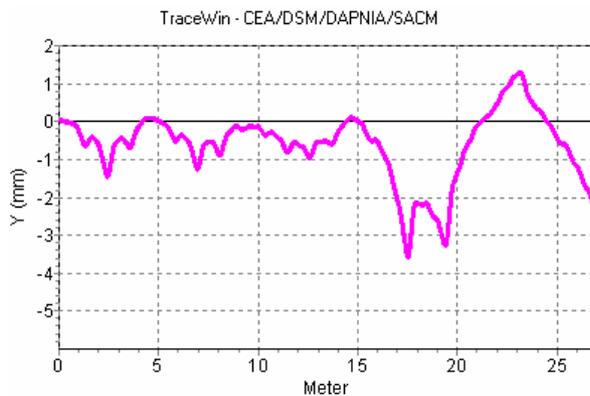


Figure 10: Déviation induite par les cavités pour le linac deuton.

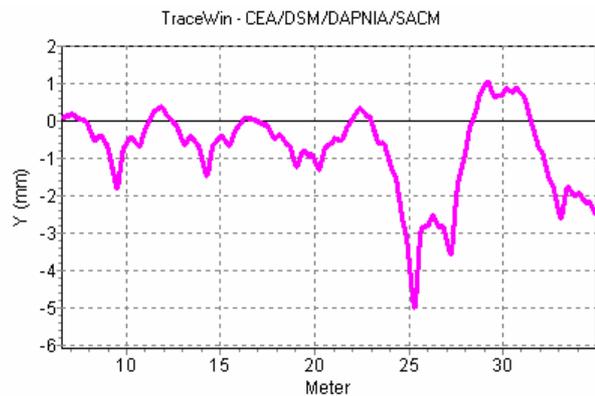


Figure 11: Déviation induite par les cavités pour le linac proton.

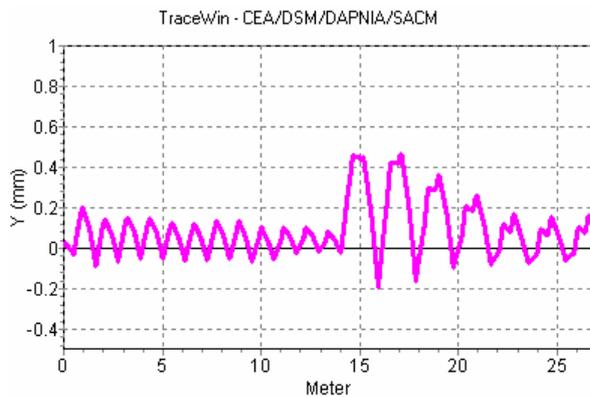


Figure 12: Déviation après correction pour le linac deuton.

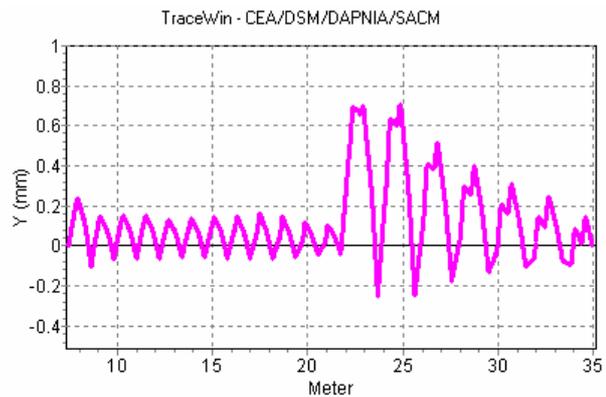


Figure 13: Déviation après correction pour le linac proton.

6. Conclusion.

L'ensemble de cette étude montre la possibilité d'accélérer des protons dans le linac de Spiral2. Les grossissements d'emittances sont certes plus importants mais gérables surtout si on tient compte du fait que l'effet de la charge d'espace est 2 fois plus important. Les pertes faisceau sont légèrement plus importantes mais là également on peut soulager la machine en réduisant le courant faisceau. De plus, on sait que du point de vue de la radioprotection, la gestion des pertes de protons est moins problématique que celles de deutons. De plus, On remarque que l'on peut atteindre les 40 MeV simplement en utilisant 2 des 4 cavités de réserve.

Références :

[1]: A. Mosnier, "SPIRAL 2: a high intensity deuteron and ion accelerator for exotic beam production", PAC 2003, Portland, 2003.

[2]: Beam dynamic development for the SPIRAL2 project Final report, P. Bertrand, J.L. Biarotte, J.M. De Conto, R. Duperrier, E. Froidefond, N. Pichoff, D. Uriot, F. Varenne,

[3]: INP Junkerstr.99, 65206 Wiesbaden, Germany, Ver: 4.36

[4]: R. Duperrier, N. Pichoff and D. Uriot, CEA Saclay codes review for high intensity linac, ICCS conference, Amsterdam, 2002.

[5] : LIONS_Linac : new particle in cell code for linacs P. Bertrand, PAC2003.