



DEN-DANS

DMN/SRMP/NT/2006-25
Date : 27 Avril 2006

DOB : DEN/DSEO
E-OTP : A-INVSC-02-01

Document Technique DMN

Page 1/40

DIRECTION DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE
DIRECTION DÉLÉGUÉE AUX ACTIVITÉS NUCLÉAIRES DE SACLAY
DÉPARTEMENT DES MATÉRIAUX POUR LE NUCLÉAIRE
SERVICE DE RECHERCHES DE MÉTALLURGIE PHYSIQUE

DOCUMENT TECHNIQUE DMN

DMN/SRMP/NT/2006-25

**Calculs d'optique faisceau pour la plate-forme instrumentale
d'irradiation JANNUS du site de Saclay**

**Patrick Trocellier (DMN/SRMP), Didier Uriot (DAPNIA/SACM)
et Mark Sundquist (NEC)**

1		Visa				
		Nom	P. Trocellier	Y. Serruys	F. Legendre	Ph. Le Poac
	27/04/2006	Date	27/04/06	27/04/06	27/04/06	27/04/06
Indice	Date		Auteur(s)	Vérificateur(s)	A.Q.	Emetteur

F1D-DMN-PR-01

 DEN-DANS		DMN/SRMP/NT/2006-25 Date : 27 Avril 2006 DOB : DEN/DSOE E-OTP : A-INVSC-02-01
	Document Technique DMN	Page 2/40

TITRE DU DOCUMENT TECHNIQUE :

Calculs d'optique faisceau pour la plate-forme instrumentale d'irradiation JANNUS du site de Saclay

AUTEURS : Patrick Trocellier (DMN/SRMP), Didier Uriot (DAPNIA/SACM) et Mark Sundquist (NEC)

RÉSUMÉ : Ce document présente la démarche suivie pour effectuer les calculs d'optique faisceau pour les trois machines électrostatiques constituant la plate-forme instrumentale d'irradiation JANNUS du site de Saclay. Les codes de calculs mis au point au DAPNIA/SACM ont été successivement appliqués pour la définition et l'optimisation des trois lignes de faisceau formant l'ensemble appelé triple faisceau.

MOTS CLES : Investissement, accélérateurs, projet JANNUS

AFFAIRE : DOB/Domaine : DEN/DSOE E-OTP : A-INVSC-02-01

TITRE DE L'AFFAIRE : Projet JANNUS

DIFFUSION : Libre Restreinte Confidentielle

Nom des CODES ou MODULES de Calcul DMN utilisés : TraceWin 1.33 (inclus PARTRAN)
(suivant Processus R1-2 du Département)

Clefs de financement : CEA

Un document papier ou fichier informatique en diffusion libre peut être diffusé sans restriction en interne CEA. La diffusion restreinte est strictement limitée à la liste de diffusion incluse dans le document sauf autorisation écrite du département. Une diffusion confidentielle indique en plus que le contenu ne doit pas être divulgué.

 DEN-DANS		DMN/SRMP/NT/2006-25 Date : 27 Avril 2006 DOB : DEN/DSOE E-OTP : A-INVSC-02-01
	Document Technique DMN	Page 3/40

SUIVI DES VERSIONS

INDICE	DATE	NATURE DE L'EVOLUTION	PAGES CHAPITRES
1	13/02/2006	Émission initiale	Toutes

LISTE DE DIFFUSION EXTERNE CEA

Société NEC : Mark Sundquist

Société PANTECHNIK : S. Kantas

CNRS/IN2P3/DIR : J. Giner

Site JANNUS sur EDMS - Projet JANNUS – II-4 Lignes et chambres

LISTE DE DIFFUSION INTERNE CEA

CEA Saclay :

DEN/DSOE : A. Alamo

DMN/DIR : Ph. Le Poac

DMN/SRMP : M. Guttman, Y. Serruys, F. Legendre

INSTN/UEPEM : S. Pellegrino, S. Vaubailon, S. Miro

DAPNIA/SACM : D. Uriot

DSM/LSCE : E. Cottureau

 DEN-DANS		DMN/SRMP/NT/2006-25 Date : 27 Avril 2006 DOB : DEN/DSOE E-OTP : A-INVSC-02-01
	Document Technique DMN	Page 4/40

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	5
1) DESCRIPTION DE LA PLATE-FORME EXPERIMENTALE D'IRRADIATION JANNUS DU SITE DE SACLAY	5
2) PROPOSITION NEC	5
3) GENERALITES SUR LE TRANSPORT DE PARTICULES CHARGEES	6
3.1) RAPPELS DE DYNAMIQUE CORPUSCULAIRE	6
3.2) FORCES ELECTROMAGNETIQUES	7
3.3) TRANSPORT DE FAISCEAUX DE PARTICULES CHARGEES	7
3.3.1) <i>Transport d'une particule</i>	7
3.3.2) <i>Paramètres de Twiss et émittance</i>	8
3.3.3) <i>Transport d'un faisceau</i>	9
3.3.4) <i>Exemples de matrices de transfert</i>	10
3.3.5) <i>Codes matriciels</i>	10
4) PRESENTATION DES CODES DE CALCUL TRACEWIN ET PARTRAN	10
5) APPLICATION AUX CALCULS DE L'OPTIQUE FAISCEAU DE JANNUS	13
CONCLUSION.....	14
REMERCIEMENTS	14
RÉFÉRENCES	14

 DEN-DANS		DMN/SRMP/NT/2006-25 Date : 27 Avril 2006 DOB : DEN/DSOE E-OTP : A-INVSC-02-01
	Document Technique DMN	Page 5/40

Introduction

Une ligne de faisceau issue d'un accélérateur de particules constitue un système d'optique électromagnétique composé de différents éléments (source d'ions, sections d'accélération, collimateurs, déflecteurs électrostatiques, lentilles électromagnétiques, aimants, quadrupôles etc.) Chaque élément transmet le faisceau qui arrive à son entrée en fonction des caractéristiques de ce dernier et de ses propres paramètres géométriques et électromagnétiques.

Nous avons donc entrepris de traiter chaque ligne de faisceau de la plate-forme instrumentale d'irradiation JANNUS comme un système optique à part entière avec ses qualités et ses défauts. Puis, nous avons cherché à optimiser la transmission du faisceau le long de chacune des lignes.

1) Description de la plate-forme expérimentale d'irradiation JANNUS du site de Saclay

La plate-forme instrumentale JANNUS (Jumelage d'Accélérateurs pour les Nanosciences, le Nucléaire et la Simulation) se compose de deux sites expérimentaux : le Centre de Spectrométrie Nucléaire et de Spectrométrie de Masse (IN2P3-CSNSM) à Orsay et une partie de l'ancien Hall SATURNE à Saclay.

Au CSNSM, seront couplés un implanteur d'ions de 190 kV (IRMA), un accélérateur électrostatique mixte, simple étage et tandem, de 2 MV (ARAMIS) et un microscope électronique à transmission FEI de 200 kV.

A Saclay, trois machines électrostatiques seront couplées :

- un accélérateur 3UH-4 Pelletron NEC de 3 MV, baptisé Epiméthée, équipé d'une source d'ions multichargés de type ECR (Electron Cyclotron Resonance) conçue par la société française PANTECHNIK ;
- une machine simple étage de 2,5 MV, baptisée Yvette, exploitée actuellement par le Laboratoire du Van de Graaff de l'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN) ;
- un tandem de 2,5 MV, le Tandetron, utilisé par le CSNSM pour réaliser des mesures AMS (Accelerator Mass Spectrometry) d'isotopes spécifiques (^9Be , ^{14}C , ^{26}Al , etc).

Cet ensemble est schématisé sur la Figure 1.

Epiméthée sera capable de fournir des faisceaux d'ions entre l'hydrogène et le bismuth avec des états de charge élevés (15 à 17⁺ pour les éléments lourds). Le domaine d'énergie accessible s'étalera donc entre 300 keV et 50 MeV. Yvette produit des faisceaux d'ions légers, protons, deutérons, hélions-3 et hélions-4, entre 300 keV et 2,5 MeV. Sa ligne de faisceau « zéro degré » pourra également produire des ions de gaz rares lourds (argon, krypton, xénon). Le Tandetron, eu égard à sa configuration tandem et à sa source à pulvérisation à vapeur de Cs, fournit principalement des faisceaux d'ions facilement ionisables négativement (hydrogène, halogènes).

2) Proposition NEC

La société NEC (National Electrostatic Corporation, Middleton, États-Unis) a proposé la fourniture d'un accélérateur électrostatique 3UH-4 de type Pelletron, muni de deux lignes de faisceau instrumentées : « zéro degré » et « quinze degrés ». Ces deux lignes sont détaillées dans les Tableaux 1 et 2.

Des simulations ont été réalisées par NEC à l'aide d'un code de transport de particules chargées non relativistes, adapté par leurs soins à partir d'un code classique dont nous parlerons dans le prochain

 DEN-DANS		DMN/SRMP/NT/2006-25 Date : 27 Avril 2006 DOB : DEN/DSOE E-OTP : A-INVSC-02-01
	Document Technique DMN	Page 6/40

paragraphe (le code Transport). Les figures 2 et 3 illustrent ces calculs pour un faisceau d'ions $^{131}\text{Xe}^{17+}$ de 51 MeV : ligne « zéro degré » et ligne « quinze degrés ».

3) Généralités sur le transport de particules chargées

3.1) Rappels de dynamique corpusculaire

Dans ce paragraphe, nous nous appuyerons sur quatre ouvrages classiques anciens mais dont la pertinence actuelle est toujours reconnue [1 - 4].

Pour un ion de masse m animée d'une vitesse v dans un espace à 3 dimensions, l'énergie cinétique s'exprime par la formule classique :

$$E_{\text{cinétique}} = (m v^2/2) \quad (1)$$

Il faut garder en mémoire le fait que :

$$v = (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)^{1/2} \quad (2)$$

avec

$$\begin{aligned} v_x &= dx/dt \\ v_y &= dy/dt \\ v_z &= dz/dt \end{aligned} \quad (3)$$

La quantité de mouvement (ou moment) s'exprime quant à elle par :

$$\begin{aligned} p_x &= m v_x \\ p_y &= m v_y \\ p_z &= m v_z \end{aligned}$$

En mécanique relativiste on exprime souvent la vitesse de l'ion considéré par rapport à la vitesse de la lumière :

$$\begin{aligned} \beta &= v/c \\ \beta &= \{2 E/m\}^{1/2} \end{aligned}$$

où l'énergie E est exprimée en MeV et la masse m en MeV/c^2 ($1 \text{ uma} = 931,50 \text{ MeV}/c^2$).

On utilise aussi le paramètre γ qui est toujours plus grand que 1 puisque v n'excède pas c :

$$\gamma = 1/(1 - \beta^2)^{1/2}$$

Ce paramètre permet en fait de relier la masse apparente de l'ion m à sa masse au repos m_0 :

$$m = \gamma m_0$$

Toute force extérieure F impose une variation de la quantité de mouvement p qui se traduit par :

$$\begin{aligned} F_x &= dp_x/dt \\ F_y &= dp_y/dt \\ F_z &= dp_z/dt \end{aligned}$$

 DEN-DANS		DMN/SRMP/NT/2006-25 Date : 27 Avril 2006 DOB : DEN/DSEO E-OTP : A-INVSC-02-01
	Document Technique DMN	Page 7/40

3.2) Forces électromagnétiques

Dans un champ électromagnétique, un ion de charge q et de vitesse v est soumis à la force de Lorentz F telle que :

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

L'évolution de la quantité de mouvement p est alors donnée par l'équation différentielle :

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}$$

L'équation (10) regroupe les relations plus classiques qui expriment la force électrostatique F_e et la force magnétique F_b :

$$\begin{aligned} F_e &= q E = m dv/dt \\ F_b &= q v B = m dv/dt \end{aligned}$$

Dans le premier cas, le mouvement est parabolique et dans le second cas il est circulaire de rayon R :

$$q v B = m v^2/R$$

3.3) Transport de faisceaux de particules chargées

Soit un faisceau de particules se déplaçant dans un repère cartésien (Ox , Oy , Oz). La direction Oz figure l'axe de propagation du mouvement, la direction Ox se situe dans le plan horizontal et la direction Oy dans le plan vertical. En tout point (x , y , z) de cet espace, la particule considérée possède une quantité de mouvement (ou moment) à trois composantes (p_x , p_y , p_z). L'espace des phases est l'espace virtuel à 6 dimensions définies par (x , y , z , p_x , p_y , p_z) et l'on peut considérer que le moment axial (dz/dt) est constant dans cet espace en dehors de tout secteur d'accélération.

