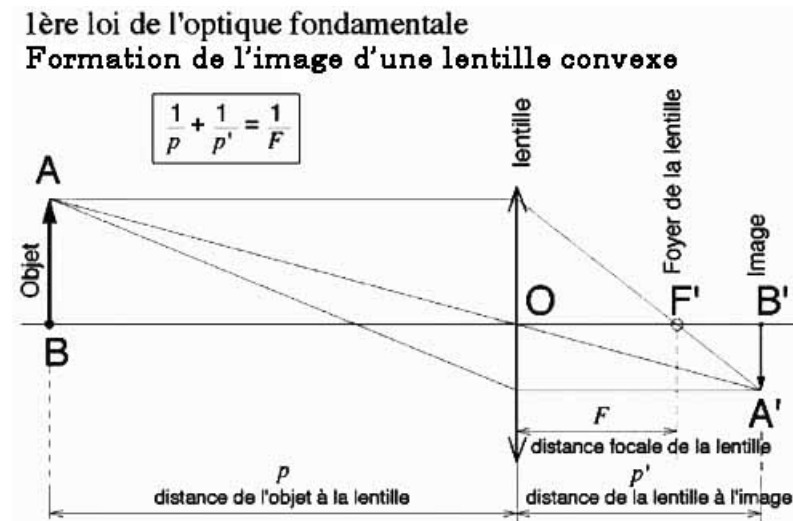


- Transport de particules chargées
- Utilisation de codes de simulations
- Application au projet SPIRAL2
- Autres projets et perspectives

IPHC: E. Bouquerel, D. Boutin, F. Osswald
GANIL: M.-H. Stodel, F. Varenne
CEA/IRFU : J. Payet, D. Uriot
CENBG : L. Serani
IPNO: L. Perrot
JINR/FLNR, Russie: N. Kazarinov
TRIUMF, Canada : R. Baartman
INFN Legnaro, Italie: M. Bisoffi, M. Communian

Introduction

- Production, accélération et transport d'ions dans accélérateurs et lignes de transfert vers détecteurs => éléments électromagnétiques
- Evolution des ions dans ces éléments EM (position, taille, distribution en énergie) => nécessité de codes de simulations spécifiques
- Analogie du traitement avec l'optique de verre: plan focal objet ou image, achromatisme, aberrations, lentilles minces ou épaisses, etc
- Deux types de calculs: matriciel ou « tracking »



Calculs matriciels

- Utilisation du formalisme matriciel pour représenter les éléments EM
- Transport par multiplication de matrices => matrice de transfert
- L'ordre de calcul dépend de l'ordre des matrices, le temps de calcul aussi
- 1^{er} ordre linéaire, ordres supérieurs non linéaires
- Utilisé par: COSY Infinity, Transport, GICOSY, Galopr, ...

$$\begin{pmatrix} x \\ x' \\ y \\ y' \\ \varphi \\ \delta \end{pmatrix}_f = \begin{pmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} & a_{03} & a_{04} & a_{05} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ \hline a_{20} & a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ a_{30} & a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \\ \hline a_{40} & a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} \\ a_{50} & a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ x' \\ y \\ y' \\ \varphi \\ \delta \end{pmatrix}_i$$

- Transport par les équations du mouvement dans un champ EM (ou vide)
- Calculs à un ordre 'infini', mais calculs plus lourds
- Possibilité de suivre l'évolution de chaque ion transporté
- Utilisé par: TraceWin, Zgoubi, Turtle, MAD/MAD-X, ...

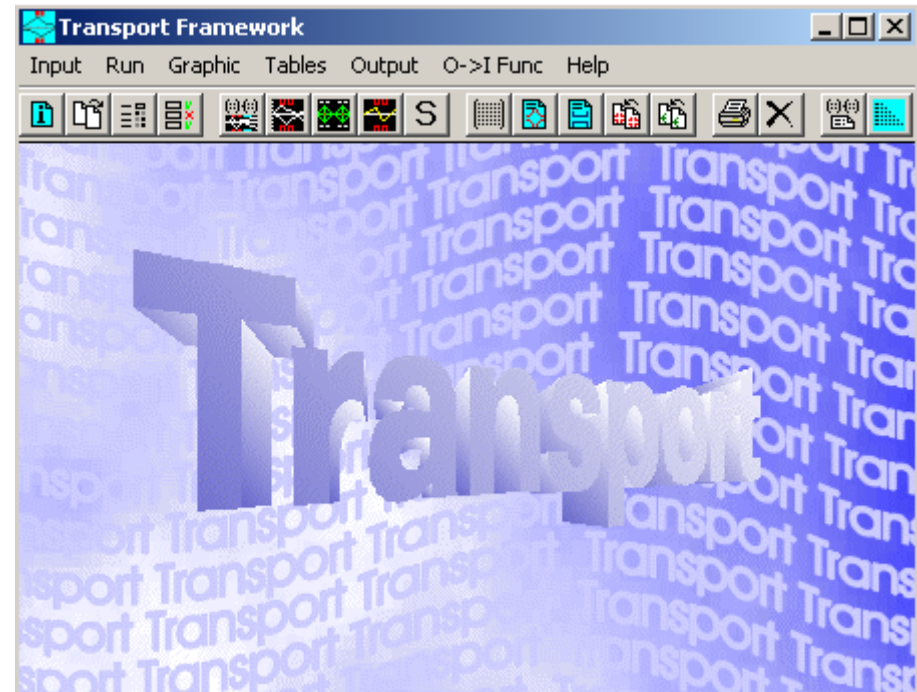
$$\begin{cases} \dot{p}_x = \frac{dp_x}{dt} = q \cdot \left(E_x + \frac{p_z}{\gamma m} \cdot (y' \cdot B_z - B_y) \right) \\ \dot{p}_y = \frac{dp_y}{dt} = q \cdot \left(E_y + \frac{p_z}{\gamma m} \cdot (B_x - x' \cdot B_z) \right) \\ \dot{p}_z = \frac{dp_z}{dt} = q \cdot \left(E_z + \frac{p_z}{\gamma m} \cdot (x' \cdot B_y - y' \cdot B_x) \right) \end{cases}$$

avec :

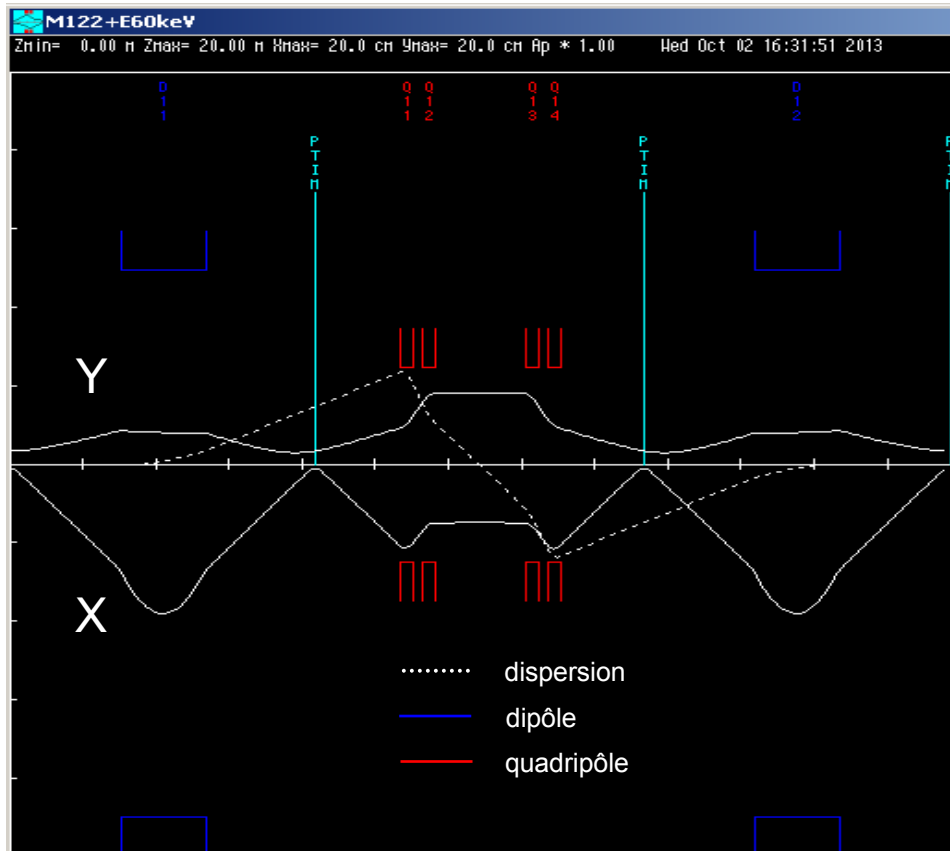
$$\frac{dx}{ds} = x' = \frac{p_x}{p_z} \text{ et } \frac{dy}{ds} = y' = \frac{p_y}{p_z}$$

Le code Transport

- Code créé par une collaboration SLAC/FNAL/CERN en 1973
- Développé par Urs Rohrer (PSI), repris par Davide Reggiani (PSI)
- Logiciel gratuit
- Calculs matriciels 1^{er} ordre, et 2^e ordre pour certains éléments
- Possibilités d'inclure les effets d'espace de charge



Calcul avec Transport



Enveloppes X et Y, dispersion de la section

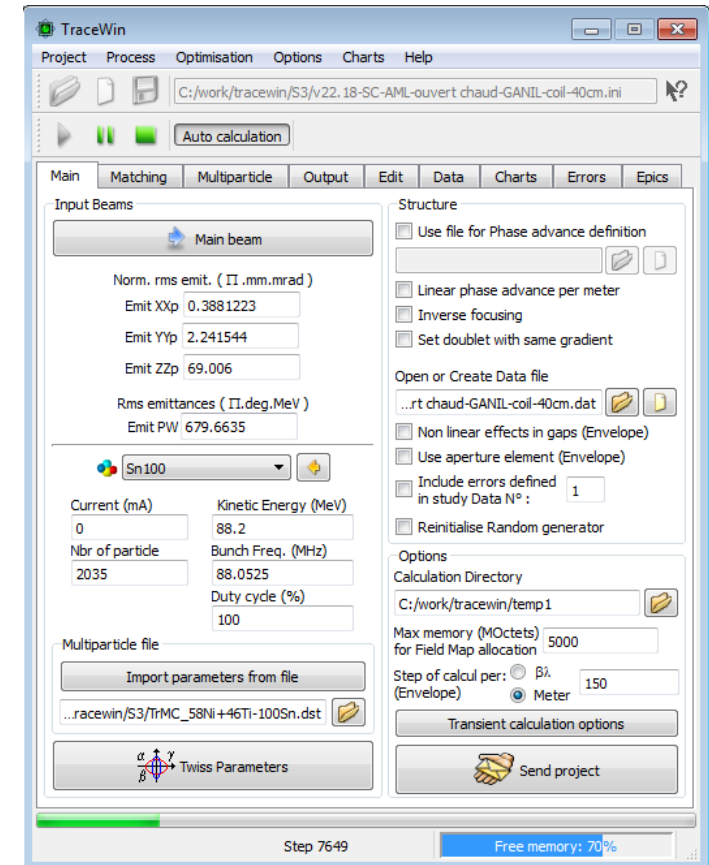
Calcul 1^{er} ordre pour une section de la ligne SPIRAL2

	X	X'	Y	Y'	L	$\delta p/p$	
TRANSFORM 1	-0.99805	0.00039	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	X
	-9.99710	-0.99805	0.00000	0.00000	0.00000	-0.02051	X'
	0.00000	0.00000	-0.03580	0.06936	0.00000	0.00000	Y
	0.00000	0.00000	-14.39821	-0.03580	0.00000	0.00000	Y'
	-0.00205	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000	11.99383	L
	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000	$\delta p/p$
LENGTH	12.85619 M						

Matrice de transfert de la section

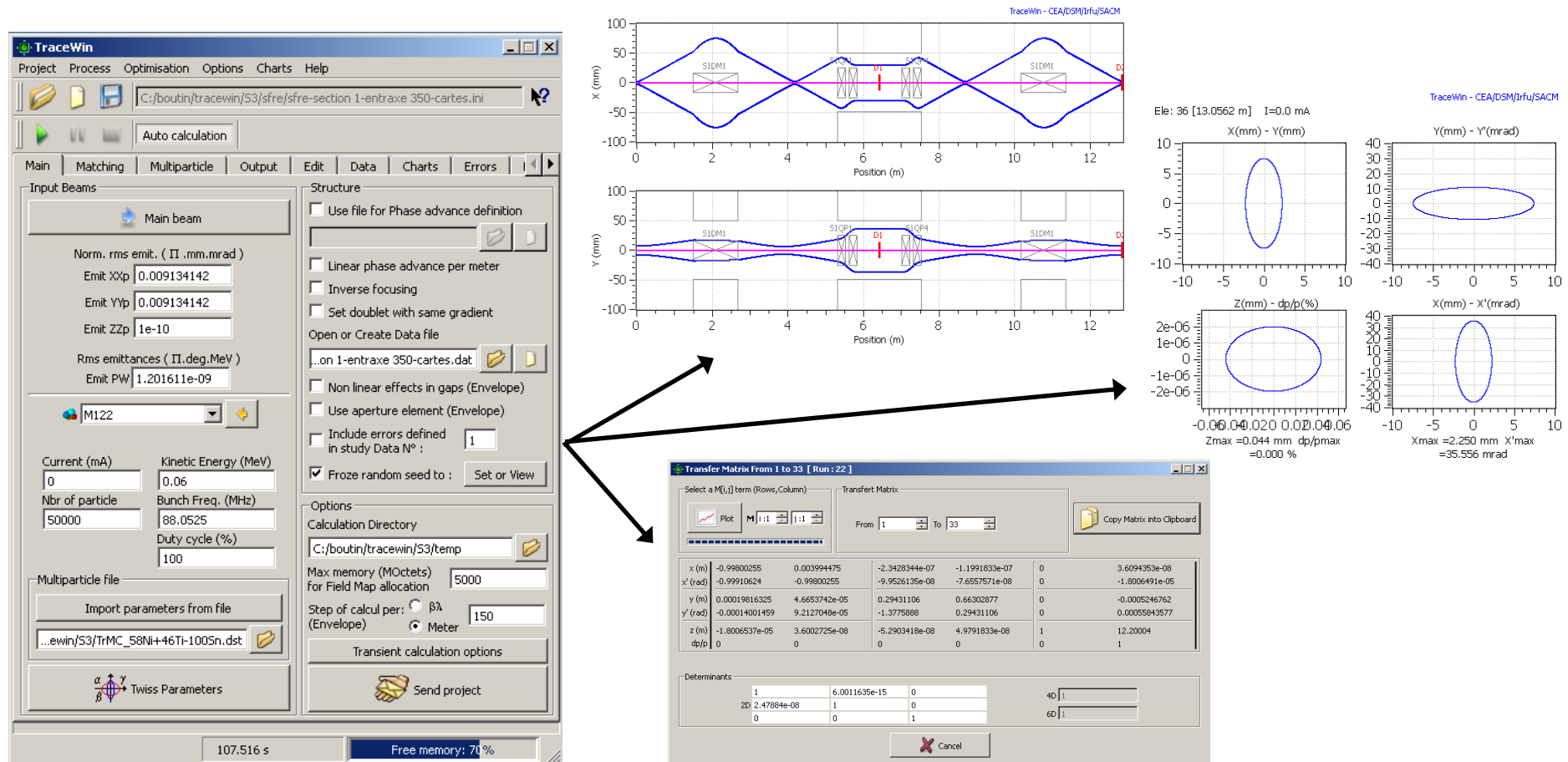
Le code TraceWin

- Code de tracking développé au CEA Saclay (N. Pichoff, D. Uriot)
- Licence commerciale de 1200 € pour deux ans (Enseignement/Education), 2400 € autrement
- Mises à jours régulières, code en constant développement
- Nombreuses fonctionnalités dont gestion de cartes de champ
- Deux modes principaux de calcul: mode enveloppe et mode multiparticules



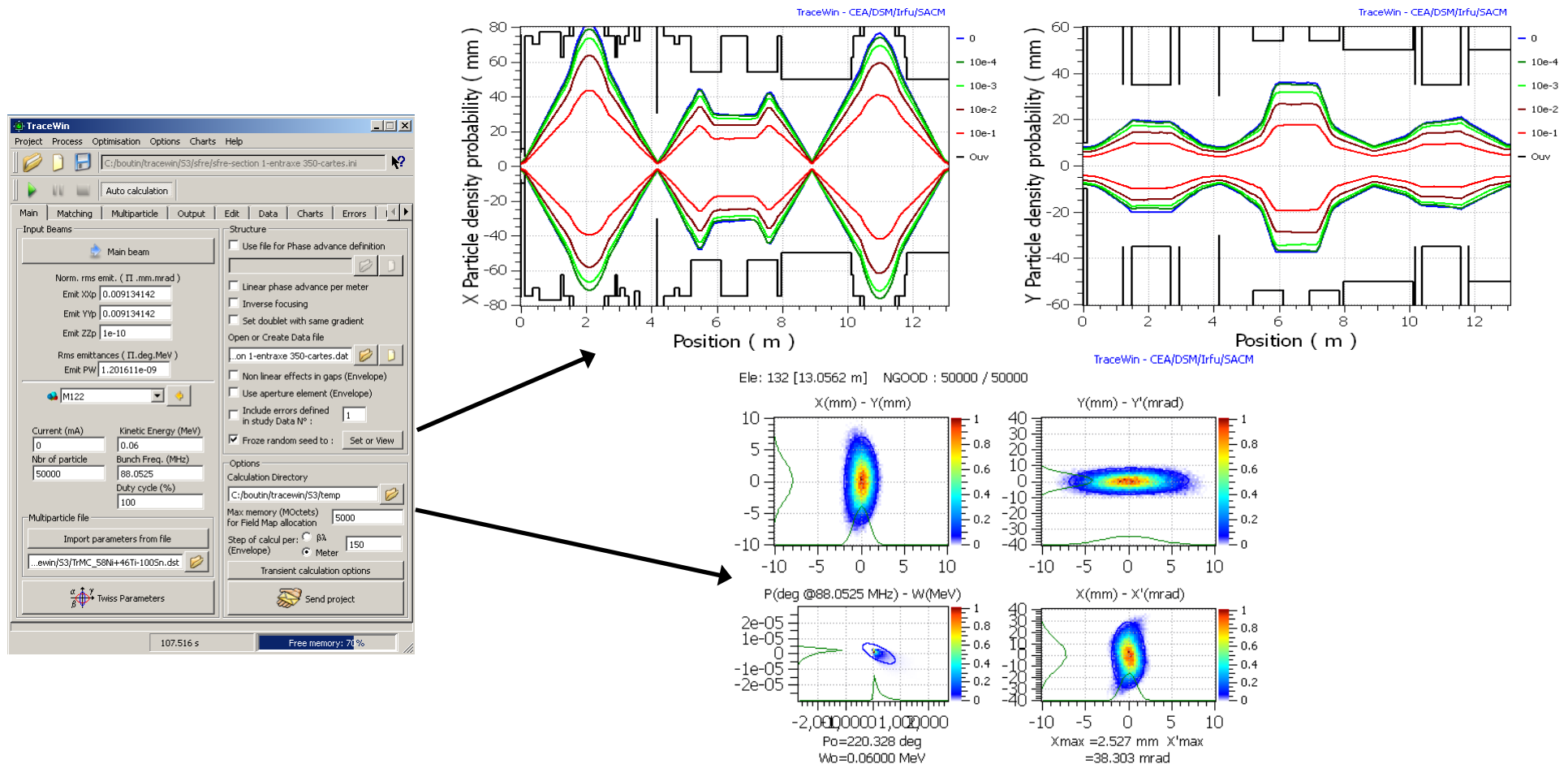
TraceWin: mode enveloppe

- Equivalent à un premier ordre (comparaison avec Transport)
- Utilise les paramètres globaux de la distribution d'entrée: émittance, paramètres de Twiss, énergie (**SPIRAL2: 80 π .mm.mrad, charge 1+, énergie 60 keV, masse 122**)



