

Adaptation d'un système d'uniformisation de faisceau dans la ligne G4 de GANIL

M. Bajard*, Y. Gasteuil†, F. Lemuet‡, F. Méot‡, L. Ponce*§

31 octobre 2003

Résumé

Ce papier rend compte d'essais de faisceau préliminaires réalisés à GANIL en vue de la mise en œuvre d'une technique d'uniformisation de faisceau destinée à l'hadronthérapie (irradiation passive ou active) et autres applications industrielles. On décrit en particulier le design et l'essai de différentes optiques dans la ligne G4 de GANIL avec pour objectif ultérieur l'uniformisation 1D dans le plan horizontal.

Compte-rendu de mission à GANIL, 29-31 mai 2003

*CNRS IN2P3/IPN Lyon

†ENS Lyon

‡CEA DAPNIA/SACM

§Auteur correspondant

Table des matières

Introduction	3
1 Description ligne G4	3
2 Optique d'uniformisation 1D en X	3
2.1 Pour la hadronthérapie (optique 1) :	3
2.2 Pour les irradiations industrielles (optique 2) :	4
3 Tests avec faisceau	6
3.1 Optique 1	7
3.2 Optique 2	7
4 Conclusion	7
Références	8

Introduction

On montre la faisabilité d'une expérience d'expansion-uniformisation 1D du faisceau (technique dite de "balayage rectangulaire uniformisé" - BRU) dans la ligne G4 de Ganil en impliquant dans la mise en forme du faisceau les lentilles qui se trouvent en amont de G4, dans l'arête de poisson.

1 Description ligne G4

L'implantation de l'uniformiseur est contrainte par les paramètres géométriques et magnétiques qui suivent, propres à la ligne de desserte de G4 [1].

Caractéristiques des quadrupôles (nomenclature donnée en Fig. 1) :

- longueur magnétique 0.3015 m,
- ARQ51, ARQ53, G4Q21, G4Q22, G4Q23 : $\phi 70$ série 1, gradient maximal 13.5 T/m, soit $K_{max} = 4.6 \text{ m}^{-2}$ à $B\rho_{max} = 2.88 \text{ T.m}$,
- ARQ52, G4Q11, G4Q12, G4Q13, G4Q24 : $\phi 70$ série 2, gradient maximal 20.3 T/m, soit $K_{max} = 7$ à $B\rho_{max} = 2.88 \text{ T.m}$.

Caractéristiques faisceau :

- enveloppes limitées à $\sigma_{x,z} < 14 \text{ mm}$,
- $\epsilon_{x,z}/\pi \leq 5 \cdot 10^{-6} \text{ m.rad}$,
- $\Delta W/W = 5 \cdot 10^{-3}$,
- à l'entrée de G4Q21 : $\beta_x = 3.00933$, $\alpha_x = -1.435$, $\beta_z = 44.3186$, $\alpha_z = -6.129$.

Distances :

- longueur de ligne, de l'entrée de la salle à la sortie de G4Q24 : 3.89 m,
- de la sortie de G4Q24 à l'extrémité aval : 13.34 m.

2 Optique d'uniformisation 1D en X

2.1 Pour la hadronthérapie (optique 1) :

Le principe de l'assemblage optique BRU est le suivant :

- en ce qui concerne l'extrémité aval de la ligne (en particulier, dimension d'image à la cible conforme aux critères d'uniformisation tels que proposés pour le projet ETOILE [2]) :
 - on forme au droit de la cible un faisceau de divergence nulle et de dimensions transverses *rms* quelques millimètres nominalement, jusqu'à quelques dizaines de millimètres dans l'utilisation de l'optique en uniformiseur. On prévoit pour cela 4 quadrupôles (variables), pour 4 contraintes $\alpha_{x,z}, \beta_{x,z}$
 - l'octupôle sera placé en amont de G4Q21 (cote $s \approx 12.5 \text{ m}$ sur la Fig. 1)
- uniformisation du faisceau :
 - il faut un octupôle par direction transverse, les deux sont découplées
 - l'octupôle d'uniformisation en X (respt en Z) est placé en un waist Z à grand β_x (respt, waist X et grand β_z)
- en ce qui concerne l'extrémité amont de la ligne (d'après critères G4, cf. plus haut) : son rôle est d'adapter à l'uniformiseur le faisceau présent à l'entrée de G4. On prévoit pour cela 6 quadrupôles, les quadrupôles ARQ51-53 et G4Q11-13.