On exprime souvent la divergence du faisceau comme le rapport du moment transverse sur le moment axial :

$$x' = (dx/dt)/(dz/dt) = dx/dz$$

et

$$y' = (dy/dt)/(dz/dt) = dy/dz$$

Compte tenu de la remarque précédente sur le moment axial, on peut remplacer p_x par x' et p_y par y' dans l'espace des phases soit (x , y , z , x' , y' , z').

3.3.1) Transport d'une particule

Si les forces sont considérées linéaires, les coordonnées dans l'espace de phase d'une particule à la position S_2 peuvent être déduites de celles à la position S_1 par une simple multiplication de matrice.

$$\vec{x}(s_2) = R \cdot \vec{x}(s_1)$$

 DEN-DANS	Document Technique DMN	DMN/SRMP/NT/2006-25 Date : 27 Avril 2006 DOB : DEN/DSOE E-OTP : A-INVSC-02-01
		Page 8/40

Ou $\vec{x}(s)$ est un vecteur représentant la position de la particule dans l'espace de phase

$$\vec{x} = \begin{pmatrix} x \\ x' = dx/ds \\ y \\ y' = dy/ds \\ z \\ \delta = \Delta p/p_s \end{pmatrix},$$

x, y et z étant respectivement la position horizontale, verticale et longitudinale de la particule dans le paquet de particules (relativement à une particule synchrone) ; p_s est moment de la particule synchrone avec $\delta=(p-p_s)/p_s$.

R est la matrice 6×6 de transfert entre s_1 and s_2 . Cette matrice pouvant être partitionnée en sous matrice 2x2 pour simplifier et accélérer les calculs.

$$R = \begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} & a_{03} & a_{04} & a_{05} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ a_{30} & a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \\ a_{40} & a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} \\ a_{50} & a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{xx} & R_{xy} & R_{xz} \\ R_{yx} & R_{yy} & R_{yz} \\ R_{zx} & R_{zy} & R_{zz} \end{bmatrix}.$$

3.3.2) Paramètres de Twiss et émittance

Commençons par définir $\langle w \rangle$ comme la valeur moyenne de la propriété w de la particule du faisceau à la position s.

L'espace de phase du faisceau est défini par :

$$\begin{pmatrix} \bar{x} = \langle x \rangle \\ \bar{x}' = \langle x' \rangle \\ \bar{y} = \langle y \rangle \\ \bar{y}' = \langle y' \rangle \\ \bar{z} = \langle z \rangle \\ 0 \end{pmatrix}$$

Les tailles rms du faisceau sont : $\tilde{w} = \sqrt{\langle (w - \bar{w})^2 \rangle}$, avec w utilisé pour x, x', y, y', z or δ .

Les corrélations rms du faisceau sont: $\overline{wv} = \langle (w - \bar{w}) \cdot (v - \bar{v}) \rangle$, avec w et v utilisés pour x, x', y, y', z or δ .

 DEN-DANS	Document Technique DMN	DMN/SRMP/NT/2006-25 Date : 27 Avril 2006 DOB : DEN/DSEO E-OTP : A-INVSC-02-01
		Page 9/40

Les émittances rms non normalisées du faisceau sont : $\tilde{\varepsilon}_w = \sqrt{\tilde{w}^2 \tilde{w}'^2 - \langle w w' \rangle^2}$ avec w utilisé pour x , y and z .

Il faut cependant noter que dans la définition précédente, z' est défini tel que $z' = (v_z - v_{zs})/v_{zs}$, v_z et v_{zs} étant les vitesses longitudinales de respectivement la particule et la particule synchrone. La plupart du temps, δ est utilisée plutôt que z' .

Dans le cas de forces linéaires, le faisceau peut être représenté dans des espaces de phase réduits par des ellipses dont les équations sont : $\gamma_w w^2 + 2\alpha_w w w' + \beta_w w'^2 = \varepsilon_w$, ou :

ε_w est l'émittance effective non normalisée du faisceau.

La relation suivante $\varepsilon_{wn} = \beta\gamma \cdot \varepsilon_w$ reliant l'émittance non normalisée à l'émittance normalisée. γ and β étant les habituels paramètres relativistes.

$\alpha_w = -\overline{w w'}/\tilde{\varepsilon}_w$, $\beta_w = \tilde{w}^2/\tilde{\varepsilon}_w$, and $\gamma_w = \tilde{w}'^2/\tilde{\varepsilon}_w$ sont les paramètres de Twiss du faisceau satisfaisant la relation: $\beta_w \gamma_w - \alpha_w^2 = 1$ (voir la figure 5).

3.3.3) Transport d'un faisceau

Le faisceau peut être représenté par une matrice appelée matrice σ définie tel que :

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \overline{\tilde{x}^2} & \overline{xx'} & \overline{xy} & \overline{xy'} & \overline{xz} & \overline{x\delta} \\ \overline{xx'} & \overline{\tilde{x}'^2} & \overline{x'y} & \overline{x'y'} & \overline{x'z} & \overline{x'\delta} \\ \overline{xy} & \overline{x'y} & \overline{\tilde{y}^2} & \overline{yy'} & \overline{yz} & \overline{y\delta} \\ \overline{xy'} & \overline{x'y'} & \overline{yy'} & \overline{\tilde{y}'^2} & \overline{y'z} & \overline{y'\delta} \\ \overline{xz} & \overline{x'z} & \overline{yz} & \overline{y'z} & \overline{\tilde{z}^2} & \overline{z\delta} \\ \overline{x\delta} & \overline{x'\delta} & \overline{y\delta} & \overline{y'\delta} & \overline{z\delta} & \overline{\tilde{\delta}^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

$$\text{Avec } \sigma_{ww} = \begin{bmatrix} \beta_w \varepsilon_w & -\alpha_w \varepsilon_w \\ -\alpha_w \varepsilon_w & \gamma_w \varepsilon_w \end{bmatrix},$$

On observe que le déterminant de cette matrice $\det(\sigma_{ww}) = (\beta_w \gamma_w - \alpha_w^2) \cdot \varepsilon_w^2 = \varepsilon_w^2$

L'évolution de la matrice faisceau σ d'une position s_1 à une position s_2 à travers un élément défini par sa matrice de transfert R peut être calculée par la relation :

$$[\sigma](s_2) = R \cdot [\sigma](s_1) \cdot R^T,$$

Où R^T est la transposée de R et $[\sigma]$ est la matrice faisceau σ :

 DEN-DANS		DMN/SRMP/NT/2006-25 Date : 27 Avril 2006
	Document Technique DMN	DOB : DEN/DSOE E-OTP : A-INVSC-02-01 Page 10/40

3.3.4) Exemples de matrices de transfert

Secteur sans champ électromagnétique ou glissement de longueur L :

Pour une particule dont les coordonnées d'entrée sont x_e , x'_e , y_e et y'_e à l'abscisse $z = L$, les coordonnées de sortie deviennent x_s , x'_s , y_s , y'_s :

$$\begin{aligned}x_s &= x_e + Lx'_e \\x'_s &= x'_e \\y_s &= y_e + Ly'_e \\y'_s &= y'_e\end{aligned}$$

On peut ainsi définir la matrice de transfert sans glissement telle que :

$$R_{xx} = R_{yy} = \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Cas d'une lentille mince convergente de longueur focale f :

On peut écrire :

$$\begin{aligned}x_s &= y_e \\x'_s &= -y_e/f + y'_e \\y_s &= y_e \\y'_s &= y_e/f + y'_e\end{aligned}$$

$$R_{xx} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix}, R_{yy} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/f & 1 \end{bmatrix}$$

3.3.5) Codes matriciels

De nombreux codes de calculs matriciels basés sur la mécanique classique et les lois fondamentales de l'électromagnétisme ont été élaborés dans les grands laboratoires équipés d'accélérateurs à partir du début des années soixante pour concevoir et optimiser des lignes de faisceau. Le lecteur trouvera des détails dans les quatre ouvrages mentionnés en début de chapitre [1 – 4]. Parmi les codes de ce type les plus couramment utilisés aujourd'hui, on peut notamment citer Transport et Turtle [5 - 9]. NEC base d'ailleurs ses calculs d'optique sur une version adaptée du code Transport. Des codes « plus universels » incluant la mécanique relativiste ont ensuite été développés à partir des années quatre vingt dix parmi lesquels Zgoubi [10, 11], TraceWin et Toutatis [12].

4) Présentation des codes de calcul TraceWin et Partran

TraceWin est un programme de calcul de l'enveloppe d'un faisceau de particules chargées en paquets ou continu à travers différents éléments d'un accélérateur linéaire. C'est un code matriciel incluant les effets linéaires des forces de charge d'espace. C'est un outil complet de développement pour les réglages automatiques d'une ou de plusieurs sections de l'accélérateur en s'appuyant sur de nombreuses options. Le code permet de simuler les procédures de démarrage de la machine en incluant les différents diagnostics et leurs correcteurs associés. Tous les transports effectués par le code peuvent être doublés à l'aide des codes multiparticulaires Partran et Toutatis pour une confrontation (non linéarités). Ces codes sont appelables de manière externe ou interne (bibliothèques). TraceWin peut réaliser des études d'erreurs (désalignement, erreur de champ...) avec ou sans

 DEN-DANS		DMN/SRMP/NT/2006-25 Date : 27 Avril 2006 DOB : DEN/DSOE E-OTP : A-INVSC-02-01
	Document Technique DMN	Page 11/40

corrections basées sur des diagnostics. Ces études d'erreurs peuvent s'appuyer soit sur des transports d'enveloppe ou de macro particules. Le calcul peut être partagé sur une ou plusieurs machines distantes. Grâce à son interface graphique, l'utilisateur peut changer n'importe quel paramètre du design de la machine et observer rapidement les effets. Elle permet de visualiser la plupart des paramètres pertinents concernant ce type de développement tels que les enveloppes, les espaces de phase, les émittances, les avances de phase...) quelque soit le code choisi pour simuler le transport. Toutes ces sorties peuvent être directement sauvegardées ou copiées dans différents formats usuels. Il a été mis au point au CEA par R. Duperrier, N. Pichoff et D. Uriot.

Un guide d'utilisation est disponible [13]. Il permet de se familiariser rapidement avec l'ensemble des menus et des commandes. Les principaux cartouches contenant les menus accessibles de TraceWin et Partran sont présentés sur la Figure 4. Les principales données d'entrée concernent le faisceau d'ions considéré :

- la nature de l'ion ;
- sa masse ;
- son énergie cinétique en sortie de source ;
- son état de charge ;
- les paramètres de Twiss des 3 espaces de phase (XX', YY', ZZ') ;
- les émittances rms normalisée dans les 3 espaces de phase ϵ_x , ϵ_y et ϵ_z .

