

Yu ZHANG



Magistère de physique fondamentale d'Orsay



Rapport de stage de M1/Mag2

Simulations pour les nouvelles techniques d'accélération

Laboratoire de l'accélérateur linéaire

Bâtiments 200, 91400 Orsay Campus



Juillet, 2016

Tuteur au laboratoire: Nicolas DELERUE; Tuteur universitaire : Jérôme LEYGNIER

Yu ZHANG

Yu ZHANG

Simulation pour les nouvelles techniques d'accélération

Simulation et Caractérisation d'un spectromètre du faisceau d'élection pour PHIL et d'une chicane de compression

CNRS: Centre National de Recherches Scientifiques

IN2P3: Institut National de Physique Nucléaire et de Physiques des Particules

LAL: Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire

PHIL: PHoto-Injecteur au LAL



Remerciements

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à :

A M. Nicolas DELERUE: pour m'avoir donné cette opportunité d'apprendre au domaine du support technique pour la recherche. Votre humour, votre patience, votre industrieux, et votre inspiration m'ont donné une telle confiance pour que je puisse contribuer mes forces aux usages. Vous m'avez fait comprendre la richesse du travail au laboratoire et vous m'avez montré la harmonie de la collaboration entre les équipes et les personelles brillantes au LAL

A MM. Geoffrey BONAMY, Clément DUVAL et Vitalii

KHODNEVYCH: J'ai été impressionné par vos passions et vos amitiés, c'est vraiment heureux pour moi de vous rencontrer dans la vie. Merci pour vos aides quand je rencontre la difficulté. En regardant vos vives postures aux travaux et aux poses, je suis sûr que dans le futur, la science, la technologie, la culture et toute l'humanité seront brillants à travers l'univers

A l'ensemble du personnel du groupe ETALON au LAL

**A l'ensemble de l'université Paris-Sud et surtout au département
physique**

A mes parents

A mes amis en France

Sommaire

Introduction.....	1
1.1 Présentation du laboratoire et des missions	1
1.1.1 LAL, IN2P3 et CNRS, ETALON et PHIL	1
1.1.2 Mes Missions	2
Le spectromètre.....	3
2.1 La configuration réelle de ce spectromètre	3
2.1.1 La forme physique, la distribution des champs magnétique, et le faisceau incident.....	3
2.1.2 La méthode pour passer à la simulation	4
2.2 Le détail de la programmation	6
2.2.1 La méthode Runge-Kutta4 avec Euler. La vérification de l'exactitude de simulation.....	6
2.2.2 Les résultats préliminaires des simulations	8
Le système optique suivant le dipôle	15
3.1 Les désignations conceptuelles de ce système.....	15
3.1.1 L'objectifs de ce système, des idées principales et la méthode pour équilibrer les résolutions	15
3.1.2 La désignation en tenant compte des tailles réelles des composants et le règle de construction	18
3.2 Les simulations pour le profil transversal et aussi sa résolution.....	20
3.2.1 La courbe de distribution de l'énergie sur l'écran placé à l'arrière du spectromètre	20
3.2.2 Les courbes de résolution de l'énergie et des améliorations	23
La chicane de compression.....	25
4.1 la chicane de compression symétrique	25
4.1.1 Principe du fonctionnement d'une chicane de compression	25
4.1.2 Simulation réalisée et les caractérisations	27
4.2 la chicane de compression asymétrique.....	30
4.2.1 ?	30
4.2.2 ?	32
Conclusion	35
Annexes	36

Introduction

1.1 Présentation du laboratoire et des missions

1.1.1 LAL, IN2P3 et CNRS, ETALON et PHIL

Mon stage de M1/Mag2 physique fondamentale s'est déroulé dans un laboratoire du CNRS. Situé au cœur du campus d'Orsay, le LAL (Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire) fait partie de l'Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules (IN2P3), c'est un laboratoire dépendant du CNRS et de l'Université Paris Sud.

L'activité de recherche du LAL est centrée sur la physique des particules, complétée par une forte composante en cosmologie et en astrophysique et un département travaillant sur les accélérateurs de particules. Le laboratoire assure sa mission de transmission des connaissances par des activités d'enseignement et de communication. Pour réaliser leurs expériences, les physiciens s'appuient sur les différents services techniques et administratifs du laboratoire, et en particulier des services très performants de conception et de réalisation en mécanique et en électronique, ainsi qu'un groupe maîtrisant les technologies de l'information.

L'expérimentation en physique des particules étant souvent associée aux accélérateurs, le laboratoire mène aussi un programme de recherche et développements dans ce domaine. J'ai été intégré au groupe ESCUIAP (ElectronS Courts poUr L'Accélération laser-Plasma), guidé par monsieur Nicolas DELERUE. L'objectif de l'ESCUAP est de développer de nouvelles techniques d'accélération d'électrons en utilisant des lasers de puissance.

Pendant ce stage, mon travail est d'étudier un spectromètre installé sur PHIL (PHoto_Injecteur au LAL), qui est un accélérateur récent d'électrons construit pour développer les nouvelles technologies de la source d'électrons de très fort courant et de très faible divergence qui seront très utilisables pour la future recherche. Il peut fournir un faisceau d'électrons de bonne qualité à environ 10 MeV, et il a aussi devenu un outil très enrichissant pour former des étudiants. Ps : les études actuelles sont faites avec une énergie de 5 MeV mais des extensions à 6, 11 ou 250 MeV pour les faisceaux d'électrons sont envisagées, ces valeurs apparaissent souvent dans la suite.

1.1.2 Mes Missions

Certaines nouvelles installations sont en planification pendant mon stage : On cherche à accélérer des paquets d'électron très concentrés et contrôlables en les envoyant dans une cellule plasma en même temps qu'une impulsion laser ultra-puissante. Dans la ligne du faisceau d'électrons, on utilise un dipôle comme un spectromètre qui permet de dévier le faisceau, après ce dipôle, on installe un système optique qui permet de mesurer les caractéristiques de notre faisceau d'électrons. Et après, une chicane de compression et si nécessaire un quadripôle de re-focalisation seront concevoir pour que le paquet d'électrons envoyé au plasma soit assez court pour bien accélérer le plasma.

Ma mission contient principalement trois parties : je dois d'abord simuler la déviation des particules dans le spectromètre et caractériser l'influence des paramètres de l'entrée du faisceau sur la position et l'angle de sortie. Ensuite, je dois concevoir un système optique qui permet de visualiser le profil transversal à la sortie du spectromètre par une simple caméra et chercher une méthode à améliorer la résolution. Et finalement, je dois chercher à programmer la simulation d'une chicane de compression pour satisfaire les conditions de la construction réelle du montage.

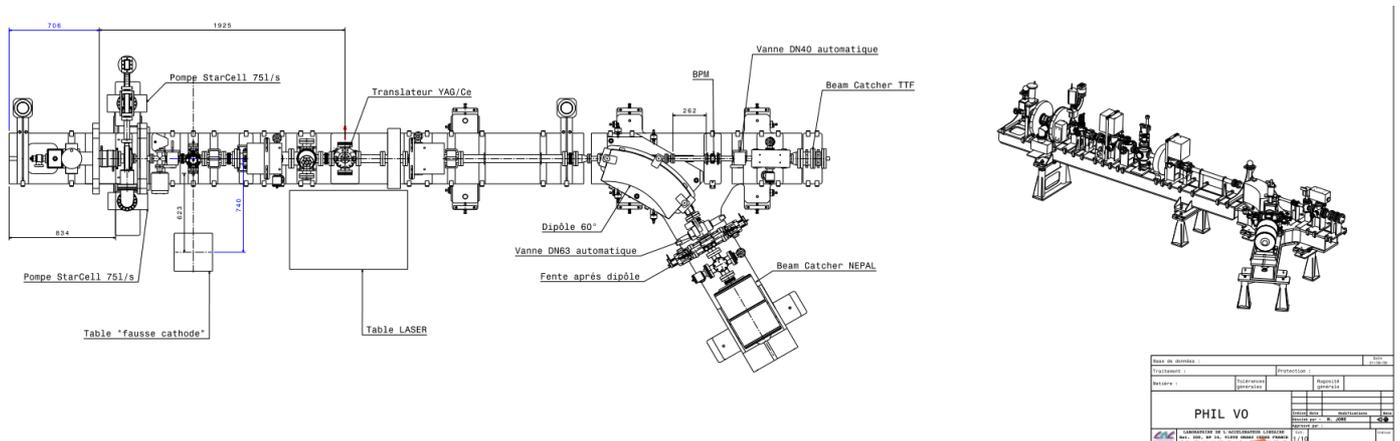


Figure 1 La chaîne principale pour le paquet d'électron. Le dipôle 60° est utilisé comme un spectromètre

Cette image n'est pas complète et elle n'inclut pas le système optique et la chicane de compression qui seront présentés précisément dans la suite.

