

École Publique d'Ingénieurs en 3 ans

Rapport

EMITTANCE : TRANSFORMATION D'UNE ÉMITTANCE À TRAVERS DIFFÉRENTS SYSTÈMES D'OPTIQUE IONIQUE

septembre 2020,

version 4.0

Corentin MICHEL

Elève ingénieur en filière

Electronique et Physique Appliquée

Majeure Génie Nucléaire et Energétique

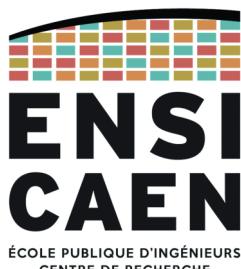
corentin.michel@mailo.com

Tuteur école : Jean-Claude ANGELIQUE

Tuteur entreprise : Laurent MAUNOURY



[www.ganil-
spiral2.eu](http://www.ganil-spiral2.eu)



www.ensicaen.fr



www.cnrs.fr



Ce travail est réalisé sous licence Creative Commons
Paternité - Pas d'utilisation commerciale - Pas de modification

Remerciements

J e remercie très sincèrement Monsieur MAUNOURY pour son accompagnement tout au long de ce stage de recherche, effectué en télé-travail. Il a su se montrer pédagogue en nous guidant à distance tout au long de ce stage et en faisant de cette initiation à la recherche en physique nucléaire quelque chose de sérieux et libre à la fois. Mes sincères remerciements vont aussi à Monsieur ANGE-LIQUE sans qui je n'aurais pu trouver ce stage en laboratoire. Je remercie également Madame MAGNIER du bureau des stages qui, malgré le confinement et l'éloignement, m'a permis d'avoir une convention en bonne et due forme.

Table des matières

Remerciements	3
Introduction	7
GANIL	7
Mise en contexte	8
Notions nécessaires préalables	11
L'émittance	11
Paramètres TWISS	12
Matrice sigma et matrice de transformation	13
Transformations à travers différents éléments d'optique	15
La transformation	15
Le drift	16
La lentille mince	18
La lentille Einzel	18
Le dipôle magnétique	20
Le quadripôle électrostatique	23
Le doublet quadripôles électrostatiques	25
Une approximation possible	26
Optimisations	29
Optimisation d'un doublet de quadripôles	29
Optimisation d'une série de lentilles Einzel	31
Bilan personnel	35
Résumé - Abstract	37
Appendix	41
Codes <i>Python</i>	41

Table des figures

1	Présentation du GANIL	8
2	Zone de 3.4 m de focalisation pour le stage	8
3	Représentation de la vallée de stabilité des atomes.	8
11figure.caption.8		
5	Représentation d'une ellipse avec ses paramètres TWISS	12
6	Faisceau divergent	12
7	Faisceau parallèle	12
8	Faisceau convergent	12
9	Changement des paramètres par une matrice de transfert T	13
10	A gauche : signal d'entrée, à droite : visualisation de la transformation à travers le drift	17
11	A gauche : signal d'entrée, à droite : visualisation de la transformation à travers la lentille mince	18
12	A gauche : signal d'entrée, à droite : visualisation de la transformation à travers la lentille mince suivie d'un drift	19
13	A gauche : signal d'entrée, à droite : visualisation de la transformation à travers la lentille Einzel	20
14	Dipôle magnétique	20
15	A gauche : signal d'entrée, à droite : visualisation de la transformation à travers le dipôle magnétique pour le plan (Oxx')	21
16	A gauche : signal d'entrée, à droite : visualisation de la transformation à travers le dipôle magnétique pour le plan (Oyy')	22
17	Quadripôle électrostatique bordé d'électrodes [7]	23
18	A gauche : signal d'entrée, à droite : visualisation de la transformation à travers le quadripôle électrostatique pour le plan (Oxx')	24
19	A gauche : signal d'entrée, à droite : visualisation de la transformation à travers le quadripôle électrostatique pour le plan (Oyy')	24
20	A gauche : signal d'entrée, à droite : visualisation de la transformation à travers le doublet de quadripôles électrostatiques pour le plan (Oxx')	25
21	A gauche : signal d'entrée, à droite : visualisation de la transformation à travers le doublet de quadripôles électrostatiques pour le plan (Oyy')	26
22	A gauche : signal d'entrée, à droite : visualisation de la transformation à travers l'approximation du doublet de quadripôles électrostatiques pour le plan (Oxx')	27

23	A gauche : signal d'entrée, à droite : visualisation de la transformation à travers l'ap- roximation du doublet de quadripôles électrostatiques pour le plan (Oyy')	28
24	Surface affichant la variation d'angle en sortie de doublet	30
25	Principe du télescope de Chauveau	31
26	En haut : visualisation des focales nécessaires aux 4 lentilles Einzel, en bas : visualisation des faisceaux en entrée, au centre et en sortie de système, après 4 lentilles Einzel	33

INTRODUCTION

Elève ingénieur en spécialité Electronique et Physique Appliquée en première année, je souhaite m'orienter dans le domaine de la physique nucléaire et plus particulièrement pour l'énergie. Mon projet professionnel ne s'oriente pas spécialement vers la recherche fondamentale, mais je suis ouvert à toutes les propositions et c'est ce qui m'a mené à vouloir postuler pour ce stage en laboratoire de recherche au GANIL. L'ensemble du stage s'est déroulé en télétravail à cause de la crise sanitaire actuelle. Lors du stage nous étions deux étudiants d'école d'ingénieur sur le même sujet, nous avons donc appris à travailler ensemble à distance, à se répartir le travail et à échanger sur nos difficultés.

<\> [Code disponible sur mon GitHub](#).

Présentation du GANIL

Le GANIL (grand accélérateur d'ions lourds) est un accélérateur capable de délivrer des faisceaux d'ions stables comme radioactifs qui peuvent être utilisés par des physiciens pour leurs recherches. L'installation SPIRAL1 (Figure 1) et les futures installations autour de SPIRAL2 du GANIL s'inscrivent dans l'effort commun de la communauté de la Physique Nucléaire pour produire des faisceaux radioactifs d'une intensité compétitive, voire sans précédent. La figure 1 montre les installations actuelles du GANIL et de SPIRAL1 et les deux phases de construction prévues de SPIRAL2. Le LINear ACcelerator (LINAC) permettra d'accélérer les faisceaux de deuteron pour la création de faisceaux de neutrons dans la salle d'expérimentation NFS (Neutron For Science), et également des noyaux allant du carbone à l'uranium à des énergies de 2 à 14,5 MeV/u pour l'installation S3. Le spectromètre Super Separator S3 est un séparateur conçu pour fonctionner avec les faisceaux de haute intensité délivrés par le LINAC, suivi d'une branche de basse énergie (S3-LEB) pour étudier les propriétés des noyaux exotiques ou super-lourds. S3 fait partie de la phase 1 de SPIRAL2 et se concentrera sur l'évolution des noyaux dans la région $N = Z$. La salle expérimentale DESIR (Désintégration, Excitation et Stockage des Ions Radioactifs) recevra les faisceaux radioactifs de faible énergie et de haute intensité de SPIRAL1 et de la salle expérimentale S3 en phase 1+.

Dans le cadre du stage, nous nous focaliserons sur une région de 3,4 m en entrée de la salle DESIR, où des éléments d'optique permettent de transporter le faisceau d'ions radioactifs jusqu'à deux dispositifs expérimentaux tout en conservant leurs qualités optiques (Figure 2).

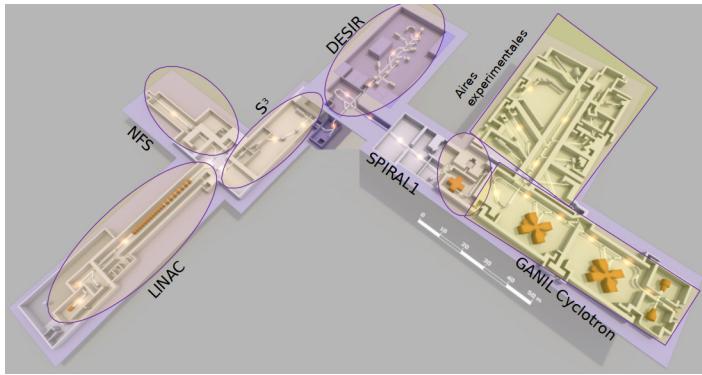


Figure 1. Présentation du GANIL

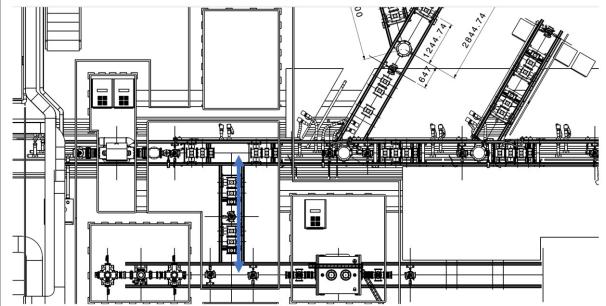


Figure 2. Zone de 3.4 m de focalisation pour le stage

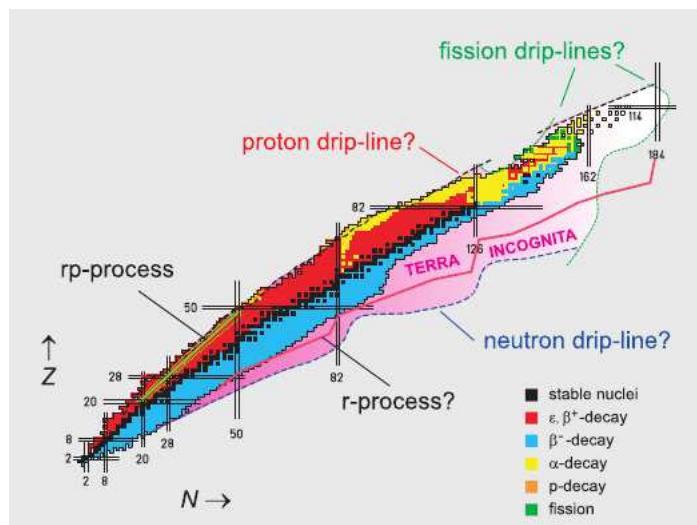


Figure 3. Représentation de la vallée de stabilité des atomes.

Lorsque l'on regarde le paysage nucléaire de la figure 3, on remarque le nombre de points d'interrogations et la région d'atomes dont on ne connaît pas encore les caractéristiques et les comportements. Tout cet espace reste donc en suspens et le monde scientifique travaille à pouvoir le comprendre un jour dans son intégralité. Aujourd'hui, on ne connaît que 2500 des 6000 combinaisons de protons et de neutrons possibles pour former des noyaux [1]. C'est pour cette raison qu'il existe une forte demande pour les faisceaux d'ions exotiques intenses et c'est dans cette optique que travaille le GANIL.

Mise en contexte

L'objectif du stage est avant tout de faire un pas dans le domaine de la Physique Nucléaire et de l'instrumentation associée et plus particulièrement de découvrir les attentes de la recherche fondamentale. Le stage se focalisera ainsi sur un aspect précis des accélérateurs de particule et en particulier les faisceaux d'ions dont l'une des caractéristiques est leur émittance.

D'après un article du CEA sur la dynamique des faisceaux de particules [2] :

"Les défis à relever pour une modélisation fidèle de la dynamique du faisceau sont divers. Sur le plan fondamental, citons la prise en compte de l'interaction avec le gaz résiduel (diffusion, ionisation, compensation de charge d'espace), de l'interaction avec les interfaces solides (cibles, fenêtres, collimateurs), la dynamique des plasmas des sources d'ions, l'optique du faisceau en présence d'éléments électromagnétiques d'ordres élevés (hexapôles, octupôles, cartes de champ), la maîtrise de la formation du halo et des pertes du faisceau pour la maintenance des futurs accélérateurs de puissance (moins de 1 W/m pour des faisceaux de plusieurs mégawatts). Sur un autre plan, il faut citer l'optimisation du coût des systèmes accélérateurs. Ces défis nécessitent la mise au point de modèles analytiques et le développement de codes de calcul et de méthodes numériques utilisant au mieux les ressources informatiques."