Les calculs d'enveloppe de faisceau (TraceWin) ou multiparticules (Partran) nécessitent un fichier d'entrée **.dat** décrivant la succession des éléments optiques constituant la ligne faisceau. Ce fichier contient également les principales commandes permettant de modifier les paramètres optiques des éléments en fonction de l'évolution de diagnostics associés. Toutes les lignes débutant par un point virgule sont des commentaires qui rappellent à l'utilisateur la syntaxe requise. Les unités des paramètres clés sont également précisées. Nous avons volontairement conservé dans l'exemple de fichier qui suit la terminologie anglaise utilisée dans le manuel d'utilisation de TraceWin réactualisé en novembre 2005 [13] :

```

; CALCUL D OPTIQUE FAISCEAU DE LA LIGNE 15 DEGRES DU 3MV NEC POUR UN FAISCEAU
DE PROTONS DE 3 MEV
; BUNCHER
; Electrostatic acceleration = ELECTROSTA_ACC V0 (voltage, V) L (length, mm) K (transverse
defocal, eV/mm2) R (aperture, mm)
ELECTROSTA_ACC 19200 6 0 6
; Drift = DRIFT L (length, mm) r (aperture, mm)
DRIFT 457 100
; Field map n (type) L (length, mm)  $\theta_i$  (phase d'entrée, °) R (aperture, mm) kb (magnetic field intensity
factor) ke (electric field intensity factor) ki (space charge compensation factor) ka (aperture flag) file
name (without extension)
FIELD_MAP 4 539 0 100 0 0.82 0 0 outsf7_bin_DU
DRIFT 302 1000
; Circular or rectangular aperture = APERTURE dx (X half width, mm) dy (half width, mm) R(0)/E(1)
APERTURE 8 8 0
DRIFT 127 100
; SECTION D ACCELERATION 1
; Lentille mince = THIN_LENS fx (focal length, mm) fy (focal length, mm) R (aperture, mm)
THIN_LENS 0.062 0.062 26
ELECTROSTA_ACC 89000 89 0 26
THIN_LENS -0.4126 -0.4126 26
; SECTION D ACCELERATION 2
THIN_LENS 0.454 0.454 12.7
ELECTROSTA_ACC 2.911e+06 1669 0 12.7
THIN_LENS -7.13 -7.13 12.7

```

 DEN-DANS		DMN/SRMP/NT/2006-25 Date : 27 Avril 2006 DOB : DEN/DSOE E-OTP : A-INVSC-02-01
	Document Technique DMN	Page 12/40

DRIFT 1025 100
; PREMIER TRIPLET QUADRUPOLAIRE : QUADRUPLET ELECTROSTATIQUE
; Quadrupôle électrostatique = QUAD_ELEM L (length, mm) V (voltage between electrodes) R (aperture, mm)
; Adjust command = ADJUST N (diagnostic number) v (variable position to be adjusted) n (link parameter), generally associated with Diagnostic element number
; Trois exemples vont suivre
ADJUST 1 2 2 0 0
QUAD_ELE 140 28843.7 22
DRIFT 14 44
ADJUST 1 2 0 0 0
QUAD_ELE 279 -28298.3 22
DRIFT 14 44
ADJUST 1 2 2 0 0
QUAD_ELE 140 28843.7 22
DRIFT 2400 100
; AIMANT DE DEFLECTION
; Bending magnet = BEND alpha (angle, °) P (curvature radius, mm) n (field gradient index) r (aperture, mm) H(0)/V(1)
; Edge angle on bending magnet = beta (pole face rotation angle, °) P g (total gap, mm) K1 (0.45) K2 (2.80) r H(0)/V(1)
EDGE 8 1200 32 0.7 0.7 32 0
BEND -30 1200 0 32 0
EDGE 8 1200 32 0.7 0.7 32 0
DRIFT 1200 100
; Diagnostic = DIAG_WAIST n (number) kx (XX' waist wanted) ky (YY' waist wanted) dxy (transverse waist accuracy)
DIAG_WAIST 1 1 1
APERTURE 10 10 0
DRIFT 2584 100
; SECOND TRIPLET QUADRUPOLAIRE : QUADRUPLET MAGNETIQUE
ADJUST 2 2 2 0 0
; Quadrupôle magnétique = QUAD L (length, mm) B' (magnetic field gradient, T/m) R (aperture, mm)
QUAD 152 1.85003 26 0
DRIFT 119 52
ADJUST 2 2 0 0 0
QUAD 281 -1.87811 26 0
DRIFT 119 52
ADJUST 2 2 2 0 0
QUAD 152 1.85003 26 0
; AIMANT DE DISTRIBUTION : CHOIX DE LA LIGNE 15 DEGRES
EDGE 0 906 32 0.7 0.7 32 0
BEND -15 906 0 32 0
EDGE 7.5 906 32 0.7 0.7 32 0
DRIFT 3242 100
DIAG_WAIST 2 1 1
APERTURE 10 10 0
DRIFT 2719 100
; TROISIEME TRIPLET QUADRUPOLAIRE : QUADRUPLET MAGNETIQUE
ADJUST 3 2 2 0 0
QUAD 152 1.90026 26 0
DRIFT 119 52
ADJUST 3 2 0 0 0
QUAD 281 -1.94824 26 0
DRIFT 119 52

 DEN-DANS		DMN/SRMP/NT/2006-25 Date : 27 Avril 2006 DOB : DEN/DSOE E-OTP : A-INVSC-02-01
	Document Technique DMN	Page 13/40

ADJUST 3 2 2 0 0
QUAD 152 1.90026 26 0
DRIFT 4539 100
DIAG_SIZE 3 1 1
END

5) Application aux calculs de l'optique faisceau de JANNUS

Nous avons entrepris dans un premier temps de modéliser en totalité la ligne « quinze degrés » de la machine 3UH-4 Pelletron, qui alimente la chambre triple faisceau. Pour cela, nous avons sélectionné plusieurs configurations expérimentales :

- un faisceau de protons de 3 MeV ;
- un faisceau de $^4\text{He}^+$ de 2,5 MeV qui correspond à la configuration standard en analyse par diffusion élastique Rutherford ou par spectrométrie de recul élastique ;
- un faisceau d'ions $^{56}\text{Fe}^{10+}$ de 30 MeV caractéristique d'une expérience d'endommagement d'une nuance quelconque d'acier par des auto-ions ;
- un faisceau d'ions $^{131}\text{Xe}^{17+}$ de 51 MeV afin de nous recalcr sur les simulations NEC.

Dans une seconde étape, nous nous sommes intéressés au cas d'un faisceau de $^4\text{He}^+$ de 2,5 MeV fourni par la machine Yvette destinée à apporter l'hélium dans les expériences d'irradiation triple. Enfin, nous avons simulé pour le Tandetron un faisceau de protons de 4 MeV figurant l'apport d'hydrogène dans les expériences d'irradiation triple puis un faisceau d'ions $^{127}\text{I}^{5+}$ de 12 MeV (élément très électronégatif impossible à ioniser dans la source d'Epiméthée). Les données de divergence disponibles pour les faisceaux d'ions issus de Yvette et du Tandetron ont été estimées en sortie de cuve [ligne d'accélération], de sorte que la simulation de ces deux lignes de l'ensemble triple faisceau démarrera à ce point.

Les Tableaux 3 et 4 contiennent l'ensemble des paramètres géométriques (tailles et divergences), énergétiques (énergie, vitesse) et électrostatiques (état de charge) des différents faisceaux d'ions des configurations expérimentales JANNUS évoquées plus haut. Les lignes triple-faisceau issues de Yvette et du Tandetron sont décrites dans les tableaux 5 et 6. Le tableau 7 regroupe les paramètres d'entrée nécessaires aux calculs TraceWin. Les calculs sont illustrés par les Figures 6 (Epiméthée), 7 (Yvette) et 8 (Tandetron).

Dans le cas du faisceau de protons de 3 MeV sur Epiméthée, nous montrons à la fois le résultat du calcul d'enveloppe (Figure 6a) et celui du calcul multiparticules (Figures 6b et 6c). Le réglage des trois triplets (1 électrostatique et 2 magnétiques) pour optimiser le transport du faisceau conduit à la série de valeurs suivante :

- $V_{11} = V_{13} = 33617,2 \text{ V}$;
- $V_{12} = - 32414,9 \text{ V}$;
- $Q_{21} = Q_{23} = 1,81271 \text{ T/m}$;
- $Q_{22} = - 1,85920 \text{ T/m}$;
- $Q_{31} = Q_{33} = 1,90878 \text{ T/m}$;
- $Q_{32} = - 1,92904 \text{ T/m}$.

La perte de faisceau pour une distribution gaussienne s'élève à environ 0,5 % au bout des 26 mètres de transport pour une lentille einzel ajustée à 0,85 (une valeur de 1,0 correspond à la focalisation maximale et donc à la tension maximale). Des résultats tout aussi encourageants ont été obtenus avec des hélions-4 de 2,5 MeV des ions $^{56}\text{Fe}^{10+}$ de 30 MeV et des ions $^{131}\text{Xe}^{17+}$ de 51 MeV, comme le montrent les figures 7, 8 et 9. Les tableaux 8 et 9 regroupent les résultats des calculs d'optimisation de la ligne triple faisceau pour ces quatre types d'ions.

Dans le cas de la ligne triple faisceau issue de Yvette, la transmission du faisceau est principalement limitée par l'aimant de distribution qui possède un entrefer étroit et une chambre de faible ouverture.

 DEN-DANS		DMN/SRMP/NT/2006-25 Date : 27 Avril 2006 DOB : DEN/DSOE E-OTP : A-INVSC-02-01
	Document Technique DMN	Page 14/40

La transmission d'un faisceau de $^4\text{He}^+$ de 2,5 MeV peut atteindre 90% en ajustant les champs des deux derniers triplets quadrupolaires et en choisissant des lignes à ouverture élevée (tableau 5). Dans le cas de la ligne triple faisceau issue du Tandetron, compte-tenu de sa faible longueur de l'ordre de 10 mètres, il est aisé d'atteindre une transmission de 90%. Le résultat des deux dernières optimisations est résumé par le tableau 10.

Conclusion

Grâce à l'expertise du DAPNIA/SACM, nous avons pu simuler les lignes de faisceau de la plate-forme instrumentale d'irradiation JANNUS au moyen des codes de transport de faisceaux de particules chargées TraceWin et Partran. Nous avons pu en particulier optimiser l'optique faisceau des trois lignes constituant l'ensemble dit « triple faisceau ».

Tout d'abord, il convient d'insister sur le fait que la comparaison entre nos calculs et les simulations effectuées par NEC à propos de la machine Epiméthée montre un excellent accord.

La ligne triple faisceau issue de la machine Yvette devra comporter trois triplets quadrupolaires successifs : le premier situé en sortie de cuve machine, le second placé entre les deux aimants et le dernier positionné avant la chambre d'expériences triple faisceau. De plus, un déflecteur électrostatique de 15° présent sur la ligne AMS du tandetron est utilisé pour ramener le faisceau d'Yvette dans le plan vertical médian de la chambre triple faisceau, de façon à disposer de trois faisceaux séparés angulairement de 15° . Enfin, il convient de signaler que la portion terminale de la ligne triple faisceau issue de Yvette se caractérise par un grand diamètre (400 mm).

Quant à la ligne issue du Tandetron, elle ne nécessite l'utilisation que de deux triplets quadrupolaires : l'un est celui disponible actuellement au laboratoire du Tandetron de Gif et l'autre devra être acquis.

Un certain nombre de points reste néanmoins encore à vérifier :

- la définition de la position des correcteurs de position ;
- l'étude de la sensibilité aux erreurs afin de déterminer les tolérances d'alignement ;
- l'étude de la sensibilité aux fluctuations de l'énergie d'entrée ;
- l'effet de l'emploi d'un quatrième quadrupôle sur la ligne triple faisceau issue de Yvette.