Le spectromètre

2.1 La configuration réelle de ce spectromètre

2.1.1 La forme physique, la distribution des champs magnétique, et le faisceau incident

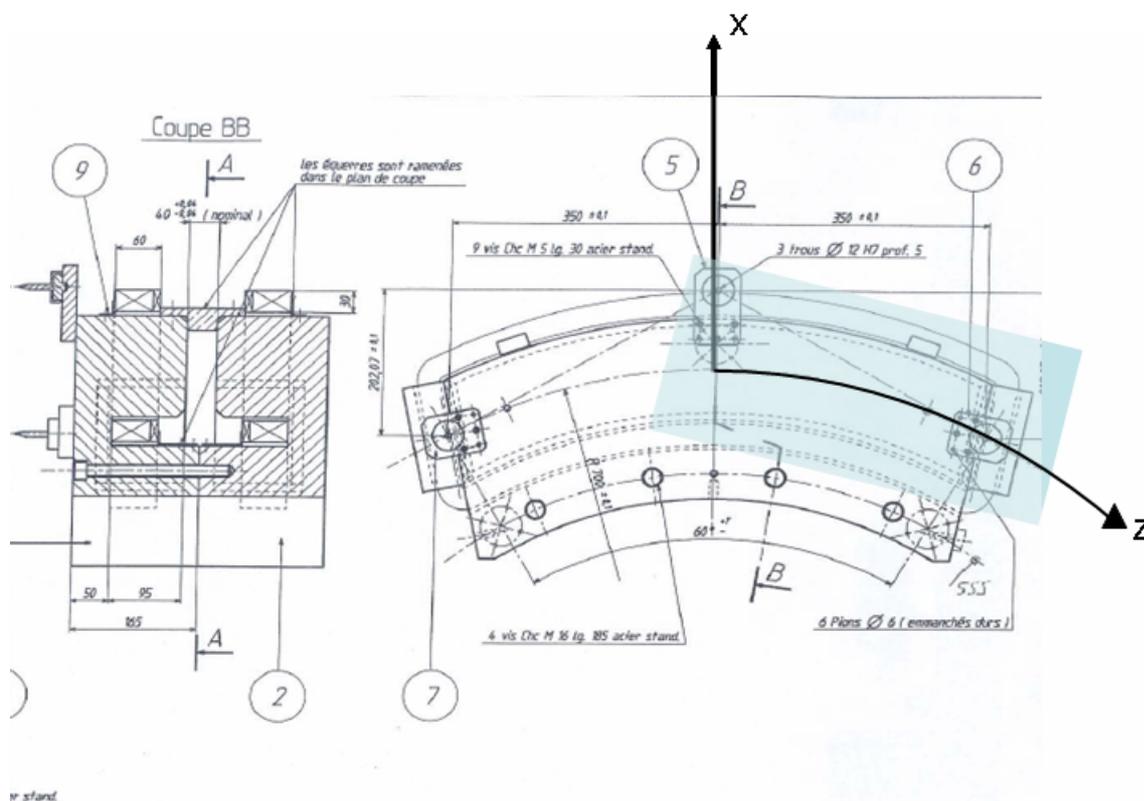


Figure 2 La chaîne principale pour le paquet d'électron. Le dipôle 60° est utilisé comme un spectromètre

Cette image montre la forme du spectromètre. La vue de dessus est une forme composée des deux arcs de même centre et des deux bords de forme anormale. L'axe Z s'applique principalement à la caractéristique longitudinale du paquet d'électron, l'axe X s'applique alors au profil transversal du paquet d'électron.

Yu ZHANG

Le champ magnétique est principalement dans la direction Y, on néglige toute les déviations sorties du plan XZ dans la suite de notre études pendant mon stage. Les valeurs du champ magnétique dans la zone ombré en bleu sont mesurées précédemment et gardées dans une carte du champ qui sera peut-être utilisable dans la suite de mon travail. Le code pour lire cette carte est préparé mais les valeurs exactes de la portée de cette zone n'est pas claire pendant mon stage.

Le champ magnétique est principalement considéré comme homogène pendant mon stage et remplaçable dans le code si une fois on aura des valeurs réelles concernant la distribution du champ magnétique dans l'espace.

Pour le faisceau d'incidence. On peut vérifier que les électrons arrivent perpendiculairement par rapport au premier rayon du secteur mais pas par rapport au bloc d'entrée qui est aussi soumis au champ magnétique. L'angle d'ouverture de ce secteur est bien 60° mais le champ magnétique n'existe pas seulement dans ce secteur. Il faut alors bien modéliser la forme de ce dipôle.

2.1.2 La méthode pour passer à la simulation

Pour passer ce spectromètre dans la simulation par un code python, on s'intéresse d'abord à la construction des 'objets'. L'objet est nommé 'particule', cet objet doit contenir l'information sur la masse, la charge, (...etc.), la position et aussi la vitesse ou la quantité du mouvement dans une ou plusieurs références. A chaque itération, le script calcule automatiquement la prochaine position et la quantité de mouvement en utilisant un pas de temps assez petit pour diminuer au maximum l'erreur.

Dans mon code, la référence est d'abord une référence cartésienne avec le centre des deux arcs (marqué O) comme l'origine. La deuxième référence est sphérique basé sur le plan XOZ, en prenant la norme avec deux angles φ et θ Noté (XrOZr). Le θ est toujours $\pi/2$, mais peut être changé pour la suite de mon stage. En fait, une autre référence X0OZ0 sera utilisée quand je passe à la programmation pour la chicane.

Voici je vais lister tous les valeurs concernant la forme de cet aimant que j'ai mesuré et utilisé pendant mes simulations :

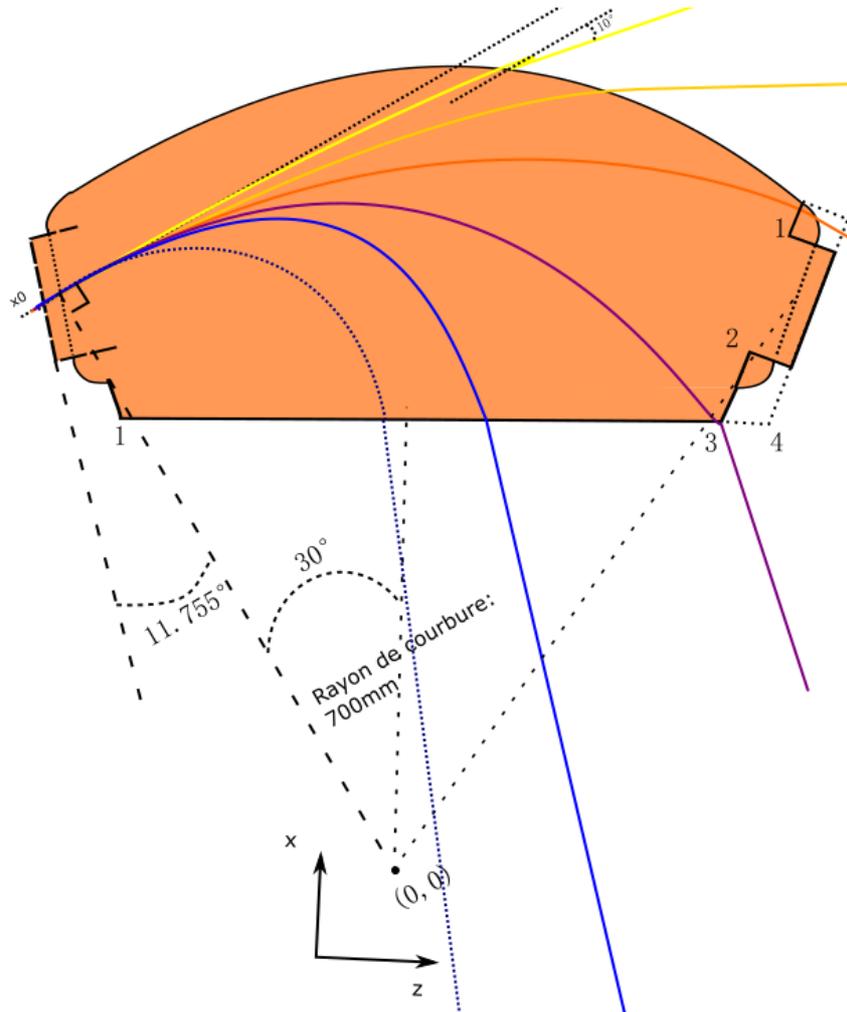


Figure 3 l'image illustrée la portée du dipôle et les configurations pour simulation

Les lignes colorées représentent les trajectoires des faisceaux d'électrons des différentes énergies. Celle la plus haute représente la situation où le faisceau sort du dipôle avec une déviation de 10 degré. Celle la plus basse est pointillée puisqu'elle peut représenter le moment où le faisceau de sortie n'est plus utile.

Attention : le centre de l'arc supérieur n'est pas le même que le centre de l'arc principal défini par le point d'entrée et le point de sortie par défaut. Mais leur rayon de courbure est toujours 700mm ; les faisceaux sortis par le bas n'ont pas beaucoup d'intérêts, j'ai donc rempli l'arc en bas par une ligne droite qui représente la limite du dipôle.

Les coordonnées (Z, X) pour les points sont (le dipôle est symétrique par rapport à l'axe X):

- | | |
|----------------------|-----------------------|
| 1. (357.476, 676.63) | 2. (328.097, 535.445) |
| 3. (306.315, 430.77) | 4. (362.493, 430.77) |

Le rayon des quatre petits arcs est 34.606mm.

Le centre de l'arc supérieur est à (0, 113), l'arc inférieur n'est pas utilisé pour l'instant

2.2 Le détail de la programmation

2.2.1 La méthode Runge-Kutta4 avec Euler. La vérification de l'exactitude de simulation

On doit d'abord fixer les valeurs constantes :

$m : 9.1093826 \times 10^{-31} \text{ kg};$

$q : 1.6021892 \times 10^{-19} \text{ C};$

$c : 299792458 \text{ ms}^{-1};$

$h : 1 \times 10^{-10} \text{ s};$

h est la différence du temps entre chaque itérations. La simulation est plus correcte quand la valeur de h est plus petite.

Après plusieurs essais, et en passant du repère cartésien en repère sphérique pour le mouvement, j'ai réalisé un script Python qui permet de calculer l'état suivant de notre particule. Les relations principales utilisées sont : (On suppose que le champ magnétique est stable et unidirectionnel Y)

$$P = qBR, \quad P = Mv = \gamma mv, \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad E^2 = P^2 c^2 + m^2 c^4$$

Ici, R est le rayon de courbure à un point, les autres variables sont définis normalement.

La norme de la quantité du mouvement ne change pas au cours de la déviation : donc à chaque itération faite par le programme, on a une différence d'angle de propagation, $\Delta\varphi$, perpendiculaire au champ magnétique.

$$\Delta\varphi = hqB_{\perp}/M$$

B_{\perp} est la projection du champ magnétique dans la direction perpendiculaire à la direction de propagations de l'électron. Cette fonction peut être vérifiée en décomposant proprement la quantité du mouvement \vec{p} .