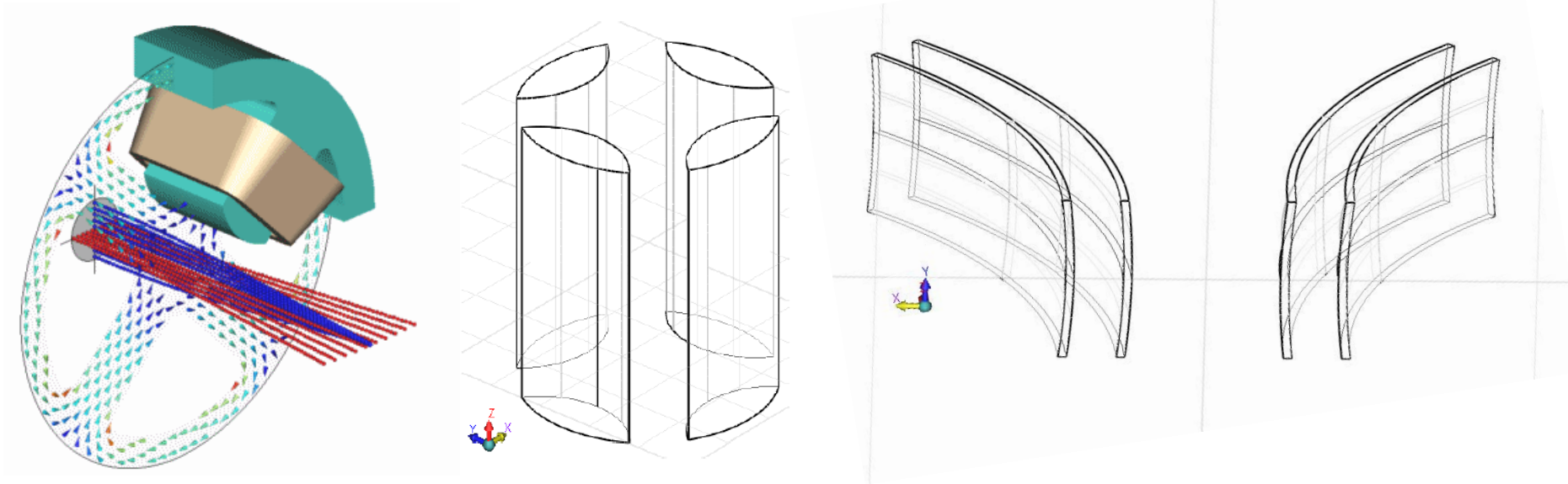
TraceWin: mode multiparticules

- Utilise une distribution de noyaux ou 'particules', générée en interne ou importée
- Les aberrations d'ordre supérieur peuvent être observées et corrigées avec une ré-optimisation des éléments EM



Le code Lorentz

- Code commercial produit par INTEGRATED Engineering Software
- Licence commerciale entre 1500 et 5000 € (minimum tarif université et renouvellement de licence, plus sinon)
- Calculs d'éléments électromagnétiques, possibilités de tracking
- Interface graphique accessible, bon compromis entre vitesse et précision



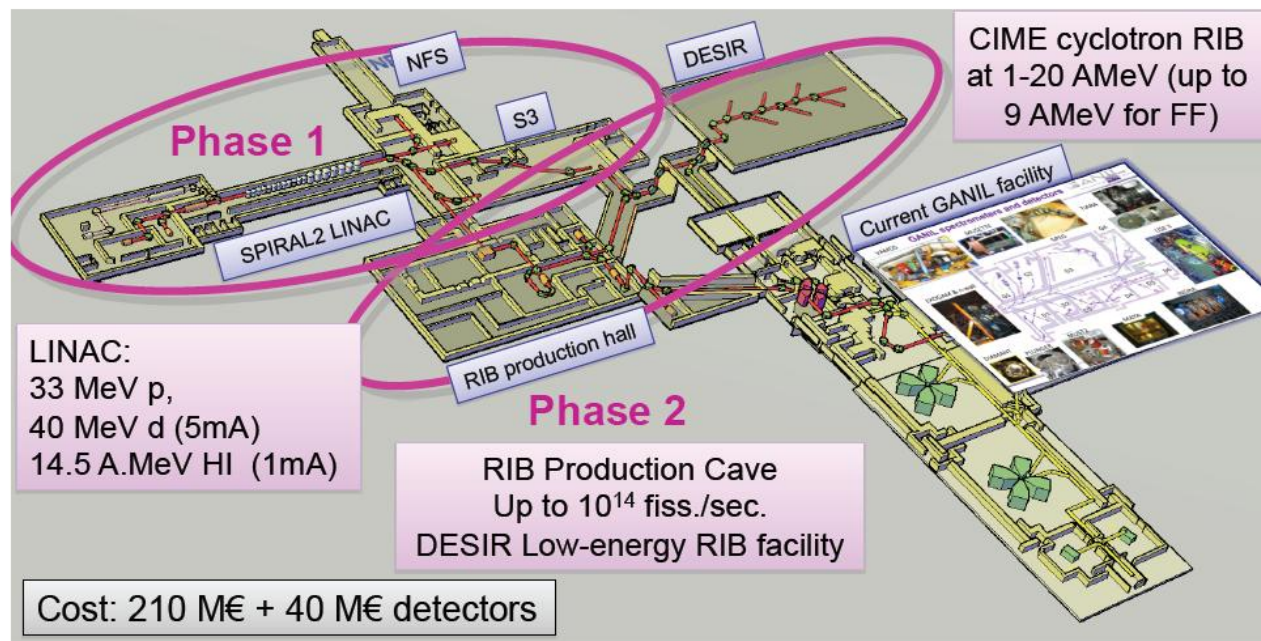
Le projet SPIRAL 2



SPIRAL2 under construction

Phase 1: High intensity stable beams + Experimental rooms (S³ + NFS) (First beam Sept 2014)

Phase 2: High-intensity low-energy (DESIR) & post-accelerated Radioactive Ion Beam facility

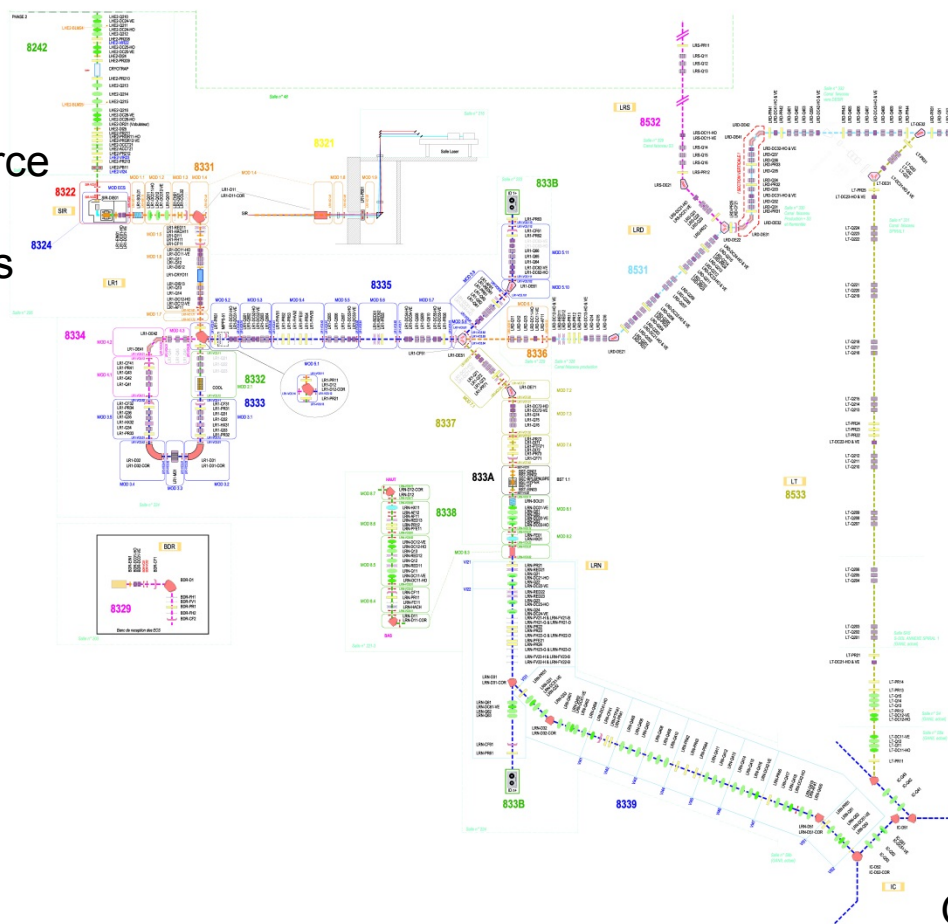


Spécificités de la phase 2

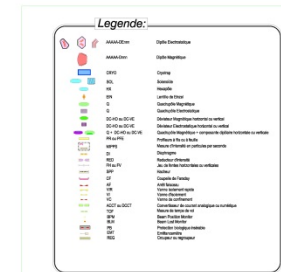
- Ions radioactifs
- E = 15-60 keV
- I jusqu'à 1 pμA
- Produits de fission, fusion, légers (⁶He), lourds (U)
- Faisceaux continus

Vue générale des lignes basse énergie

cible-source
faisceau
radioactifs



DESIR



N° PBS:

8242	USP 3 (Ligne Faisceau Energie Production)
8322	Exposition 10 Transport/Transporteur
8324	Station de Production
8329	Station de Production
8331	Station de Production
8332	Station de Production
8333	Station de Production
8334	Station de Production
8335	Station de Production
8336	Station de Production
8337	Station de Production
8338	Station de Production
8339	Station de Production
833A	Station de Production
833B	Station de Production
833C	Station de Production
833D	Station de Production
833E	Station de Production
833F	Station de Production
833G	Station de Production
833H	Station de Production
833I	Station de Production
833J	Station de Production
833K	Station de Production
833L	Station de Production
833M	Station de Production
833N	Station de Production
833O	Station de Production
833P	Station de Production
833Q	Station de Production
833R	Station de Production
833S	Station de Production
833T	Station de Production
833U	Station de Production
833V	Station de Production
833W	Station de Production
833X	Station de Production
833Y	Station de Production
833Z	Station de Production

SYNOPSIS DES LIGNES DE FAISCEAU
SPIRAL2 PHASE2

N°	Nom	Longueur (m)	Énergie (MeV)	Intensité (pA)	État
8242	USP 3 (Ligne Faisceau Energie Production)	100	10	10	Actif
8322	Exposition 10 Transport/Transporteur	100	10	10	Actif
8324	Station de Production	100	10	10	Actif
8329	Station de Production	100	10	10	Actif
8331	Station de Production	100	10	10	Actif
8332	Station de Production	100	10	10	Actif
8333	Station de Production	100	10	10	Actif
8334	Station de Production	100	10	10	Actif
8335	Station de Production	100	10	10	Actif
8336	Station de Production	100	10	10	Actif
8337	Station de Production	100	10	10	Actif
8338	Station de Production	100	10	10	Actif
8339	Station de Production	100	10	10	Actif
833A	Station de Production	100	10	10	Actif
833B	Station de Production	100	10	10	Actif
833C	Station de Production	100	10	10	Actif
833D	Station de Production	100	10	10	Actif
833E	Station de Production	100	10	10	Actif
833F	Station de Production	100	10	10	Actif
833G	Station de Production	100	10	10	Actif
833H	Station de Production	100	10	10	Actif
833I	Station de Production	100	10	10	Actif
833J	Station de Production	100	10	10	Actif
833K	Station de Production	100	10	10	Actif
833L	Station de Production	100	10	10	Actif
833M	Station de Production	100	10	10	Actif
833N	Station de Production	100	10	10	Actif
833O	Station de Production	100	10	10	Actif
833P	Station de Production	100	10	10	Actif
833Q	Station de Production	100	10	10	Actif
833R	Station de Production	100	10	10	Actif
833S	Station de Production	100	10	10	Actif
833T	Station de Production	100	10	10	Actif
833U	Station de Production	100	10	10	Actif
833V	Station de Production	100	10	10	Actif
833W	Station de Production	100	10	10	Actif
833X	Station de Production	100	10	10	Actif
833Y	Station de Production	100	10	10	Actif
833Z	Station de Production	100	10	10	Actif

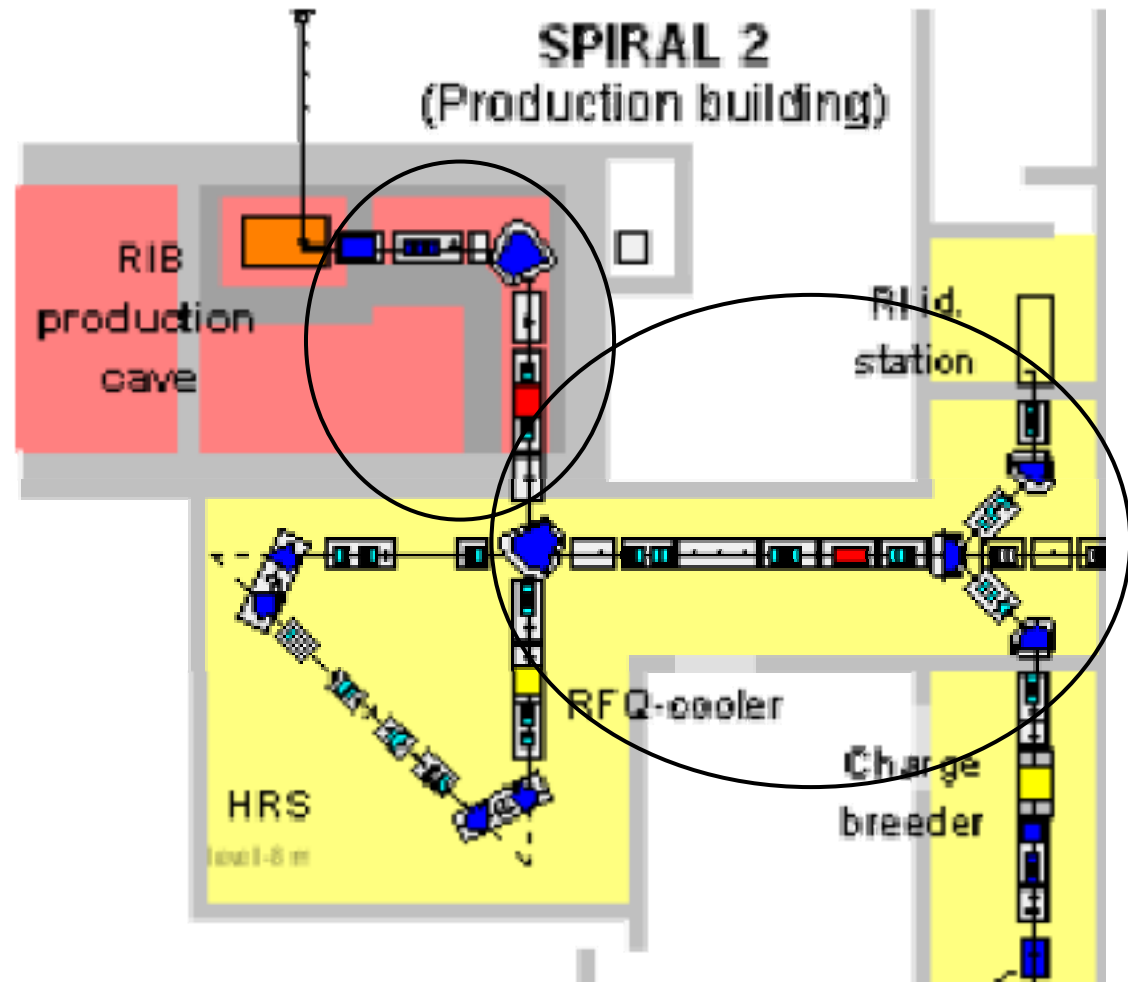
GANIL

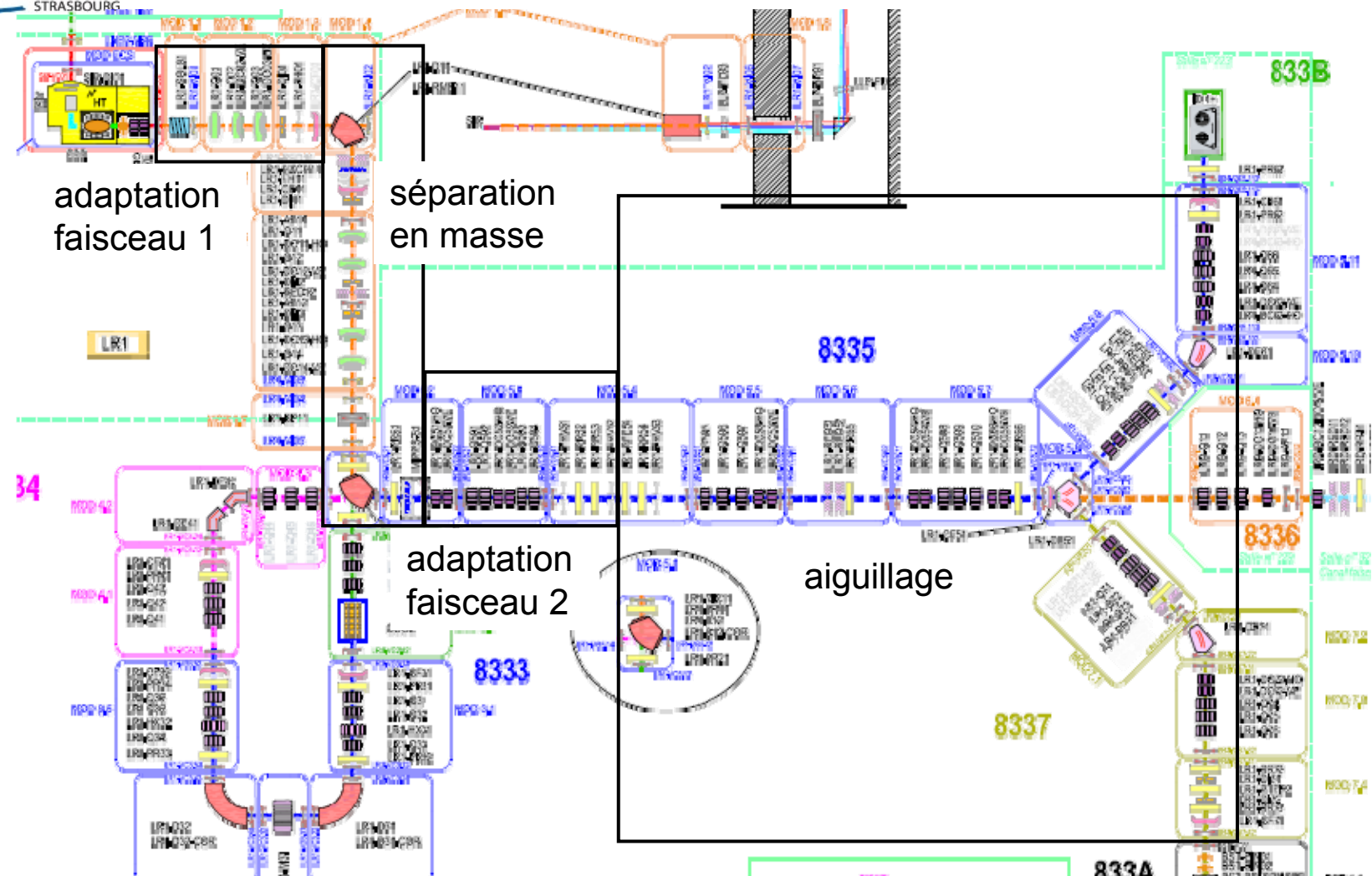
Lignes de faisceaux radioactifs: lots IPHC

Deux zones prises en charge pour les calculs:

- Zone Production (études mécaniques faites en collaboration avec le GANIL)
- Zone Transport (jusqu'aux interfaces avec HRS, station IBE et booster de charge)