Dans cette optique, le sujet de stage nous permet de commencer à entrevoir les interactions entre les faisceaux et des éléments d'optique "perturbateurs" tout en utilisant les outils informatiques pour modéliser et optimiser leurs actions.

NOTIONS NÉCESSAIRES PRÉALABLES

Dans cette partie nous parlerons des différentes notions que nous avons dû apprendre à maîtriser avant de pouvoir répondre à la problématique.

L'émittance

■ L'émittance, parfois nommée exitance, est la grandeur photométrique caractérisant le flux émis par unité de surface d'une source étendue. C'est une notion qui nous renseigne sur la nature d'un faisceau, en terme de taille (liée à x), de divergence (liée à x'), et de distribution de particules (Figure 4).

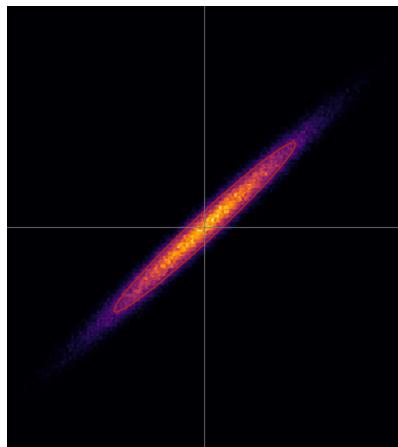


Figure 4. Simulation d'un faisceau d'ions grâce aux codes Python

En connaissant la taille et la divergence d'un faisceau en sortie d'un élément, on peut ainsi modéliser son allure, et pour cela les outils informatiques sont indispensables, permettant aux physiciens de prévoir les formes des faisceaux qu'ils transmettent.

Dans un exemple concret, la caractérisation précise d'un faisceau est plus que nécessaire dans le traitement des cancers par hadronthérapie [3]. Cette méthode permet de soigner des cancers radio-résistants et inopérables, sans utiliser de rayons X, ayant l'inconvénient de brûler les chairs sur l'axe du traitement. L'hadronthérapie permet de soigner de façon locale, mais avant toute chose, le faisceau doit pouvoir avoir une taille et une divergence bien précise.

L'émittance s'exprime en $mm.mrad$, cependant on l'exprime en $\pi.mm.mrad$ pour indiquer que la valeur numérique décrit une surface (x,x') divisée par $\pi : S = \pi\epsilon$.

L'émittance ne se suffisant pas à elle-même, elle met en lien des paramètres que l'on nomme "paramètres TWISS" qui permettent de modéliser le faisceau.

Paramètres TWISS

L'ellipse du faisceau et son orientation ainsi sont décrites par 4 paramètres : $\epsilon, \beta, \alpha, \gamma$. Avec ϵ l'émit-tance dont nous venons de parler et α, β et γ les trois autres paramètres TWISS.

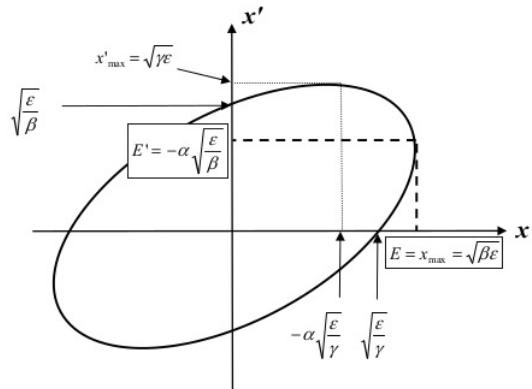


Figure 5. Représentation d'une ellipse avec ses paramètres TWISS

En déterminant ces paramètres on peut ainsi remonter directement à l'équation de l'ellipse :

$$\epsilon = \gamma x^2 + 2\alpha x x' + \beta x'^2 \quad (1)$$

Le paramètre α va indiquer la divergence du faisceau.

Si α est négatif, le faisceau sera divergent.

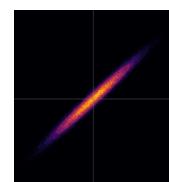


Figure 6. Faisceau divergent

Si α est nul, le faisceau sera dit parallèle.

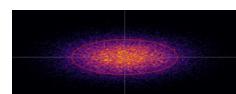


Figure 7. Faisceau parallèle

Si α est positif, le faisceau sera convergent.

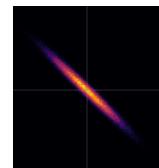


Figure 8. Faisceau convergent

Ces paramètres étant des paramètres d'ellipse, ils permettent de satisfaire le théorème d'Apollonius qui les relie entre eux :

$$\epsilon = \frac{S}{\pi} = \sqrt{\frac{\epsilon}{\gamma}} * \sqrt{\epsilon\gamma} = \sqrt{\frac{\epsilon}{\beta}} * \sqrt{\epsilon\beta} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \epsilon\beta = \frac{\epsilon}{\gamma} - \alpha \frac{\epsilon}{\gamma} \\ \beta\gamma = 1 + \alpha^2 \end{cases} \quad (3)$$

De cette façon, un faisceau d'ions qui aura une certaine forme en entrée de système, étant perturbé par un élément, verra ses paramètres TWISS modifiés. Ainsi son allure changera et on pourra obtenir de nouveaux paramètres en sortie par une méthode calculatoire que l'on détaillera par la suite.

Matrice sigma et matrice de transformation

L'approche que nous avons vis-à-vis du faisceau et de son comportement dans l'espace est une approche d'optique matricielle. En effet on peut considérer que le faisceau qui arrive en entrée de système a une matrice qui la caractérise et qui est formée des paramètres que nous venons de voir. Cette matrice, la matrice sigma, est en quelque sorte l'empreinte du faisceau dans l'espace, son identité. Or son identité sera modifiée par l'environnement et les éléments d'optique dans lesquels il sera contraint de passer.

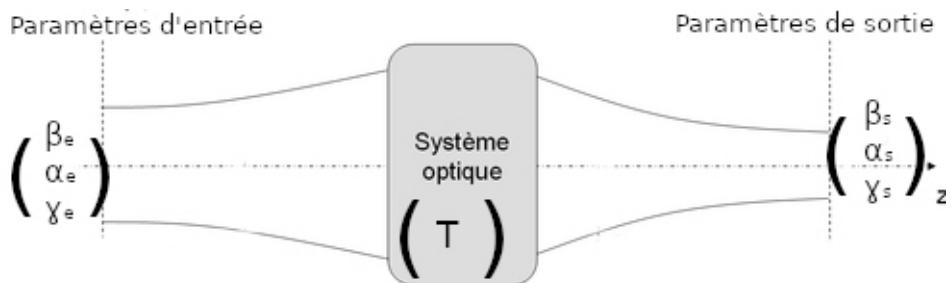


Figure 9. Changement des paramètres par une matrice de transfert T

Le système optique de matrice de transfert T va ainsi modifier les valeurs des paramètres TWISS du faisceau et de nouveaux paramètres seront définis en sortie, caractérisant une nouvelle allure du faisceau.

La matrice dite "sigma", qui correspond à l'empreinte de l'ellipse est alors :

$$\sigma = \epsilon \begin{pmatrix} \beta & -\alpha \\ -\alpha & \gamma \end{pmatrix} \quad (4)$$

On remarque que cette matrice (4) est composée des paramètres TWISS. C'est grâce à cette matrice que nous pourrons ensuite travailler et que nous pourrons caractériser la forme du faisceau en extrayant les différents paramètres.

TRANSFORMATIONS À TRAVERS DIFFÉRENTS ÉLÉMENTS D'OPTIQUE

Maintenant que nous sommes capables de comprendre de quoi nous parlons et que nous sommes capables de lire la “carte d’identité” des faisceaux, nous pouvons commencer à voir comment ces faisceaux sont transformés dans les différents éléments mis à notre disposition, grâce à des simulations que nous avons dû coder. Chaque élément d’optique a un comportement sur les faisceaux qui peut être modélisé en optique matricielle par une matrice de transfert dont nous allons nous efforcer ici de trouver les expressions.

La transformation

En optique matricielle, lorsqu’un faisceau passe à travers un élément d’optique dont on connaît la matrice de transfert T , ses paramètres initiaux sont modifiés (cf. équation (4)) de telle sorte que la nouvelle matrice des paramètres en sortie est telle que :

$$\sigma_s = \begin{pmatrix} T \\ \sigma_e \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T \\ \sigma_e \end{pmatrix}^t \quad (5)$$

Avec T^t la matrice transposée de la matrice de transfert.

Dans cette optique, il a donc été inévitable de devoir programmer informatiquement la visualisation des faisceaux. Nous avons programmé toutes nos visualisations de résultats en *Python*, langage fortement utilisé dans le milieu de la Recherche pour sa facilité de manipulation.

Certains paramètres comme le α et le β initiaux ainsi que l’émittance de départ ϵ ont été donnés à partir des valeurs en sortie d’accélérateur.

De façon générale, on n’utilise pas tout le faisceau d’ions en simulation car cela permet de représenter les pertes possibles dues aux collisions sur les parois, par exemple. De ce fait, les physiciens utilisent une émittance tronquée : $\epsilon_{rms} = 68.3\%$ (rms pour “root mean square”). Cette émittance correspond à un faisceau gaussien dont on conserve 68.3% des particules dans le faisceau (soit 2σ total d’écart type). En utilisant les statistiques et notamment la loi du χ^2 , on trouve les valeurs qui permettent d’afficher 68.3%, 90% ou 95.5% des valeurs dans une ellipse. Dans ces derniers cas on conserve 90% des particules pour un faisceau gaussien à 3.3σ total et 95.5% pour un faisceau gaussien à 4σ total.

Mon approche pour la visualisation des ellipses

Mon binôme et moi avons eu deux approches différentes face au problème. Etant à distance, nous pouvions nous aider mais nos programmes nous étaient propres et chacun avait sa vision.

Lui, a préféré se référer directement à l'équation de l'ellipse (équation 1) en fonction des paramètres de la matrice sigma. Pour ma part j'ai décidé de projeter des points, déviés par la matrice de transfert par rapport à leur trajectoire initiale (figure 9), qui représentent les ions du faisceaux, puis de calculer l'ellipse qui correspond à un certain degré de confiance. En faisant cela je devais projeter un certain nombre de points afin d'afficher un nuage assez conséquent. Je me suis fixé 100000 points pour la visualisation, simulant un faisceau de 100000 ions que l'on projette à travers le système (figure 4).

Pour cela j'ai utilisé une fonction [8] qui donne des coordonnées aléatoires de points autour d'une moyenne, que j'ai fixée au point de coordonnées (0,0), et qui retourne une matrice. Ensuite je l'ai multiplié par la matrice sigma (sigma en entrée ou sigma en sortie en fonction de ce que je voulais représenter) pour que mes points placés aléatoirement puissent suivre le canevas imposé et donc, finalement, représenter un nuage de points représentatifs des caractéristiques du faisceau.

Une fois le nuage de points représenté, j'ai défini une fonction [9] qui me permettait de prendre plus ou moins de points en compte, et donc d'obtenir l'ellipse. Enfin il était possible de tracer le nuage de points ainsi que l'ellipse de confiance [10].

Le Drift

Le drift (ou espace de glissement), est un élément d'une certaine distance L dont l'indice de réfraction est constant. Dans notre cas, l'indice de réfraction sera de 1 car nous aurons un espace de glissement rempli de vide. Sa matrice de transfert est telle que [1] :

$$T = \begin{pmatrix} 1 & L/n \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

En utilisant cette matrice de transfert et les paramètres permettant de caractériser le faisceau en entrée, il était possible de visualiser le faisceau en sortie d'élément. La longueur du drift a été prise égale à 424 mm.

$$\begin{aligned}
\sigma_{sortie} &= T \cdot \sigma_{entre} \cdot T^t \\
&= \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \epsilon \begin{pmatrix} \beta & -\alpha \\ -\alpha & \gamma \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ L & 1 \end{pmatrix} \\
&= \epsilon \begin{pmatrix} \gamma L^2 - 2\alpha L + \beta & L\gamma - \alpha \\ L\gamma - \alpha & \gamma \end{pmatrix} \quad (7)
\end{aligned}$$

En affichant 100 000 points pour le faisceau, on simule un faisceau de 100 000 ions projetés dans un drift.