On cherche ensuite à déterminer plus précisément la valeur de $\Delta\varphi$ utilisé dans nos itération :

Réfléchissons d'abord le problème continu: les variables temporaires sont \vec{r} avec \vec{P} ou pour simplifier φ . M est constant mais j'ai ajouté un emplacement de réservation dans mes codes afin de le changer si nécessaire. Le système d'équation est :

$$d\varphi = dt * qB_{\perp}(\vec{r})/M(P) \quad (\vec{r} \text{ dépend de } x,y,z)$$

$$dx = dt * \frac{P}{M} * \sin \theta * \sin \varphi$$

$$dy = dt * \frac{P}{M} * \cos \theta$$

$$dz = dt * \frac{P}{M} * \sin \theta * \cos \varphi$$

Attention : Z est la direction suivant la chaîne d'instruments. Y est la direction verticale et la direction du champ magnétique. X est la direction perpendiculaire à Z et à Y . Dans le cas simplifié : dy est toujours 0.

On compare ces fonctions avec la fonction à laquelle on peut utiliser la méthode Runge-Kutta 4 :

$$\dot{y} = f(t, y), \quad y(t_0) = y_0.$$

$$\dot{\varphi} = qB_{\perp}(\vec{r}(t, \varphi))/M, \quad \varphi(t_0) = \varphi_0, \quad \vec{r}(t_0) = \vec{r}_0$$

Le problème est que $\vec{r}(t, \varphi)$ n'est pas une fonction définitive. Elle dépend de la condition initiale.

Donc on décidé de combiner la méthode de RK4 pour φ avec une méthode d'Euler pour \vec{r} quand on fait les itérations.

La méthode de Runge-Kutta 4 peut être trouvée sur Wikipédia, elle permet de réduire fortement l'erreur. On va ensuite vérifier notre simulation en comparant le rayon théorique calculé par la formule précédente avec le rayon déterminé par la simulation. Le champ est choisi comme homogène pour éliminer l'erreur à cause de la méthode d'Euler pour \vec{r}

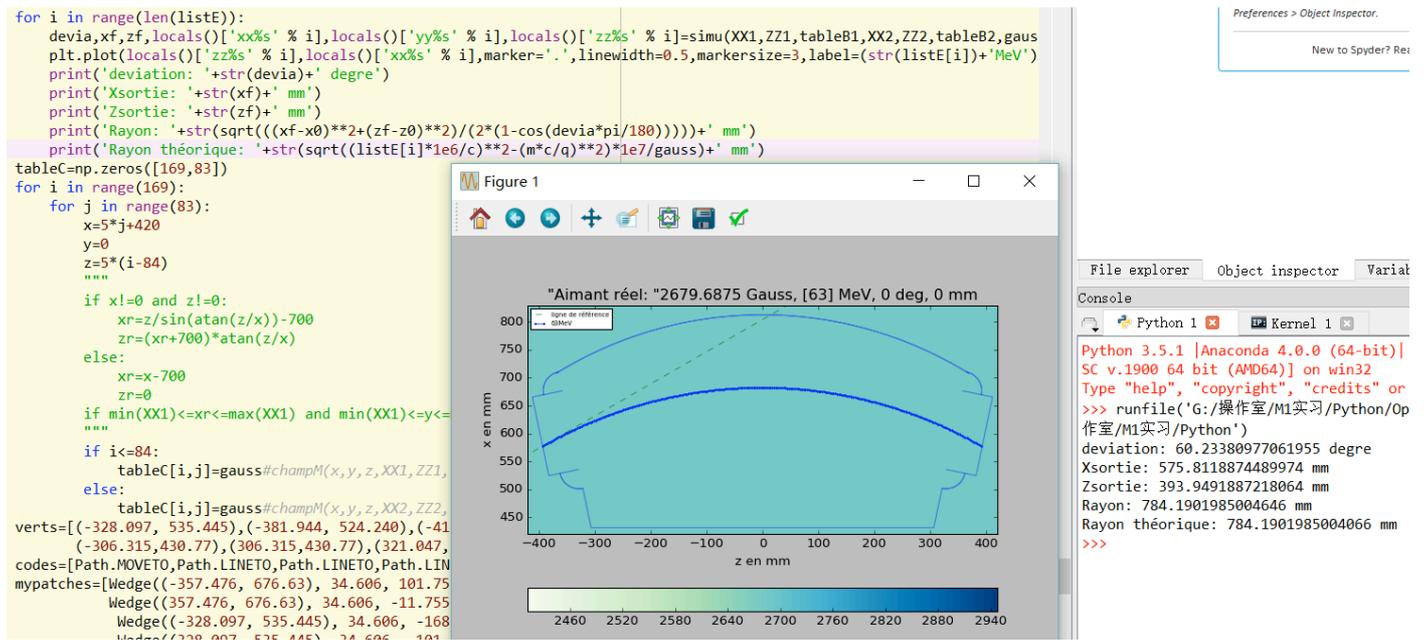


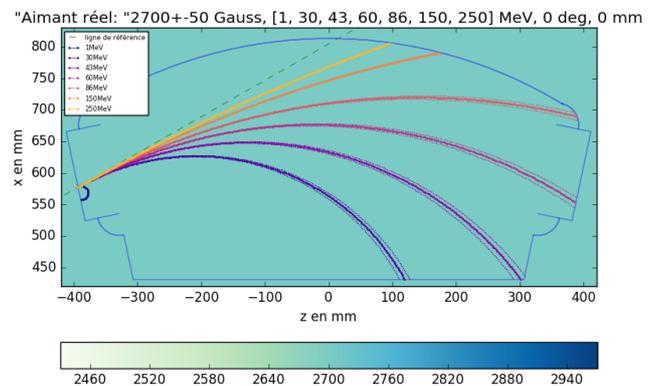
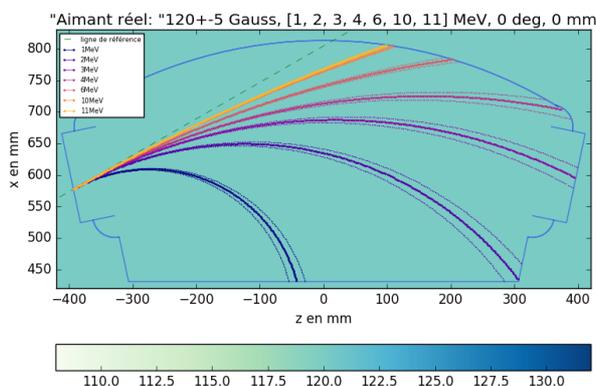
Figure 4 La vérification de l'exactitude de simulation.

On compare la valeur du rayon calculée par la formule $R=P/(q*B)$ avec celle calculé en utilisant le triangle formé par le point d'incidence, le point de sortie et l'angle de déviation du faisceau.

On trouve que le premier chiffre différent se trouve à l'onzième chiffre après la virgule. Notre simulation est donc croyable.

2.2.2 Les résultats préliminaires des simulations

Les unités à la sortie de chaque exécution sont unifiées : MeV, mm, s, kg, G, degré et les combinaisons de ces unités.



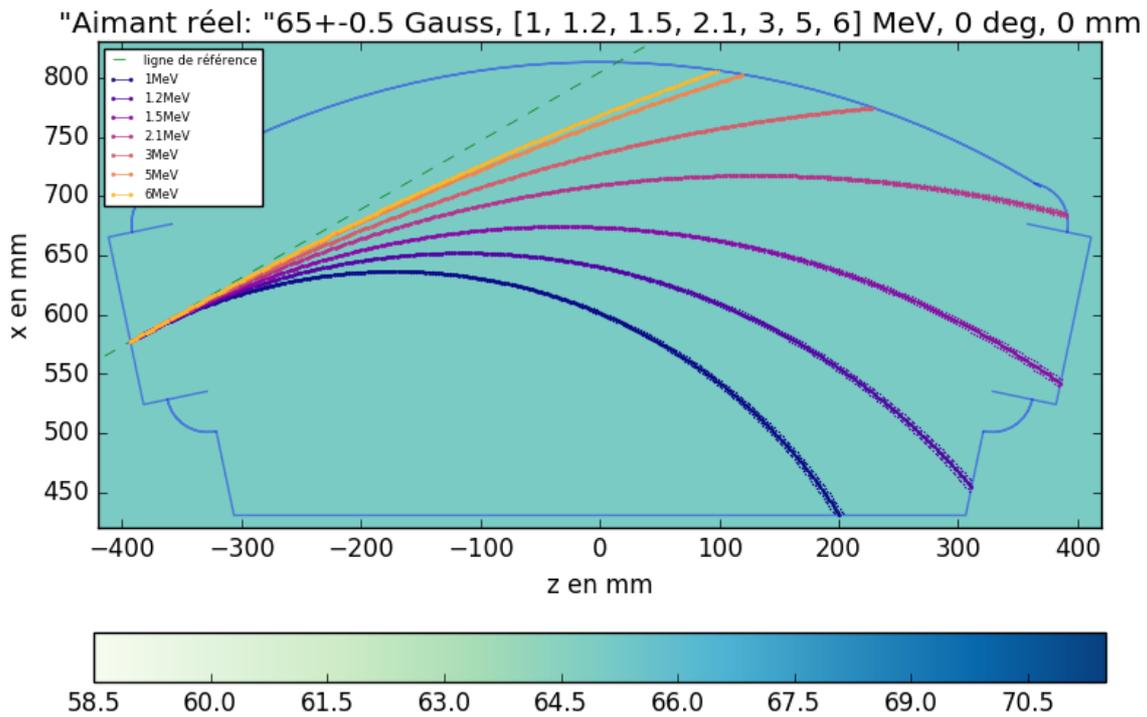


Figure 5 Les simulations pour que les faisceaux de 11, 250, 6 MeV sortent à une déviation de 10 degré.

Les barres de couleurs ne sont pas utiles pour l'instant parce que le champ est considéré comme homogène pour l'instant.