Du point de vue optique, les deux zones forment un ensemble **continu**

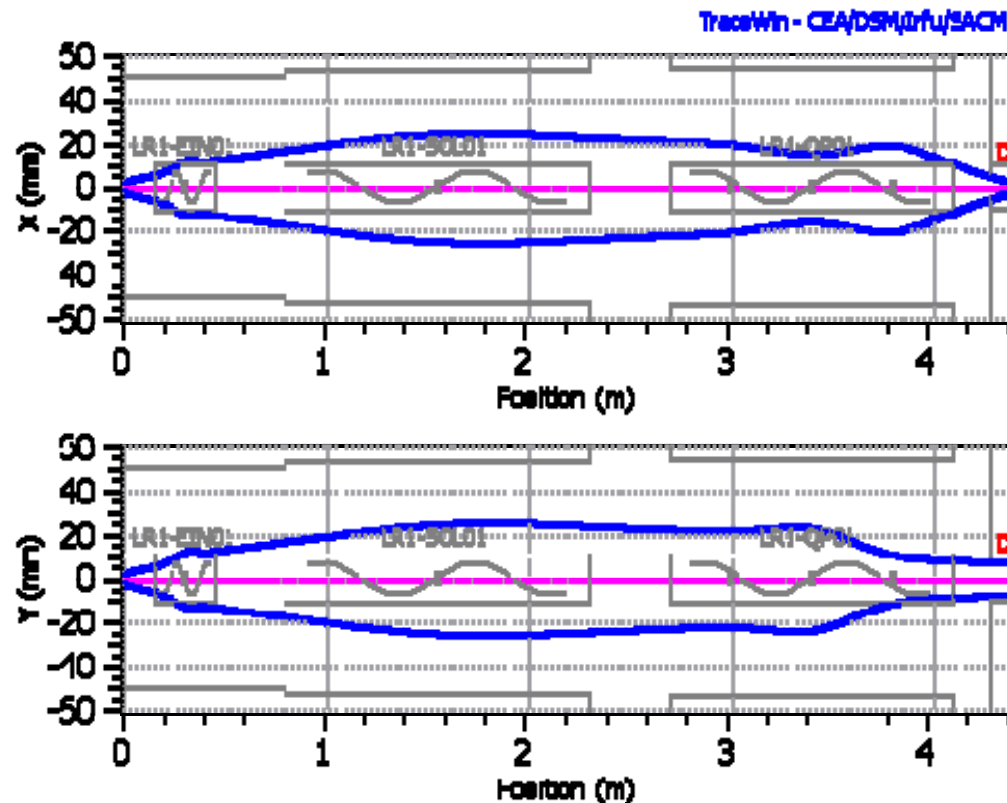




Faisceau de référence: 80 π .mm.mrad, charge 1+, énergie 60 keV, masse 122

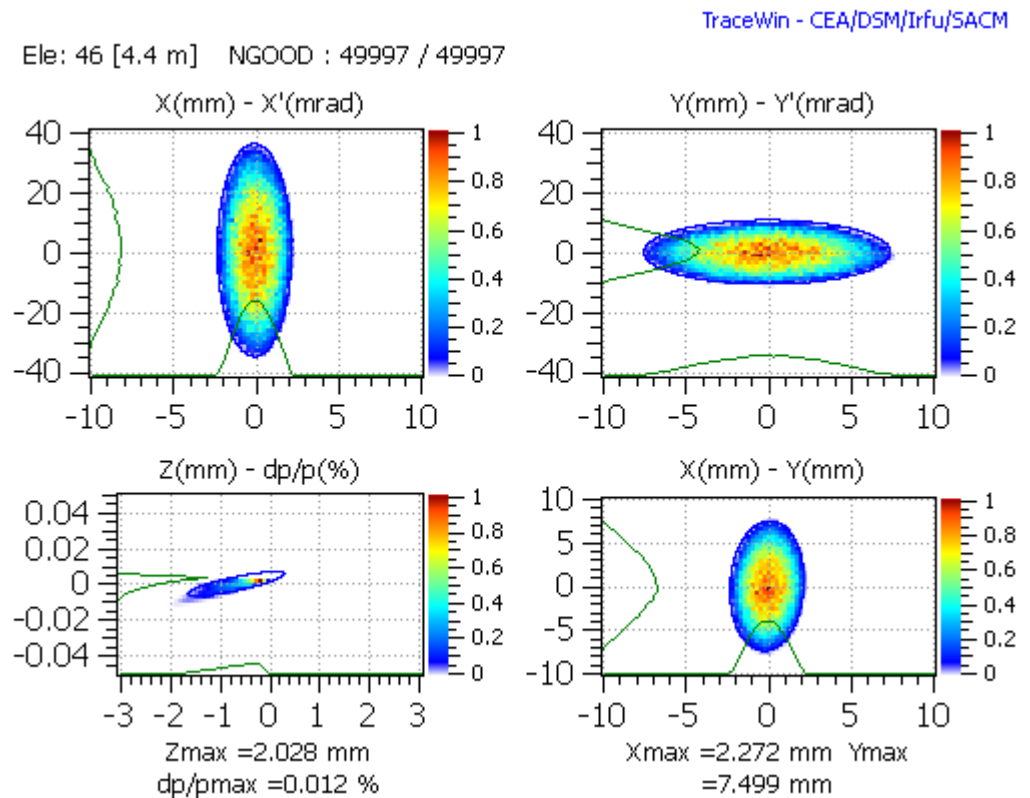
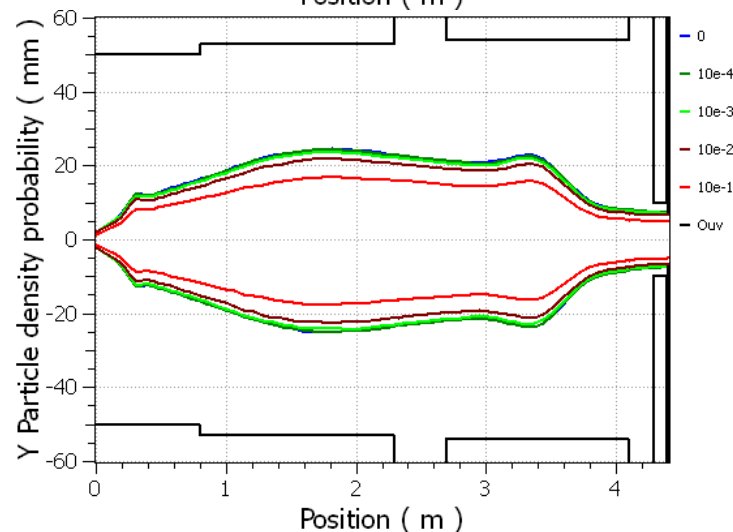
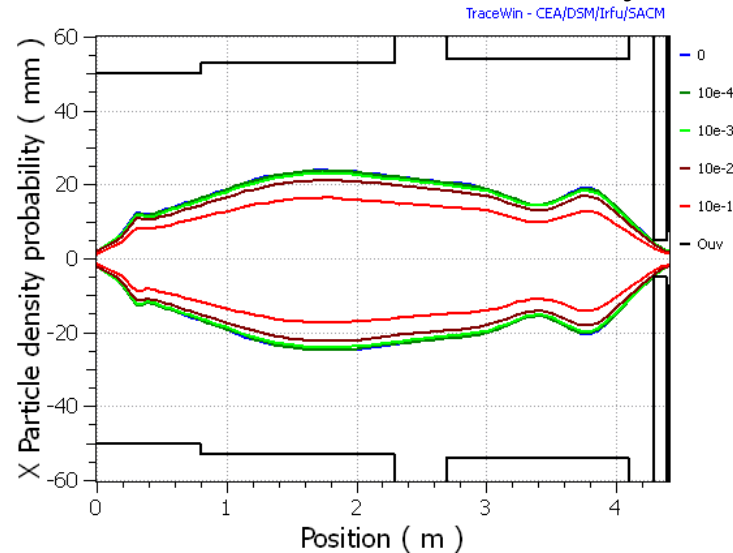
Section d'adaptation faisceau 1

- Composition: une lentille de Einzel, un solénoïde, un triplet de quadripôles magnétiques
- Adapte la taille faisceau pour le passage dans les dipôles magnétiques, quelle que soit la taille en sortie de source



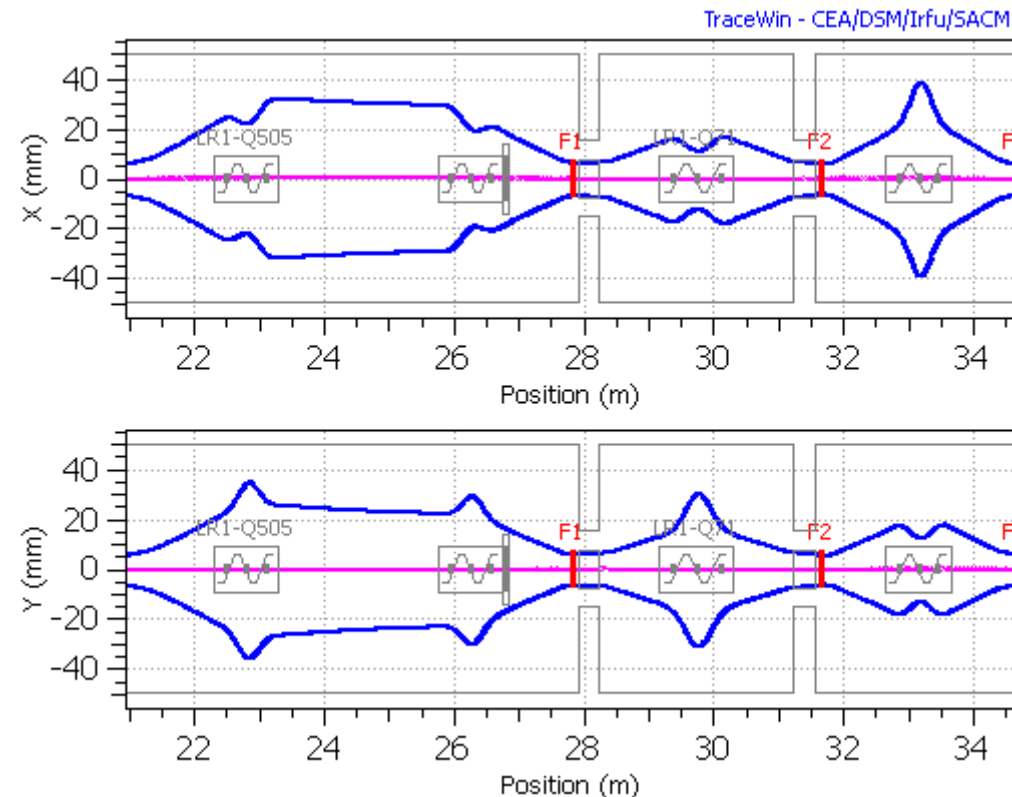
Section d'adaptation faisceau 1

- Taille en sortie $x = 2.25$ mm, $y = 7.47$ mm (référence 2.25 et 7.45 mm)



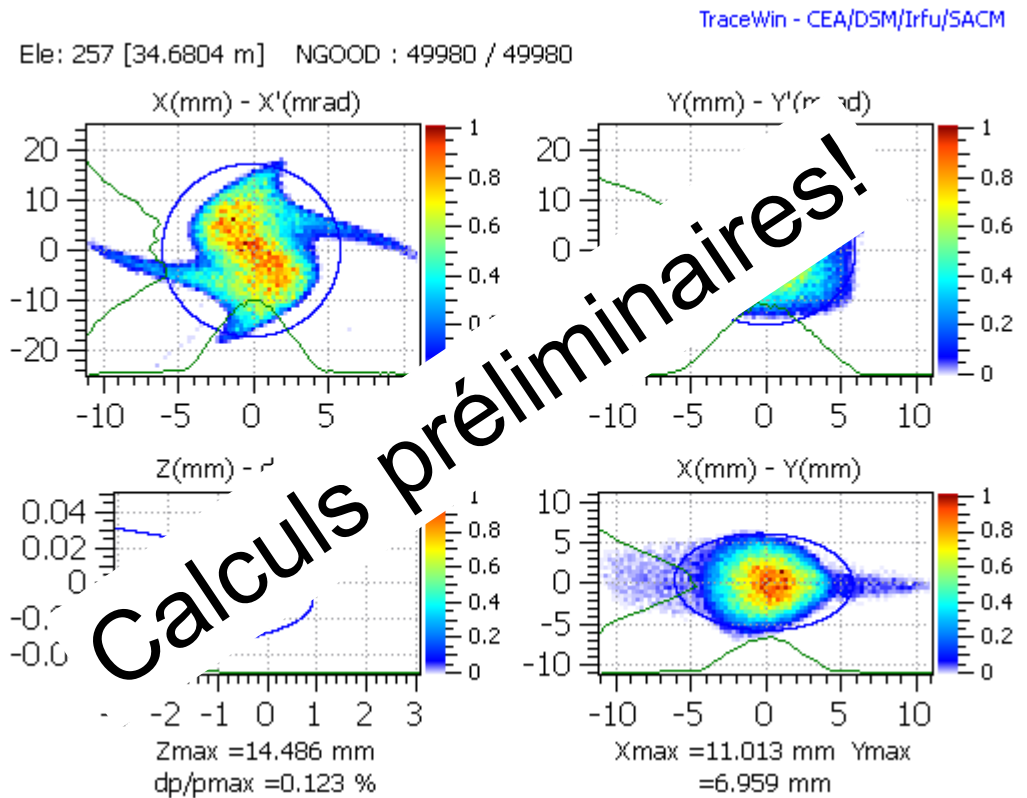
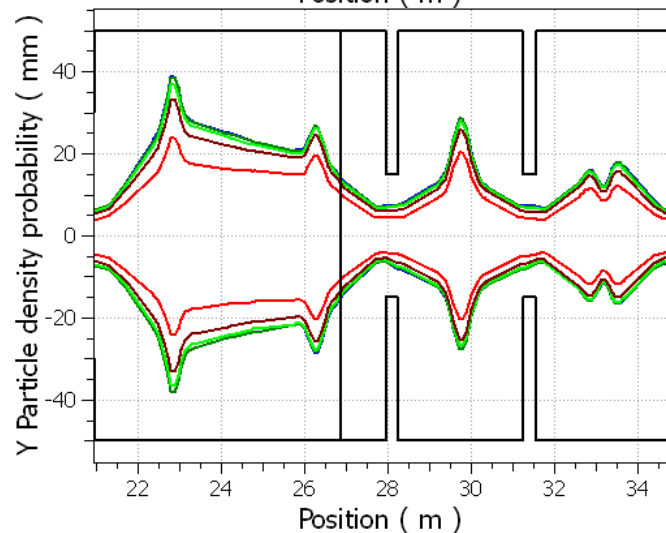
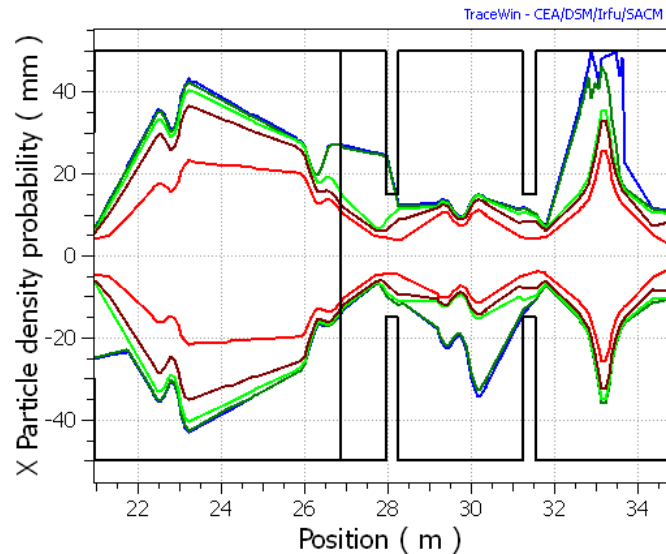
Section d'aiguillage

- Composition: deux déflecteurs, 4 triplets de quadripôles, un kicker, tous électrostatiques
- Dirige le faisceau vers une des trois branches de sortie (station d'identification IBE, booster de charge, DESIR)



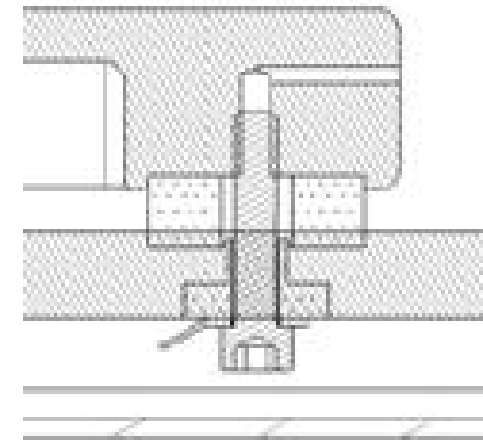
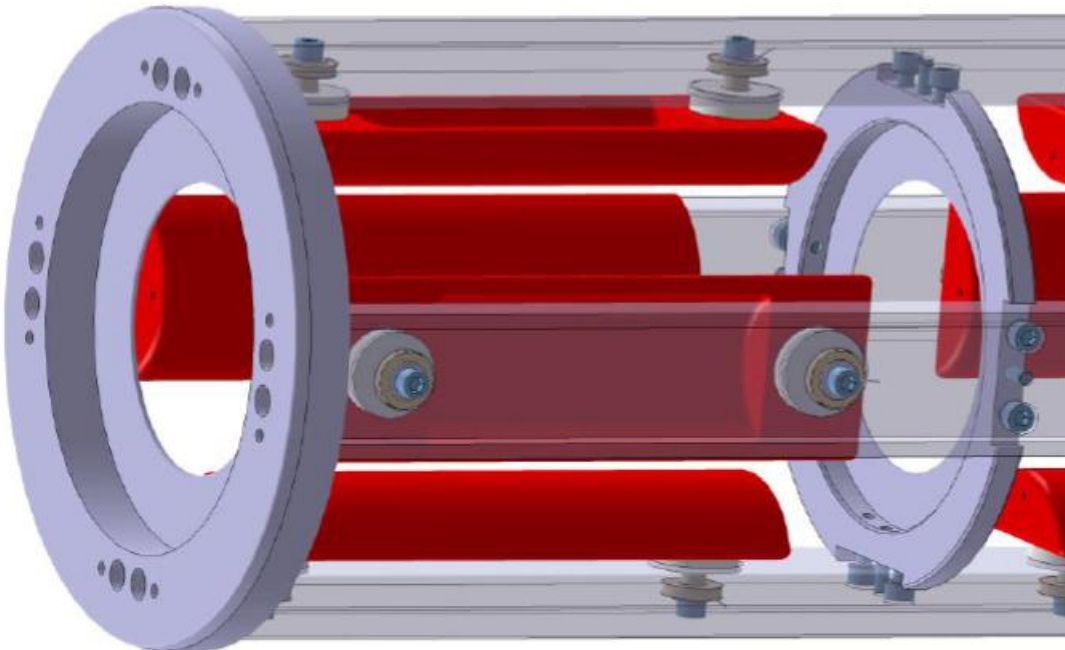
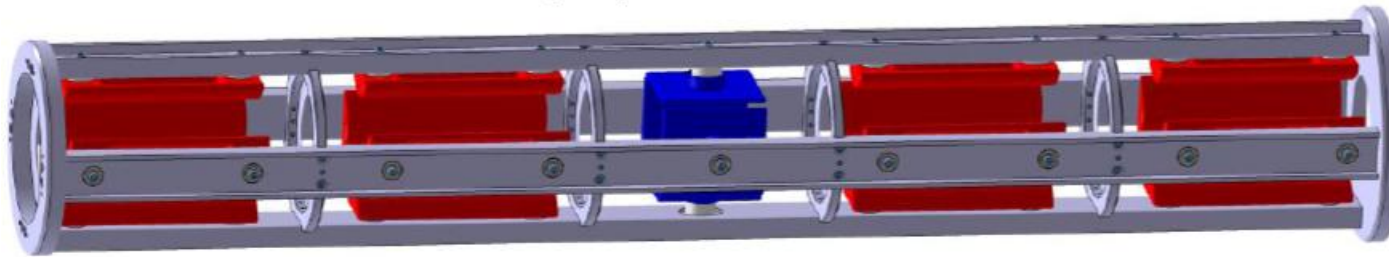
Section d'aiguillage

- Taille en sortie $x = 5.93$ mm, $y = 5.99$ mm (référence 6.00 et 6.00 mm)