D'autres simulations doivent également être réalisées afin d'optimiser :

- les lignes de l'ensemble triple faisceau issues d'Epiméthée et d'Yvette pour le passage de faisceaux d'ions propres à l'analyse en mode réaction nucléaire comme des deutérons entre 600 keV et 1,8 MeV ou des protons entre 600 et 800 keV ;
- la ligne venant d'Yvette et portant l'expérience MécaSiC d'irradiation de fibres de carbure de silicium sous contrainte mécanique ;
- les trois autres lignes issues de la machine Epiméthée dédiées soit à l'analyse par faisceaux d'ions soit à l'irradiation ;
- l'ensemble double faisceau constitué par la cinquième ligne venant d'Yvette en connection avec la quatrième ligne venant d'Epiméthée.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Philippe Trouslard (INSTN/Laboratoire du Van de Graaff), Evelyne Cottureau (DSM/SMA) et Saïd Kantas (Société Pantechnik) pour leur disponibilité.

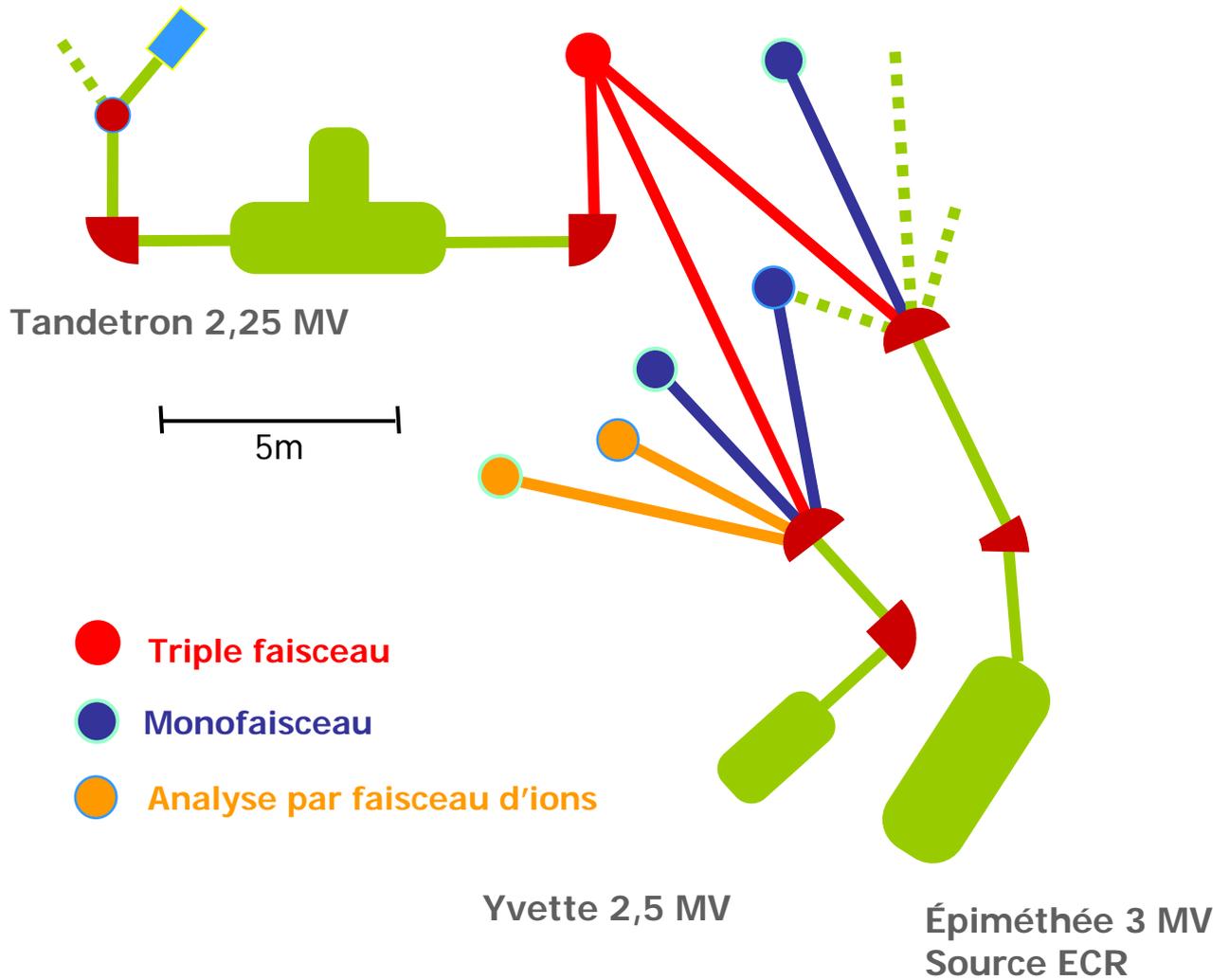
Références

- [1] The Transport of Charged Particle Beams, A.P. Banford, E. & F.N. Spon Ltd, London, 1965.
[2] Focusing of Charged Particles, A. Septier, Academic Press, New York, 1967.
[3] The Physics of Charged-Particle Beams, J.D. Lawson, 2nd edition, Clarendon Press, Oxford, 1988.

 DEN-DANS		DMN/SRMP/NT/2006-25 Date : 27 Avril 2006 DOB : DEN/DSOE E-OTP : A-INVSC-02-01
	Document Technique DMN	Page 15/40

- [4] Charged Particle Beams, S. Humphries Jr, John Wiley & Sons Inc., New York, 1990.
- [5] K.L. Brown, F. Rothacker, D.C. Carey and Ch. Iselin, Transport a computer program for designing charged particle beam transport systems, Report SLAC-91, Rev. 2, 1977.
- [6] K.L. Brown, D.C. Carey, C.F. Iselin and F. Rothacker, Transport, Report CERN 80-04, 1980.
- [7] D.C. Carey, TURTLE (Trace unlimited rays through lumped elements): A computer program for simulating charged particle beam transport systems, Report NAL-64, 1971.
- [8] D.C. Carey, K.L. Brown, Ch. Iselin, TURTLE (Trace unlimited rays through lumped elements): A computer program for simulating charged particle beam transport systems, including decay calculations, Report SLAC-246, 1983.
- [9] G.H. Gillepsie and B.W. Hill, Particle optics and accelerator modelling software for industrial and laboratory beamline design, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B139(1998)476-480.
- [10] F. Méot, The ray-tracing code Zgoubi, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A427(1999)353-356.
- [11] F. Méot and S. Valéro, Zgoubi user's guide, Rapport CEA-LNS-GT-90-05, 1990, 142 pages, voir également Report CEA/DSM/DAPNIA/SEA/97-13 et FERMILAB-TM-2010, 1997.
- [12] R. Duperrier, N. Pichoff and D. Uriot, CEA Saclay codes review for high intensities linacs computations, in Proceedings of ICCS-2002, Amsterdam, edited by P.M.A. Sloop, Springer Verlag, Berlin, 2002, p. 411-418.
- [13] D. Uriot, Manuel d'utilisation du code TraceWin, version novembre 2005, ftp://ftp.cea.fr/incoming/y2k01/Dynamic_codes/.

Figure 1 : Schéma de la plate-forme instrumentale d'irradiation JANNUS de Saclay.



 DEN-DANS		DMN/SRMP/NT/2006-25 Date : 27 Avril 2006 DOB : DEN/DSOE E-OTP : A-INVSC-02-01
	Document Technique DMN	Page 17/40

Tableau 1 : Description de la ligne de faisceau « zéro degré » de l'accélérateur 3UH-4 Pelletron NEC ou ÉPIMÉTHÉE (cas d'un faisceau de protons de 3 MeV).

Élément	Longueur (mm)	Diamètre (mm)	Tension ^a (kV)	Ouverture (mm)	Espacement ^b (mm)	Rayon de courbure (mm)	Angle de déflexion (degrés)	Inclinaison des faces d'entrée/sortie (°)	Gap ^c (mm)
Cavité d'extraction	6	12	19,2						
Drift	325								
Lentille einzel		63,5	14						
Drift	250								
Paire de fentes				4,6 x 4,6					
Drift	125								
Secteur d'accélération	89	52 (entrée) 25,4 (sortie)	167						
Secteur d'accélération	1669	25,4 (entrée) 25,4 (sortie)	2 833						
Drift	100								
Triplet quadrupolaire électrostatique^d	140 (Q1 et Q3) 217 (Q2)	44	21,6 (Q1 et Q3) - 26,42 (Q2)		14				
Drift	1200								
Aimant de déflexion						1200	30	- 8 - 8	32
Drift	1200								
Paire de fentes				4,6 x 4,6					
Drift	2613								
Triplet	152	52	21,4		119				



DEN-DANS

DMN/SRMP/NT/2006-25

Date : 27 Avril 2006

DOB : DEN/DSOE

E-OTP : A-INVSC-02-01

Document Technique DMN

Page 18/40

quadrupolaire magnétique	(Q1 et Q3) 281 (Q2)		(Q1 et Q3) - 21,3 (Q2)						
Drift	3190								
Paire de fentes				2 x 2					
Drift	3590								
Triplet quadrupolaire magnétique	152 (Q1 et Q3) 281 (Q2)	52	22 (Q1 et Q3) - 21,72 (Q2)		119				
Drift	2240								

a Pour une lentille quadrupolaire magnétique, la valeur de la tension en kV représente également le gradient de champ magnétique en G/mm.

b Pour un doublet ou un triplet, l'espacement correspond à la distance entre les quadrupôles.

c Le gap représente la distance séparant les pôles.

d Q1, Q2 et Q3 représentent les trois quadrupôles du triplet. En règle générale, Q1 et Q3 sont identiques.

 DEN-DANS		DMN/SRMP/NT/2006-25 Date : 27 Avril 2006 DOB : DEN/DSOE E-OTP : A-INVSC-02-01
	Document Technique DMN	Page 19/40

Tableau 2 : Description de la ligne de faisceau « quinze degrés » de l'accélérateur 3UH-4 Pelletron NEC ou ÉPIMÉTHÉE (cas d'un faisceau de protons de 3 MeV)^a.

Élément	Longueur (mm)	Diamètre (mm)	Tension (kV)	Ouverture (mm)	Espacement (mm)	Rayon de courbure (mm)	Angle de déflexion (degrés)	Inclinaison des faces d'entrée/sortie (°)	Gap (mm)
Cavité d'extraction	6	12	19,2						
Drift	325								
Lentille einzel		63,5	14						
Drift	250								
Paire de fentes				4,6 x 4,6					
Drift	125								
Secteur d'accélération	89	52 (entrée) 25,4 (sortie)	167						
Secteur d'accélération	1669	25,4 (entrée) 25,4 (sortie)	2 833						
Drift	100								
Triplet quadrupolaire électrostatique	140 (Q1 et Q3) 217 (Q2)	44	21,6 (Q1 et Q3) - 26,45 (Q2)		14				
Drift	1200								
Aimant de distribution						1200	30	- 8 - 8	32
Drift	1200								
Paire de fentes				4,6 x 4,6					
Drift	2613								
Triplet	152	52	17,99		119				



DEN-DANS

DMN/SRMP/NT/2006-25

Date : 27 Avril 2006

DOB : DEN/DSEO

E-OTP : A-INVSC-02-01

Document Technique DMN

Page 20/40

quadrupolaire magnétique	(Q1 et Q3) 281 (Q2)		(Q1 et Q3) - 18,44 (Q2)						
Drift	1721								
Aimant de déflexion						906	15	- 7,5 0	32
Drift	3300								
Paire de fentes				2 x 2					
Drift	4300								
Triplet quadrupolaire magnétique	152 (Q1 et Q3) 281 (Q2)	52	19,25 (Q1 et Q3) - 19,35 (Q2)		119				
Drift	2960								

a Les lignes faisceau « zéro degré » et « quinze degrés » divergent après la sortie du second triplet quadrupolaire magnétique.

Figure 2 : Simulation de la ligne « zéro degré » de la machine 3 UH-4 Pelletron de NEC pour un faisceau d'ions $^{131}\text{Xe}^{17+}$ de 51 MeV.