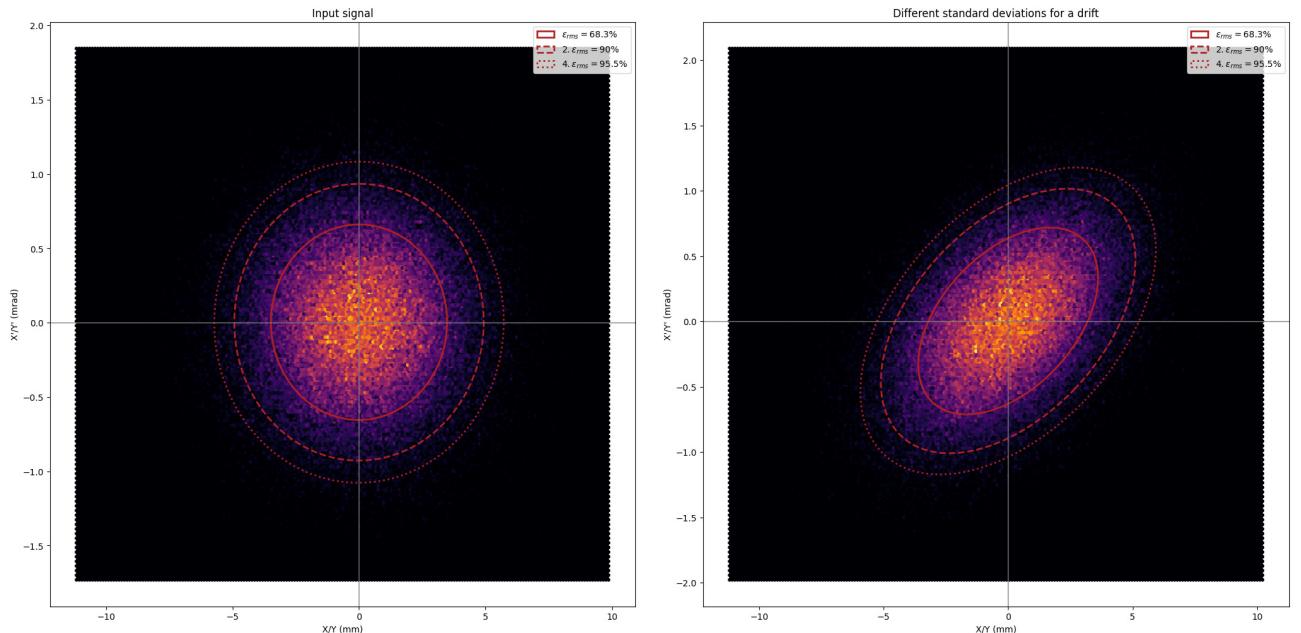


Figure 10. A gauche : signal d'entrée, à droite : visualisation de la transformation à travers le drift

En ordonnée de chaque graphique se situe l'angle de variation selon un plan (Oxx') ou (Oyy') et en abscisse la distance avec laquelle il a été dévié. Pour le cas d'un drift, la déviation selon le plan (Oxx') et le plan (Oyy') sont les mêmes, donc on ne représente qu'une ellipse de sortie pour les deux plans, ce ne sera pas forcément le cas par la suite.

La lentille mince

A partir de maintenant, pour un soucis de lisibilité, les représentations de faisceaux ne seront affichées qu'avec l'ellipse correspondant à ϵ_{rms} soit 68.3 % des valeurs. Pour la suite des exemples, nous ne détaillerons pas les calculs de la matrice sigma de sortie car le principe reste inchangé.

La lentille mince, est un élément d'une certaine focale f . Sa matrice de transfert est telle que [1] :

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

La focale de la lentille a été prise égale à 520 mm, valeur courante pour le système utilisé.

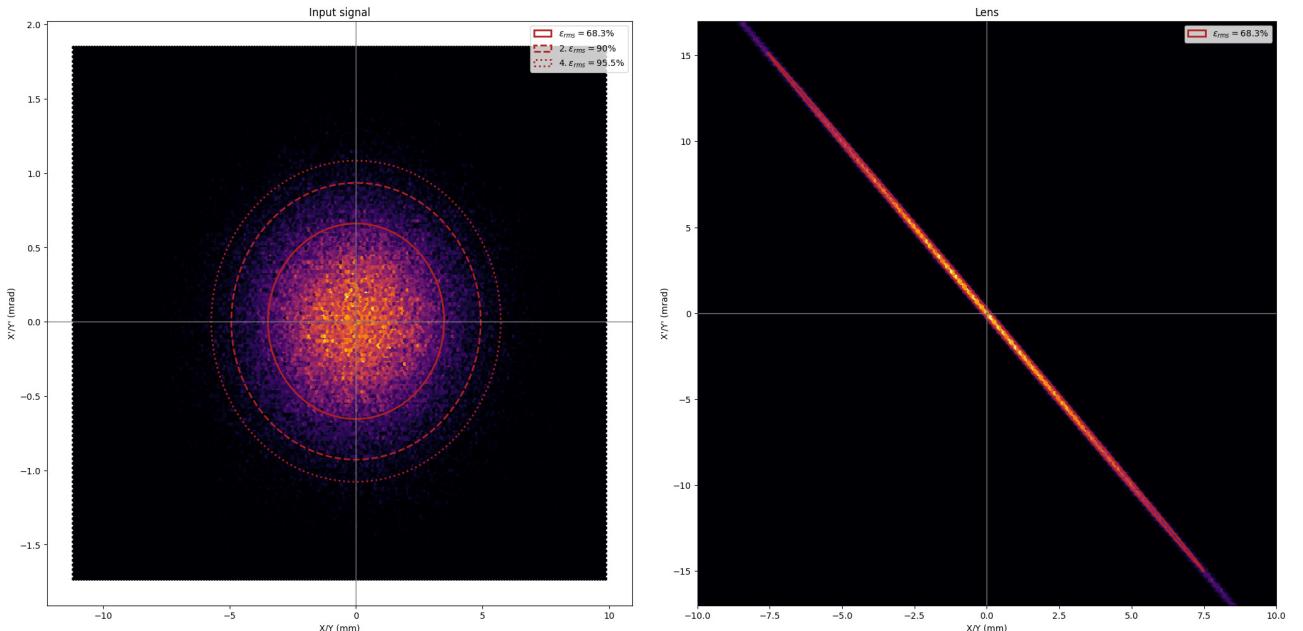


Figure 11. A gauche : signal d'entrée, à droite : visualisation de la transformation à travers la lentille mince

On remarque ici une divergence bien plus importante que dans le cas précédent et un faisceau très focalisé.

La lentille Einzel

La lentille Einzel (ou lentille unipotentielle) est une lentille particulière destinée spécifiquement à la focalisation de faisceaux d'ions. Cette lentille utilise une différence de potentiel sur une distance L

pour dévier le faisceaux dans son plan. Nous pouvons approximer cette lentille par une lentille mince de focale 520 mm bordée de deux drifts de longueurs L_1 et L_2 de 424 mm [4].

Dans un premier temps nous allons visualiser l'effet d'une lentille suivie d'un drift, puis nous pourrons ajouter un drift en amont et ainsi obtenir l'approximation de la lentille Einzel. La matrice de transfert avec un seul drift devient :

$$T = \begin{pmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{L_2}{f} & L_2 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

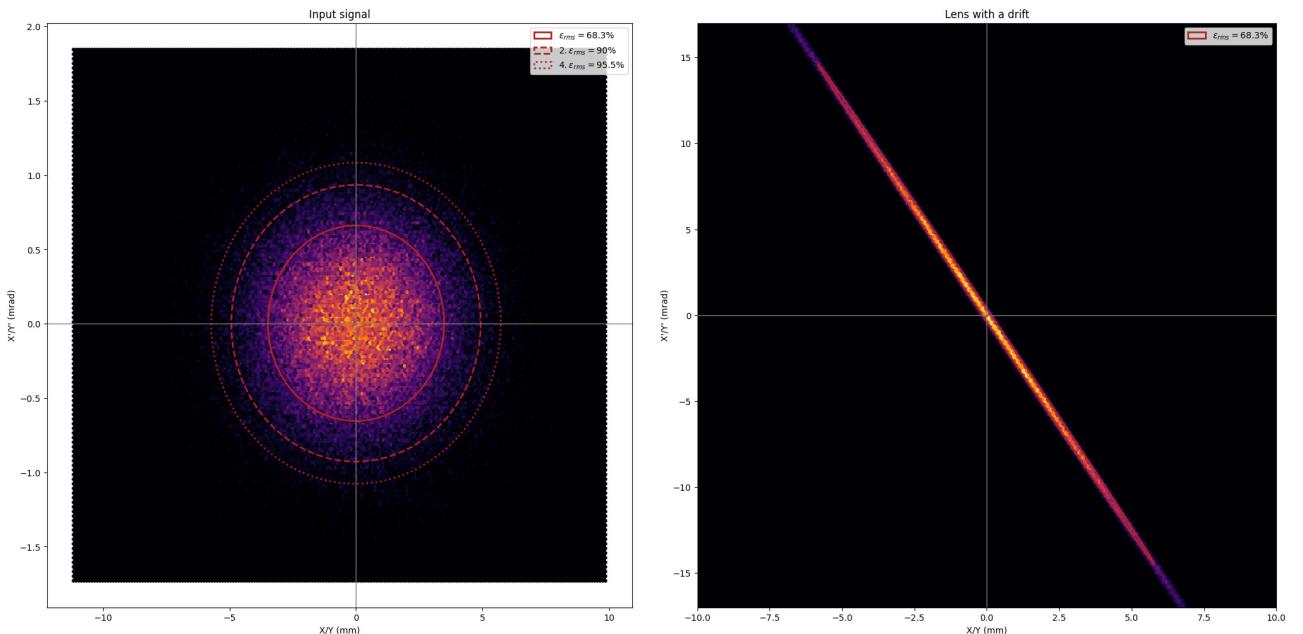


Figure 12. A gauche : signal d'entrée, à droite : visualisation de la transformation à travers la lentille mince suivie d'un drift

On ajoute maintenant un drift en amont, on a donc un système drift - lentille mince - drift, et donc l'approximation d'une lentille Einzel. La matrice de transfert devient :

$$T = \begin{pmatrix} 1 - \frac{L_2}{f} & L_1(1 - \frac{L_2}{f}) + L_2 \\ -\frac{1}{f} & -\frac{L_1}{f} + 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

Or $L_1 = L_2$ donc on peut donner une version simplifiée de cette matrice :

$$T = \begin{pmatrix} 1 - \frac{L}{f} & L(2 - \frac{L}{f}) \\ -\frac{1}{f} & -\frac{L}{f} + 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

En gardant la même échelle entre la lentille Einzel et la lentille mince avec le drift, on remarque qu'il y a la même divergence mais un étalement en distance plus faible. On rappelle que pour tous les