Transmission 99.96 %

Exemple de structure avec quadripôles

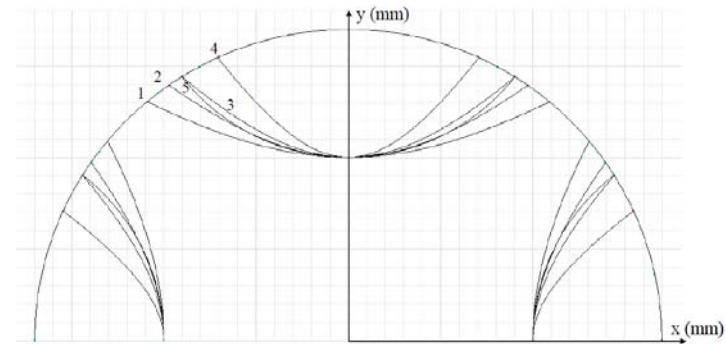


Conception faite à l'IPHC

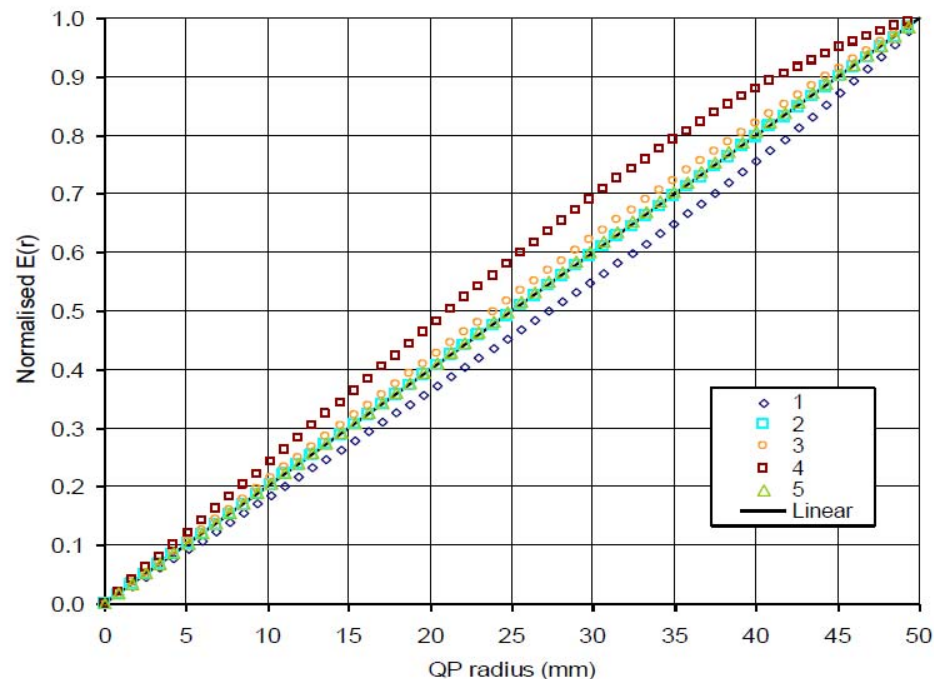
Comparaison de profils de pôles en 2D

Variantes de profils circulaire et hyperbolique :

- 1 – Profil hyperbolique (a;b)=(50;65)
- 2 – Profil hyperbolique (a;b)=(50;50)
- 3 – Profil hyperbolique (a;b)=(50;43,46)
- 4 – Profil hyperbolique (a;b)=(50;30)
- 5 – Profil circulaire r=57,25 mm



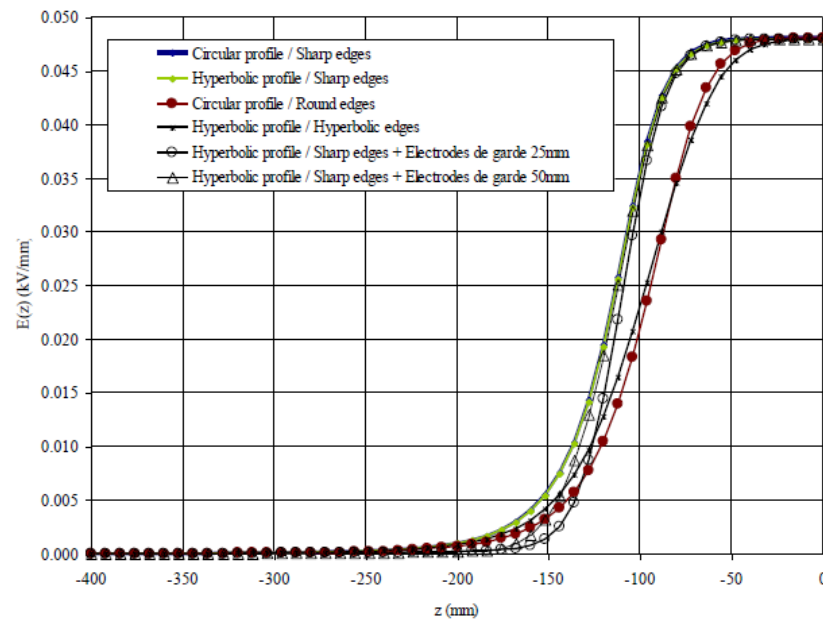
Linearity of the fields according to the electrode profiles



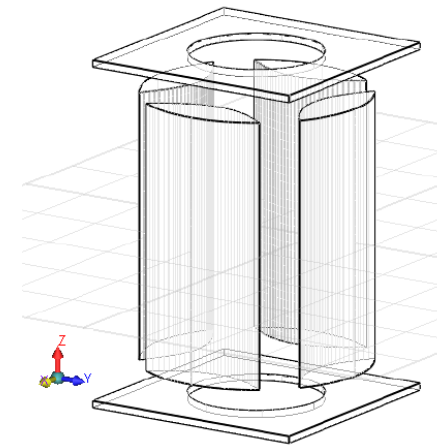
- Quelques différences dans les distributions de champ radial selon les valeurs de “b”
- Hyperbole de paramètres (a;b)=(50;50) géométriquement proche de celui du cercle de rayon 57,25 mm (1,145 x rayon d'ouverture)
- Ecart en terme de distribution de champ:
 $\Delta_{\max} = 2 \times 10^{-3}$ (électrode hyperbolique (cas 2))
 $\Delta_{\max} = 3.5 \times 10^{-3}$ (électrode circulaire (cas 5))
- Tension: ± 3000 V; largeurs des électrodes: fixées par l'intersection avec un cercle de rayon constant de 85 mm

Etudes sur les champs de fuite

- 2 électrodes de garde ajoutées sur le modèle de quadripôle (électrodes de profil hyperbolique et des bords droits)
- Dimensions et paramètres:
 - Epaisseur : 5 mm
 - Ouverture : 100 mm
 - Distances électrode de garde / quadripôle : 25 mm puis 50 mm
 - Potentiel : 0 V



Champs de fuite selon le profil et le bord d'électrode et la présence de l'électrode de garde

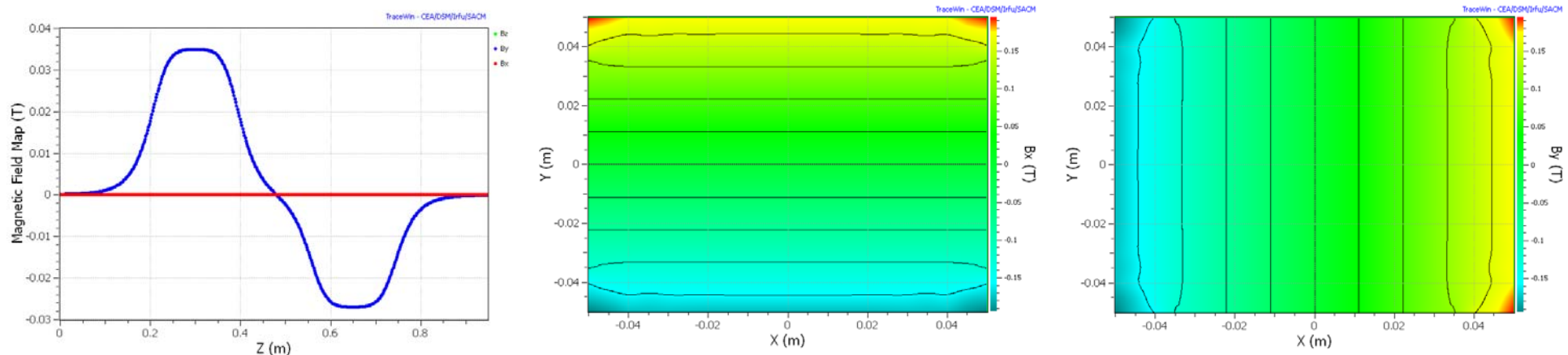


Champ de fuite atténué
Par la présence des électrodes
de garde

Merci à Elian!

Intégration de cartes de champ

- Les éléments électromagnétiques sont remplacés par des distributions 2D/3D de champ produites par des codes EM (Opera, Tosca, Lorentz,...) pour avoir une plus grande précision du calcul des trajectoires
- Code de conversion pour TraceWin et analyse 'multipolaire' des distributions
- Pour l'instant les dipôles ne sont pas implémentés



Carte de champ d'un doublet de QP magnétiques, de gauche à droite: vue 1D sur Z, vue 2D de B_x sur le plan XY, vue 2D de B_y sur le plan XY

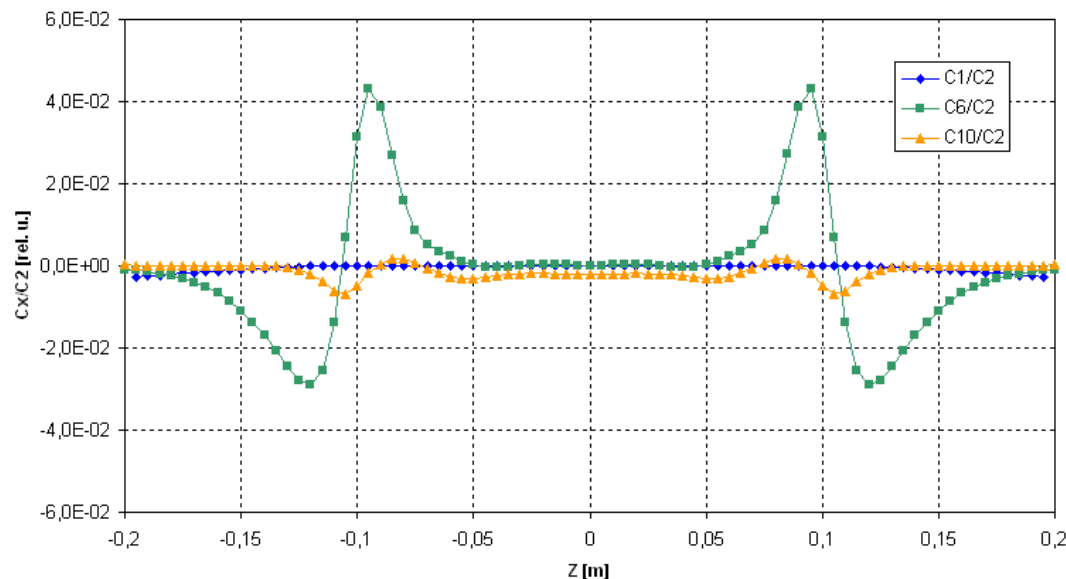
Etude analytique des cartes de champ

On décompose le champ EM en harmoniques sphériques

$$B(r, \varphi, z) = \sum_n \left[\frac{r}{r_0} \right]^{n-1} [A_n \sin(n\varphi) + C_n \cos(n\varphi)]$$

$$E(r, \varphi, z) = \sum_n \left[\frac{r}{r_0} \right]^{n-1} [-A_n \cos(n\varphi) + C_n \sin(n\varphi)]$$

r_0 rayon de gorge, r rayon de l'analyse, n multipolarité, C_n composantes 'droites' (champ B) ou 'tournées' (champ E)



Seules les harmoniques
'naturelles' contribuent au champ

$$n = m \cdot (2i + 1)$$

$m = 1$ dipôle

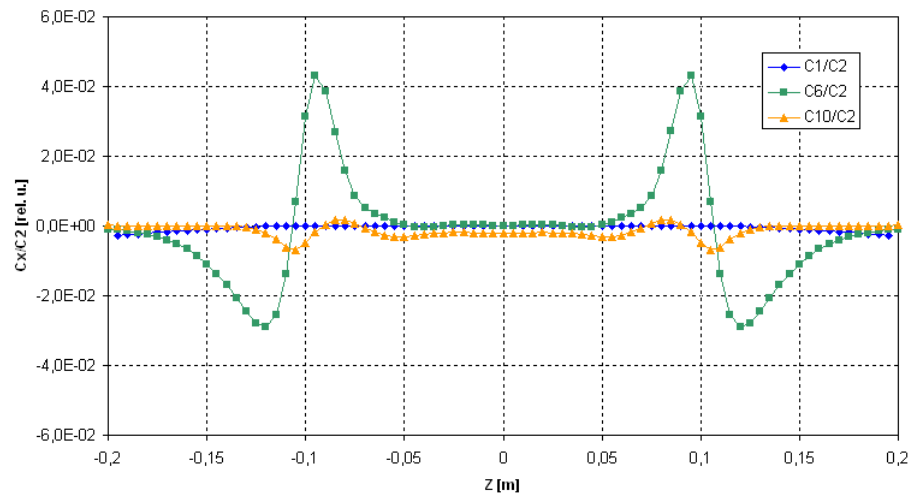
$m = 2$ quadripôle

$m = 3$ sextupôle

...

QP $\Rightarrow n = 2, 6, 10$

Etude analytique des cartes de champ



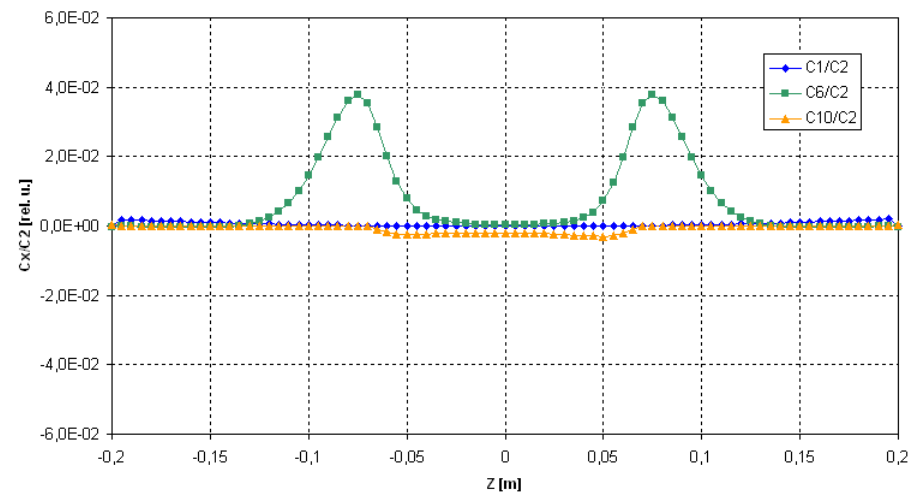
Pôles circulaires

Bord droits

$L(\text{élec}) = 200 \text{ mm}$

$\text{Ratio } \Sigma(C_6)/\Sigma(C_2) = 4.75 \times 10^{-3}$

$(4.14 \times 10^{-2} \text{ sans tenir compte du signe})$



Pôles circulaires

Bord circulaires

$L(\text{élec}) = 200 \text{ mm}$

$\text{Ratio } \Sigma(C_6)/\Sigma(C_2) = 1.08 \times 10^{-2}$

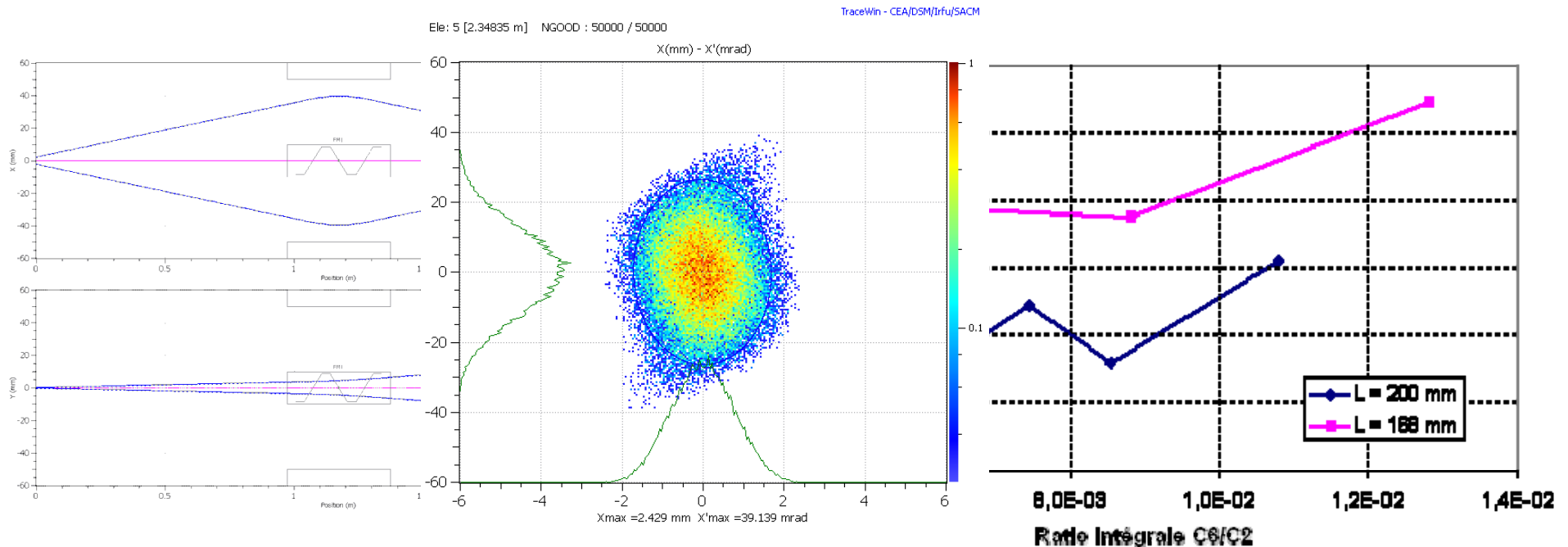
Etude analytique des cartes de champ

On définit un facteur de qualité $K_n = \frac{\sum_z C_n(z)}{\sum_z C_m(z)}$, ici $m = 2$ et $n = 6$

On teste le transport avec un seul QP

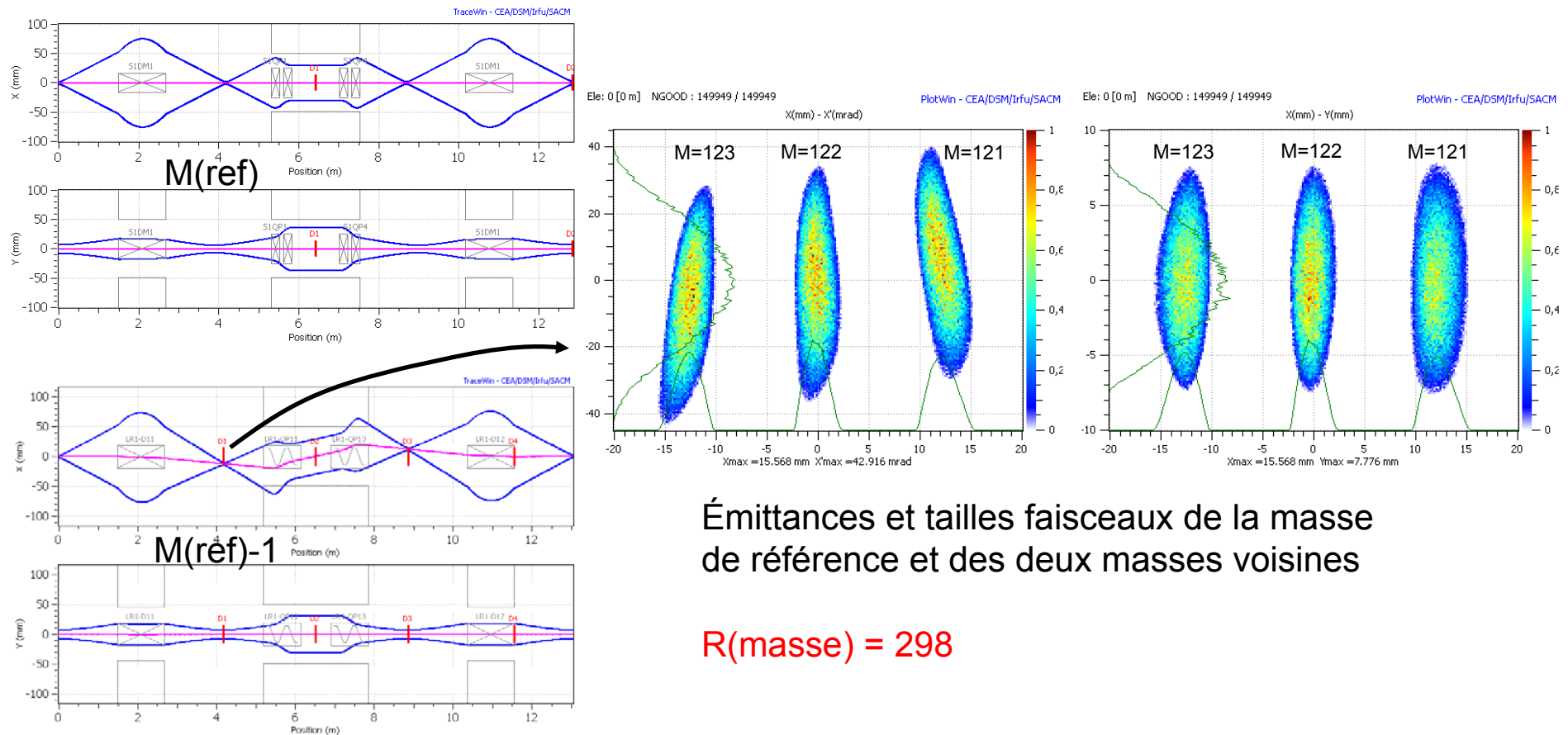
La taille faisceau augmente proportionnellement à K !