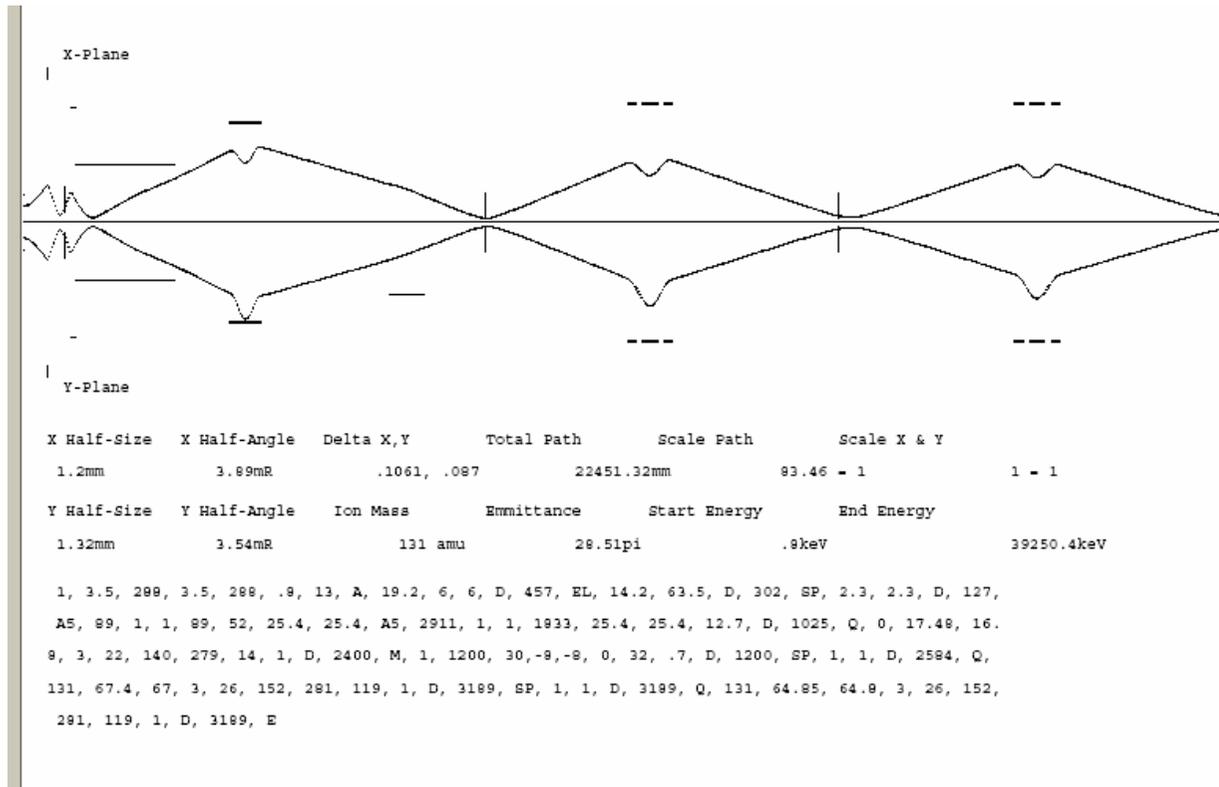


Figure 3 : Simulation de la ligne « 15 degrés » de la machine 3UH-4 Pelletron de NEC pour un faisceau d'ions $^{131}\text{Xe}^{17+}$ de 51 MeV.

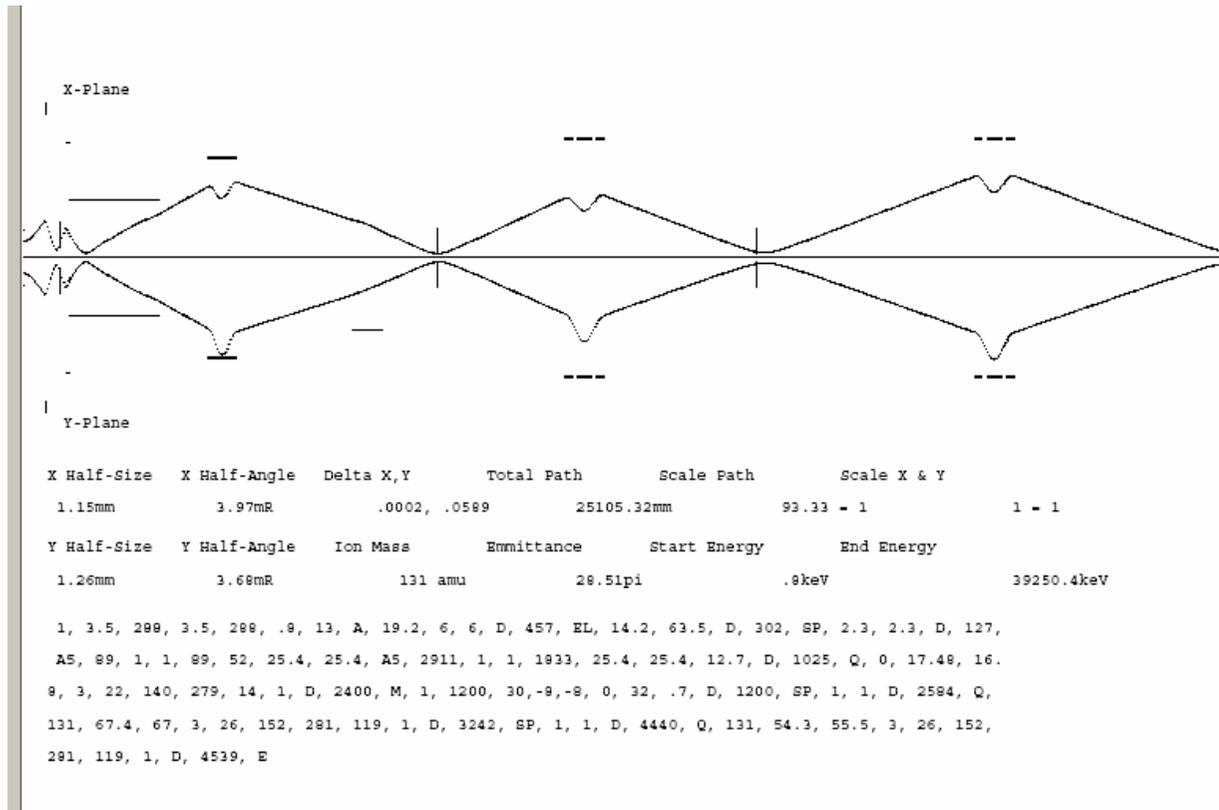
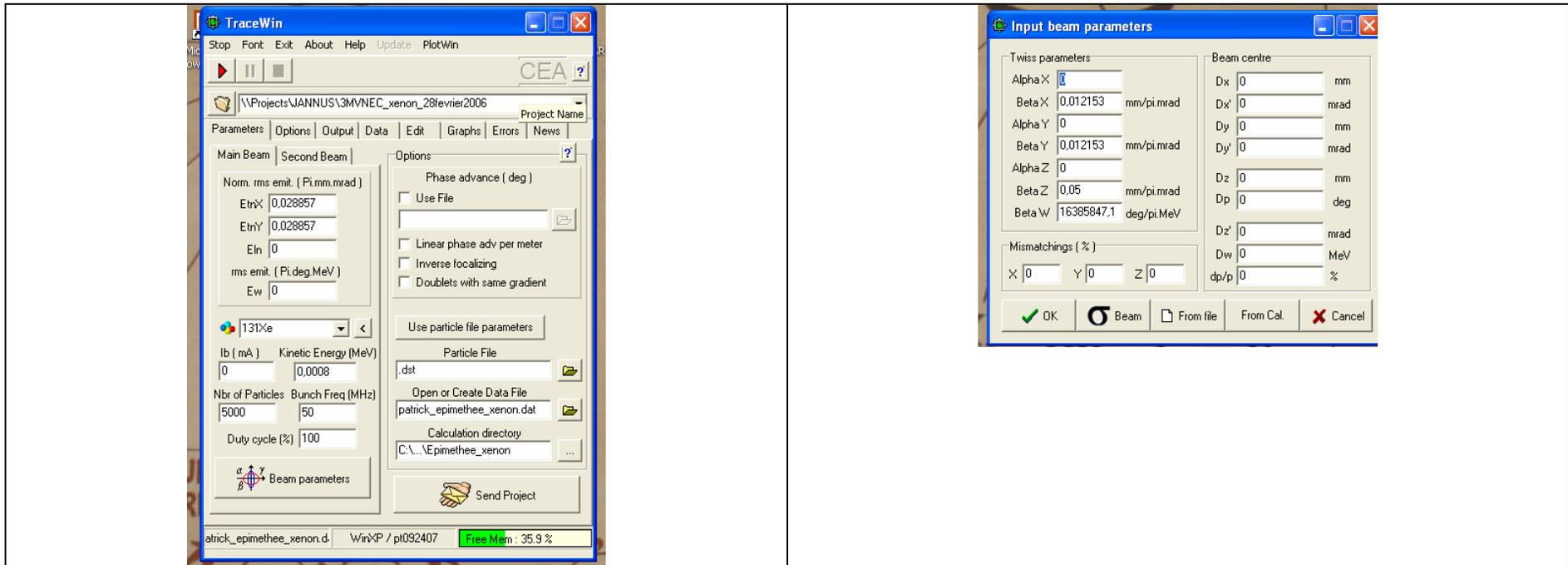


Figure 4 : Cartouches contenant les principaux menus disponibles dans TraceWin pour des calculs d'enveloppe faisceau (a et b) ou multiparticules (c et d)

a) et b)





DEN-DANS

DMN/SRMP/NT/2006-25
Date : 27 Avril 2006

DOB : DEN/DSEO
E-OTP : A-INVSC-02-01

Document Technique DMN

Page 24/40

c) et d)

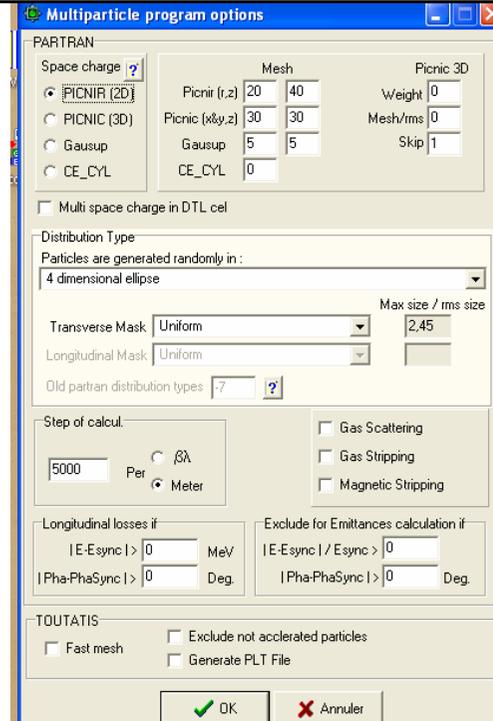
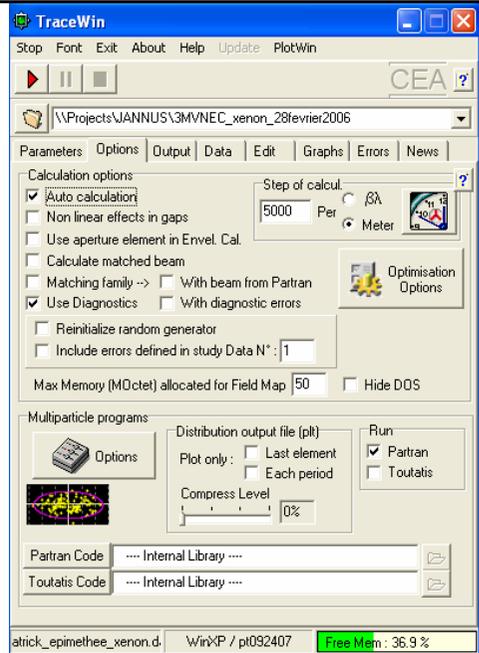


Figure 5 : Définition des paramètres de *twiss*.