Le champ est considéré comme homogène la barre de couleur qui est en Gauss est cette fois inutile. Le champ n'existe que dans le milieu du spectromètre

Le faisceau le plus énergétique est en jaune, celui moins énergétique est en bleu

L'avant-dernière valeur est la différence de l'angle d'incidence par rapport à la configuration par défaut, noté φ_0

La dernière valeur est la différence de la position d'incidence dans la direction suivant le bloc d'incidence par rapport à la configuration par défaut, noté x_0

Les lignes pointillées représentent l'influence de la variation du champ magnétique

Le champ est choisi pour que le faisceau le plus énergétique passe par l'aimant avec une déviation d'environ 10 degré

On peut aussi réaliser cette simulation pour l'aimant de forme sectoriel et cubique.

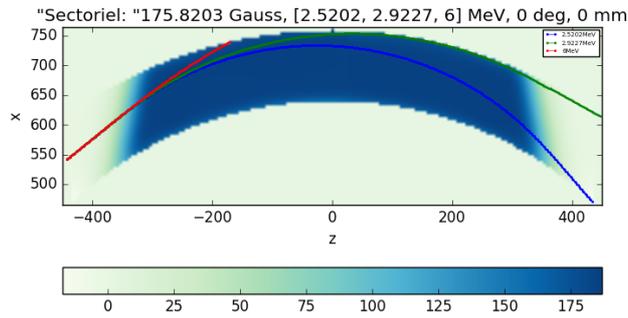
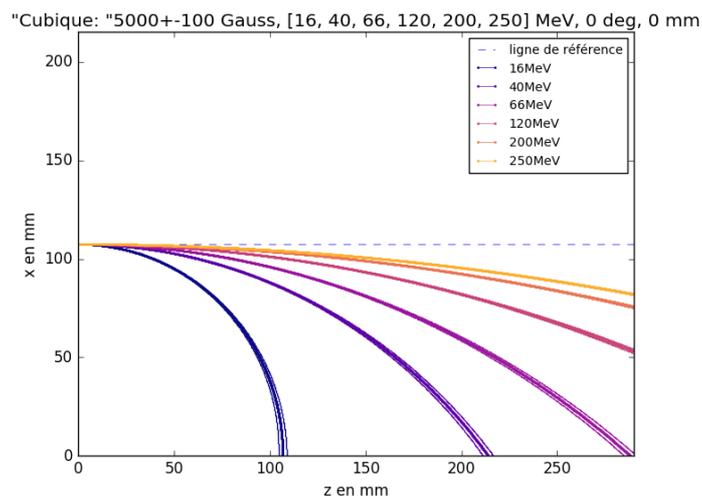
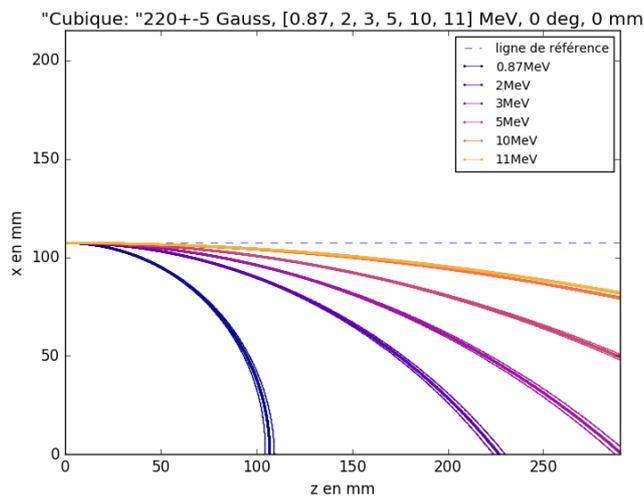


Figure 6 Les simulations de l'aimant sectoriel pour que les faisceaux de 6 MeV sortent à une déviation de 10 degré. La carte du champ est utilisée pour cet aimant pour tester le programme.



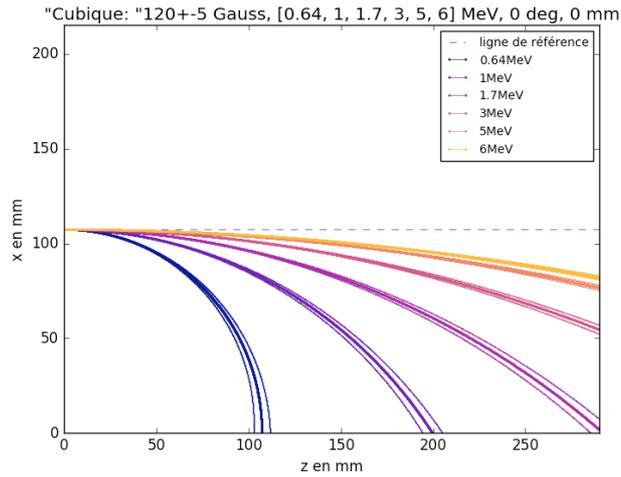


Figure 7 Les simulations de l'aimant sectoriel pour que les faisceaux de 6 MeV sortent à une déviation de 10 degré. La carte du champ est utilisée pour cet aimant pour tester le programme.

Le faisceau sorti doit être contrôlable, pour cela, on s'intéresse aux résultats de simulation si on change la position d'entrée et l'angle d'incidence. On définit une bande passante d'énergie pour que le faisceau sorte entre le point de sortie pour une déviation de 10 degré et le coin en bas à droite.

Un programme est fait pour chercher la valeur propre du champ magnétique pour que l'énergie qu'on veut sorte par la position qu'on veut. Il détermine aussi la bande passante et on peut l'utiliser pour tracer un graphe qui montre la variation de la bande passante en fonction de la position d'entrée x_0 et de l'angle d'entrée ϕ_0 :

x_0 est défini comme la distance entre le point d'entrée exact et le point d'entrée par défaut, suivant le bord du bloc d'entrée qui a une inclinaison de $30 - 11.755 = 18.248$ degré par rapport à la direction X. ϕ_0 est la différence de valeur de φ dans le sens horaire. L'angle d'incidence par défaut est 30 degré.

Les graphes pour l'aimant de forme sectorielle et cubique se trouvent dans le répertoire du rapport. On va maintenant fixer nos yeux sur la caractéristique de l'aimant de forme réelle et pour une énergie de 6 MeV (c'est-à-dire le faisceau de 6 MeV va sortir l'aimant avec une déviation de 10 degré):

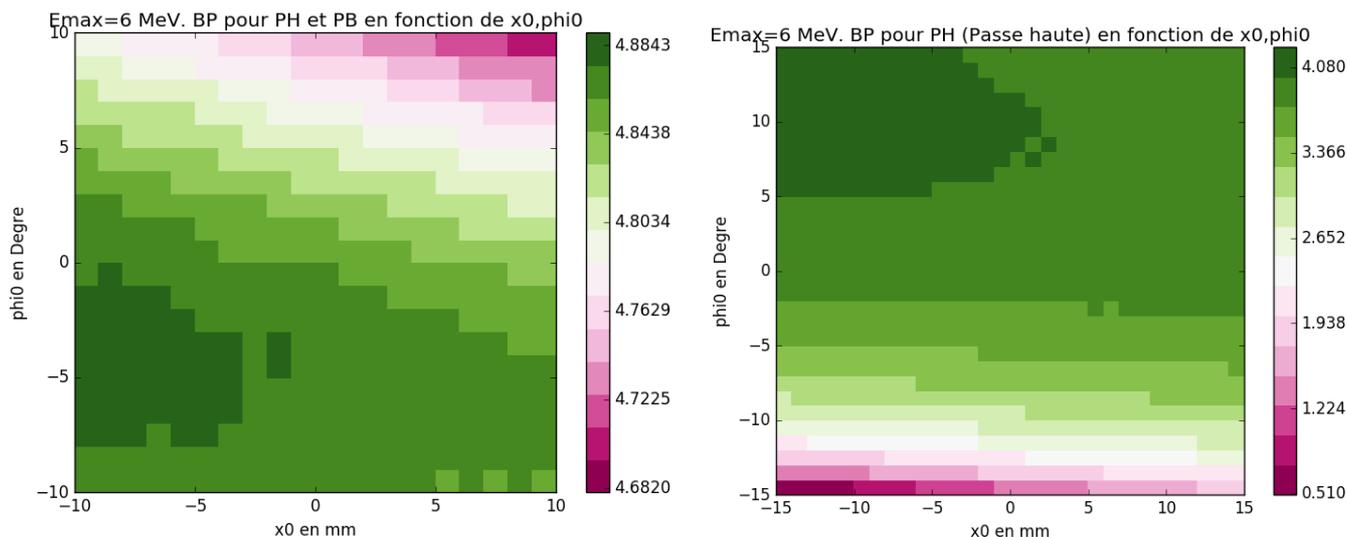


Figure 8 La variation des bande passante pour 6 MeV en fonction de x₀ et phi₀

PH signifie ‘Passe Haut’, la zone entre la sortie d’une déviation de 10 degré et le coin en haut à droite.

PB signifie ‘Passe au Bout’ la zone entre le coin en haut à droite et le coin en bas à droite.

BP signifie ‘Bande Passante’

Les formes de ces images sont quasiment identiques pour les autres énergies. Pour obtenir les valeurs exactes, il faut diminuer les pas et bien choisi la zone de traçage

On peut trouver que l’influence de l’angle d’incidence est plus importante. On peut également trouver que si on veut améliorer la bande passante totale, on doit diminuer la valeur de phi₀ et si on veut améliorer la bande passante haute, on doit inversement augmenter la valeur de phi₀.