Cohérent avec des résultats obtenus à TRIUMF sur une ligne analogue



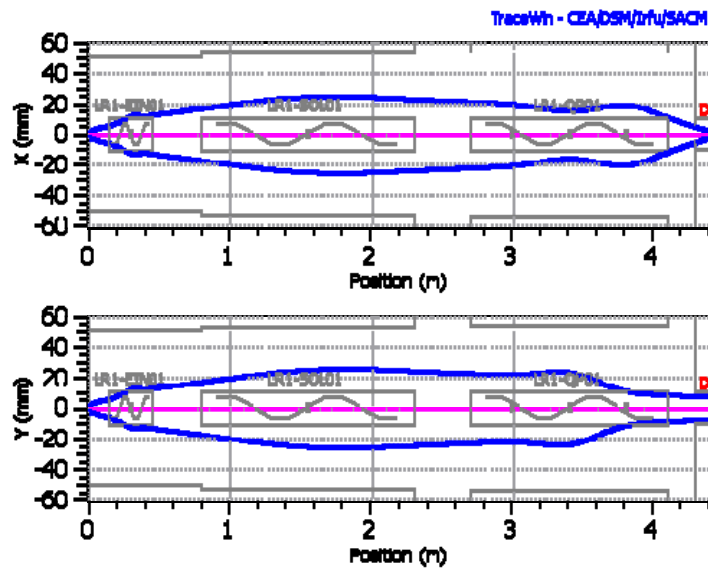
Séparation en masse des faisceaux

- On peut simuler les trajectoires de faisceaux de masses différentes de celle de référence
- Le pouvoir de séparation en masse peut être évalué

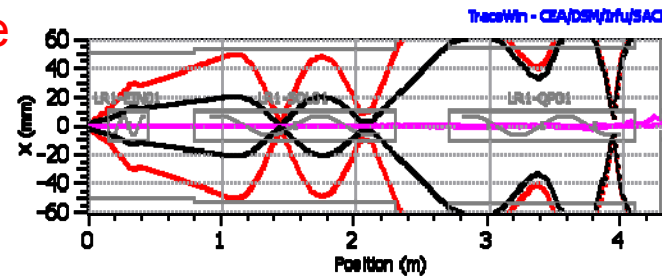


Pertes faisceaux

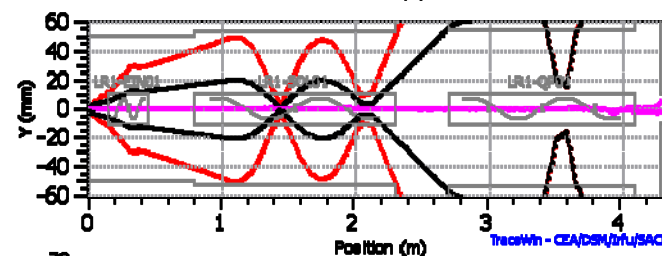
- Les pertes du faisceau d'intérêt sont inférieures à 1% (**spécification** pour une émittance de $80 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$)
- Les contaminants de forte intensité sont perdus dans la région peu après la source
=> besoin de refroidir la zone



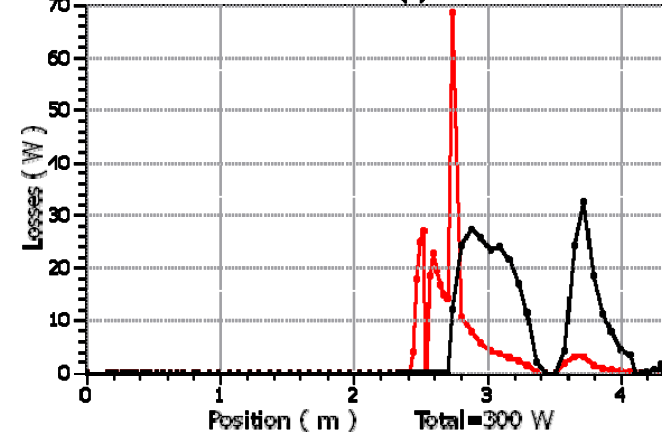
Enveloppes du faisceau d'intérêt de masse 122



Enveloppes du faisceau $^4\text{He}^+$ (gaz support ECR)



Facteur de neutralisation
 $f = 0.7$
 $f = 1.0$

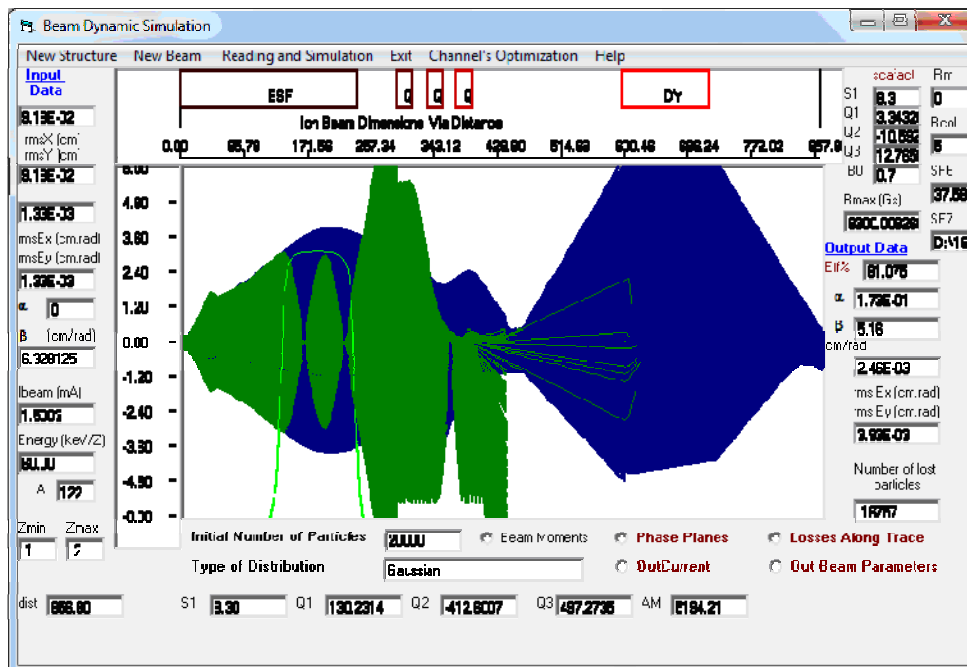


Puissance déposée le long de la ligne (intégrée sur une surface)

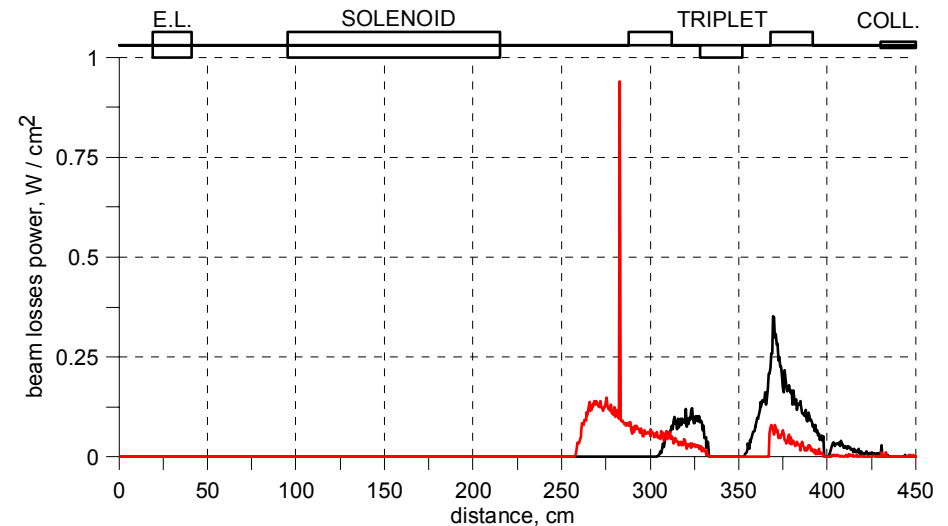
$f = 0.7$
 $f = 1.0$

Le code MCIB04

- Code développé par N. Kazarinov (JINR/FLNR, Dubna, Russie)
- Permet de simuler différentes espèces d'ions avec les effets de charge d'espace entre elles (2 ou +)
- Tracking avec éléments analytiques ou cartes de champ



Enveloppes des faisceaux de masse 122 (bleu)
et de $^4\text{He}^+$ (vert)



Puissance déposée le long de la ligne

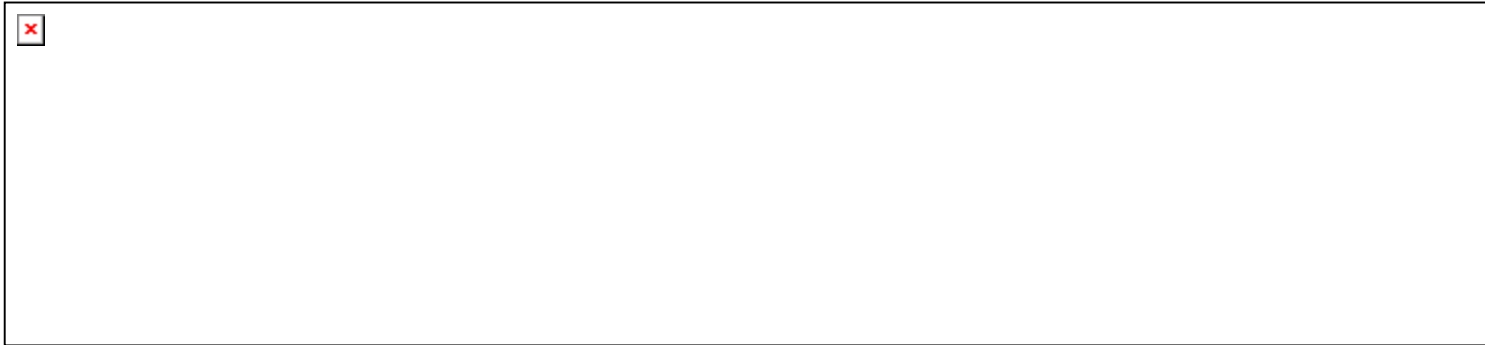
$f = 0.7$

$f = 1.0$

Accord raisonnable avec TraceWin

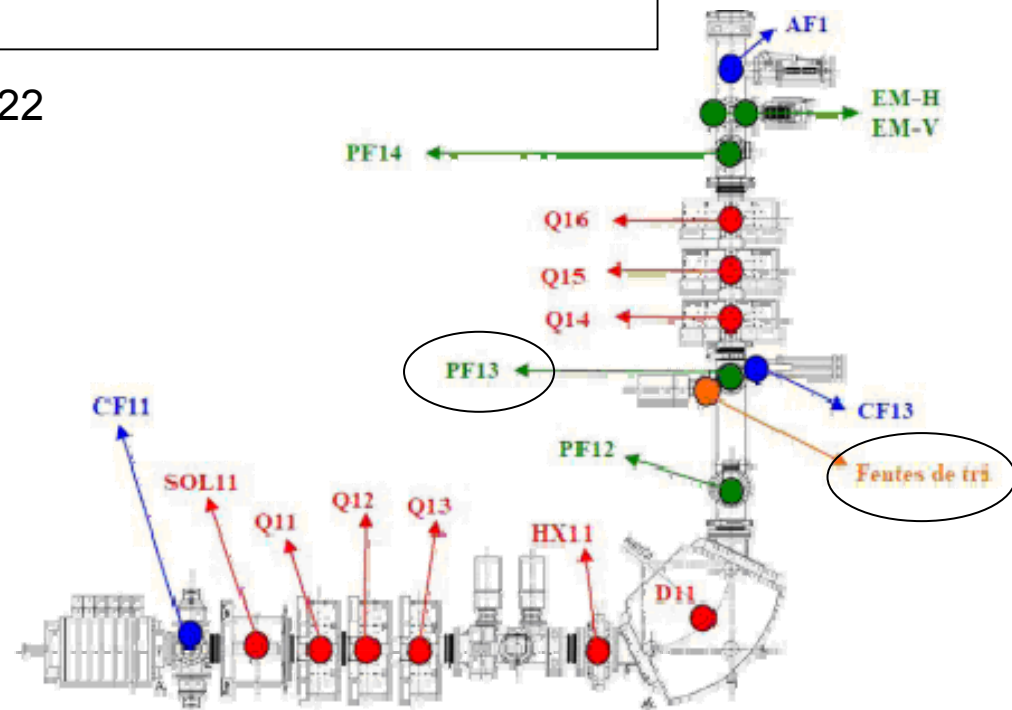
Faisceaux creux

- Le gaz support crée des perturbations qui affectent le faisceau d'intérêt



Distributions du faisceau de masse 122

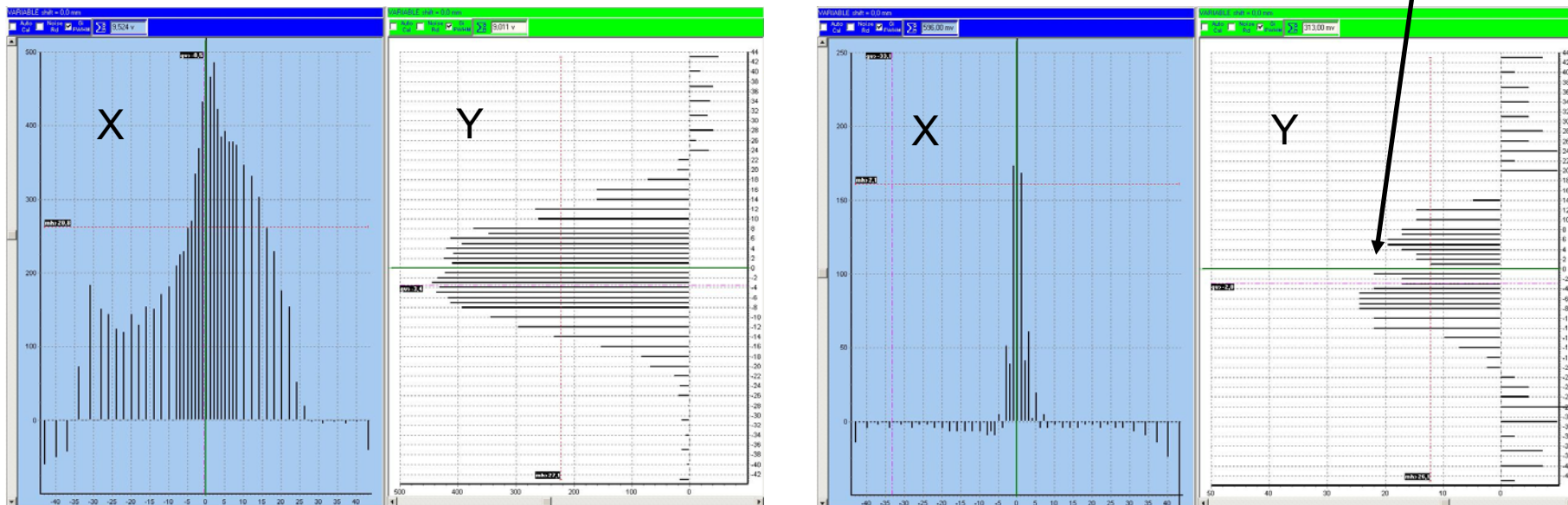
⇒ Expérience au LPSC Grenoble
pour mettre en évidence cet effet
(ligne LBE1 de SPIRAL2 phase 1)



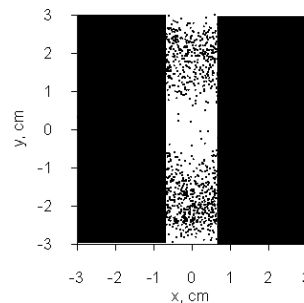
Mise en évidence des faisceaux creux

- Faisceau de $^{40}\text{Ar}^+$ avec ^{14}N comme gaz support
- Utilisation de fentes pour vérifier la distribution du faisceau

« creux » observé!



Fentes ouvertes

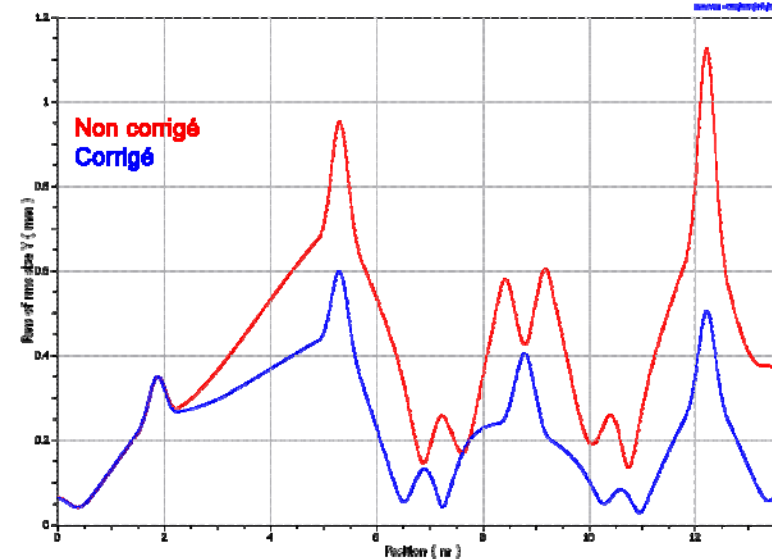
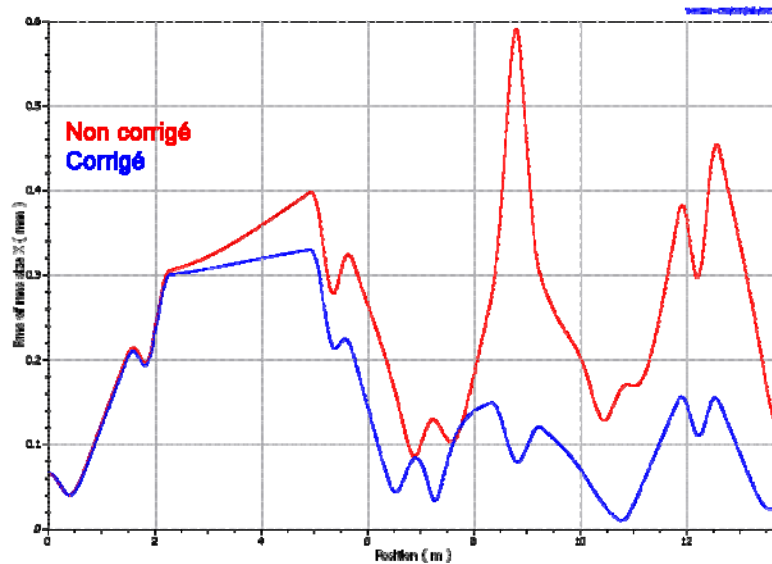
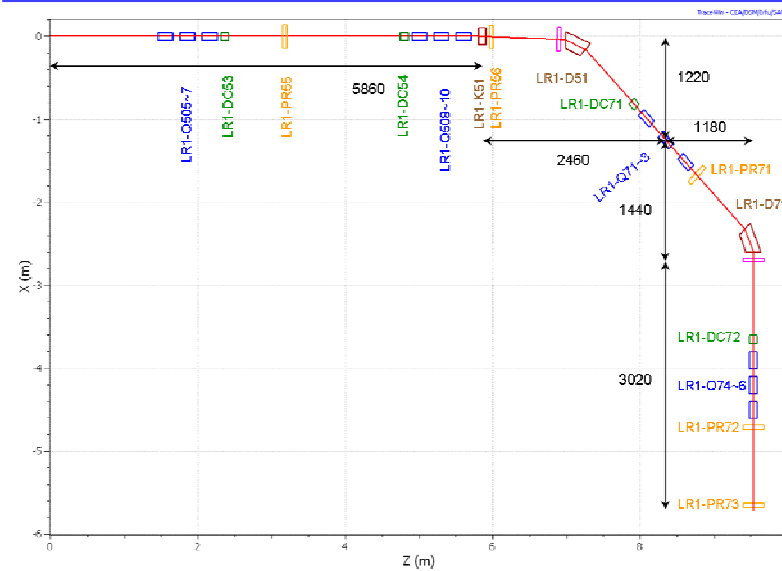