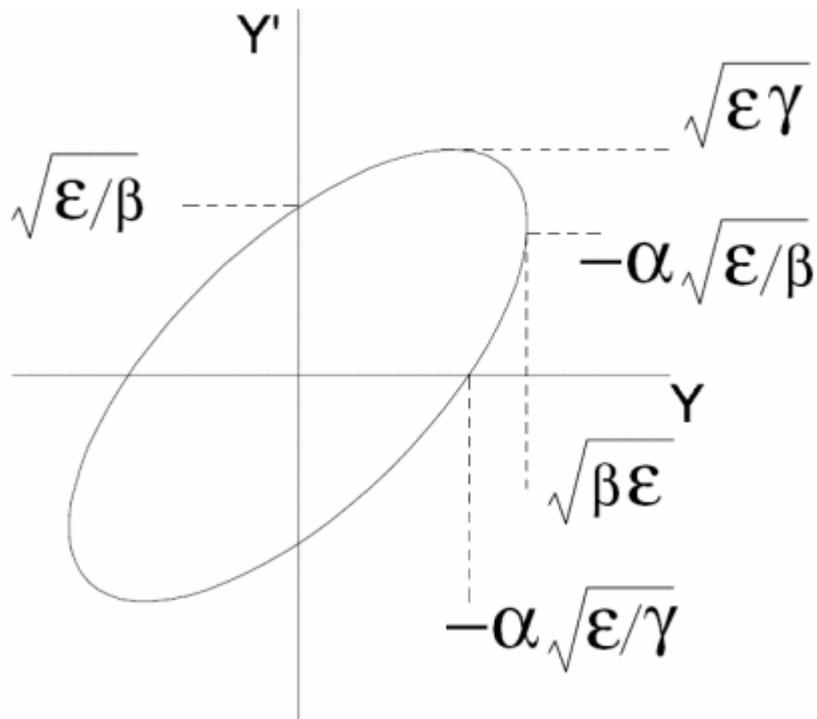


Tableau 3 : Tailles et divergences initiales des faisceaux de JANNUS.

	X (mm)	Y (mm)	X' (mrad)	Y' (mrad)
3MV NEC ligne 0° 3 MeV protons 3 MeV hélions-4	3,5	3,5	32	32
3MV NEC lignes 0° et 15° 30 MeV ⁵⁶Fe¹⁰⁺ 51 MeV ¹³¹Xe¹⁷⁺	3,5	3,5	92	92
2,5 MV Yvette *	2,5	2,5	30	30
2,25 MV Tandetron *	8	15	7	3.9

* Données estimées en sortie de cuve.

Tableau 4 : Différents faisceaux d'ions issus des trois machines de l'ensemble JANNUS.

Machine	Ions	Etat de charge final	Energie source (keV)	Energie finale (MeV)	β	γ
3MV NEC^a	¹ H	1+	0,8	3	0,0013106	1,000000
3MV NEC	⁴ He	1+	0,8	2,5	0,0006553	1,000000
3MV NEC	⁵⁶ Fe	10+	0,8	30	0,0001751	1,000000
3MV NEC	¹³¹ Xe	17+	0,8	51	0,0001145	1,000000
Yvette	⁴ He	1+	2	2,5	0,0366322	1,000671
Tandetron^b	¹ H	1+	20	4	0,0926731	1,004322
Tandetron^b	¹²⁷ I	5+	20	12	0,0142434	1,000101

a L'énergie des ions est le produit de la tension d'accélération par l'état de charge.

b La source d'ions du Tandetron produit des ions négatifs qui sont épluchés dans le terminal. L'énergie de sortie machine est donc le produit de la tension d'accélération V par (l'état de charge final + 1), ainsi à 2 MV de tension on obtient des protons de 4 MeV.

 DEN-DANS		DMN/SRMP/NT/2006-25 Date : 27 Avril 2006 DOB : DEN/DSOE E-OTP : A-INVSC-02-01
	Document Technique DMN	Page 28/40

Tableau 5 : Description de la ligne « triple faisceau » issue de la machine Yvette de l'ensemble expérimental JANNUS pour des hélions-4 de 2,5 MeV.

Elément	Longueur (mm)	Diamètre (mm)	Tension (kV)	Ouverture (mm)	Espacement (mm)	Rayon de courbure (mm)	Angle de déflexion (degrés)	Inclinaison des faces d'entrée et de sortie (°)	Gap (mm)
Drift	440			30					
Triplet quadrupolaire magnétique	140 (Q1, Q2, Q3)	50	2,80 (Q1 et Q3) -2,80 (Q2)		14				
Drift	1620	300							
Paire de fentes		100							
Drift	412	300							
Aimant de déflexion				26		610	90	20,5 20,5	32
Drift	200								
Triplet quadrupolaire magnétique	152 (Q1 et Q3) 281 (Q2)	60	1,40 (Q1 et Q3) -1,40 (Q2)		119 + 543 (entre Q1 et Q2)				
Drift	634	60							
Drift	710	100							
Aimant de distribution				10		3380	17,42	0,34 7,5	20
Drift	200	60							
Drift	8260	200							
Triplet quadrupolaire magnétique	152 (Q1 et Q3) 281 (Q2)	200	1,40 (Q1 et Q3) -1,40(Q2)		119				
Drift	1242	200							

 DEN-DANS					DMN/SRMP/NT/2006-25 Date : 27 Avril 2006 DOB : DEN/DSOE E-OTP : A-INVSC-02-01
	Document Technique DMN				Page 29/40

Défecteur électrostatique	660			300		2674	15		600
Drift	1372			200					

Tableau 6 : Description de la ligne « triple faisceau » issue de la machine Tandatron de l'ensemble expérimental JANNUS pour des protons de 4 MeV.

Élément	Longueur (mm)	Diamètre (mm)	Tension (kV)	Ouverture (mm)	Espacement (mm)	Rayon de courbure (mm)	Angle de déflexion (degrés)	Inclinaison des faces d'entrée/sortie (°)	Gap (mm)
Drift	1007								
Triplet quadrupolaire magnétique	152 (Q1 et Q3) 281 (Q2)	52	1,66 (Q1 et Q3) -1,52 (Q2)		119				
Drift	2480	60							
Drift	100	60							
Aimant de déflexion				27,5		1300	90	26,57 26,57	40
Drift	218	60							
Triplet quadrupolaire électrostatique	240 (Q1 et Q3) 502 (Q2)	50	4,26 (Q1 et Q3) -2,54 (Q2)		20				
Drift	2300	60							

Tableau 7 : Paramètres d'entrée des cartouches de la figure 4 pour le calcul de l'optique faisceau des lignes « triple faisceau » : émittance (moyenne quadratique) et paramètres de *twiss* (voir figure 5).

Machine	Ions	Energie (keV)	EtnX (Pi mm mrad)	EtnY (Pi mm mrad)	β X (mm/pi mrad)	β Y (mm/pi mrad)	β Z (mm/pi mrad)	β W (deg/pi MeV)
3MV NEC	¹ H	0,8	0,03670	0,03670	0,10938	0,10938	0,05	1436831,83
3MV NEC	⁴ He	0,8	0,01835	0,01835	0,10938	0,10938	0,05	2863283,52
3MV NEC	⁵⁶ Fe	0,8	0,01372	0,01372	0,03922	0,03922	0,05	10699040,4
3MV NEC	¹³¹ Xe	0,8	0,00897	0,00897	0,03922	0,03922	0,05	16385847,1
2,5 MV Yvette	⁴ He	2 500	0,6873	0,6873	0,08333	0,08333		
Tandetron	¹ H	4 000	1,3030	1,3612	1,14286	3,84615		
Tandetron	¹²⁷ I	12 000	0,199427	0,20833	1,14286	3,84615		

Tableau 8 : Bilan des calculs d'optimisation de la ligne triple faisceau d'Épiméthée.

Faisceau	V_{11} (V_{13}) (V)	V_{12} (V)	Q_{21} (Q_{23}) (T/m)	Q_{22} (T/m)	Q_{31} (Q_{33}) (T/m)	Q_{32} (T/m)
$^1\text{H}^+$ 3 MeV	33515,8	- 32324,5	1,81473	- 1,86121	1,88475	- 1,90419
$^4\text{He}^+$ 2,5 MeV	33655,2	- 32451,9	3,61297	- 3,70553	3,74242	- 3,78241
$^{56}\text{Fe}^{10+}$ 30 MeV	33676,1	- 32470,2	4,26789	- 4,37737	4,53353	- 4,66440
$^{131}\text{Xe}^{17+}$ 51 MeV	33813,6	- 32593,3	5,01495	- 5,14343	5,60593	- 5,48853

 DEN-DANS		DMN/SRMP/NT/2006-25 Date : 27 Avril 2006 DOB : DEN/DSEO E-OTP : A-INVSC-02-01
	Document Technique DMN	Page 32/40

Tableau 9 : Bilan des calculs d'optimisation de la ligne triple faisceau de Epiméthée (suite). Le facteur de champ de la lentille einzel désigne la fraction de la tension maximale appliquée.

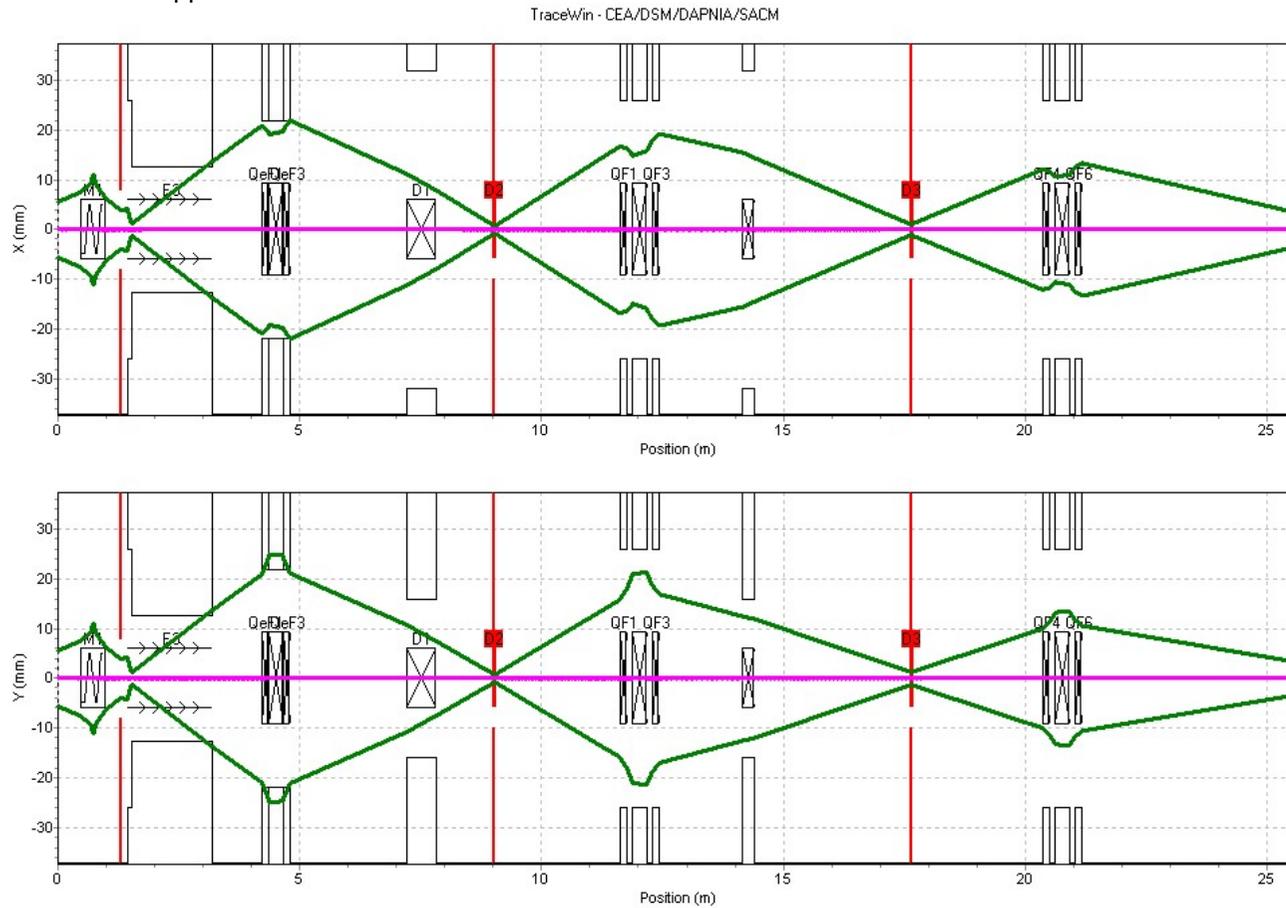
Facteur de champ de la lentille einzel	Perte de faisceau (%)			
	$^1\text{H}^+$ 3 MeV	$^4\text{He}^+$ 2,5 MeV	$^{56}\text{Fe}^{10+}$ 30 MeV	$^{131}\text{Xe}^{17+}$ 51 MeV
0,60				29
0,65			29,5	10
0,70	30	30	7,5	0
0,75	7	7	0	0
0,80	0	0	0	0
0,85	0	0	6	6
0,90	18	18	42	40
0,95	52	52	67	65

Tableau 10 : Bilan de l'ajustement des éléments d'optique des lignes triple-faisceau issues d'Yvette et du Tandetron.