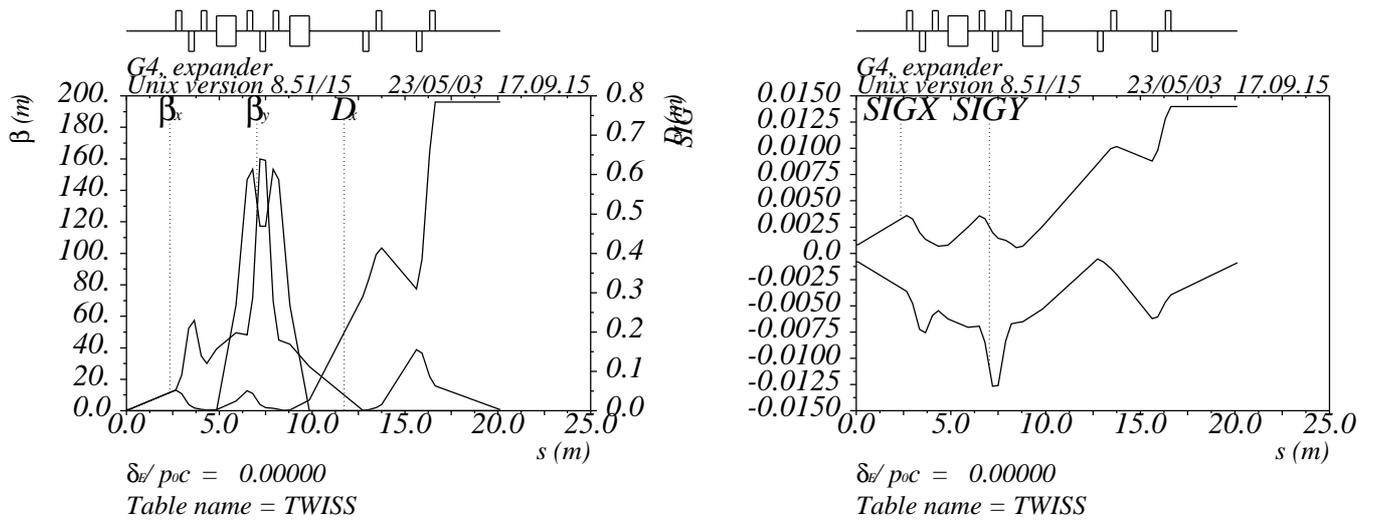


FIG. 1 – Ligne G4 de GANIL. La nomenclature des lentilles est la suivante, d’amont en aval : deux triplets, ARQ51/52/53 et G4Q11/12/13, suivis d’un quadruplet final dans la salle, G4Q21/22/23/24. Fig. de gauche : Fonctions optiques fournissant $\beta_{x,cible} = 200$ et $\beta_{z,cible} < 1$ m. Fig. de droite : Enveloppes correspondantes pour $\epsilon_x/\pi = \epsilon_z/\pi = 1 \cdot 10^{-6}$ m.rad, dans le cas du réglage optique en expandeur 1D horizontal.

La Fig. 1 montre une optique de principe et les enveloppes ainsi obtenues. On a choisi de travailler à émittance horizontale ϵ_x suffisamment petite pour que l’enveloppe faisceau reste dans l’ouverture des quadrupôles, ce paramètre ϵ_x étant ajustable à loisir en salle de contrôle.

La Table 1 donne un échantillon des forces nécessaires dans les 10 lentilles pour obtenir le waist en X au droit de l’octupôle et la taille de faisceau souhaitée à la cible.

Les 6 lentilles amont ARQ51-ARQ13 ne sont pas changées au cours d’un éventuel scan en β_x , et leurs forces ne dépassent pas 3.7 m^{-1} ce qui est dans les spécifications.