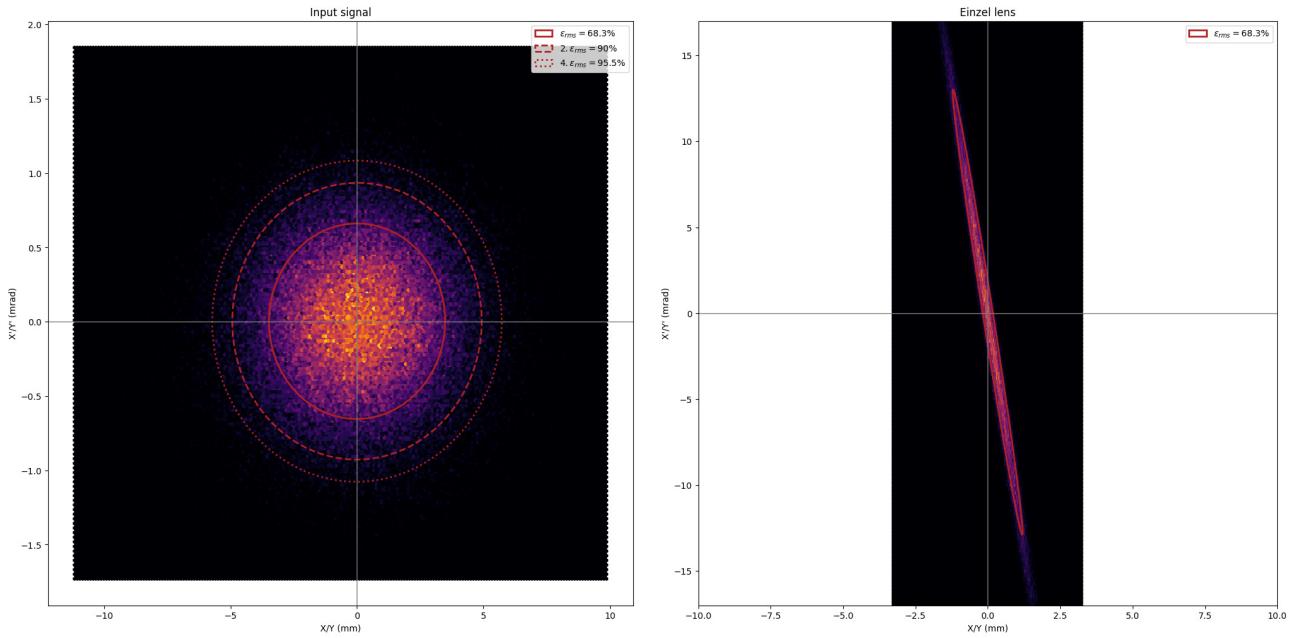


Figure 13. A gauche : signal d'entrée, à droite : visualisation de la transformation à travers la lentille Einzel

exemples précédents, on ne représente que la visualisation dans un plan, mais que le faisceau est bien dévié dans les deux plans (Oxx') et (Oyy').

Le dipôle magnétique

Le dipôle magnétique est un aimant focalisant dans le plan horizontal et se comportant comme un drift dans le plan vertical.

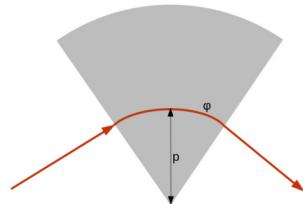


Figure 14. Dipôle magnétique

Ce qui signifie que le dipôle magnétique va avoir deux matrices de transfert différentes, selon le plan (Oxx') et le plan (Oyy') ([1], [5]) :

$$T_x = \begin{pmatrix} \cos(\varphi) & p \cdot \sin(\varphi) \\ \frac{1}{p} \cdot \sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$T_y = \begin{pmatrix} 1 & p \cdot \varphi \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

On va donc ici devoir représenter la transformation dans les deux plans (Oxx') et (Oyy'). Cependant nous ne prendrons pas en compte le fait qu'il puisse y avoir des couplages entre les deux plans. On prendra pour valeurs $\phi = 90^\circ$ et $p = 260\text{ mm}$.

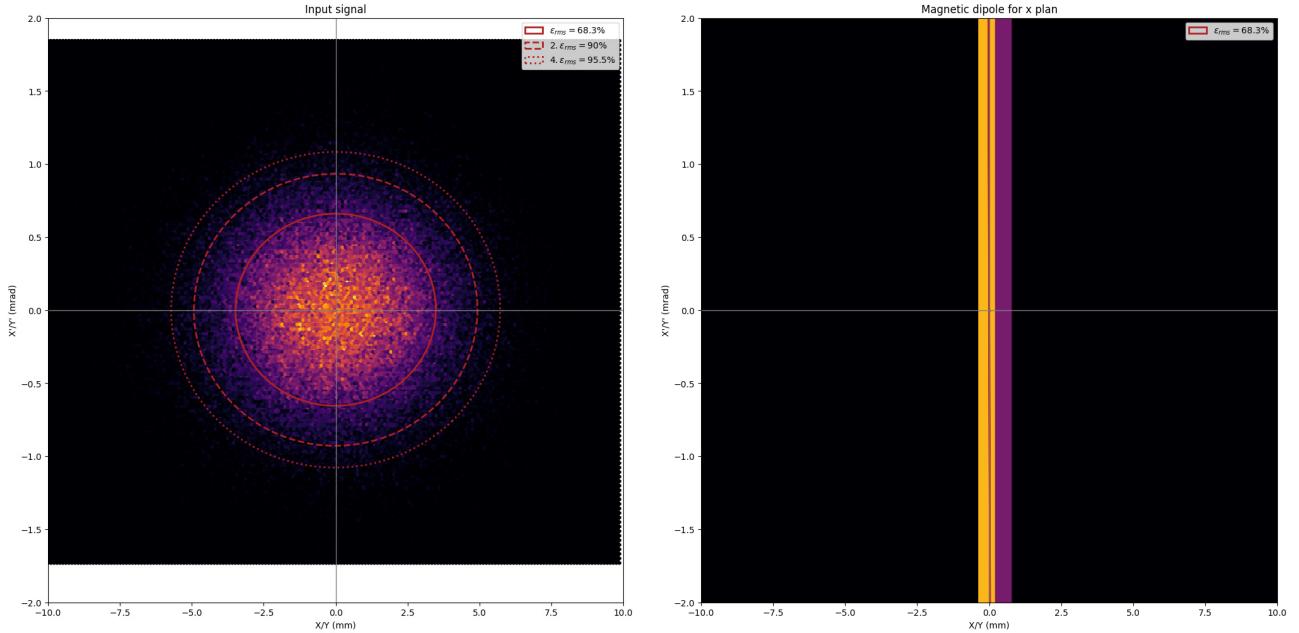


Figure 15. A gauche : signal d'entrée, à droite : visualisation de la transformation à travers le dipôle magnétique pour le plan (Oxx')

On remarque immédiatement que le faisceau a une divergence très élevée mais une dispersion très faible (figure 15). La représentation semble erronée mais elle provient du fait que les points sont très éloignés les uns des autres et que la fonction *Python* qui représente l'ensemble des points n'arrive pas à les afficher correctement sur cette échelle.

Cet affichage pointe du doigt une propriété importante. En effet, le faisceau de sortie doit avoir la même surface que le faisceau d'entrée pour la même perte considérée. Donc si le faisceau est particulièrement peu divergent, il sera particulièrement dispersé, et inversement.

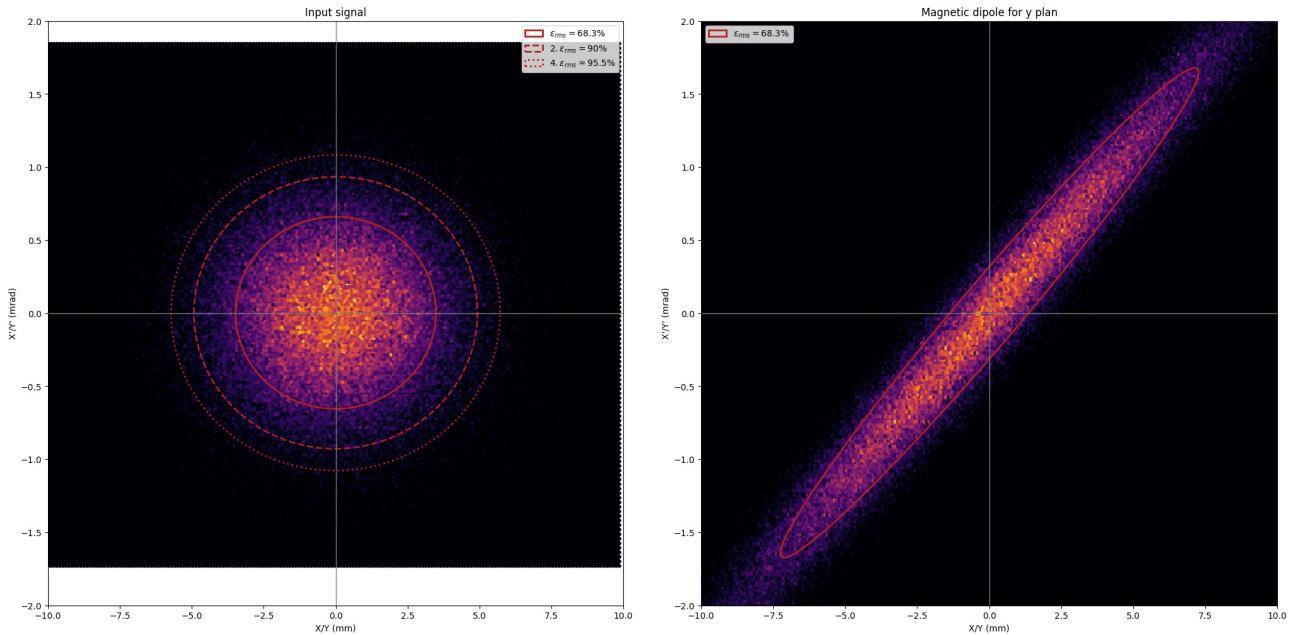


Figure 16. A gauche : signal d'entrée, à droite : visualisation de la transformation à travers le dipôle magnétique pour le plan (0yy')

Pour le plan (0yy') (figure 16), la divergence est bien plus faible que précédemment et la dispersion un peu plus élevée. On a ici un système qui a deux actions différentes sur le faisceau selon quel plan on considère. A partir de maintenant, tous les éléments d'optique que nous verrons auront cette particularité.

Le quadripôle électrostatique

Le quadripôle électrostatique permet la concentration du faisceau qui est indispensable pour un transfert efficace dans la salle d'expérimentation DESIR tout en assurant le confinement des particules.

Cet élément utilise des propriétés d'électrostatique pour dévier le faisceau dans l'espace dans les deux plans, grâce à des différences de potentiel entre des électrodes. Le quadripôle va avoir une action focalisante sur un plan et défocalisante sur l'autre. Nous allons donc garder notre faisceau parallèle d'entrée pour visualiser un faisceau convergent pour le plan (Oxx') et divergent pour le plan (Oyy').

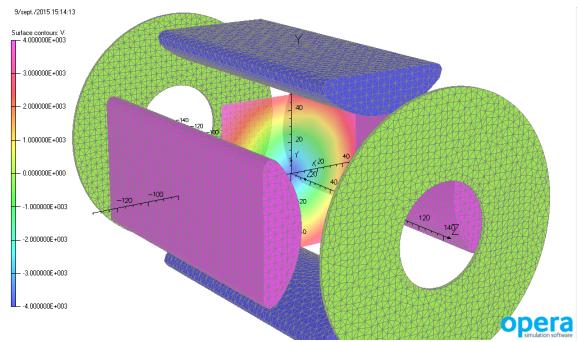


Figure 17. Quadripôle électrostatique bordé d'électrodes [7]

Il existe également des quadripôles magnétiques où c'est un champ magnétique qui permet de focaliser ou défocaliser les ions.

Ce qui signifie que le quadripôle électrostatique va avoir deux matrices de transfert différentes, selon le plan (Oxx') et le plan (Oyy') ([1], [5], [6]) :

$$T_+ = \begin{pmatrix} \cos(kL) & \frac{1}{k} \sin(kL) \\ -k \cdot \sin(kL) & \cos(kL) \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$T_- = \begin{pmatrix} \cosh(kL) & \frac{1}{k} \sinh(kL) \\ k \cdot \sinh(kL) & \cosh(kL) \end{pmatrix} \quad (15)$$

Avec : $k = \sqrt{\frac{V_0}{2VR^2}} [m^{-1}]$

- $V_0 = 1800 \text{ V}$, la différence de tension entre électrodes voisines ($+V_0/2$ sur l'une et $-V_0/2$ sur ses voisines).
- $V = 20000 \text{ V}$, la tension d'accélération de l'ion utilisé (ici du $^{39}\text{K}^+$).
- $R = 0.035 \text{ m}$, la demie distance entre les électrodes.