	Q_{11} (Q13) (T/m)	Q_{12} (T/m)	Q_{21} (T/m)	Q_{22} (T/m)	Q_{23} (T/m)	Q_{31} (T/m)	Q_{32} (T/m)	Q_{33} (T/m)
Yvette $^4\text{He}^+$ 2,5 MeV	5,820	- 10,174	2,227	- 1,797	3,256	1,322	- 1,329	1,247
	Q_{11} (Q13) (T/m)	Q_{12} (T/m)	Q_{21} (Q23) (T/m)	Q_{22} (T/m)				
Tandetron Protons 4 MeV	2,803	- 2,541	3,318	- 2,078				
Tandetron $^{127}\text{I}^{5+}$ 12 MeV	10,784	- 9,805	2,822	- 2,843				

Figure 6 : Optimisation de l'optique de la ligne triple faisceau d'Épiméthée pour des protons de 3 MeV :

a) calcul d'enveloppe



b) calcul multiparticules (image du faisceau sur la cible).

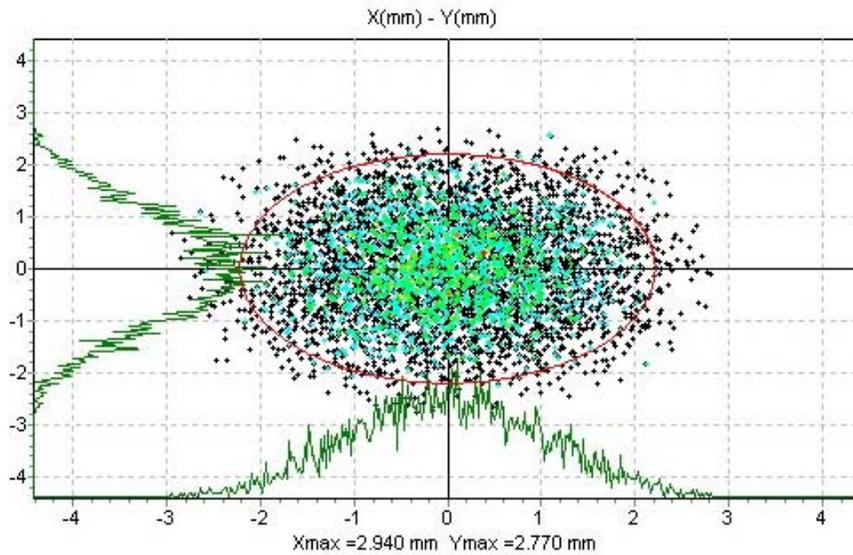


Figure 7 : Optimisation de l'optique de la ligne triple faisceau d'Épiméthée pour des hélions-4 de 2,5 MeV : calcul d'enveloppe.

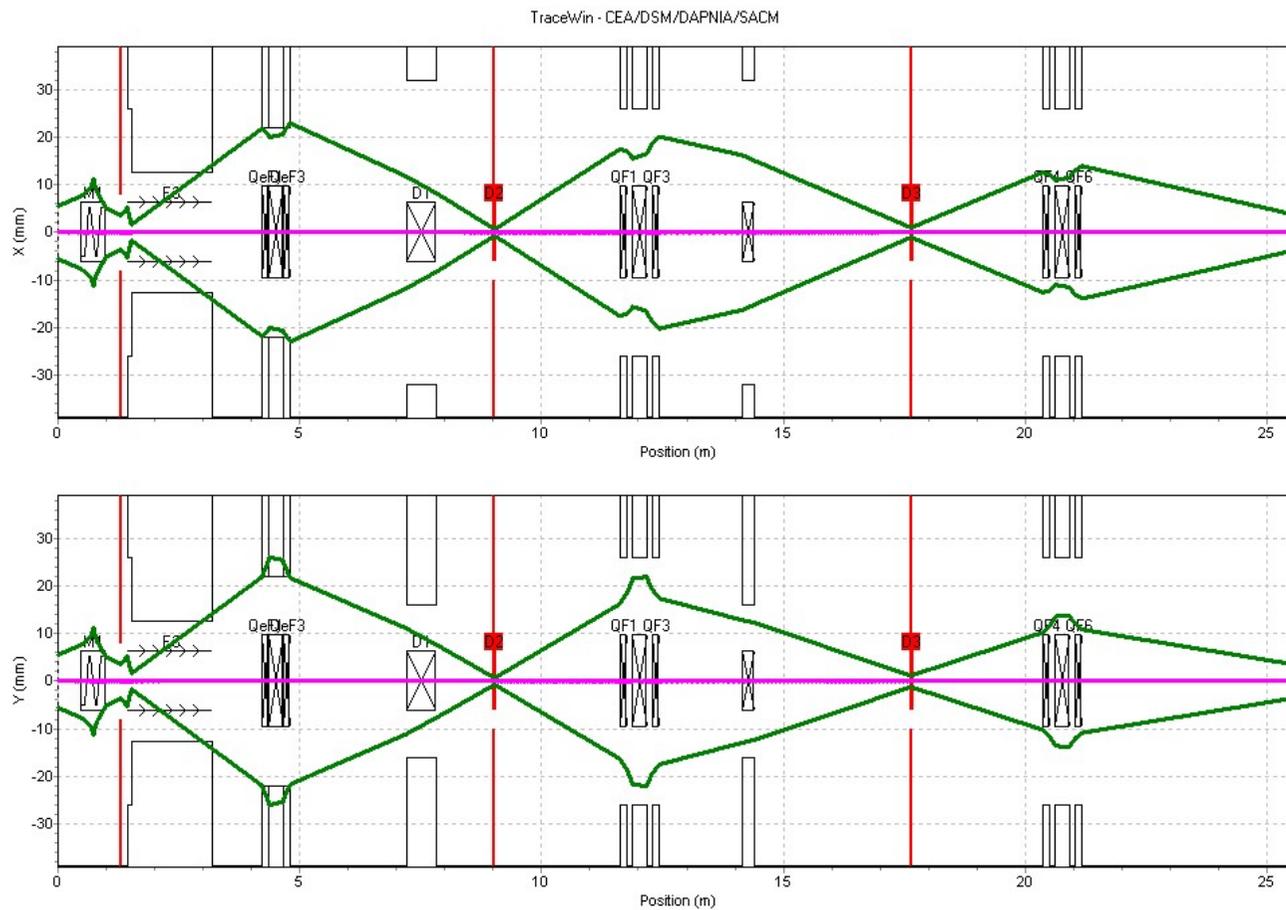


Figure 8 : Optimisation de l'optique de la ligne triple faisceau d'Épiméthée pour des ions $^{56}\text{Fe}^{10+}$ de 30 MeV : calcul d'enveloppe.

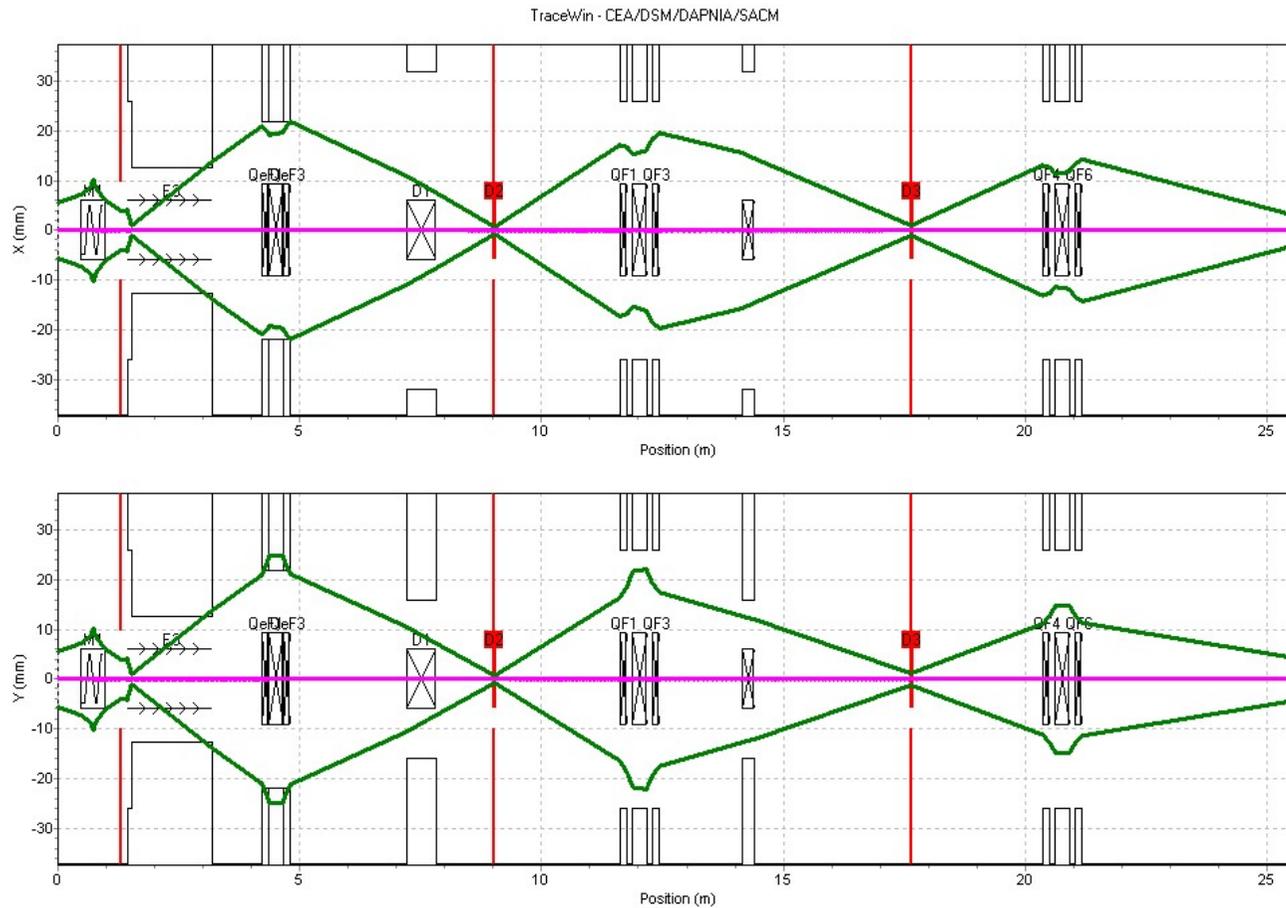


Figure 9 : Optimisation de l'optique de la ligne triple faisceau d'Épiméthée pour des ions $^{131}\text{Xe}^{17+}$ de 51 MeV : calcul d'enveloppe.