2.2 Pour les irradiations industrielles (optique 2) :

Le principe de l’assemblage optique est le suivant :

- extrémité aval de la ligne :
 - on forme au droit de la cible un faisceau de dimension horizontale 40 cm et de dimension verticale 40 mm. On prévoit pour cela 4 quadrupôles, pour 4 contraintes $\alpha_{x,z}, \beta_{x,z}$
 - L’octupôle sera placé en amont de G4Q21.

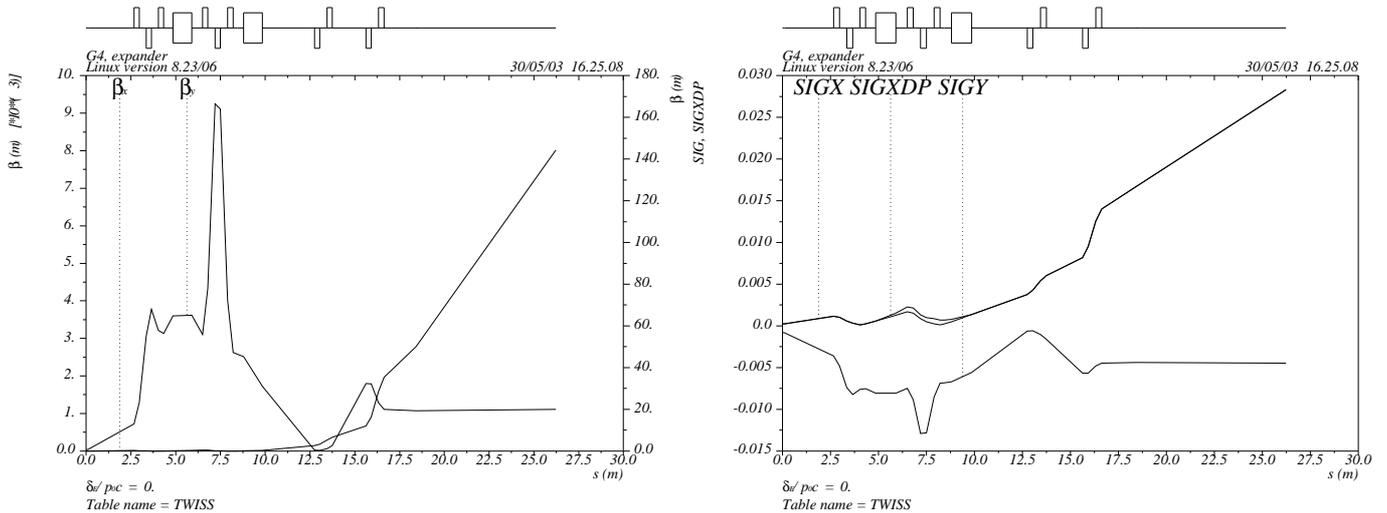
Pour obtenir un faisceau de 40 cm en horizontal avec l’émittance maximale de $5\pi \cdot 10^{-6}$ m.rad, il faut $\beta_{x,cible} = 8000$ m. La Table 1 donne un échantillon des forces nécessaires dans les 10 lentilles pour obtenir le waist en X au droit de l’octupôle et la taille de faisceau souhaitée à la cible. La Fig. 2 montre les fonctions optiques et enveloppes.

La Fig. 3 montre la simulation de faisceau avec uniformisation correspondant à cette optique. La force de l’octupôle est donnée par la relation [3]