Chaque configuration de x₀ et phi₀ pour une certaine énergie demande une valeur unique du champ magnétique. On peut aussi tracer cette valeur en fonction de x₀ et phi₀ :

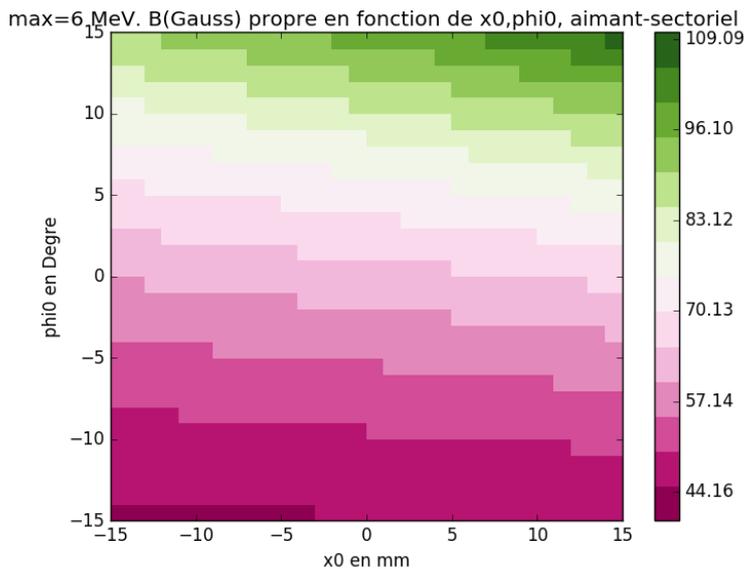


Figure 9 La chaine principale pour le paquet d’électron. Le dipôle 60° est utilisé comme un spectromètre

Ce graphe est normal, des petites valeurs de x0 et phi0 nécessitent une valeur petite du champ magnifique.

Pour la variation des valeurs des bandes passantes, on voit qu’ autour de la configuration par défaut, la bande passante totale (PH+PB) ne peut que varier de 4%. Mais la bande passante haute peut varier plus de 100%. Cela veut dire que la bande PH est beaucoup plus sensible que la bande totale. On doit aussi prendre en compte de la limitation de l’installation, et donc, on peut proposer 2 façons à améliorer la bande passante sans dépasser la limite d’installation. Ces deux améliorations pour 6, 11, 250 MeV sont listées dans le tableau suivant :

Aimant réel, champ homogène													
	BP haute						BP au bout						
	Champ (G)	Incidence(deg)	X0	Emin	Emax	Bande	Champ (G)	Incidence(de	X0	Emin	Emax	Bande	Bande total
Défaut	64.0313	0	0	2.1234	6	3.8766	64.0313	0	0	1.146	2.1234	0.9774	4.854
Optimisé1	57.6563	-3	-9	2.2763	6	3.7237	57.6563	-3	-9	1.1158	2.2763	1.1605	4.8842
Optimisé2	86.25	13	-15	1.9197	6	4.0803	86.25	13	-15	1.2444	1.9197	0.6753	4.7556
Défaut	117.9063	0	0	3.8338	11	7.1662	117.9063	0	0	1.9582	3.8338	1.8756	9.0418
Optimisé1	105.7031	-3	-10	4.1147	11	6.8853	105.7031	-3	-10	1.8926	4.1147	2.2221	9.1074
Optimisé2	159.5	13	-15	3.4598	11	7.5402	159.5	13	-15	2.1624	3.4598	1.2974	8.8376
Défaut	2679.688	0	0	86.25	250	163.75	2679.6875	0	0	42.9902	86.25	43.2598	207.0098
Optimisé1	2246.094	-6	-9	103.3594	250	146.6406	2246.0938	-6	-9	41.4245	103.3594	61.9349	208.5755
Optimisé2	3328.125	10	-15	77.6172	250	172.3828	3328.125	10	-15	45.6287	77.6172	31.9885	204.3713
Les bandes passantes sont définies identiquement par rapport à l'aimant sectoriel													
L'optimisation1 est pour la bande totale													
L'optimisation2 est pour la bande haute													

Tableau 1 les bandes passantes aux différentes conditions pour l’aimant de forme réelle

Aimant sectorial							BP au bout						
	BP haute						BP au bout						
	Champ (G)	Incidence(deg)	X0	Emin	Emax	Bande	Champ (G)	Incidence(deg)	X0	Emin	Emax	Bande	Bande totale
Défaut	175.8203	0	0	2.9227	6	3.0773	175.8203	0	0	2.5202	2.9227	0.4025	3.4798
Optimisé	84.1846	-11	-12	2.1391	6	3.8609	84.1846	-11	-12	1.6066	2.1391	0.5325	4.3934
Défaut	323.0736	0	0	5.312	11	5.688	323.0736	0	0	4.5634	5.312	0.7486	6.4366
Optimisé	154.401	-11	-12	3.847	11	7.153	154.401	-11	-12	2.8397	3.847	1.0073	8.1603
Défaut	7392.692	0	0	120.9961	250	129.0039	7392.692	0	0	103.7621	120.9961	17.234	146.2379
Optimisé	3509.115	-11	-12	86.6406	250	163.3594	3509.115	-11	-12	63.4797	86.6406	23.1609	186.5203

A E=Emax, le faisceau est dévié de 10 degré

Tableau 2 les bandes passantes aux différentes conditions pour l'aimant de forme sectorielle

Aimant cubique							
	BP						Coin en bas à droite:
	Champ (G)	Incidence(deg)	X0	Emin	Emax	Bande	
Défaut	119.3896	0	0	0.64	6	5.36	1.7
Optimisé	115.1343	-11	-20	0.5724	6	5.4276	6
Défaut	219.3197	0	0	0.8734	11	10.1266	3
Optimisé	211.7061	-11	-20	0.6972	6	10.3028	6
Défaut	4989.522	0	0	16.1011	250	233.8989	66.5
Optimisé	4816.488	-11	-20	10.8029	250	239.1971	250

A E=Emax, le faisceau est dévié de 10 degré.
 Cette fois, BP est défini entre les faisceaux déviés 10 degré et ceux déviés 90 degré. Elle est optimisé lorsque le faisceau dévié de 10 degré sorte par le coin en bas à droit

Tableau 3 les bandes passantes aux différentes conditions pour l'aimant de forme cubique

Finalement, on va comparer la simulation en configuration améliorée avec celle en configuration par

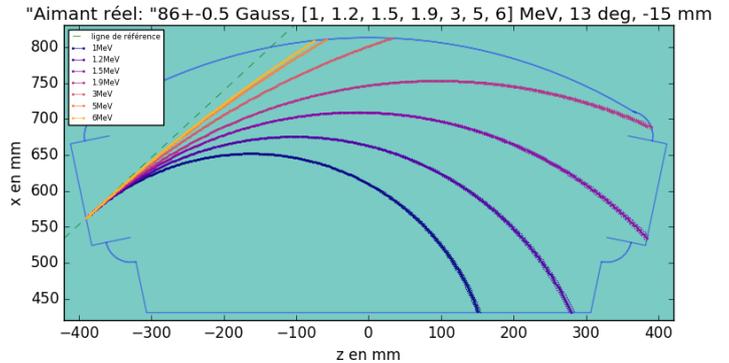
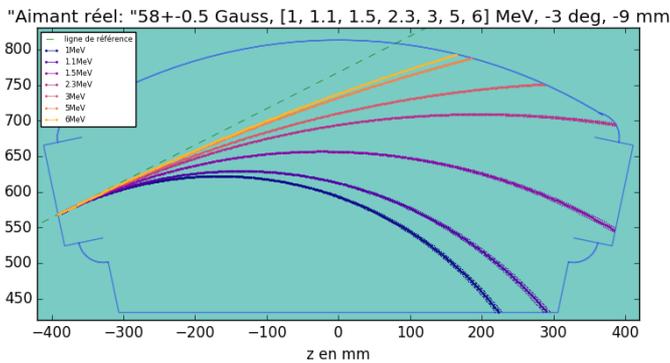
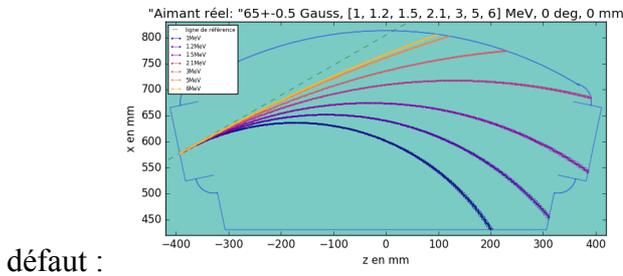


Figure 10 La chaîne principale pour le paquet d'électron. Le dipôle 60° est utilisé comme un spectromètre

Pour résumer la partie du spectromètre on peut dire que la configuration est choisie selon notre but. Si on veut principalement utiliser la partie PH+PB, on choisit la configuration ‘optimisé1’. Si on veut élargir la portée de la partie PH, on choisit la configuration ‘optimisé2’. Mais de toute façon, la configuration par défaut reste valable

Le système optique suivant le dipôle

3.1 Les désignations conceptuelles de ce système

3.1.1 L’objectifs de ce système, des idées principales et la méthode pour équilibrer les résolutions

Après avoir caractérisé la capacité que la bande passante peut être variée, on va maintenant continuer à étudier le profil transversal du faisceau d’électron dans cette ligne d’instrument.

On place un écran après l’aimant afin de pouvoir détecter la position du faisceau sortie par une caméra. Cet écran doit permettre d’émettre les rayons lumineux dans toutes les directions après avoir capturé un électron. On peut ainsi connaître la distribution transversale des électrons des énergies différentes, une caméra sera utilisée pour transporter ces informations à l’ordinateur.

Ce qui est problématique est que les rayons lumineux induisent par les faisceaux d’électrons de hautes énergies proviennent des points très proches au niveau de l’écran. Une caméra a forcément une limitation sur le pouvoir de résolution parce que les éléments photosensibles ne peuvent pas être infiniment petits. C’est pour cela qu’on va désigner un système d’optique pour rendre la caméra efficace pour les rayons des électrons de basse énergie, et capable pour détecter les rayons des électrons de haute énergie.