Ces valeurs ont été fournies car utilisées de façon expérimentale sur l'installation SPIRAL1.

Mais avant de lancer le calcul pour visualiser les ellipses, nous allons ajouter un drift après le quadripôle afin de simuler le fait que le faisceau mettra une certaine distance à se stabiliser dans sa tra-

jectoire. Nous ne l'avons pas fait précédemment car les éléments précédents avaient une action sur le faisceau directement en sortie, le quadripôle, quant à lui, prend un peu plus de place pour se dévier.

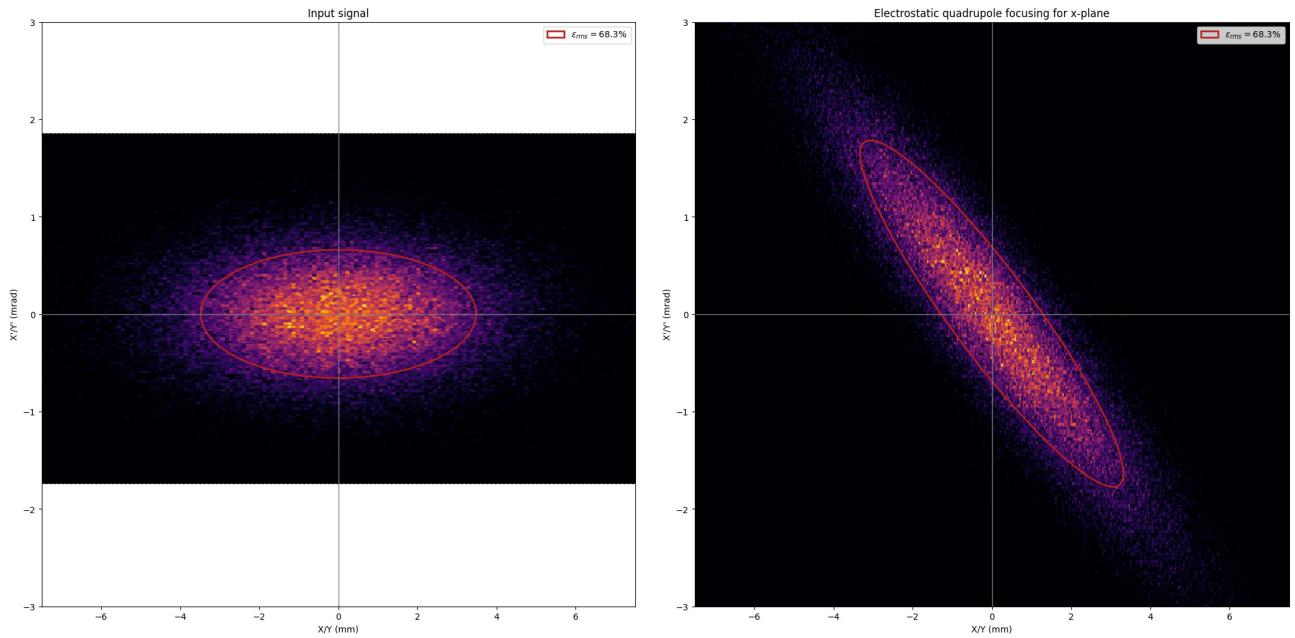


Figure 18. A gauche : signal d'entrée, à droite : visualisation de la transformation à travers le quadripôle électrostatique pour le plan (Oxx')

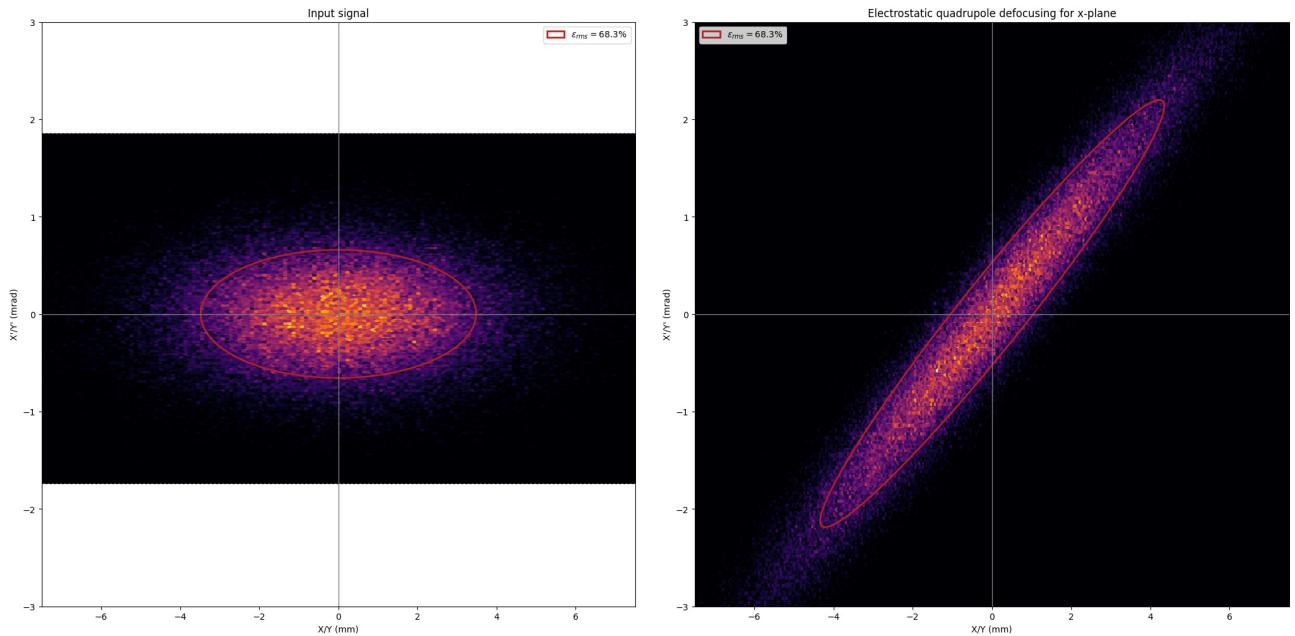


Figure 19. A gauche : signal d'entrée, à droite : visualisation de la transformation à travers le quadripôle électrostatique pour le plan (Oyy')

On obtient, comme prévu, un faisceau convergent dans le plan (Oxx') (figure 18 et définition figure 8) et divergent selon (Oyy') (figure 19 et définition figure 6). Puisque nous sommes partis d'un faisceau parallèle en entrée, cela confirme que le quadripôle est focalisant sur le premier plan et défocalisant selon le second.

Le doublet de quadripôles électrostatiques

Un autre élément que nous allons devoir utiliser est le doublet de quadripôles électrostatiques. Nous verrons dans le chapitre suivant qu'il sera essentiel pour la partie optimisation.

Le principe devient alors très simple, on place deux quadripôles électrostatiques à la suite en ajoutant un espace de 40 mm entre les deux quadripôles. Les deux quadripôles auront les mêmes caractéristiques que précédemment (cf. équations 14 et 15). Seulement ils auront des plans de focalisation complémentaires l'un par rapport à l'autre : si le plan (Oxx') du premier quadripôle est focalisant, alors le plan (Oxx') du deuxième quadripôle est défocalisant et vice-versa. Quelques lignes de *Python* permettent de vérifier cette condition avant de calculer la matrice sigma en sortie et donc de visualiser l'ellipse.

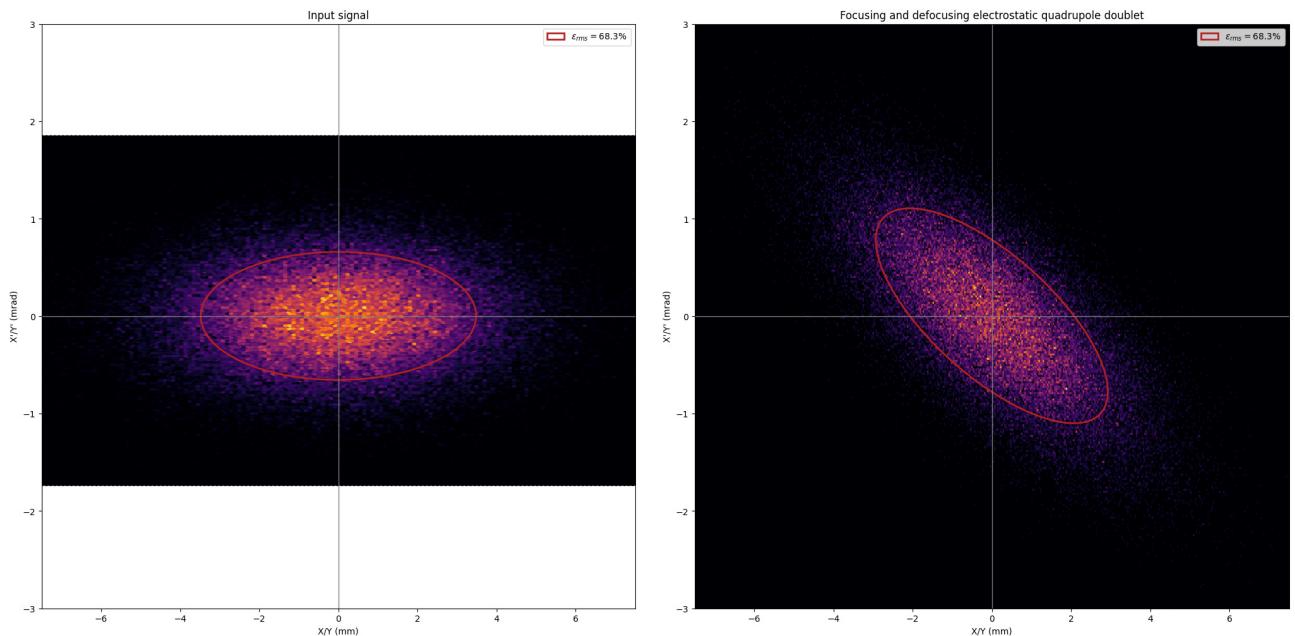


Figure 20. A gauche : signal d'entrée, à droite : visualisation de la transformation à travers le doublet de quadripôles électrostatiques pour le plan (Oxx')

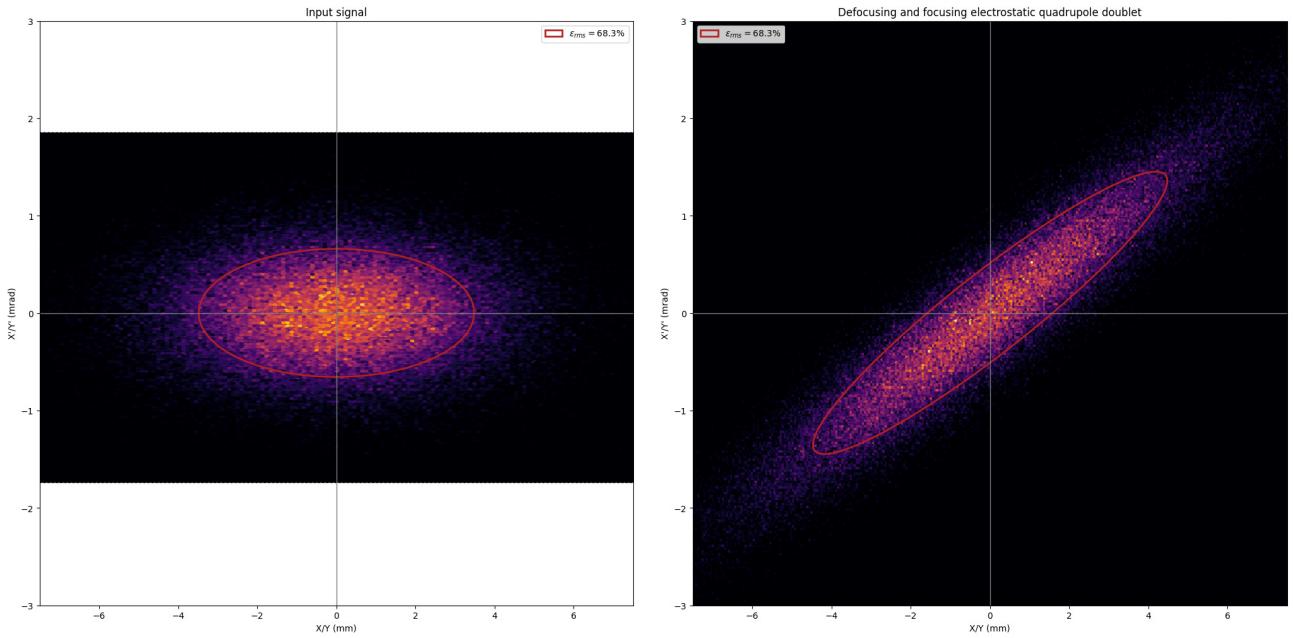


Figure 21. A gauche : signal d'entrée, à droite : visualisation de la transformation à travers le doublet de quadripôles électrostatiques pour le plan (Oyy')

Ayant gardé la même échelle que pour les ellipses figures 18 et 19, on peut voir que leurs divergences ont été globalement diminuées. C'est en effet une qualité que l'on recherche, on souhaite éviter au maximum que les faisceaux divergent ou se dispersent.