$$KL = \frac{1}{12\epsilon_z\beta_l^2} \frac{\cos^3 \phi}{\sin \phi} \quad (1)$$

dénomination	optique 1				optique 2
ϵ_x (π mm.mrad)	1	0.1			0.1
ϵ_z (π mm.mrad)	1	1			1
$\beta_{x,octu}$ (m)	72.746	72.746			140.0
$\beta_{z,octu}$ (m)	0.3	0.3			0.4
$\beta_{x,cible}$ (m)	196.003	392.001	162.004	32.075	8000
$\beta_{z,cible}$ (m)	0.782	0.964	0.744	0.5	20
$\sigma_{x,cible}$ (mm)	14	14	9	4	28.2
$\sigma_{z,cible}$ (mm)	0.88	0.98	0.86	0.71	4.4
KARQ51 (m^{-2})	4.321109				4.70745
KARQ52 (m^{-2})	-4.708043				-5.191468
KARQ53 (m^{-2})	3.523825				4.70745
KQ11 (m^{-2})	4.744933				1.199727
KQ12 (m^{-2})	-5.333736				-3.526652
KQ13 (m^{-2})	4.744933				4.6
KQ21 (m^{-2})	$-9.512721 \cdot 10^{-10}$	$-4.603834 \cdot 10^{-10}$	$-7.67742 \cdot 10^{-5}$	$-3.419213 \cdot 10^{-9}$	-1.653952
KQ22 (m^{-2})	0.9058868	0.478143	0.999293	1.498467	0.9505448
KQ23 (m^{-2})	-3.021963	-3.06705	-2.999327	-2.518526	-2.488709
KQ24 (m^{-2})	1.84148	2.02937	1.774627	0.774337	1.526922

TAB. 1 – Echantillon des forces des lentilles desservant G4 pour l'application BRU.

FIG. 2 – Conditions de focalisation pour uniformisation en X par octupôle placé juste en amont de Q21 ($s \approx 12.5$ m). $\epsilon_x = 0.1\pi$ mm.mrad, $\epsilon_z = 1\pi$ mm.mrad.