On va d’abord séparer l’écran par trois zones selon l’énergie des électrons reçus. Un système optique doit permettre d’élargir l’image de la zone de haute énergie et d’amincir l’image de la zone de basse énergie (Cela va être expliqué précisément quand on précise la méthode à équilibrer la résolution). On choisit d’utiliser les miroirs et l’écran plans pour ne pas déformer l’image et rendre linéaire la relation entre le profil transversal de l’électron et le profil capturé par la caméra. Et finalement, au moins une lentille doit être utilisée pour focaliser les images à la caméra et aussi pour enlever l’influence des rayons parasites

Pour prédire le comportement des faisceaux des particules et pour créer un système optique de détection plus performant on commence par les simuler via l’ordinateur. Voici un dessin qui montre mon design. On va d’abord considérer les rayons parallèles après l’écran :

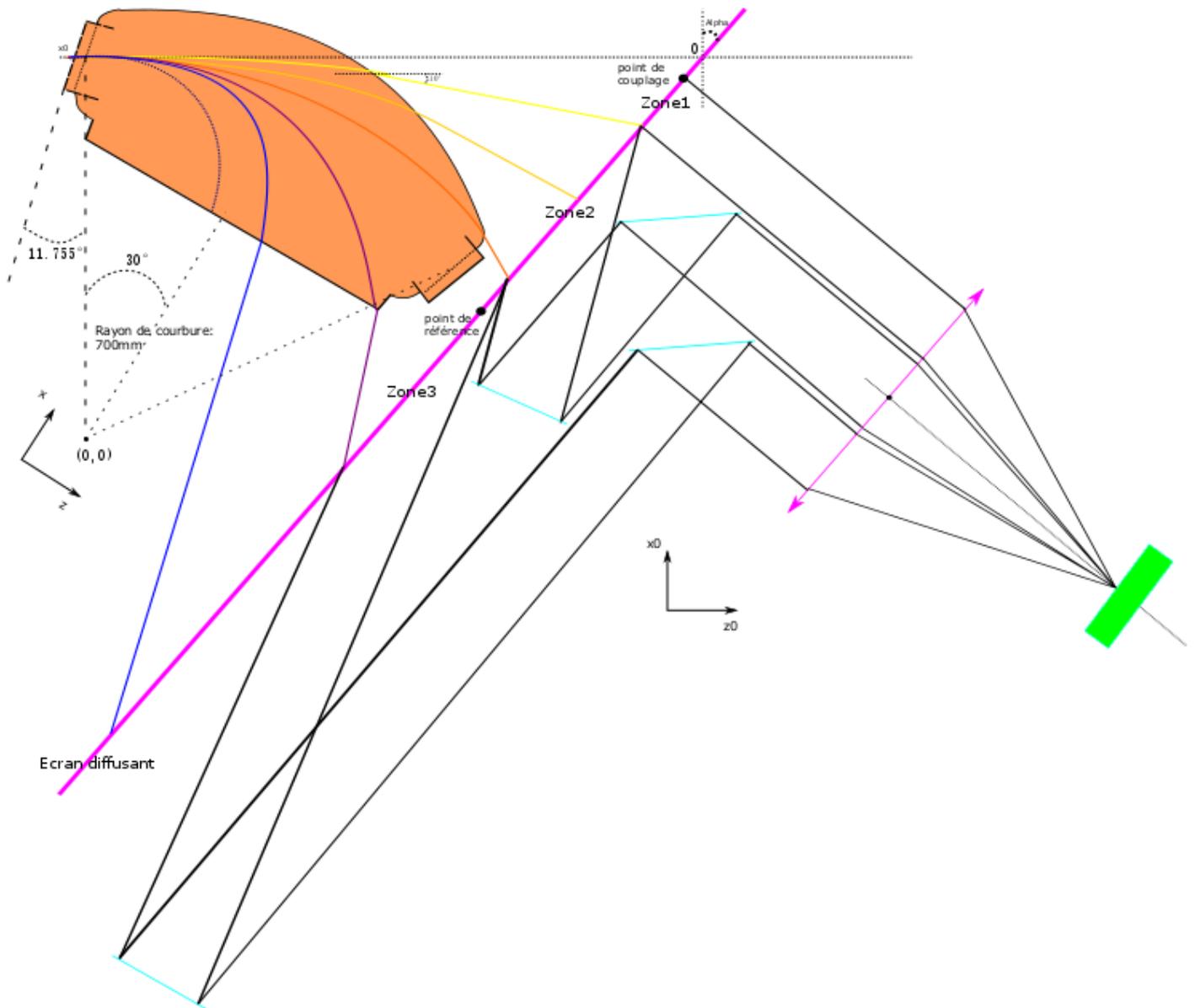


Figure 11 le design idéal pour ce système d'optique

Cette fois on doit revenir au repère X0Z0 au lieu de XZ pour bien représenter les positions des composants optiques par rapport à la ligne du faisceau non dévié qui est aussi la ligne de la chaîne principale du paquet d'électron.

Ce système après l'écran est composé d'une lentille et de quatre miroirs (les petits traits en azur). Puisque le miroir ne change jamais la taille de l'image par rapport à l'objet, la seule façon à réaliser ce système est de former les images inclinées. Les images finales pour ces trois zones doivent être collées, sinon on doit utiliser plusieurs lentilles.

Le problème est simple quand on considère seulement les rayons parallèles. Les rayons doivent être parallèles devant la lentille pour être focalisés en un seul point. C'est donc la largeur du rayon avant la

lentille pour chaque zone qui va décider l'élargissement de l'image, et cet élargissement va être utilisé pour équilibrer les résolutions.

Pour les zones 2 et 3, on doit amincir l'image finale. Les deux premiers miroirs vont regarder leurs propres zones avec un angle d'inclinaison. Cela est la source d'amincissement. Les deux miroirs après sont fixé à 45 degré par rapport à l'écran pour renvoyer les rayons à la lentille de façon parallèle.

On va maintenant préciser la méthode pour équilibrer les résolutions des trois zones :

Au cours de mes programmations, Les trois zones sont définies par : de $x_{proj}=x_{coup}=50\text{mm}$ au point où le faisceau d'électron est dévié de 10 degré ; de ce point au point où le faisceau rencontre le coin en haut à droite ; et la partie reste. On la numérote comme Zone1, 2 et 3.

x_{proj} est la distance entre le point de rencontre du faisceau d'électrons avec l'écran et le point d'intersection la ligne non-déviée du faisceau d'électron avec l'écran. x_{coup} est le seuil de déviation, les faisceaux qui n'ont pas atteindre ce seuil ne sont pas considérés pour l'instant.

Au niveau de l'écran, il y une seule valeur de x_{proj} pour une certaine valeur de E, l'énergie du faisceau d'électron. La résolution est définie comme la variation de E sur le E central pour un pas de x_{proj} suffisamment petit, ce pas est constant pour toute la même courbe, et pour une valeur de ΔE varié. La valeur de x_{proj} change d'un pas, le E central est pris au début de chaque pas pour simplifier les calculs. Et si on veut modifier la résolution au niveau de la caméra, on doit modifier ce pas au niveau de la caméra. Ce pas au niveau de la caméra est aussi constant et est défini par la distance entre chaque pixel. Et finalement on peut trouver que cette modification revient à dilater ou contracter les faisceaux qui arrivent à la lentille et qui arrivent à la caméra.

$$\text{Res}_f = \frac{\Delta E(\text{pas_caméra})}{E} \propto \frac{1}{L_{\text{lentille}}} \propto \frac{1}{k * L_{\text{écran}}} \propto \left(\frac{\Delta E(\text{pas_écran})}{E} \right) / k = \text{Res}_i / k$$

L_{lentille} est la largeur du rayon coupé suivant le plan de la même phase juste devant la lentille. La détermination de sa valeur est essentielle pour concevoir l'installation de notre système d'optique

Pour équilibrer les trois zones, il faut satisfaire :

$$\frac{\text{Res}_{i_1}}{k_1} = \frac{\text{Res}_{i_2}}{k_2} = \frac{\text{Res}_{i_3}}{k_3}$$

k est le facteur d'élargissement du faisceau par rapport à la taille de chaque zone au niveau de l'écran dans la direction de x_{proj}

Le miroir n'augmente ni diminue la taille de l'objet, donc le facteur k pour chaque zone est relié avec l'angle d'inclinaison de l'image après les miroirs et l'objet original (noté β). k est égal à $\cos(\beta)$ si on utilise

les faisceaux parallèles. Les facteurs k doivent être tous inférieure à 1. Puisque sinon, le rayon de k supérieur à 1 ne peut pas arriver parallèlement par rapport aux autres rayons devant la lentille, et on ne peut plus utiliser qu'une seule lentille

La position de l'écran est fixé par le point de référence et l'angle d'inclinaison de l'écran (noté $\alpha; \alpha$). Une grande valeur de α dans le sens qui favorise la rencontre des faisceaux de basses énergies va améliorer la résolution pour x_{proj} inférieur à une certaine valeur qui dépend de la position du point de référence et aussi de la distribution des faisceaux d'électrons arrivés. On revient à étudier l'influence de l'angle d'inclinaison dans la partie de la simulation suivante.