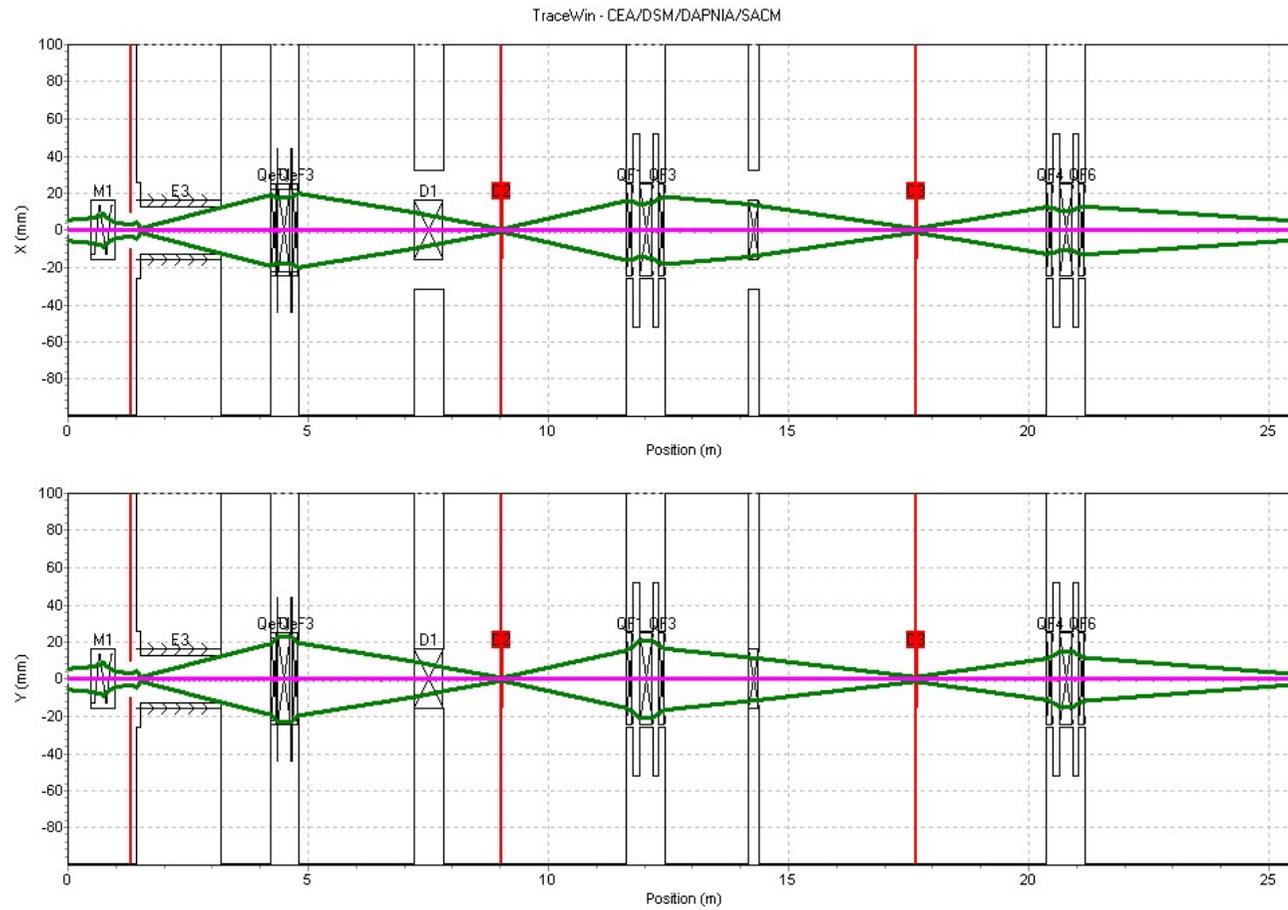


Figure 10 : Optimisation de l'optique de la ligne triple faisceau de Yvette.

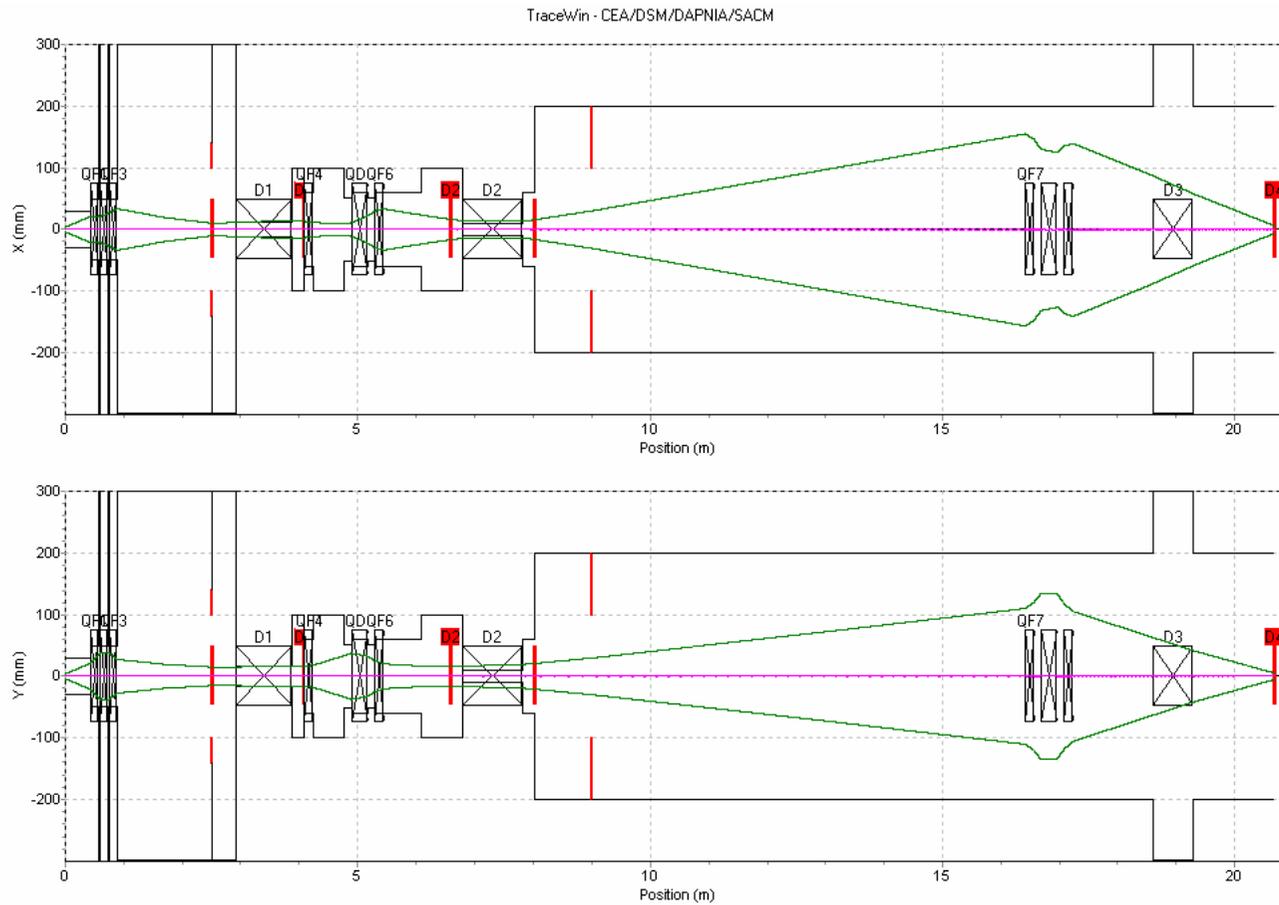
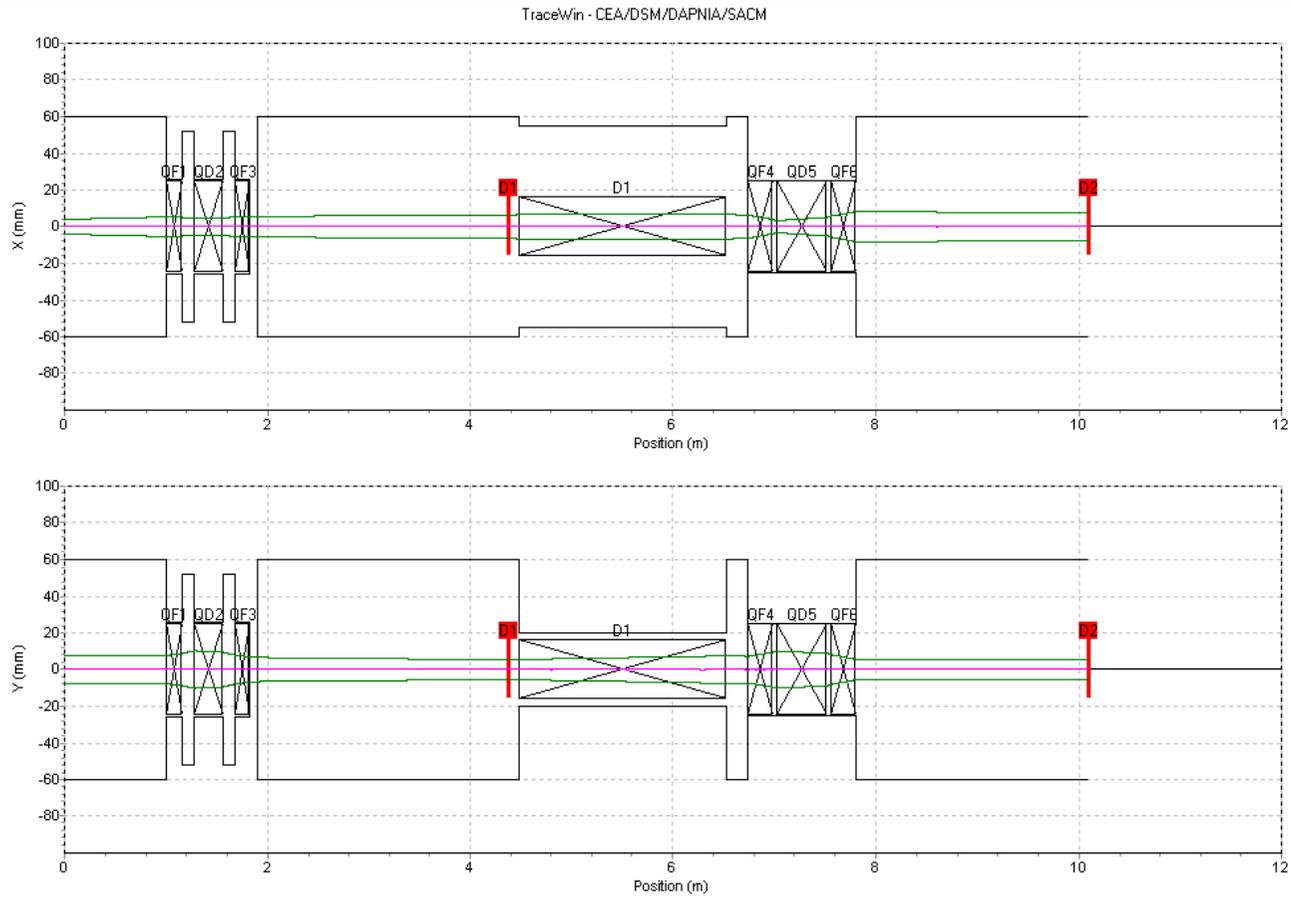


Figure 11 : Optimisation de l'optique de la ligne triple faisceau du Tandatron :
a) protons de 4 MeV





DEN-DANS

DMN/SRMP/NT/2006-25

Date : 27 Avril 2006

DOB : DEN/DSEO

E-OTP : A-INVSC-02-01

Document Technique DMN

Page 40/40

b) $^{127}\text{I}^{5+}$ de 12 MeV

TraceWin - CEA/DSM/DAPNIA/SACM