Une approximation possible

Nous nous sommes apperçus qu'il était souvent possible de faire des approximations afin de simplifier des calculs tout en gardant une certaine cohérence dans les résultats. La thèse de Y. FEDALA nous indique d'ailleurs :

“Il est parfois utile pour simplifier des problèmes de transport des faisceaux, d'utiliser l’approximation lentille mince d'un quadrupôle. Dans l'approximation lentille mince, un quadrupole (épais) de longueur L et de force K est remplacé par une lentille mince de focale f encadrée de deux sections sans champs de longueur $L/2$. La matrice de la lentille mince équivalente peut être obtenue à partir de la matrice du quadrupole en faisant tendre L vers zéro et en gardant le produit KL constant. La matrice de la lentille mince s’écrit alors :”

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$\text{Avec : } \frac{1}{f} = \frac{L \frac{V_0}{4}}{R^2 V}$$

- $L = 0.100 \text{ m}$, la longueur du drift que l'on ajoute après le quadripôle.

- $V_0 = 1800 \text{ V}$, la différence de tension entre électrodes voisines ($+V_0/2$ sur l'une et $-V_0/2$ sur ses voisines).
- $V = 20000 \text{ V}$, la tension d'accélération de l'ion utilisé (ici du $^{39}\text{K}^+$).
- $R = 0.035 \text{ m}$, la demie distance entre les électrodes.

Le but ici est donc de vérifier que l'on peut utiliser cette approximation pour travailler ensuite.

On calcule donc la matrice sigma de sortie en utilisant une suite de deux lentilles minces bordées de drifts (sections sans champ dans la thèse de Y. FEDALA). On utilise notre condition précédente qui prenait un drift de 40 mm entre les deux quadripôles et on prend des drifts de longueurs $\frac{100 \text{ mm}}{2}$ de chaque coté des quadripôles.

On calcule la matrice sigma et on affiche l'ellipse :

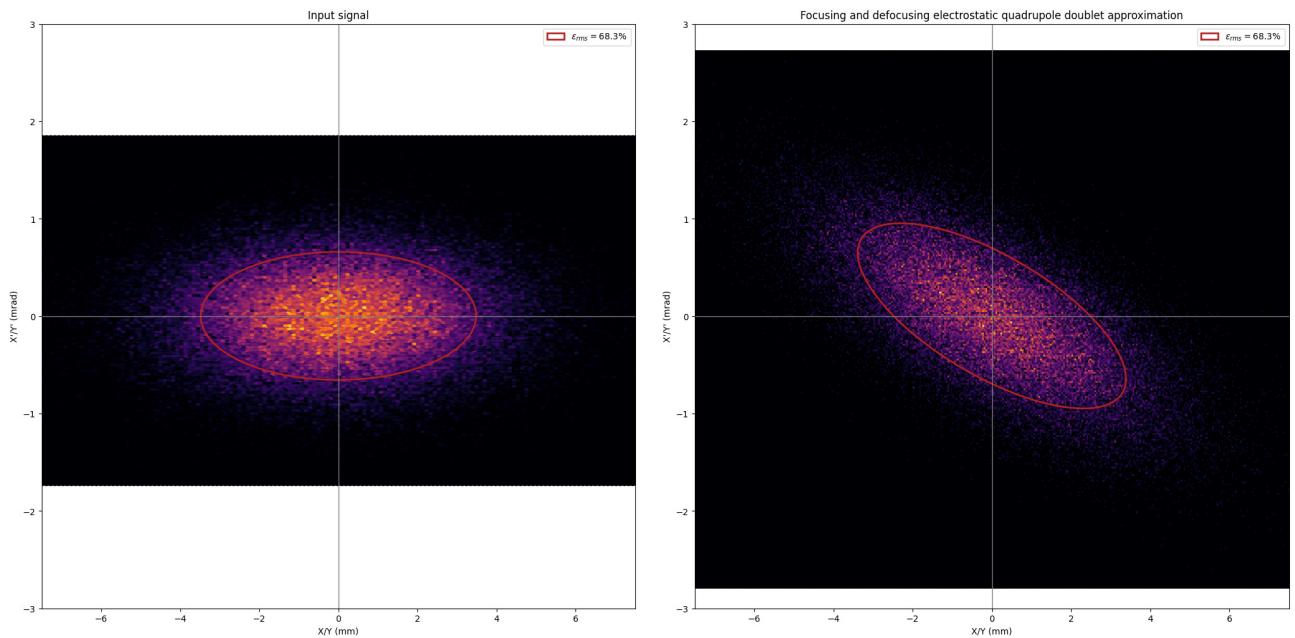


Figure 22. A gauche : signal d'entrée, à droite : visualisation de la transformation à travers l'approximation du doublet de quadripôles électrostatiques pour le plan (0xx')

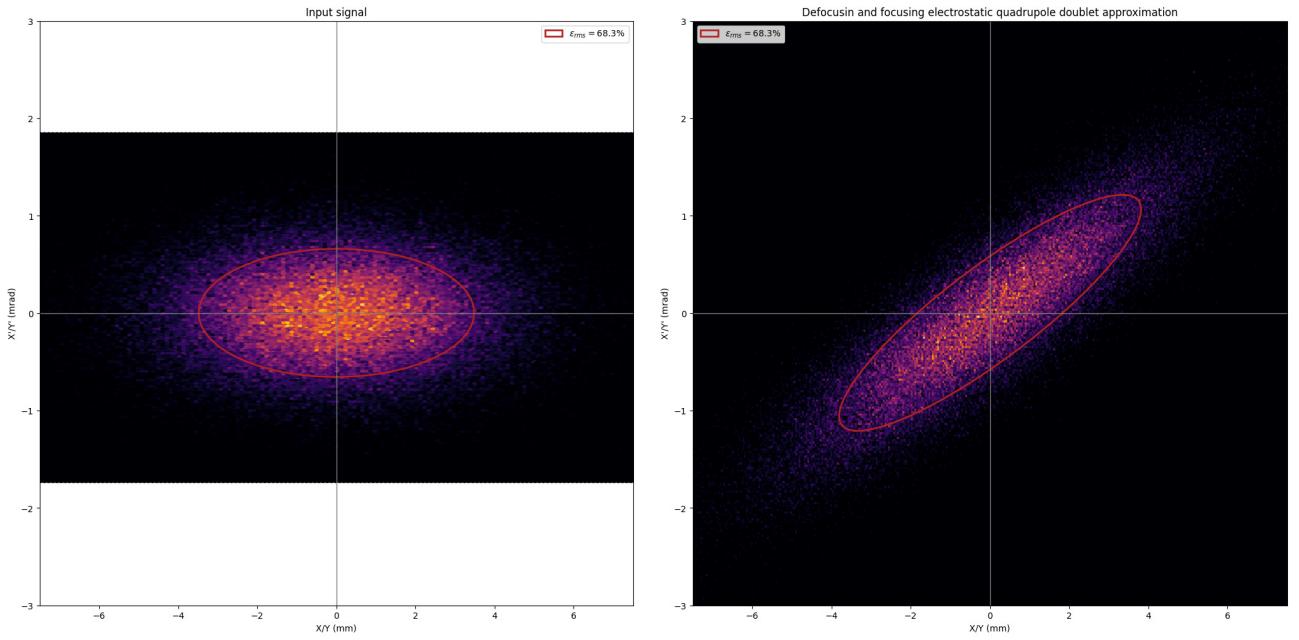


Figure 23. A gauche : signal d'entrée, à droite : visualisation de la transformation à travers l'approximation du doublet de quadripôles électrostatiques pour le plan (Oyy')

On s'aperçoit immédiatement que les figures 20 et 22 ainsi que 21 et 23 sont très similaires. Nous allons pouvoir considérer par la suite que l'on peut utiliser cette approximation du quadripôle électrostatique par une lentille mince bordée de drifts.

OPTIMISATIONS

Nous visualisons maintenant le comportement des faisceaux d'ions lorsqu'ils traversent les éléments d'optique qui constituent la section qui nous intéressait. L'optimisation demandée en début de stage va être réalisée soit avec des doublets de quadripôles soit avec une série de lentilles Einzel. Nous allons donc maintenant nous focaliser sur l'optimisation des paramètres afin d'obtenir des faisceaux aux caractéristiques prédéfinies. Puisque nous venons de voir qu'il était possible d'approximer les doublets de quadripôles, nous allons utiliser cette propriété. Dans un premier temps, j'ai fait une recherche de minimisation de la divergence avec un doublet de quadripôles. Ensuite j'ai étudié un système de lentilles Einzel en série tandis que Tom, avec qui j'ai fait le stage, s'est focalisé sur un système de deux séries de doublets de quadripôles.

Optimisation d'un doublet de quadripôles

Dans cette première partie nous devions faire une optimisation en recherchant les tensions à appliquer à deux quadripôles électrostatiques de focalisation inverse l'un par rapport à l'autre pour rechercher les combinaisons possibles pour avoir un minimum de variation dans le plan (Oxx') et dans le plan (Oyy'). Le programme que j'ai écrit affiche une surface en 3D qui permet de visualiser les combinaisons possibles pour avoir un minimum de variation d'angle en sortie. On notera que de façon expérimentale, si $\alpha \leq 0.01 \text{ rad}$, on peut considérer que le faisceau est parallèle. Ainsi sur la surface affichée, on aura un ensemble de valeurs de tensions à appliquer aux quadripôles qui permettront de minimiser cette variation d'angle en sortie par rapport à l'entrée.

Nous partirons d'un faisceau parallèle ($\alpha = 0$ et $\beta = 1.8$) de ${}^{39}\text{K}$ à 3000 eV d'énergie avec une émittance de $5 \pi.\text{mm}.m\text{rad}$.