3.1.2 La désignation en tenant compte des tailles réelles des composants et le règle de construction

Le positionnement des composants optiques devient difficile quand on considère l'installation réelle :

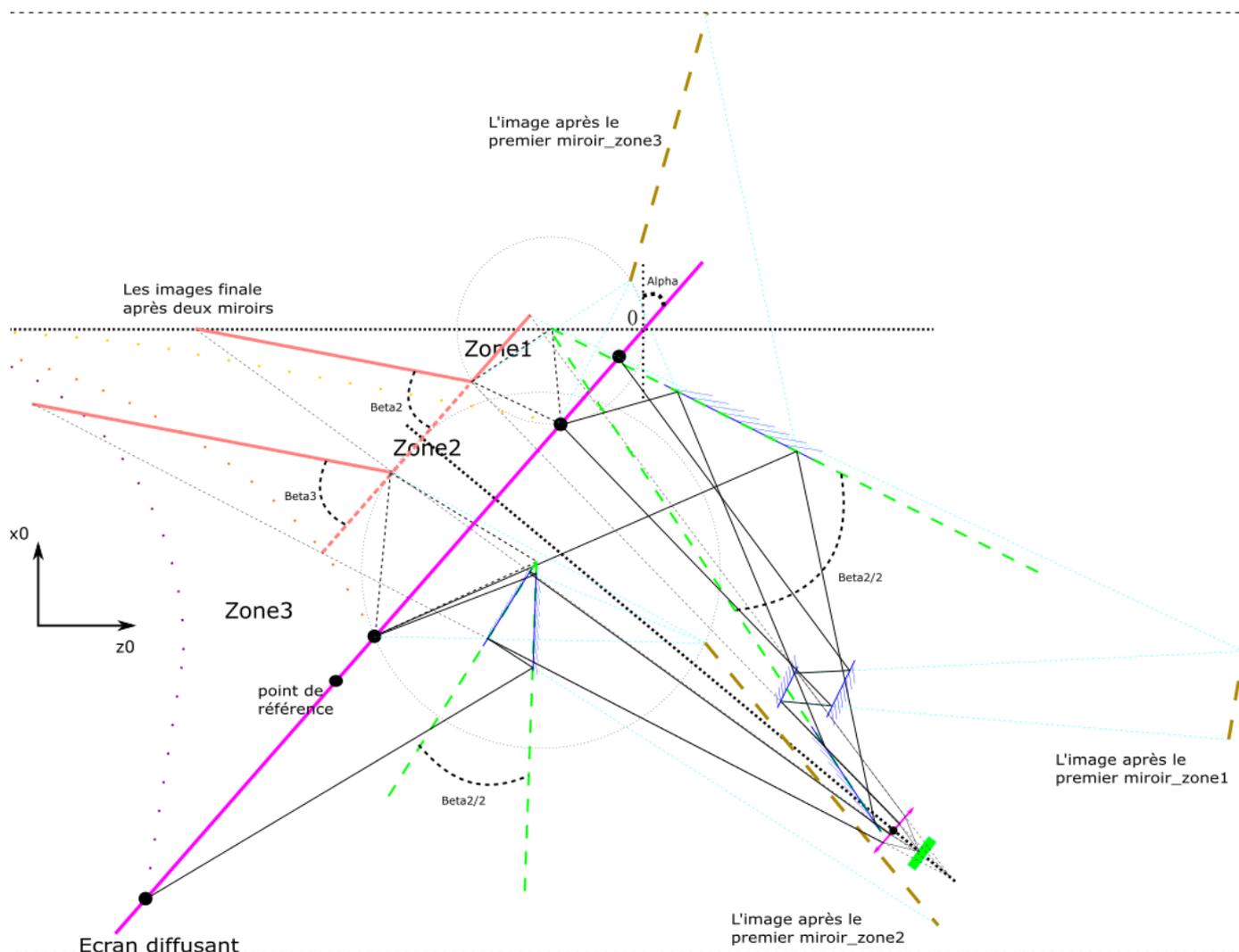


Figure 12 Le dessin pour le système optique avec les rayons convergents

On cherche à construire le système avec les petits miroirs et la petite lentille. Les facteurs d'élargissement sont relatifs puisqu'on peut toujours contrôler l'élargissement global en modifiant la distance entre la lentille et la caméra. Mais pour pouvoir utiliser une petite lentille, on ne peut pas seulement diminuer les valeurs de k , parce qu'une petite valeur de k signifie un grand angle β qui est l'angle entre l'objet et l'image après deux miroirs. Donc, maintenant, on doit considérer les rayons convergents

On doit fixer nos yeux sur les images finales après les miroirs. L'emplacement de ces images va finalement décider ce qu'on peut capturer par la caméra à travers une petite lentille.

Par rapport au dessin précédent : on a tracé les images virtuelles (en rouge) après les miroirs pour fixer la ligne Centrale. On a aussi tracé les premières images (en couleur kaki) après les miroirs primaires, les lignes pointillées en vert frais sont tracer pour déterminer la position des miroirs.

Règle de construction :

On utilise d'abord les facteurs d'élargissement k qui pour déterminer les angles β .

On choisit la position des images virtuelles de chaque zone après les miroirs en respectant les angles β .

On choisit la ligne centrale de l'ensemble de la lentille avec le détecteur, et on ajuste la position des images précédentes pour que la lentille soit totalement éclairée.

Pour chaque zone, on utilise le vecteur d'un point dans l'objet original à son image virtuelle après deux miroir comme le fond d'un triangle isocèle qui a un sommet d'angle égal à β

À partir de ce point, on trace deux lignes référentielles avec un angle égal à $\beta/2$ entre ces deux lignes, les deux miroirs doivent nécessairement se trouver suivant chacune de ces deux lignes. Le fait que ces deux lignes peuvent être parallèles ne gêne pas notre construction

Pour optimiser la configuration, et pour avoir un montage réalisable, il faut éloigner les images après les miroirs par rapport à la lentille et rapprocher le détecteur avec la lentille.

Le choix des lignes correspondant aux deux miroirs est très important pour bien espacer les composants optiques en 3D ou en un seul plan

Le problème pour ce genre de système optique est que l'image finale est déformé car on n'a pas utilisé les faisceaux parallèles, l'image loin de la ligne central est plus déformé.

3.2 Les simulations pour le profil transversal et aussi sa résolution

3.2.1 La courbe de distribution de l'énergie sur l'écran placé à l'arrière du spectromètre

On va maintenant utiliser le code précédent pour simuler la variation de l'énergie du faisceau d'électrons en fonction de la position x_{proj} au niveau de l'écran. On peut aussi simuler la variation de la résolution en fonction de la position x_{proj} pour prévoir les valeurs de k et donc l'installation du système optique.

La position x_{proj} est calculée en utilisant l'équation de l'écran défini par le point de référence (z_{ref} , x_{ref}) et l'angle d'inclinaison de l'écran α avec l'équation du faisceau de sortie déterminée par le point de sortie (z_s, x_s) et l'angle de sortie φ_s . Cela va nous donner les coordonnées du point de rencontre du faisceau d'électron avec l'écran. On calcule aussi les coordonnées du point d'intersection de la ligne non dévié avec l'écran en utilisant en plus le point initial (z_0 , x_0)

Grâce aux études précédentes, on sait qu'à environ 65 Gauss, le faisceau de 6 MeV sort du spectromètre avec une déviation de 10 degré. De même façon : 118 Gauss pour 11 MeV ; 2680 Gauss pour 250 MeV.

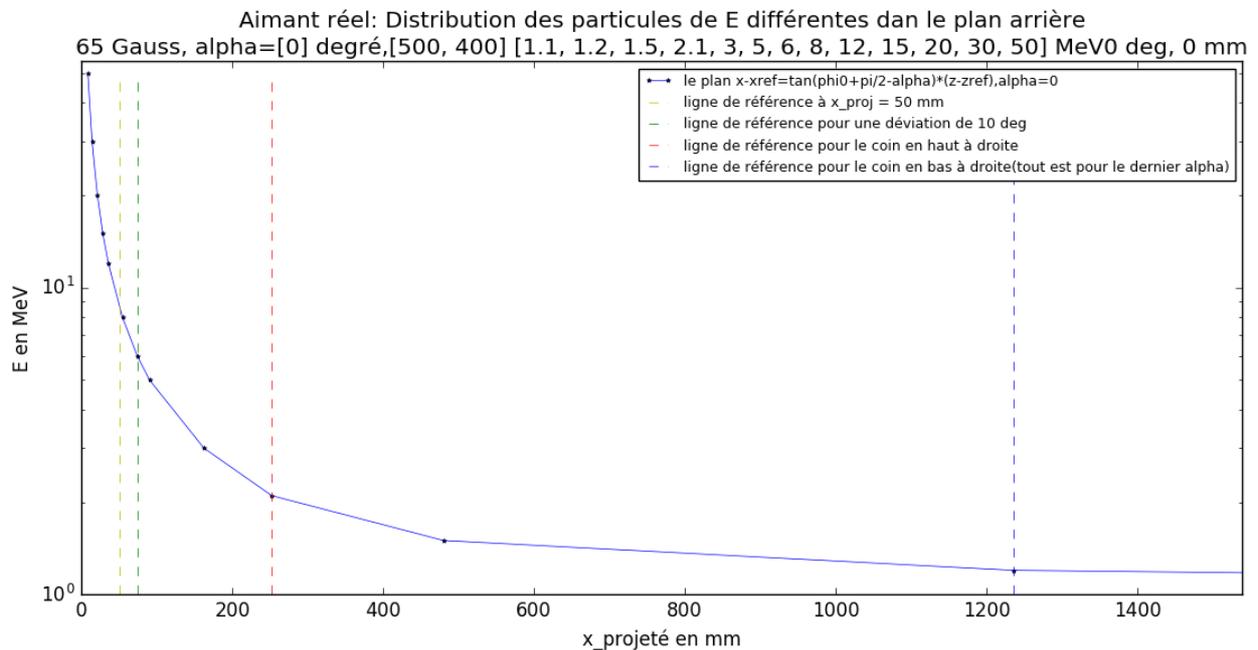


Figure 13 La Variation de l'énergie en fonction de x_{proj} en échelle semi-logarithmique pour 6 MeV

$X_{\text{projeté}}$ est la distance entre le point de rencontre du faisceau d'une certaine énergie et le point de rencontre du faisceau non dévié, c'est-à-dire de l'énergie infinie. On utilise l'échelle semi-logarithmique puis qu'en échelle réelle, la forme est non distinguable.