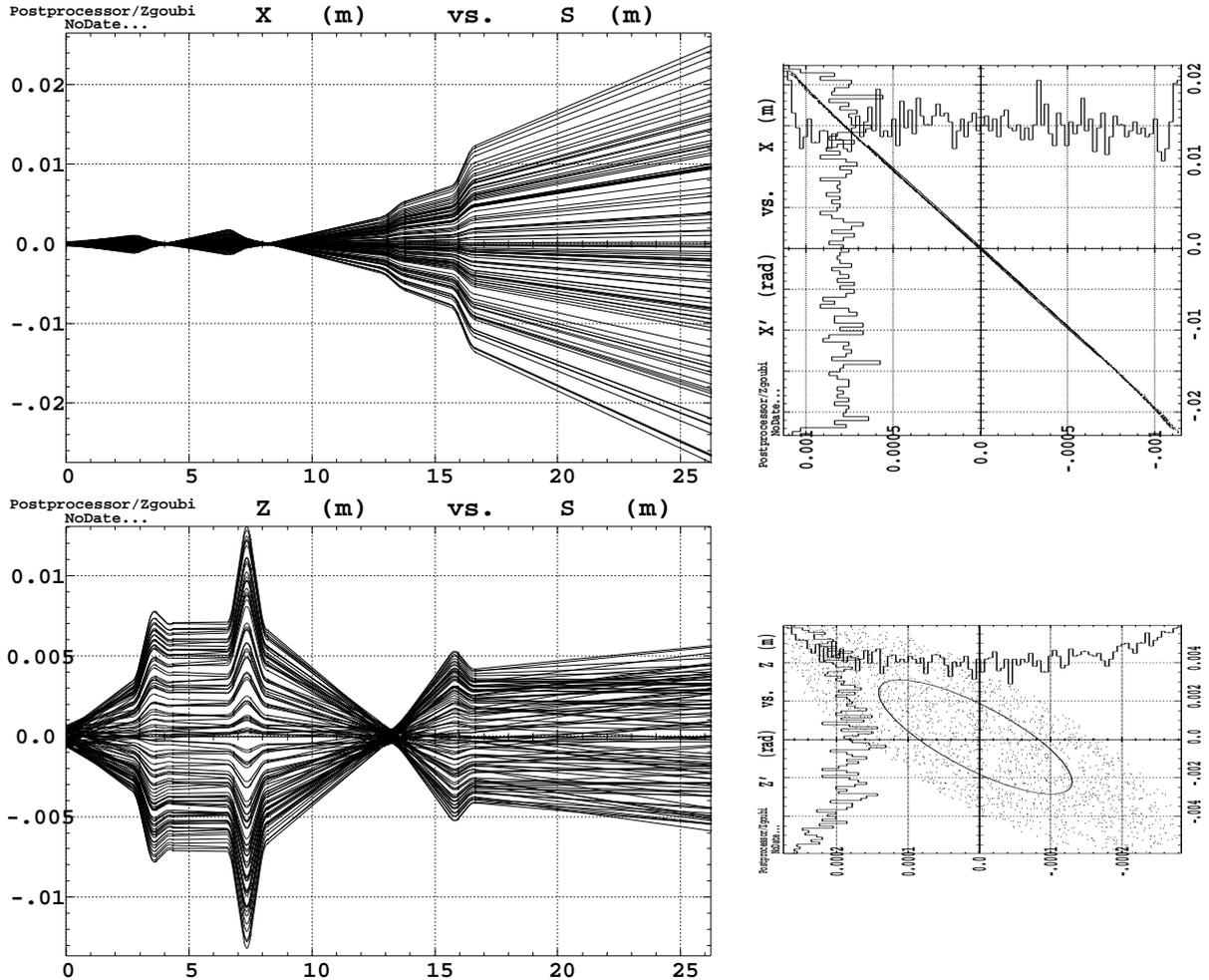


FIG. 3 – Simulation d'un faisceau avec uniformisation 1D horizontale (direction X) : enveloppes X (figure du haut) et Z (figure du bas) et espaces des phases correspondants en fin de ligne.

dans laquelle β_l est l'amplitude betatron horizontale dans l'octupôle d'uniformisation, ϕ est l'avance de phase betatron de l'octupôle à la cible. En prenant un octupôle de longueur magnétique 40 cm et de rayon au pôle 3.3 cm, il faudrait un champ $B_{p\hat{o}le} \approx 4$ kG pour obtenir l'uniformisation ; cette valeur peut facilement être diminuée, si nécessaire, par différents procédés (cf. Eq.1) : allongement de l'octupôle, augmentation de β_l , ajustement de l'avance de phase ϕ , toutes choses qui devront faire l'objet d'une étude de design ultérieure.

3 Tests avec faisceau

Les essais préliminaires rapportés ici ont été réalisés avec pour but de vérifier que le faisceau délivré en G4 présente les critères de focalisation et de densité transverse propres à la mise en œuvre de BRU.

Deux points-clés sont :

- réalisation des optiques 1 et 2 décrites précédemment,
- obtention de profils en cloche (à peu près paraboliques ou gaussiens).

Un faisceau de Carbone 13 à 75 MeV/u nous a été fourni, soit un $B\rho_{mesure} = 2.73796$ T.m.

Les deux optiques ont pu être testées et mesurées avec les systèmes de mesure de profils (profileur à émission secondaire + profileur à gaz dans l'air en fin de ligne) installés dans G4. Un écran d'alumine placé sur le porte-cible en aval de G4Q24 permet, en plus, une observation directe 2D du faisceau.

3.1 Optique 1

Les réglages de consigne imposés sont ceux permettant d'obtenir un $\beta_{x,cible} \approx 200$ m avec une divergence nulle. Le tableau (2) compare les valeurs théoriques $\sigma_{theorique} = \sqrt{\beta\epsilon/\pi}$ prévues par les simulations au droit des profileurs avec les valeurs $\sigma_{mesures}$ données par les profileurs.

Profileurs	Plan horizontal		Plan vertical	
	$\sigma_{x,theorique}$	$\sigma_{x,mesures}$	$\sigma_{y,theorique}$	$\sigma_{y,mesures}$
	mm	mm	mm	mm
PR11	0.5	2	6.6	3
PR21	8.5	6.5	0.5	1
PR22	14.1	8	2	1
PR23	14.1	7	7.1	/
profileur à gaz	14.1	29.1	7.1	27.5

TAB. 2 – Comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs attendues des profils.