Optimisation de la variation d'angle en fonction de la tension appliquée aux quadripôles

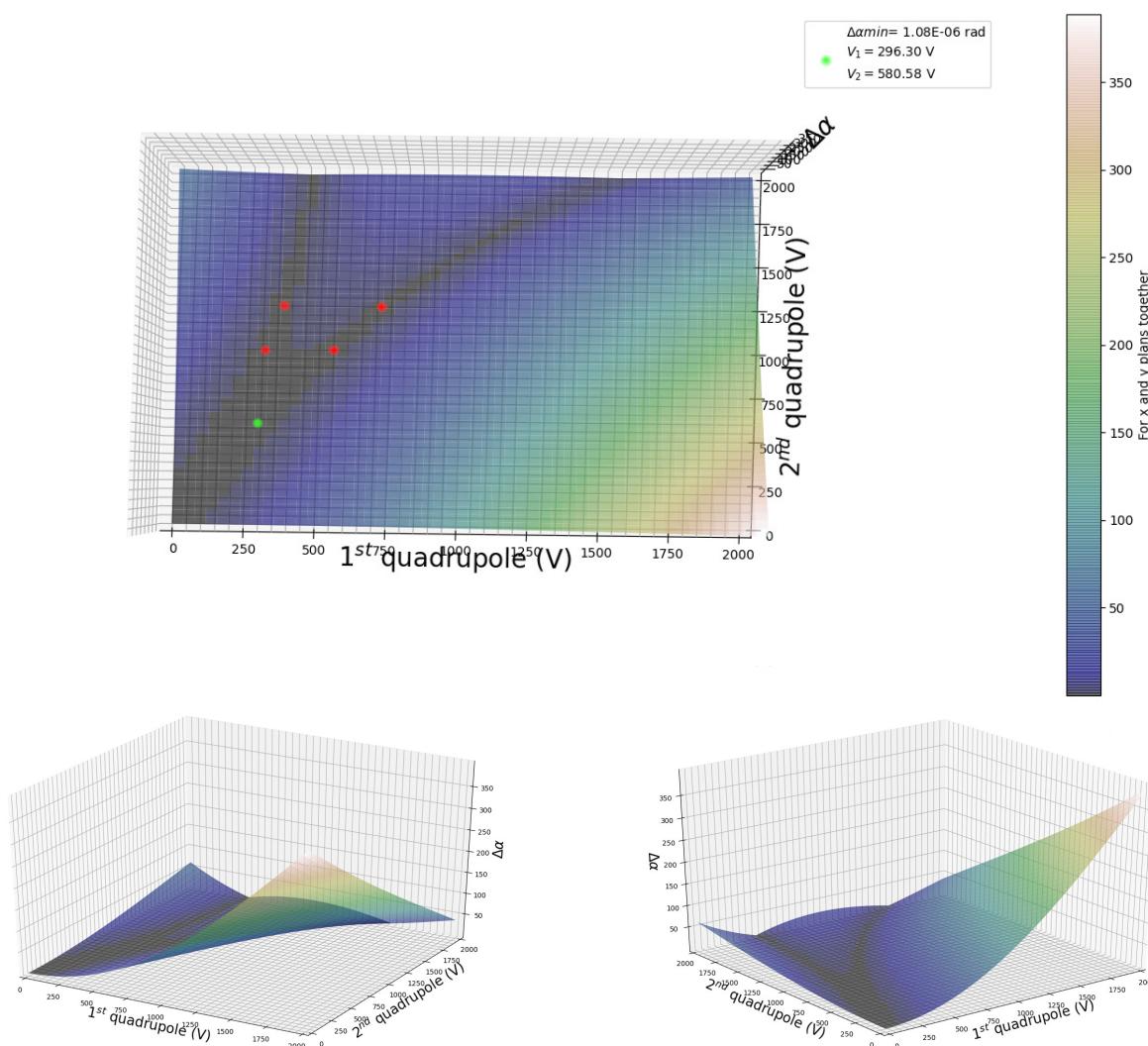


Figure 24. Surface affichant la variation d'angle en sortie de doublet

Les zones noires sur le graphique nous permettent de visualiser des courbes de tensions qui, combinées, permettent de minimiser la variation d'angle en sortie de doublet de quadripôle.

Sur le graphique ne sont prises en compte que les valeurs de tensions entre 0 V et 2000 V, cependant il est possible de mettre une tension négative, mais on remarquera alors une symétrie des couples de valeur par rapport à 0.

On remarque une fourche sur la surface. Cette fourche signifierait que pour une valeur de tension pour le 2^e quadripôle, il existe deux possibilités de tension pour le 1^{er} qui minimiseraient la divergence. Avant d'avoir écrit ce programme nous n'avions aucun moyen d'envisager cette propriété. Cette représentation 3D est donc des plus instructives. Nous allons vérifier cette nouvelle propriété en prenant des valeurs (couples que l'on affiche en rouge sur la figure 24).

	V1 = 310 V	V1 = 552 V
V2 = 1000 V	$\Delta\alpha = 0.006048 \text{ rad}$	$\Delta\alpha = 0.000439 \text{ rad}$
	V1 = 733 V	V1 = 361 V
V2 = 1250 V	$\Delta\alpha = 0.011921 \text{ rad}$	$\Delta\alpha = 0.012571 \text{ rad}$

Table 1. Vérification pour certains couples de tension

On ne vérifie que certaines valeurs mais on remarque déjà que la variation d'angle est minime. Sachant que l'on part d'un faisceau parallèle avec $\alpha = 0 \text{ rad}$, on obtient que le $\Delta\alpha$ est en fait la valeur absolue de la divergence en sortie de doublet de quadripôle. Or avec une divergence de moins de 0.01 rad , on peut considérer que le faisceau est parallèle. La surface en figure 24 montre bien qu'il existe parfois deux valeurs de tension pour le 1^{er} quadripôle qui permettent d'avoir un faisceau parallèle, avec la même tension pour le 2^e.

On remarque en revanche que plus on s'éloigne du minimum (le point vert) en passant par les branches de la fourche, moins les couples de tension permettent d'avoir un $\Delta\alpha$ suffisamment petit pour considérer que le faisceau est parallèle.

Optimisation d'une série de lentilles Einzel

Dans cette deuxième partie nous nous basons sur les travaux de P. CHAUVEAU [4] qui étudie le fait que nous soyons capables de transporter un faisceau d'ions d'un point A à un point B en minimisant les pertes sur le trajet. Avec un jeu de lentilles, nous serions ainsi capables de transporter le faisceau de l'entrée à la fin d'une section d'une certaine distance et, en jouant sur les points focaux images et objets, retrouver le même faisceau qu'au début.

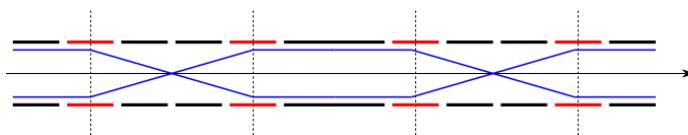


Figure 25. Principe du télescope de Chauveau

Ainsi nous simulons le fait qu'il existe 4 lentilles Einzel successives sur notre section de 3.4 m. Le but est de faire rentrer un faisceau et de trouver les valeurs de focale des lentilles (que l'on peut placer n'importe où sur la ligne, paramètre à choisir au début) qui permettent d'avoir un faisceau le moins divergent possible. Les lentilles sont placées de façon symétriques par rapport au centre.

En utilisant la propriété précédemment énoncée selon laquelle un faisceau garde une surface constante

s'il n'a pas de perte, le programme *Python* que j'ai réalisé ne va se focaliser que sur le terme de divergence de la matrice sigma de sortie. En effet, en recherchant les valeurs de focale de telle sorte que α_{sortie} soit le plus proche possible de α_{entre} , on fait en sorte que le faisceau de sortie soit le plus ressemblant possible du faisceau d'entrée.

Dans notre exemple nous allons partir d'un faisceau parallèle comme nous l'avons fait depuis le début, et chercher les valeurs de focale des 4 lentilles qui permettent d'avoir un faisceau le moins divergent possible par rapport à l'entrée. Nous garderons le faisceau de ^{39}K à 3000 eV d'énergie avec une émittance de $5 \pi.mm.mrad$.

La figure 26 nous permet de visualiser les focales nécessaires aux 4 lentilles Einzel de notre système. On peut également voir l'allure du faisceau lorsqu'il entre (à gauche), au centre du système (au milieu) et lorsqu'il en ressort (à droite). Le faisceau n'est presque pas dévié si on considère qu'il est passé par 4 lentilles qui auront une action comme montré sur la figure 25. Il n'y a qu'une légère dispersion par rapport au faisceau d'entrée. On peut donc ici considérer que le résultat est acceptable. On pourra par ailleurs remarquer une diminution de la densité du faisceau en sortie par rapport à l'entrée. Cela est dû au fait que le système ne peut pas être parfait et qu'il existe tout de même des pertes. Mais on peut considérer que pour un faisceau qui traverse 3.4 m de lentilles, elles restent négligeables.

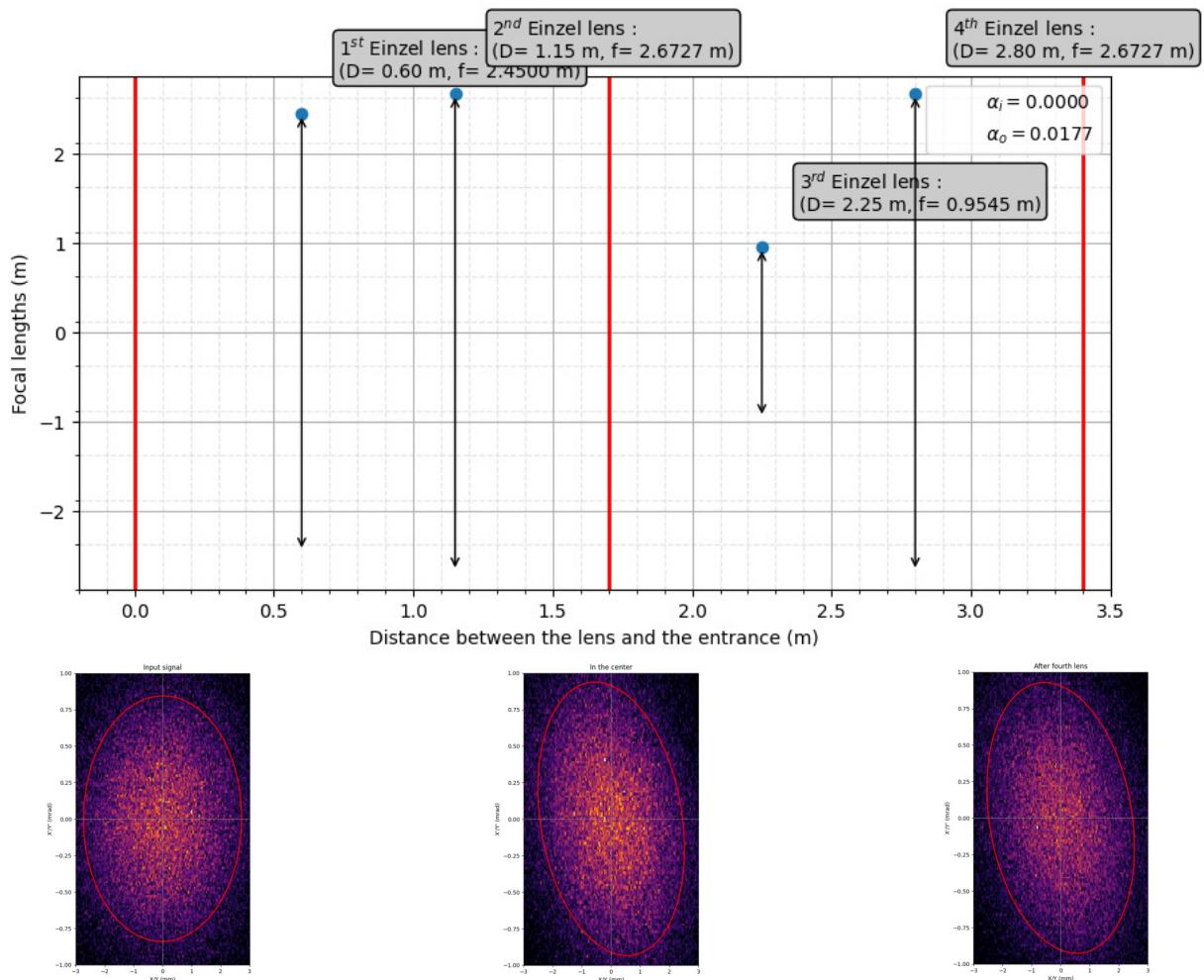


Figure 26. En haut : visualisation des focales nécessaires aux 4 lentilles Einzel, en bas : visualisation des faisceaux en entrée, au centre et en sortie de système, après 4 lentilles Einzel

BILAN PERSONNEL

Les circonstances particulières dues au confinement et à l'application de précautions nous a obligé à réaliser ce stage à distance. Dans un premier abord, cela peut sembler contraignant, mais cela s'est avéré très formateur pour nous, stagiaires, mais aussi certainement pour notre tuteur, Monsieur MAOUNOURY, qui a dû redoubler d'efforts pour rendre le sujet plus compréhensible à distance. De notre côté, nous avons du fournir un effort particulier pour assimiler les connaissances nécessaires pour aborder le sujet, en lisant les documents qui nous ont été fournis et en extrayant les bonnes informations. Après un premier travail plus théorique, nous avons pu commencer la partie simulation.