Fentes fermées à +/- 2 mm

- **Les calculs d'erreur permettent d'évaluer les tolérances opto-mécaniques des éléments de la ligne**
- Erreurs de positionnement ou de champ des éléments EM, ou de la distribution du faisceau après la source
- Les erreurs peuvent être 'statiques' (corrigeables par un diagnostic) ou 'dynamiques' (non corrigeables)
- Affectent la position du faisceau (ordre 0) ou la taille (ordre 1)
- Nécessité d'utiliser des éléments de correction => **steerers** (ou quadripôles)

- Définition des plages d'erreurs pour chaque variable et pour chaque type d'élément
- Tirage aléatoire des erreurs pour 1000 'lignes'
- Définition de la position des steerers et des profileurs associés
- Optimisation des steerers pour corriger la position du faisceau
- Ré-optimisation des quadripôles pour corriger la taille du faisceau
- Vérification des résultats, et modification des steerers et/ou profileurs si besoin

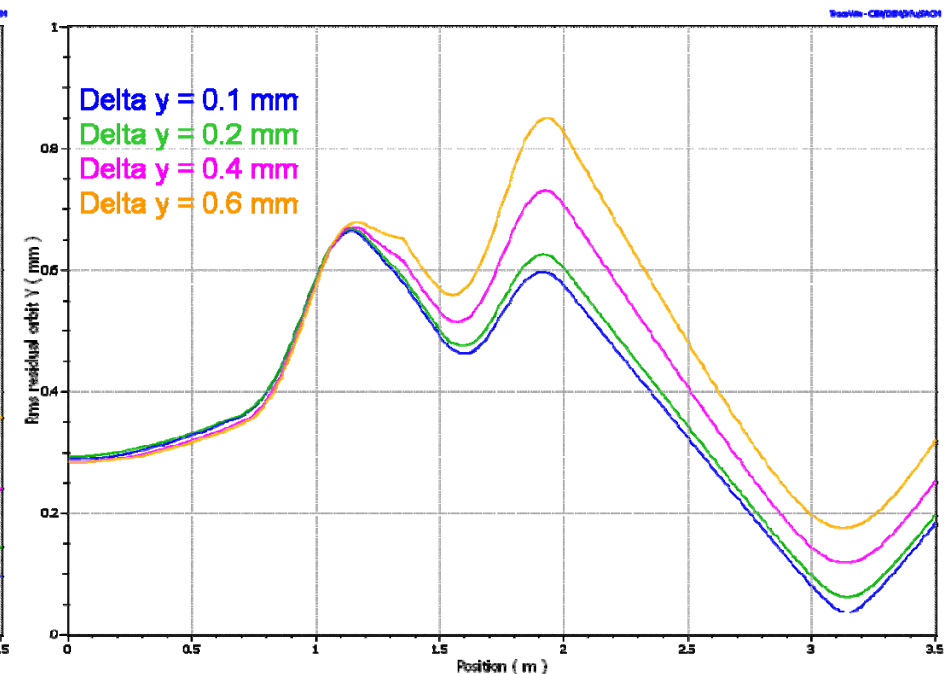
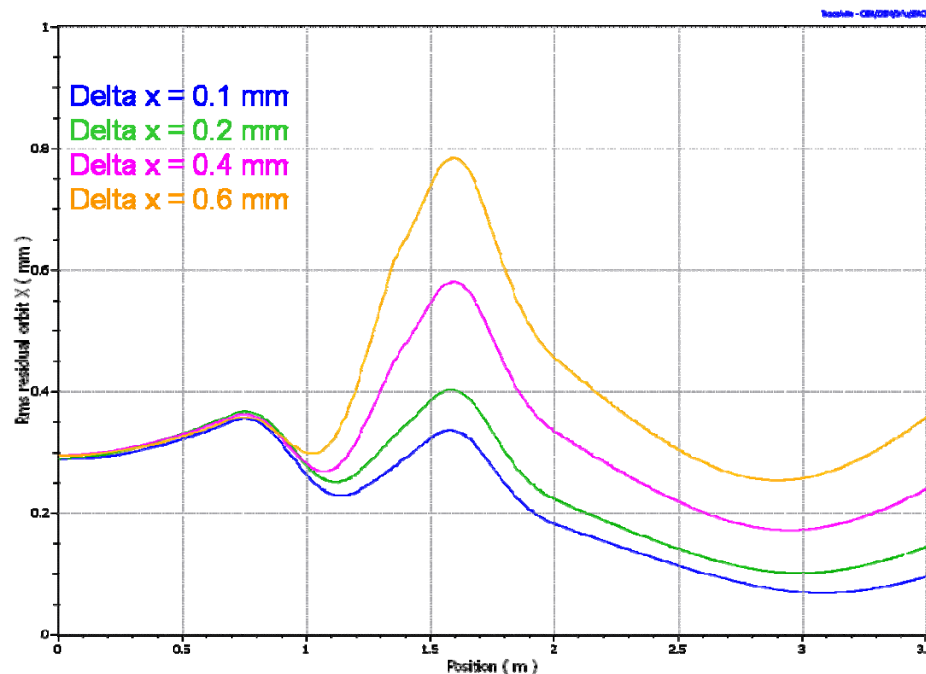
Calculs d'erreur en zone transport



Section d'aiguillage, RMS de la fluctuation de la taille faisceau

Etude de sensibilité des erreurs

- On fait varier l'erreur sur la position des quadripôles dans la section d'adaptation 2
- On peut en déduire la tolérance pour la mécanique



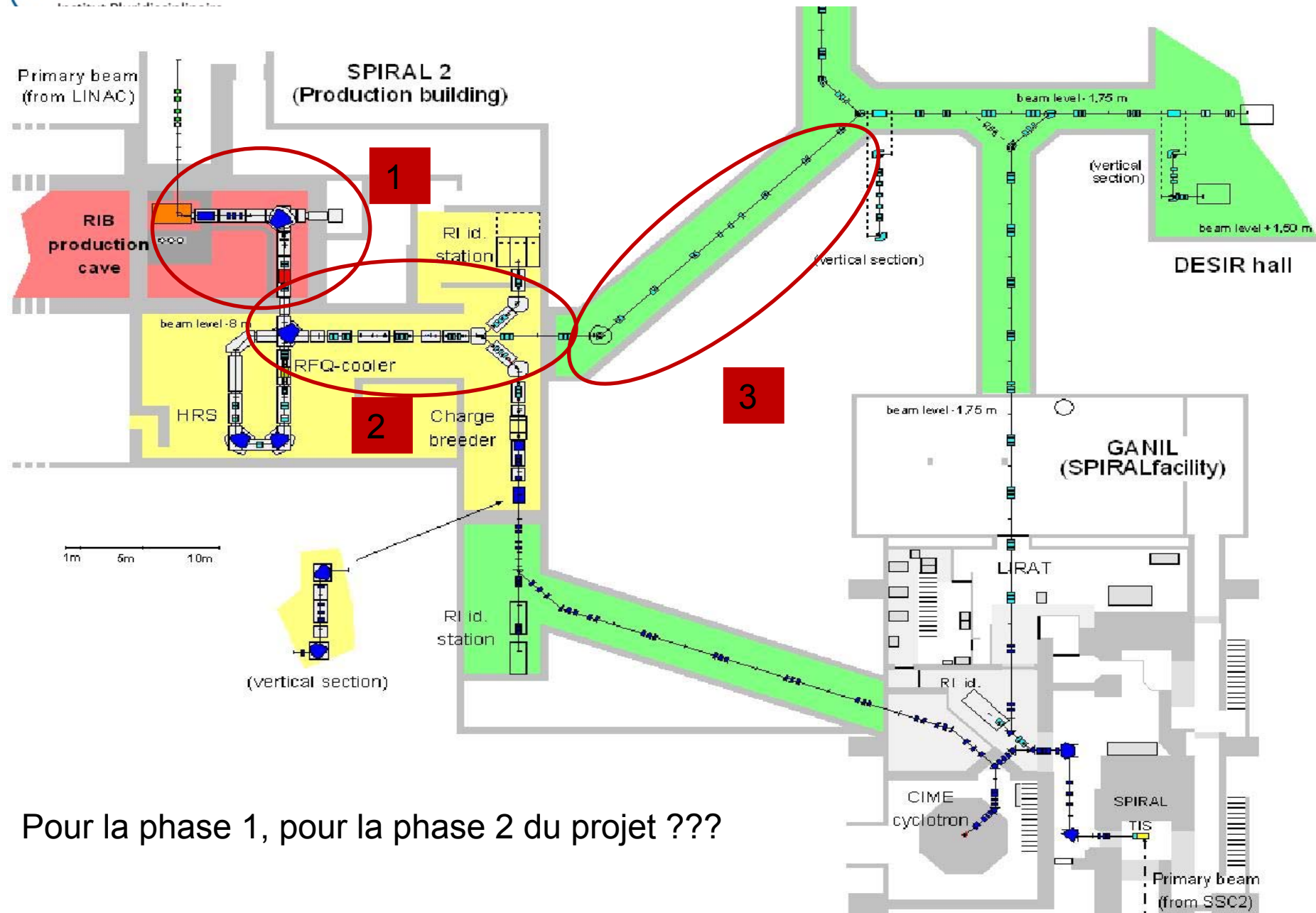
Section d'adaptation 2, position du faisceau ('orbite résiduelle')

Conclusions

- Utilisation de plusieurs codes de simulations pour réaliser un projet de lignes de faisceaux, bonne concordance et complémentarité
- Calculs détaillés pour vérifier la qualité du faisceau, sa transmission sur de longues distances, son impact sur son environnement (contamination, dosimétrie collective, intervention du personnel)
- Résultats conformes aux cahier des charges et réponse aux attentes
- Possibilités d'ajouter d'autres codes au panel pour les projets futurs (évaluation en cours)
- Démarche expérimentale en parallèle pour compléter les compétences et préparer la mise en route des lignes conçues

- Prototypages et démonstrateurs en cours et en préparation, recherche de partenaires, de financement => Stratégie pour les faisceaux radioactifs de SPIRAL2 en cours d'élaboration
- Poursuite des collaborations en cours (JINR/FLNR Dubna, GSI, INFN Legnaro)
- Expériences en préparation sur une ligne d'implanteur à Icube et dans un laboratoire d'accueil (GANIL, FLNR, etc.)
- Projet d'étude d'une ligne en sortie du cyclotron CYRCE, définition du programme scientifique, de l'architecture de l'installation, du plan de financement
- Contribution aux projets de physique des neutrinos envisageable

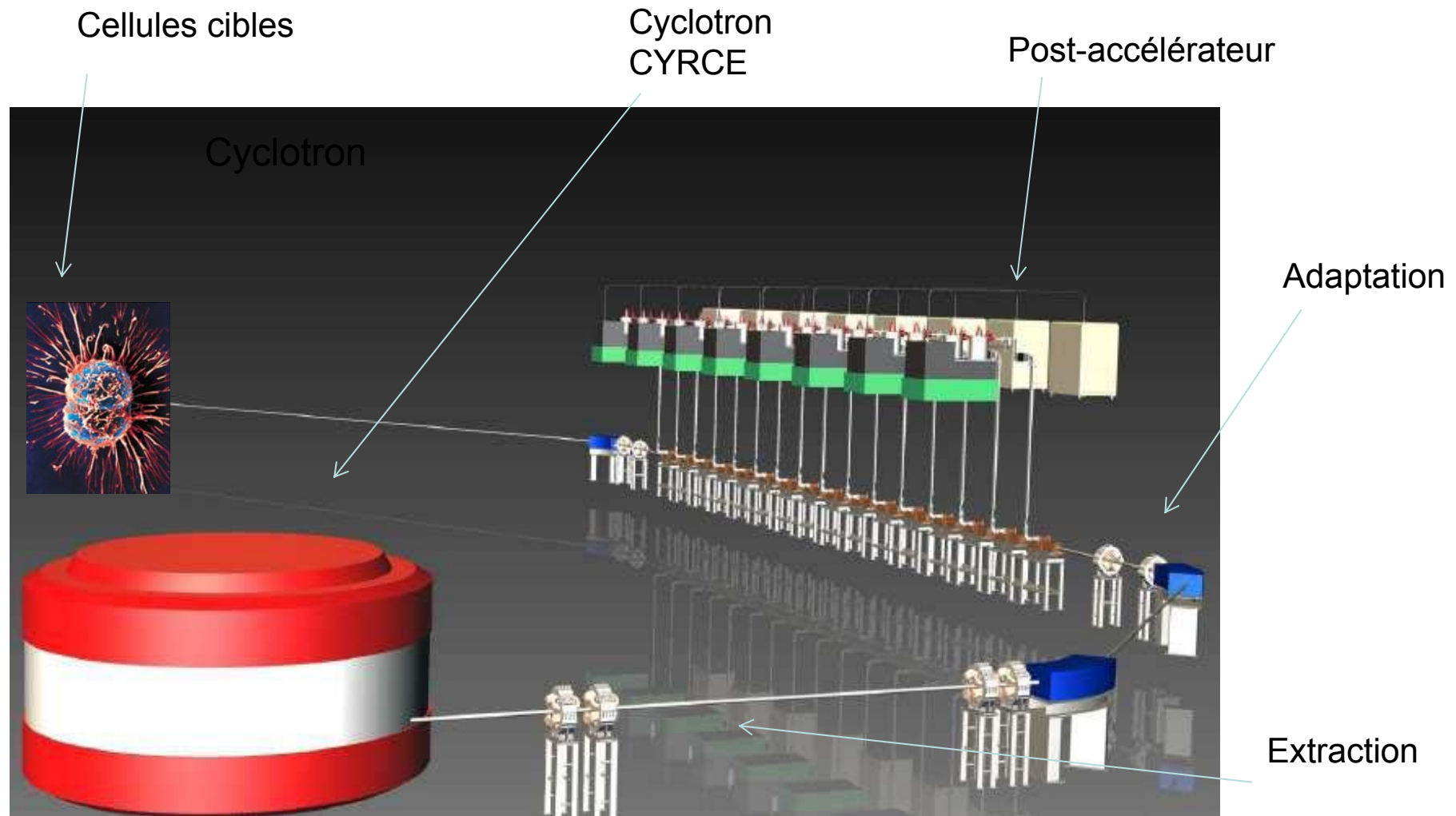
Lignes pour SPIRAL 2 : plusieurs options



Pour la phase 1, pour la phase 2 du projet ???

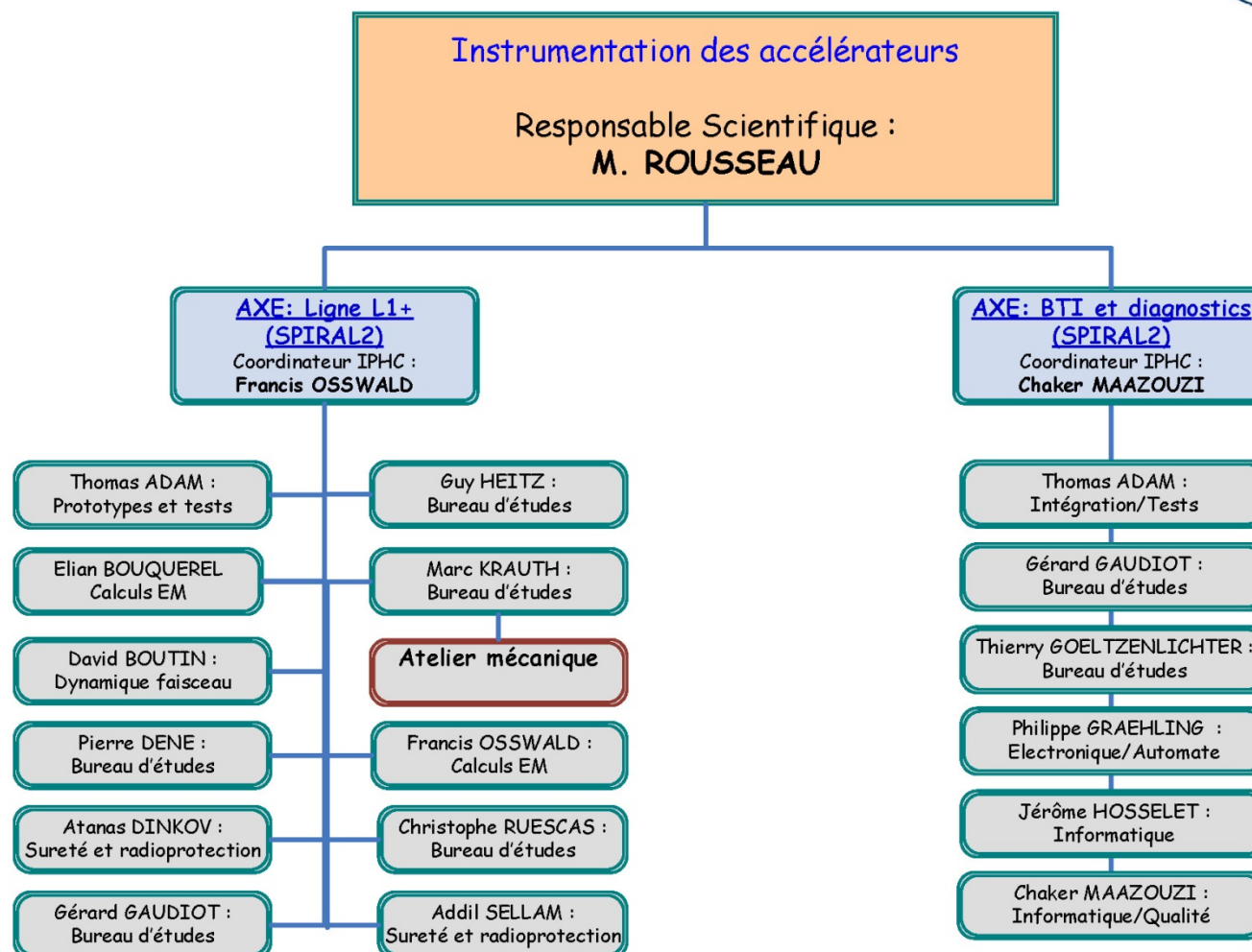
Projet de ligne pour l'extension de CYRCE

En cours d'élaboration, non financé à l'heure actuelle (demande en cours)