La limitation en émittance ajoutée à la limitation en intensité envoyée dans la salle G4 par les normes de radioprotection font travailler à des intensités proches de la limite de fonctionnement des profileurs EMS, ce qui explique pour bonne part la différence entre mesures et valeurs théoriques. En revanche, il est possible d'utiliser dans ce cas le profileur à gaz qui donne de bons profils. Les résultats sont cependant en désaccord et il faut interpréter les écarts, notamment dans le plan vertical. On peut suspecter :

- soit une différence entre les conditions initiales entrées dans les simulations en amont de ARQ51 par rapport à l'optique réelle,
- soit des défauts optiques dans l'arête de poisson (alignement des aimants en particulier)
- soit une défaillance du profileur à gaz (peu probable)

3.2 Optique 2

Les valeurs de consigne des quadrupôles doivent permettre d'obtenir un $\beta_{x,cible} = 8000$ m afin de permettre l'uniformisation sur 40 cm. Dans ce cas, l'enveloppe est limitée par le diamètre dans G4Q24. Il faut donc réduire l'émittance pour les mesures afin de ne pas couper dans la distribution en amont de la cible. On a donc travaillé avec une émittance horizontale $\epsilon_x/\pi = 0.1 \cdot 10^{-6}$ m.rad. Dans le plan vertical, en revanche, on ne limite pas l'émittance de façon à avoir suffisamment de résolution sur les profileurs, $\epsilon_z/\pi = 10^{-6}$ m.rad.

4 Conclusion

Les premiers tests sur faisceau nous ont convaincus que l'optique actuelle de la ligne G4 permet d'envisager la mise en œuvre de la technique BRU ("balayage rectangulaire uniformisé") d'uni-

Profileurs	Plan horizontal		Plan vertical	
	$\sigma_{x,theorique}$	$\sigma_{x,mesures}$	$\sigma_{y,theorique}$	$\sigma_{y,mesures}$
	mm	mm	mm	mm
PR21	3.7	3	0.6	1
PR22	16.6	12	4.4	3
PR23	28.3	4	4.4	3
profileur à gaz	28.3	29.9	4.4	25.5

TAB. 3 – Comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs attendues des profils.

formisation transverse 1D horizontale du faisceau, moyennant des modifications de géométrie de faible ampleur (déplacement de Q21-Q24 de quelques dizaines de cm pour loger un octupôle).

Les résultats obtenus du point de vue des marges de manœuvre en réglages optiques, sont satisfaisants aussi en ce qui concerne le positionnement futur de l'octupôle, en amont de Q21.

La compatibilité des mesures avec les simulations numériques au niveau de la cible demande cependant de plus amples investigations, notamment concernant le contrôle de l'optique (alignement des éléments de la ligne, mesure des profils, précision de l'instrumentation).

Deux points restent limitants pour la mise en oeuvre effective de l'uniformisation :

- le diamètre intérieur des quadrupôles qui oblige à travailler à petite émittance. Ce critère n'est pas rédhibitoire - à préciser en temps utile
- l'intensité maximale autorisée dans la salle G4 avec sortie du faisceau dans l'air limitant la résolution des profileurs à fils.

Pour poursuivre les tests, il faut désormais :

- investiguer les moyens de mesure de profil et d'uniformité du faisceau à la cible sur une étendue de 40 cm horizontalement et quelques cm verticalement (écran luminescent couplé à une CCD pour une bonne résolution et une bonne sensibilité)
- optimiser le lieu d'implantation de l'octupôle par rapport à l'optique et aux contraintes géométriques de la salle G4 pour minimiser les modifications.
- une étude complète de l'optique en fonction du point précédent pour préciser les spécifications de l'octupôle (en première approximation, $L_{mag} = 40$ cm, $R_{pôle} = 4$ cm, $B_{pôle} = 5$ kG)
- préparer le design et la construction de l'octupôle (éventuellement deux pour une uniformisation 2D)

Références

- [1] Communication Bernard Bru, Déc. 2002.
- [2] Projet de hadronthérapie à Lyon, lignes de faisceau, B. Launé, F. Méot, A. Tkatchenko, report CEA/DSM/DAPNIA/SEA-01-10 and CNRS IN2P3 IPNO-01-07 (July 2001).
- [3] Principles of the non-linear tuning of beam expanders, F. Méot and T. Aniel, NIM A 379 (1996) 196-205.