Nous avons donc décidé d'avoir tous le même langage informatique pour le stage : le langage *Python*. D'après Monsieur MAOUNOURY, ce langage, d'une extrême praticité, est beaucoup apprécié dans le monde de la recherche par ses bibliothèques déjà existantes qui permettent d'obtenir des résultats plus rapidement.

D'un point de vue personnel, ce stage m'a considérablement appris sur ce domaine des accélérateurs pour la Physique Nucléaire : l'optique ionique. Les applications du traitement par faisceaux d'ions sont de plus en plus nombreuses et comprendre de quoi il s'agit devient très intéressant. Nous avons pu découvrir des applications dans le domaine médical, dans le domaine de l'étude des matériaux et le traitement de surfaces ou bien sûr dans le domaine de la recherche pour mieux comprendre les atomes et leurs comportements.

J'ai pu considérablement approfondir mes compétences en programmation *Python*, langage que je serai vraisemblablement amené à utiliser si je continue dans cette voie de la physique nucléaire. J'ai également pu améliorer mon aisance en programmation *LATEX*, extrêmement utile pour la rédaction de compte rendus et de documents scientifiques.

Grâce aux discussions que nous avons pu avoir avec Monsieur MAOUNOURY, nous avons pu découvrir le métier de chercheur et cela m'a permis d'avoir une vision objective du métier et des différentes applications dans lesquelles il peut travailler.

RÉSUMÉ - ABSTRACT

Résumé

Emittance : transformation d'une émittance à travers différents systèmes d'optique ionique

L'objectif principal de ce stage porte sur l'étude des faisceaux d'ions en sortie d'accélérateur et de leurs comportements lorsqu'ils rencontrent des éléments d'optique que les physiciens du GANIL utilisent pour leurs mesures dans la salle d'expérimentation DESIR.

Après une partie du stage visant à assimiler les connaissances sur le sujet et notamment les notions d'émissivité, de paramètres TWISS, de matrices de transfert et de matrice sigma, nous étions capables de calculer les matrices sigma de sortie des faisceaux en fonction des éléments sur son passage : Drift, lentille mince, lentille Einzel, dipôle magnétique, quadripôle électrostatique. Nous avons pu ensuite faire des combinaisons de ces éléments. En utilisant ces combinaisons, et après avoir envisagé une approximation viable pour le doublet de quadripôles électrostatiques, nous étions en mesure d'optimiser les paramètres à appliquer à ce dernier afin d'obtenir un faisceau le moins divergent possible. Pour finir, nous avons pu étudier un système permettant de "supprimer" les distances de transfert des faisceaux en jouant sur les propriétés d'optique pour transporter un faisceau d'un point *A* à un point *B* tout en gardant au maximum son allure de départ.

Abstract

Emittance : transformation of an emittance through different ion-optical systems

The main objective of this internship is to study ion beams at the exit of the accelerator and their behaviour when they encounter optical elements that GANIL physicists use for their measurements in the DESIR experiment room.

One part of the traineeship was focused on the assimilation of knowledge on the subject, particularly the notions of emissivity, TWISS parameters, transfer matrices and sigma matrices. Afterwards we were able to calculate the sigma output matrices of the beams as a function of the elements in its path : Drift, thin lens, Einzel lens, magnetic dipole, electrostatic quadrupole. We could then make combinations of these elements. After using these combinations and considering a viable approximation for the electrostatic quadrupole doublet, we were able to optimize the parameters to be applied to the latter in order to obtain the least divergent beam possible. Finally, we were able to study a system allowing to "suppress" the beam transfer distances by playing on the optical properties to transport a beam from a point *A* to a point *B* while keeping as much as possible of its starting speed.

Annexes

Codes Python

Création d'un ensemble de données corrélées

```
1 # Crée un ensemble aléatoire de données bidimensionnelles avec la moyenne
2 # bidimensionnelle (mu) et les dimensions (scale) spécifiées. La corrélation peut être
3 # contrôlée par le paramètre "dependency", une matrice 2x2. On choisira la matrice
4 # sigma calculée comme paramètre ''dependency''.
5
6 # n est le nombre de points que l'on veut afficher
7 def get_correlated_dataset(n, dependency, mu, scale, **kwargs):
8     latent = np.random.randn(n, 2) #crée des valeurs aléatoires
9     dependent = latent.dot(dependency) # on multiplie par la matrice sigma
10    scaled = dependent * scale # on peut donner une échelle (ici scale = 1, 1)
11    scaled_with_offset = scaled + mu # on peut donner une moyenne (ici mu = 0, 0)
12    # on retourne x et y de l'ensemble de données corrélées
13    return scaled_with_offset[:, 0], scaled_with_offset[:, 1]
```

Tracé de l'ellipse

```
1 # Cette fonction trace l'ellipse de confiance de la matrice de covariance de la
2 # matrice donnée (matrice avec x et y). L'ellipse est affichée dans l'objet axes
3 # ''ax''.
4
5 # Les angles de l'ellipse sont contrôlables par ''n_std'' que l'on trouve grâce à la
6 # loi du chi2. La valeur par défaut est 2.2977 qui affiche 68.3% des valeurs.
7
8 """
9 Paramètres
10 -----
11 x, y : array_like, shape (n, )
12         Matrice d'entrée.
13
14 ax : matplotlib.axes.Axes
15         L'objet axes pour afficher l'ellipse.
16
17 n_std : float
18         Le nombre d'écart pour l'angle de l'ellipse.
19
20 Retourne
21 -----
22 matplotlib.patches.Ellipse
```

```

23
24     Other parameters
25     -----
26     kwargs : {'~matplotlib.patches.Patch'
27     """
28
29
30     def confidence_ellipse(x, y, ax, n_std=parameters.n_std, facecolor='none', **kwargs):
31
32
33         if x.size != y.size:
34             raise ValueError("x and y must be the same size")
35
36         cov = np.cov(x, y)
37         pearson = cov[0, 1] / np.sqrt(cov[0, 0] * cov[1, 1])
38
39         ell_radius_x = np.sqrt(1 + pearson)
40         ell_radius_y = np.sqrt(1 - pearson)
41         ellipse = Ellipse((0, 0),
42                           width=ell_radius_x * 2,
43                           height=ell_radius_y * 2,
44                           facecolor=facecolor,
45                           **kwargs)
46
47         # Calcul de l'écart-type de x par rapport au racine carrée de la variance et
48         # multiplication par le nombre donné d'écart-types.
49         scale_x = np.sqrt(cov[0, 0]) * np.sqrt(n_std)
50         mean_x = np.mean(x)
51
52         # Calcul de l'écart-type de y par rapport au racine carrée de la variance et
53         # multiplication par le nombre donné d'écart-types.
54         scale_y = np.sqrt(cov[1, 1]) * np.sqrt(n_std)
55         mean_y = np.mean(y)
56
57         transf = transforms.Affine2D() \
58             .rotate_deg(45) \
59             .scale(scale_x, scale_y) \
60             .translate(mean_x, mean_y)
61
62         ellipse.set_transform(transf + ax.transData)
63
64     return ax.add_patch(ellipse)

```

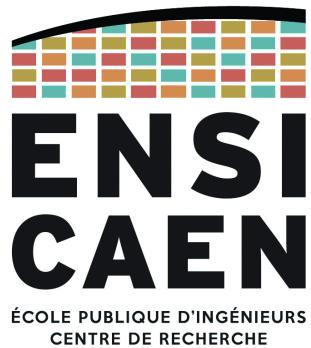
Un exemple

```
1 fig, ax_nstd = plt.subplots(figsize=(10, 10), constrained_layout=True)
2
3 # on va ici afficher l'ellipse pour un drift. La matrice sigma de sortie a été calculée dans
4 # un autre fichier "sigma_matrices.py" et retourne la matrice correspondante.
5 dependency_nstd = sigma_matrices.Drift(parameters.drift_L, parameters.drift_alpha,
6                                         parameters.drift_beta, parameters.drift_gamma, parameters.epsilon)
7
8 mu = parameters.mu
9 scale = parameters.scale
10
11 ax_nstd.axvline(c='grey', lw=1)
12 ax_nstd.axhline(c='grey', lw=1)
13
14 # on crée d'abord les données corrélées pour le nuage de points.
15 x, y = get_correlated_dataset(100000, dependency_nstd, mu, scale, label='Dataset')
16 ax_nstd.scatter(x, y, s=0.5)
17
18 # on donne ici un aspect au nuage de points avec un fond noir.
19 ax_nstd.hexbin(x, y, gridsize=500, cmap='inferno')
20
21 ...
22 les valeurs d'écart type on été calculées ici:
23 https://www.fourmilab.ch/rpkp/experiments/analysis/chiCalc.html
24 ...
25 confidence_ellipse(x, y, ax_nstd, n_std=2.2977,
26                      label=r'$\epsilon_{rms}=68.3\%$', edgecolor='firebrick', linewidth=2)
27 # confidence_ellipse(x, y, ax_nstd, n_std=4.6051,
28 #                      label=r'$2.\epsilon_{rms}=90\%$', edgecolor='firebrick', linestyle
29 #                                     ='--', linewidth=2)
30 # confidence_ellipse(x, y, ax_nstd, n_std=6.2021,
31 #                      label=r'$4.\epsilon_{rms}=95.5\%$', edgecolor='firebrick', linestyle
32 #                                     =':', linewidth=2)
33
34 # on trace un point central pour visualiser la moyenne.
35 ax_nstd.scatter(mu[0], mu[1], c='red', s=3)
36
37 # paramètres du graphique
38 ax_nstd.set_title('Drift')
39 ax_nstd.set_xlim((-7.5, 7.5))
40 ax_nstd.set_ylim((-3, 3))
41 ax_nstd.set_xlabel('X/Y (mm)')
42 ax_nstd.set_ylabel("X'/Y' (mrad)")
43 ax_nstd.legend()
44 fig.savefig('pics/drift.png', bbox_inches='tight', dpi=100)
```

```
43  
44     plt.show()
```

BIBLIOGRAPHIE

- [1] A. Ponton. Étude de la dynamique des faisceaux dans l'accélérateur primaire d'EURISOL et de ses cavités supraconductrices de type " triple spoke ". Physique Nucléaire Théorique [nucl-th]. Université Paris Sud - Paris XI, 2009. Français. tel-00546137
- [2] CEA, http://irfu.cea.fr/Phocea/Vie_des_labos/Ast/ast_visu.php?id_ast=514
- [3] <https://www.france-hadron.fr/fr/projets/hadrontherapie.html>
- [4] Pierre Chauveau. Design, simulations and test of a Time-of-Flight spectrometer for mass measurement of exotic beams from SPIRAL1/SPIRAL2 and -ray spectroscopy of N=Z nuclei close to 100 Sn. Nuclear Experiment [nucl-ex]. Université de Caen Normandie, 2016. English. tel-01469429
- [5] Japan Atomic Energy Research Institute, A Computer Code 'BEAM' for the Ion Optics Calculation of the JAERI Tandem Accelerator System, (1987)
- [6] Y. Fedala. Étude d'une cavité Fabry Pérot haute finesse à quatre miroirs pour des applications de production de rayons X et gamma par interaction Compton laser-électrons. Physique [physics]. Université Paris Sud - Paris XI, 2008. Français. tel-00343028
- [7] IN2P3, <http://ipnwww.in2p3.fr/Realisations-recentes,590>
- [8] Création d'un ensemble de données corrélées [en annexe](#).
- [9] Tracé de l'ellipse [en annexe](#).
- [10] Un exemple [en annexe](#).



f
@
in

École Publique d'Ingénieurs en 3 ans

6 boulevard Maréchal Juin, CS 4505

14050 CAEN cedex 04