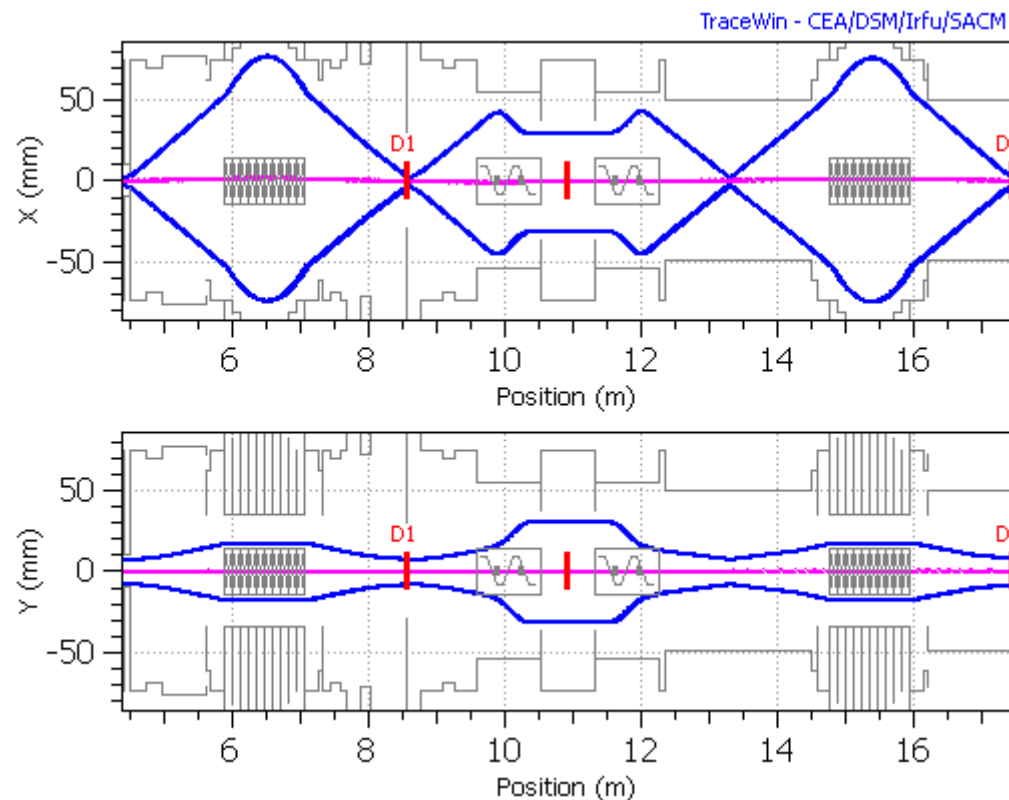
Merci à tous les collègues du groupe IA

Organigramme



Section de séparation en masse

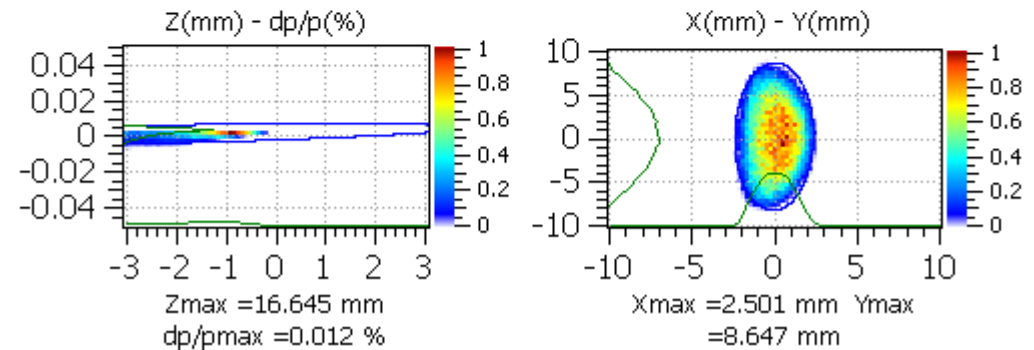
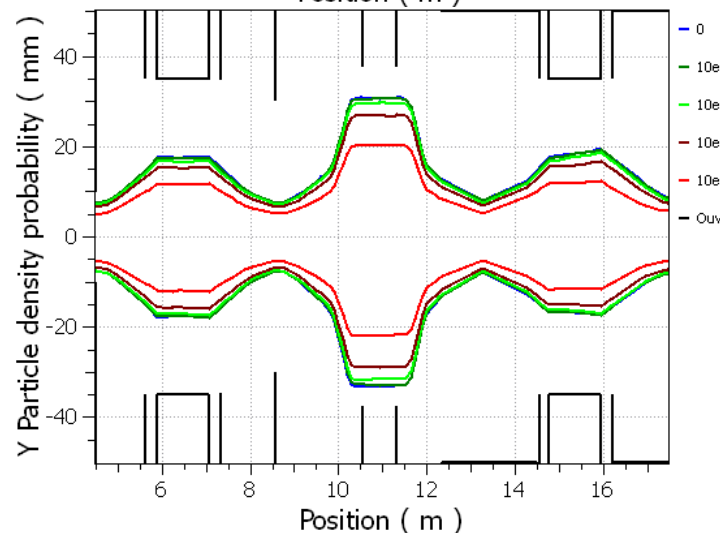
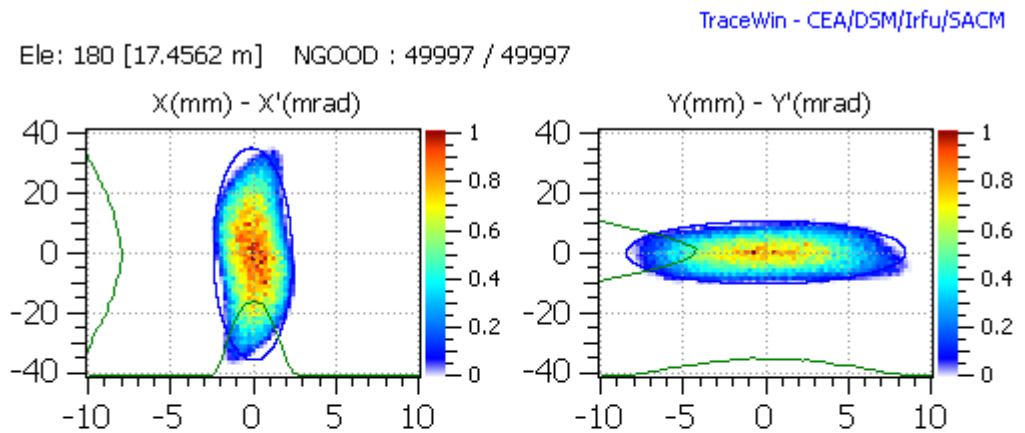
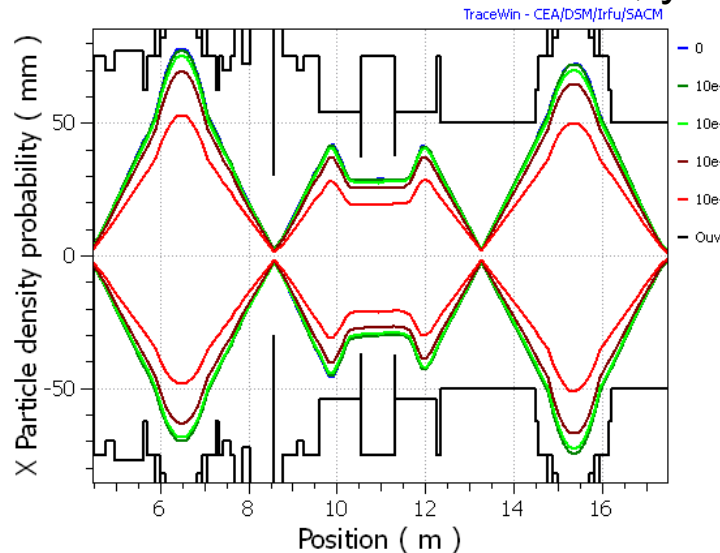
- Composition: deux dipôles magnétiques, deux doublets de quadripôles
- Sépare et supprime les masses voisines du faisceau d'intérêt



Pour séparer les isobares => ligne vers HRS

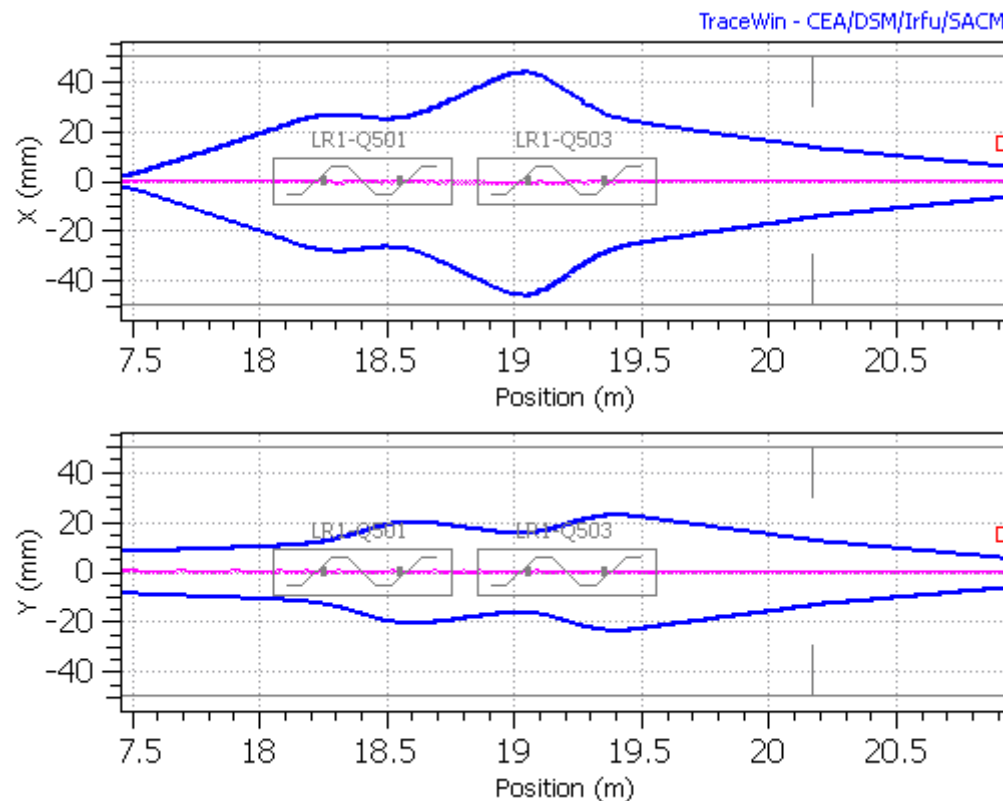
Section de séparation en masse

- Taille en sortie $x = 2.39$ mm, $y = 8.45$ mm (référence 2.25 et 7.45 mm)



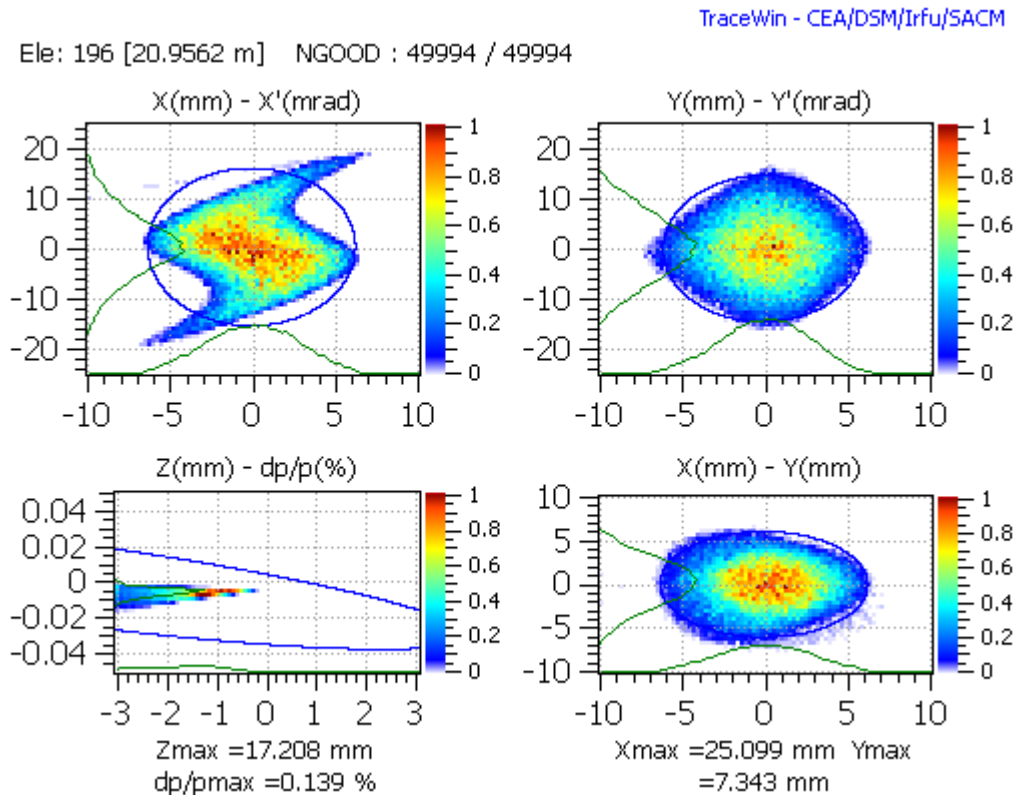
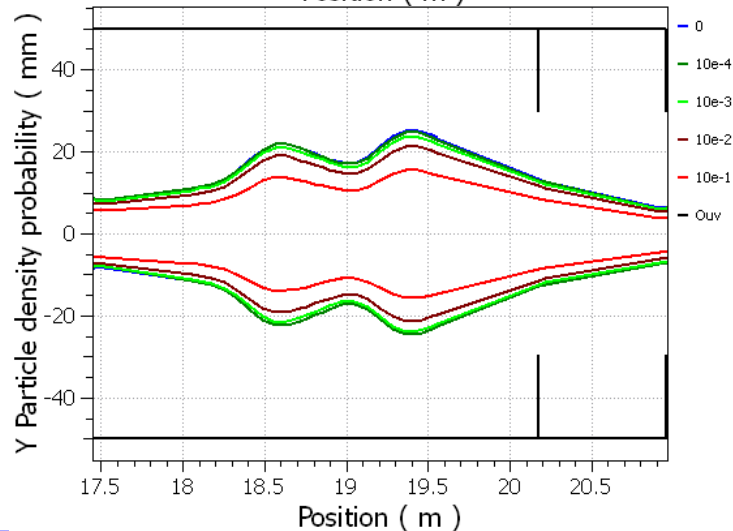
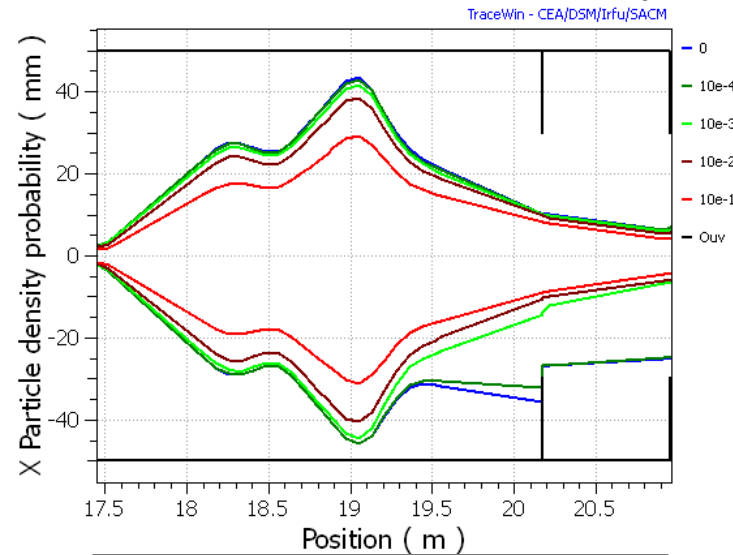
Section d'adaptation faisceau 2

- Composition: deux doublets de quadripôles
- Adapte le faisceau pour le passage dans les éléments électrostatiques (faisceau rond)



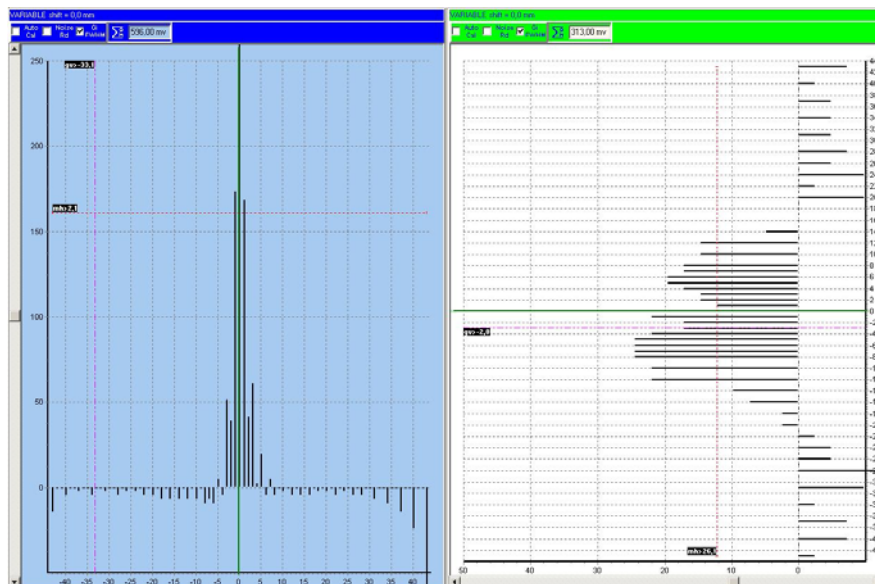
Section d'adaptation faisceau 2

- Taille en sortie $x = 6.29$ mm, $y = 6.06$ mm (référence 6.00 et 6.00 mm)

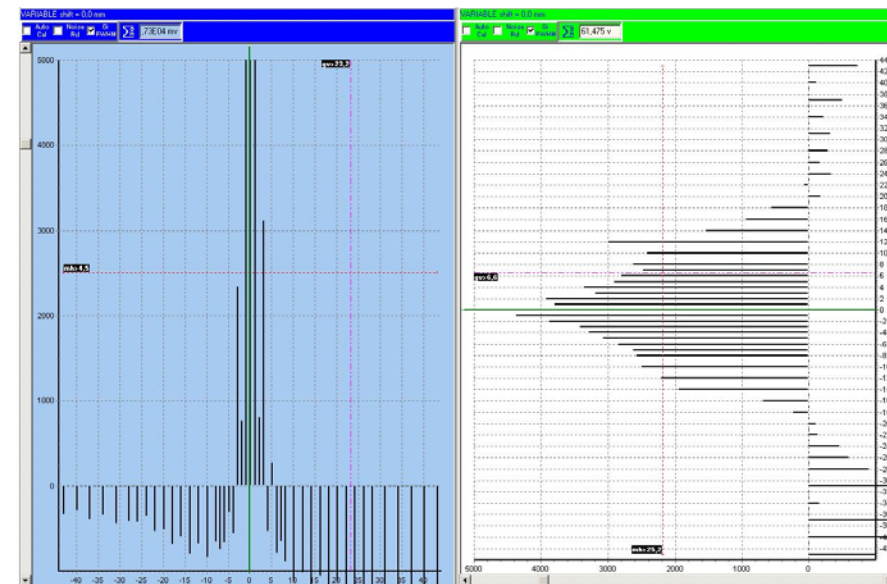


Mise en évidence des faisceaux creux

- L'effet de faisceau creux dépend de l'intensité du gaz support et du faisceau d'intérêt



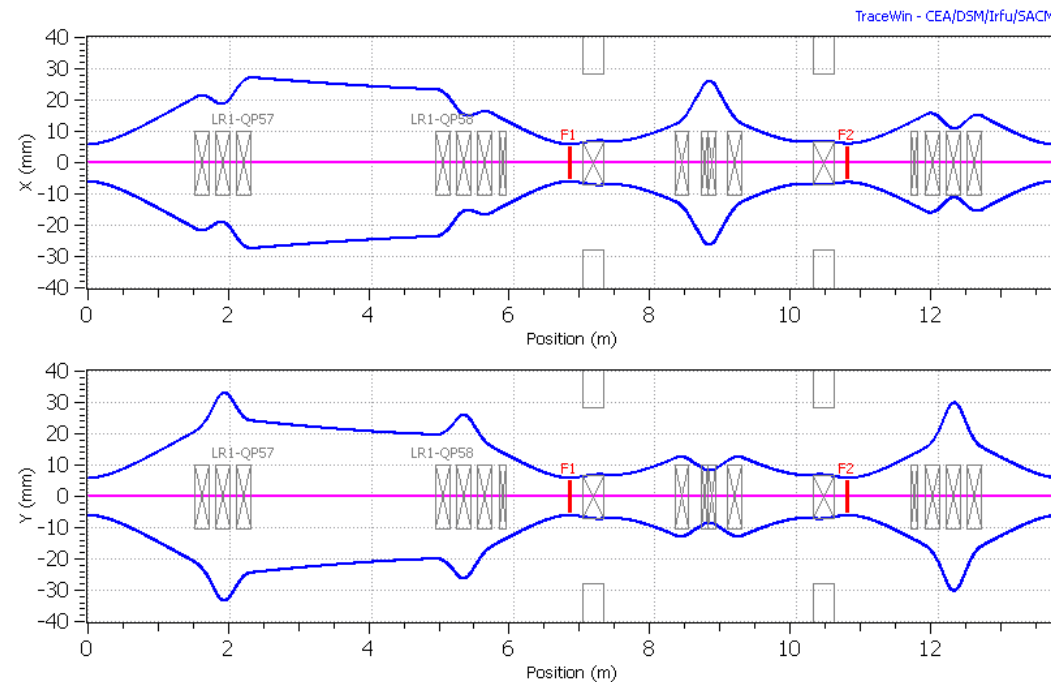
Fentes fermées à ± 2 mm
Pression gaz Ar ??



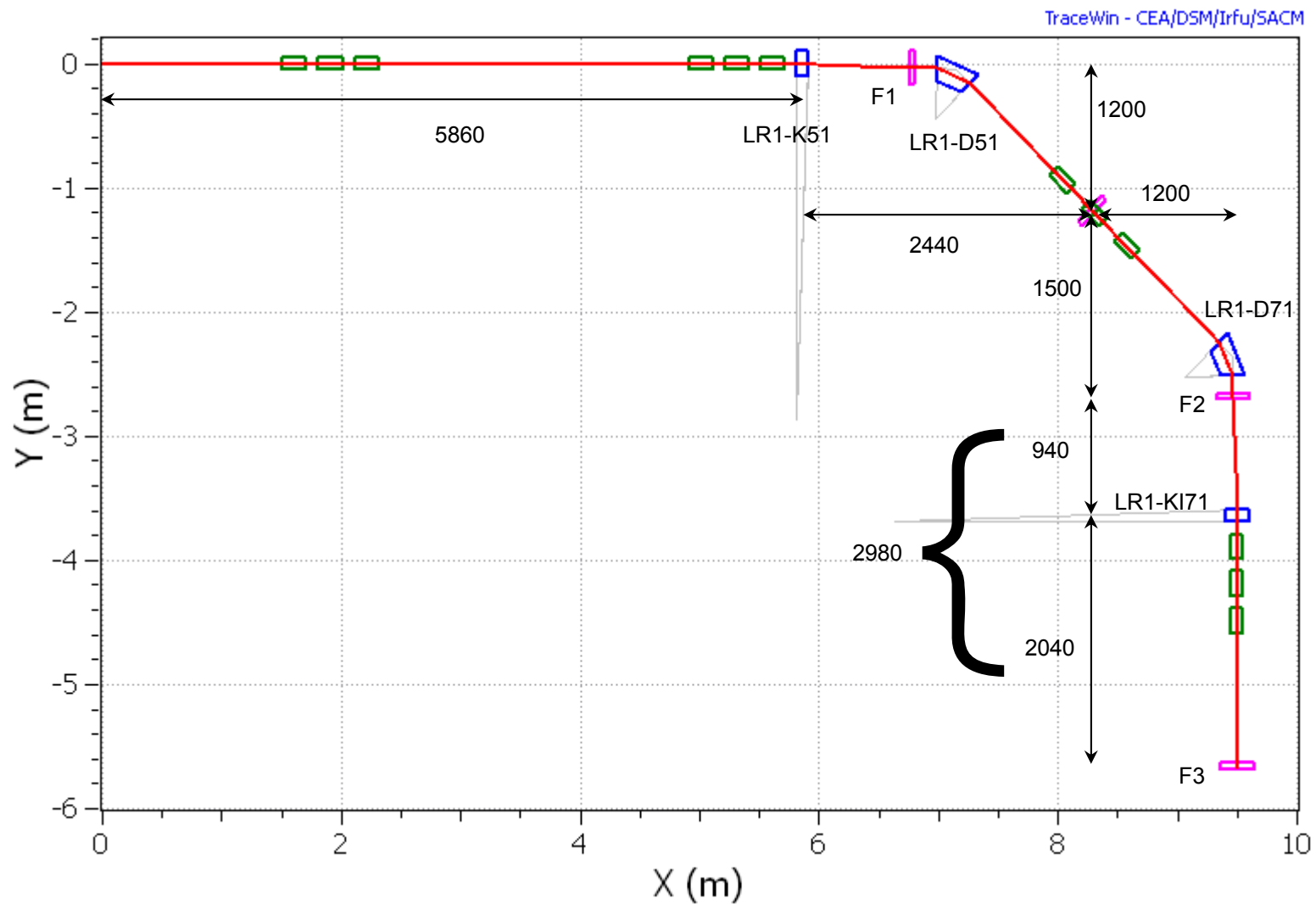
Fentes fermées à ± 2 mm
Pression gaz Ar ?? (ouvert)

- La branche vers le booster de charge et la ligne N+ a une interface fixée mécaniquement
- L'intégration mécanique a montré un chevauchement entre le dernier module de la ligne 1+ et le booster de charge

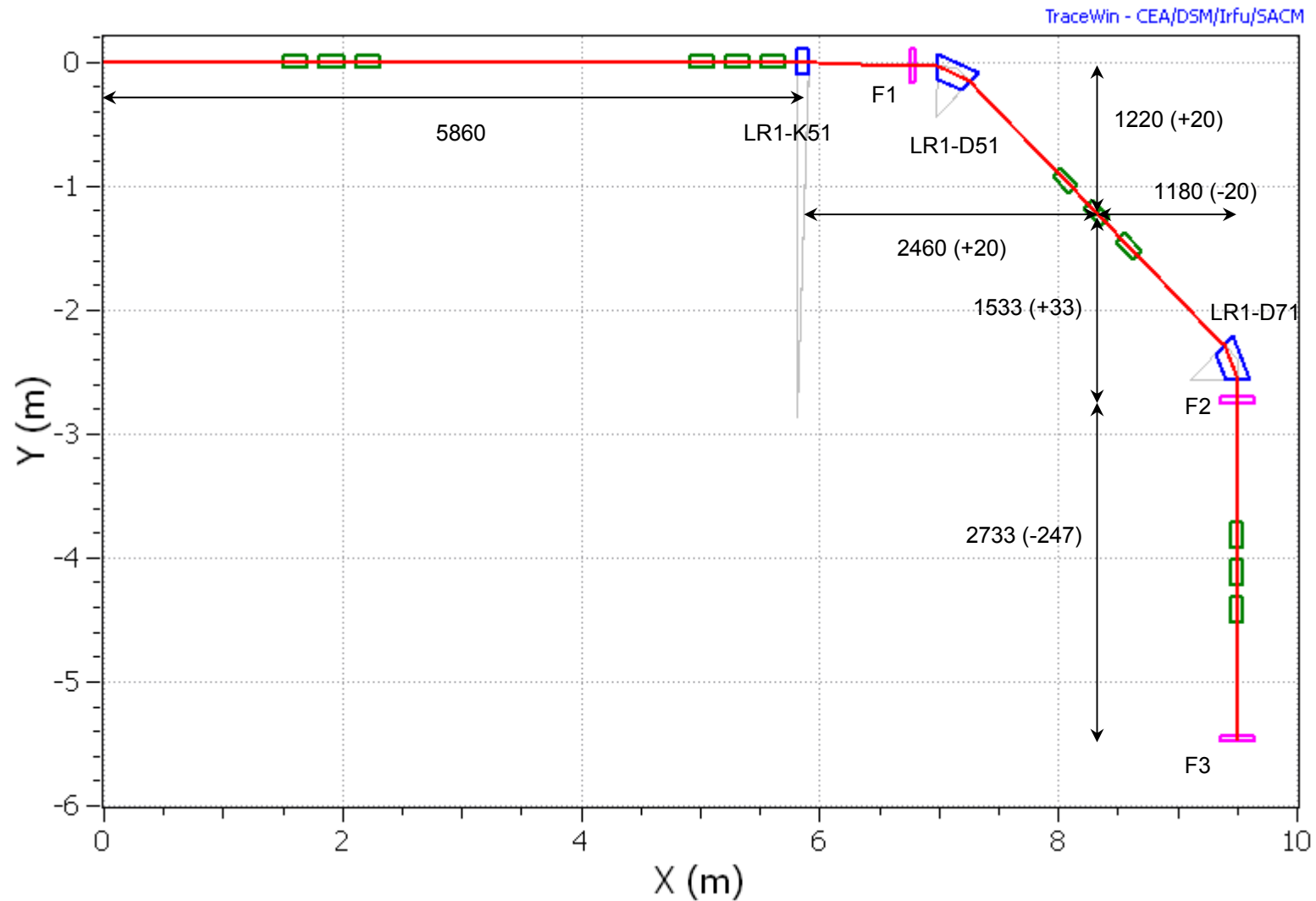
=> Interaction entre la mécanique et l'optique



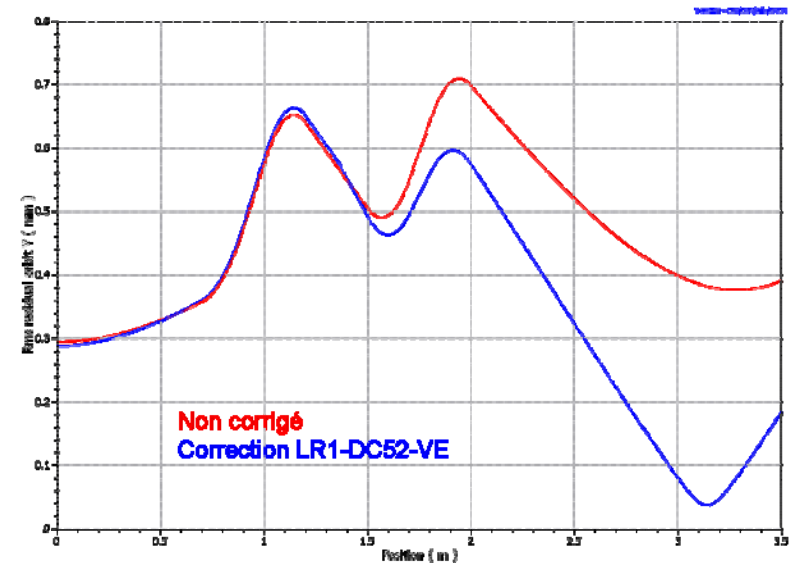
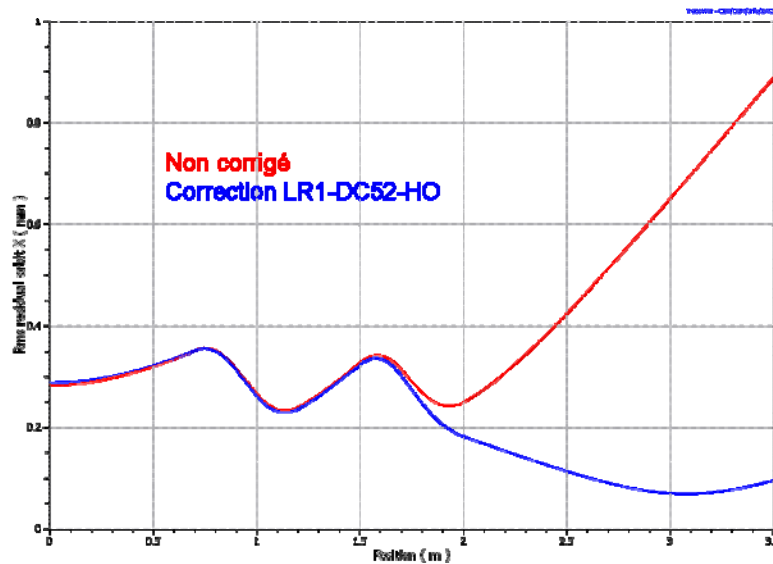
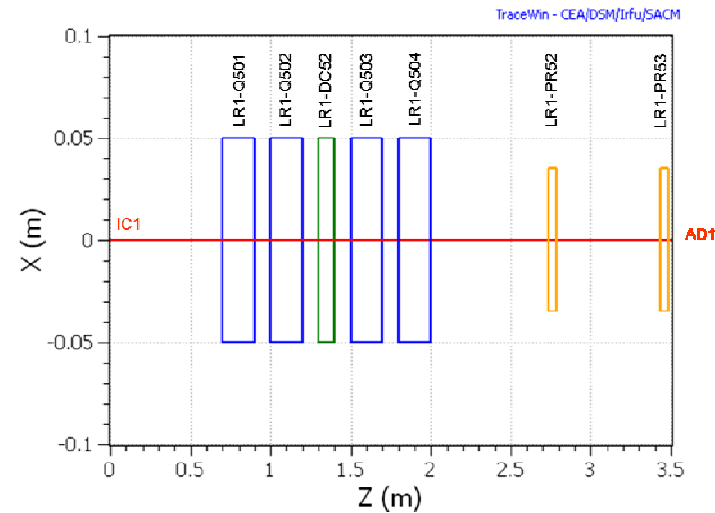
Section 7: reference optics



Section 7: alternative (one kicker suppressed)

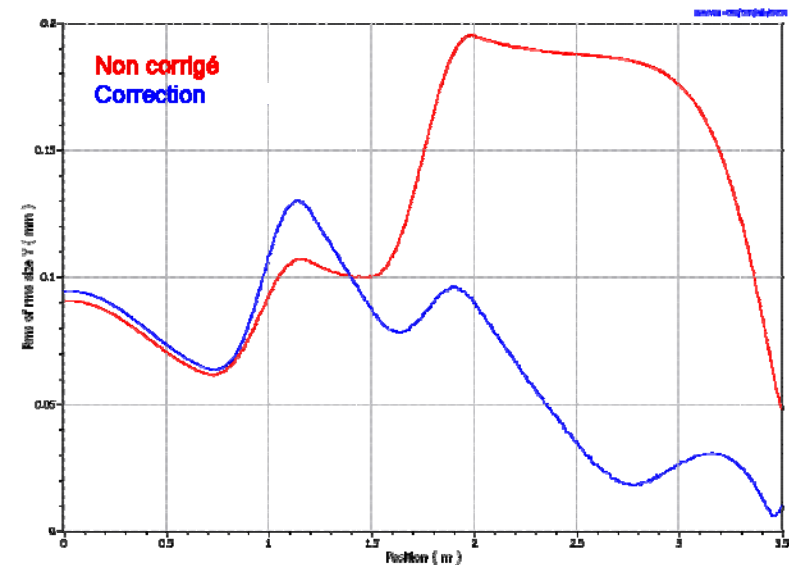
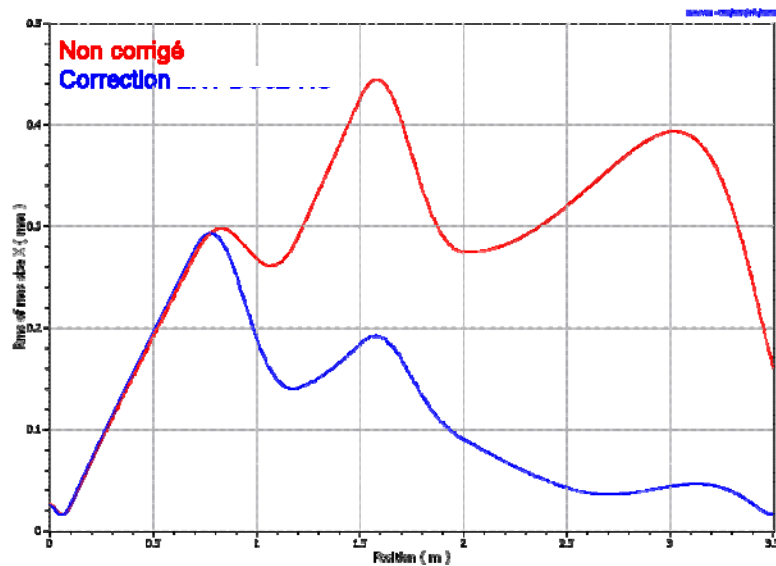
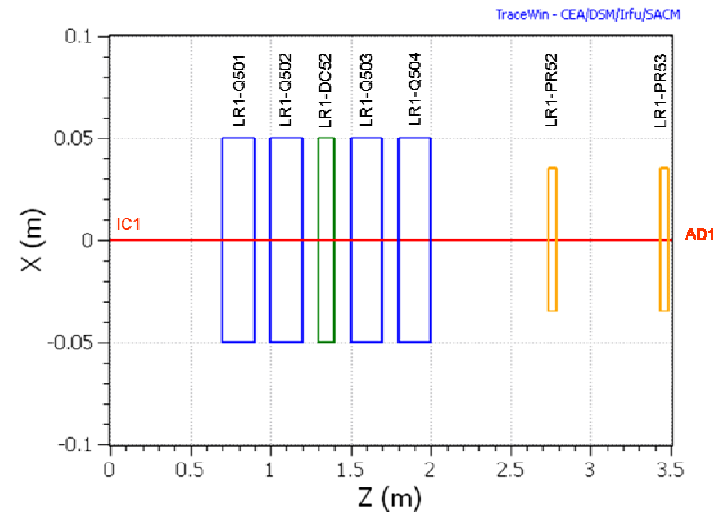


Calculs d'erreur en zone transport



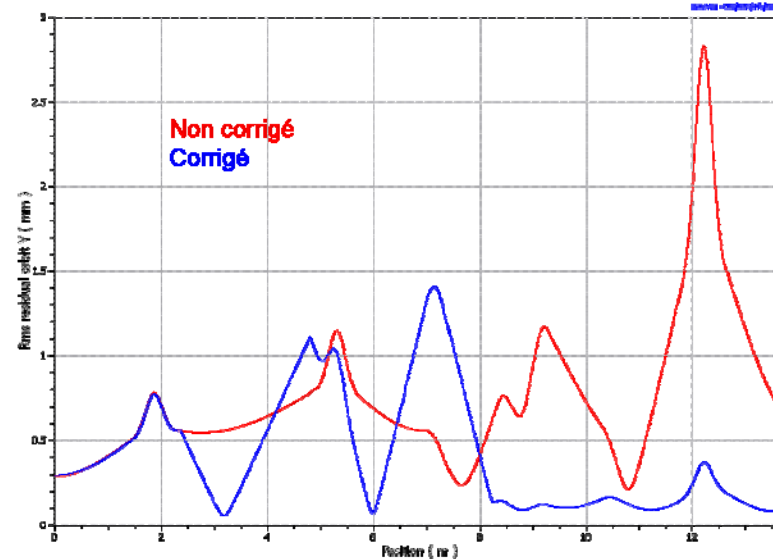
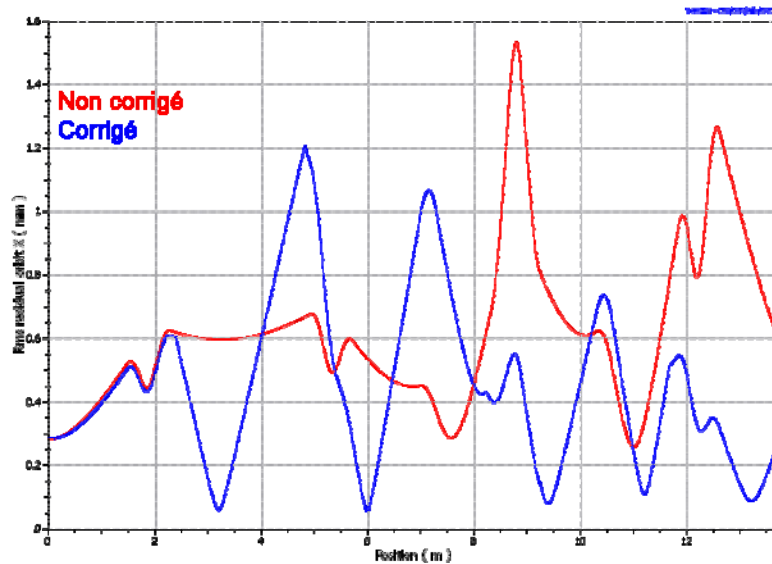
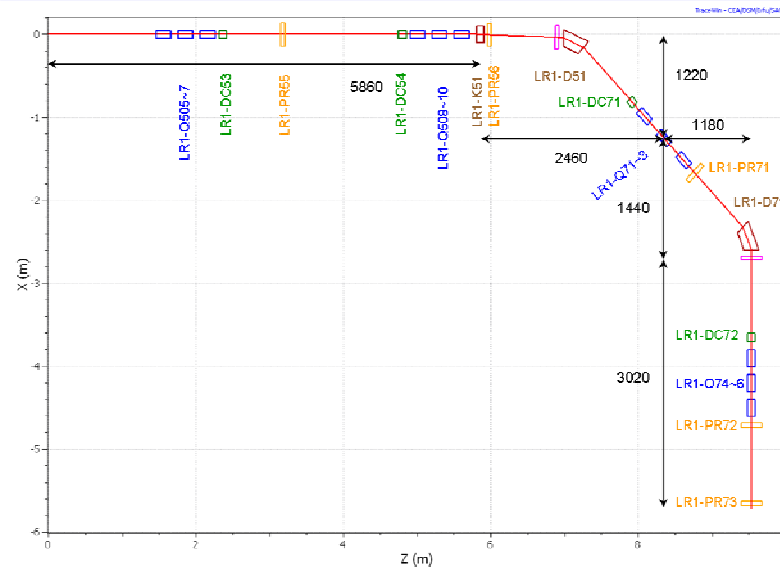
Section d'adaptation 2, position du faisceau ('orbite résiduelle')

Calculs d'erreur en zone transport



Section d'adaptation 2, RMS de la fluctuation de la taille faisceau

Calculs d'erreur en zone transport



Section d'aiguillage, position du faisceau ('orbite résiduelle')