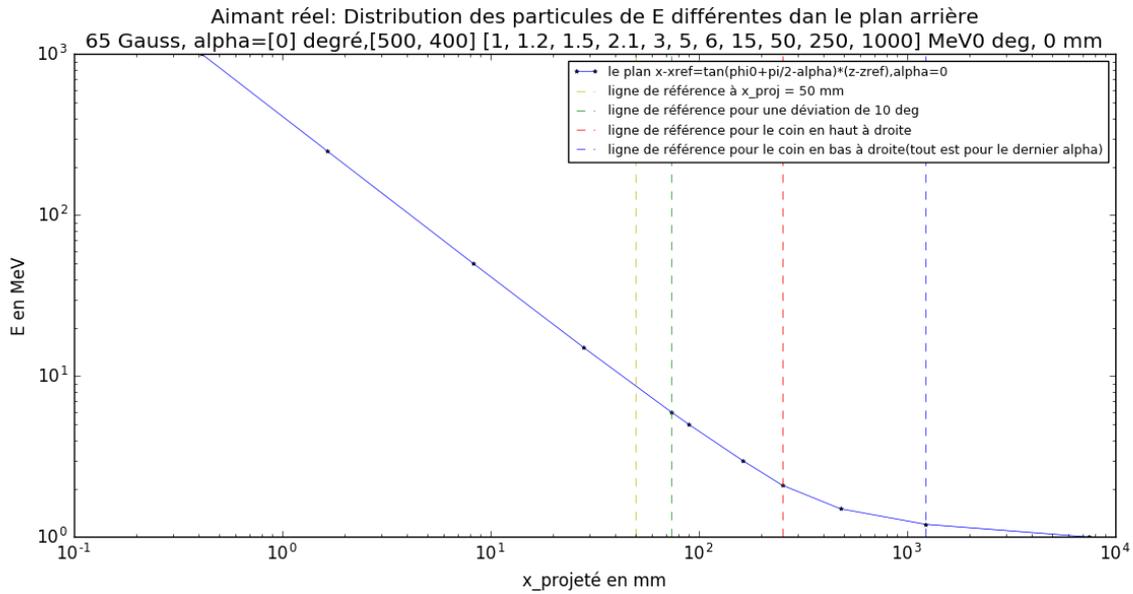


Figure 14 La Variation de l'énergie en fonction de x_{proj} en échelle logarithmique pour 6 MeV

En échelle logarithmique on peut voir que la courbe est composée de deux parties : quand l'énergie est assez grande, la courbe est quasiment linéaire. Quand l'énergie est proche de l'énergie au repos, la courbe évolue vers à un asymptote. C'est asymptote n'est pas parfaitement présenté dans cette courbe puisque l'instabilité de la simulation détruit la rencontre quand l'énergie est très faible.

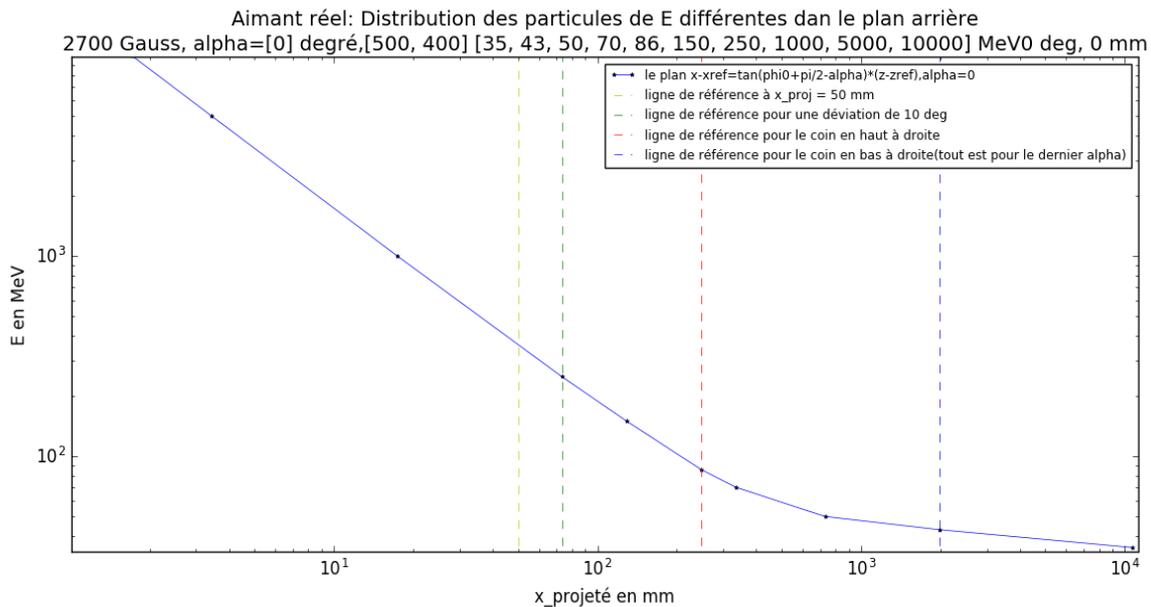


Figure 15 La Variation de l'énergie en fonction de x_{proj} en échelle logarithmique pour 250 MeV

La forme de cette courbe est similaire pour 250 MeV, on peut vérifier que c'est toujours au coin en haut à droite que la courbe commence à changer la pente.

On va maintenant étudier l'effet de l'angle d'inclinaison de l'écran sur la courbe de distribution, l'écran est perpendiculaire au faisceau non dévié quand l'angle α vaut 0. L'augmentation de cette valeur permet d'incliner l'écran de façon horaire, c'est-à-dire dans le sens qui favorise la rencontre des faisceaux de basses énergies avec l'écran.

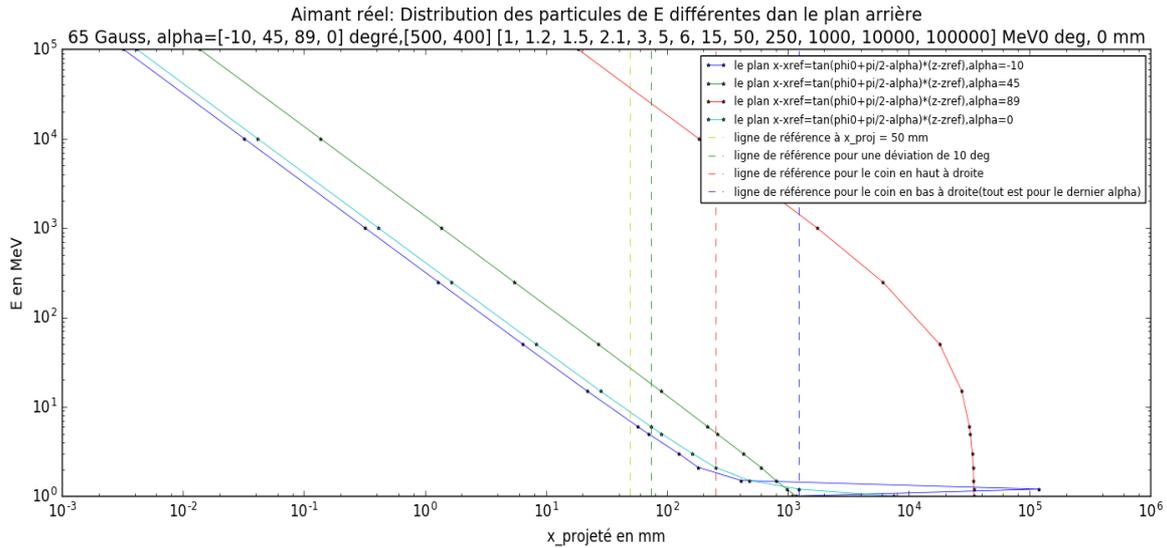


Figure 16 La courbe de distribution en échelle logarithmique pour 6 MeV et pour $\alpha = [-10, 0, 45, 89]$ degré

On trouve que quand α devient grand, l'énergie pour une même valeur de $x_{\text{projété}}$ devient plus grande, la zone de la courbe linéaire devient plus large. Les pentes de ces zones sont identiques, par contre, les pentes après le coin en haut à droite deviennent de plus en plus négatives. On fait ensuite des zooms sur ces courbes pour vérifier l'existence de l'asymptote et pour regarder précisément le changement des pentes.

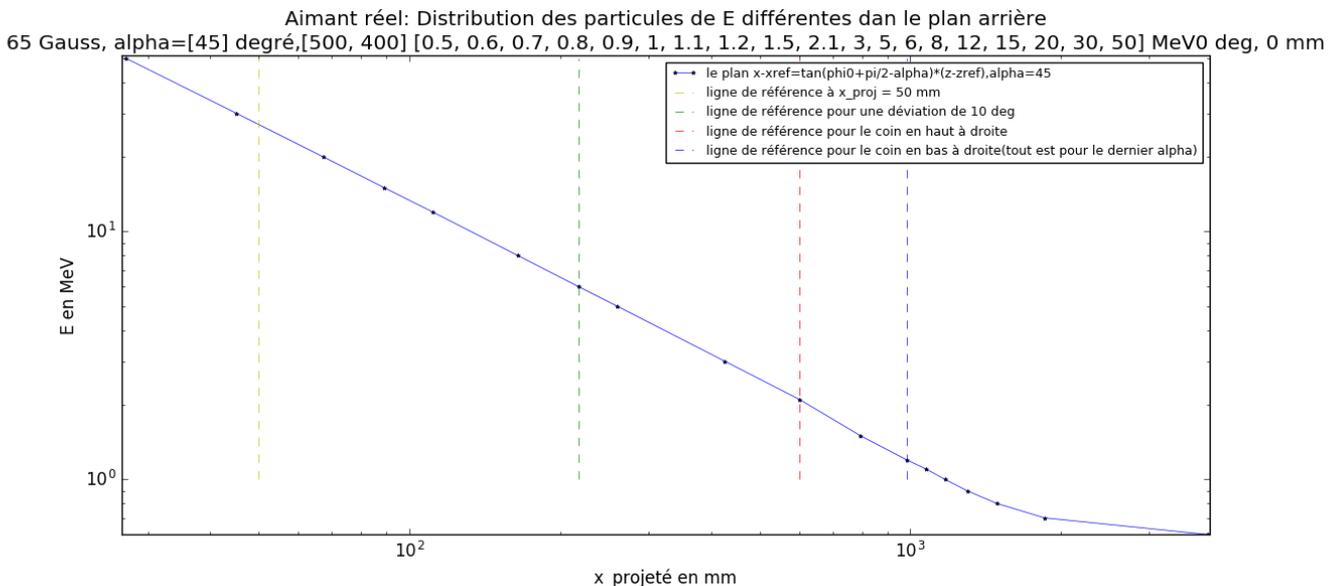


Figure 17 La courbe de distribution en échelle logarithmique pour 6 MeV et pour $\alpha = 45$ degré

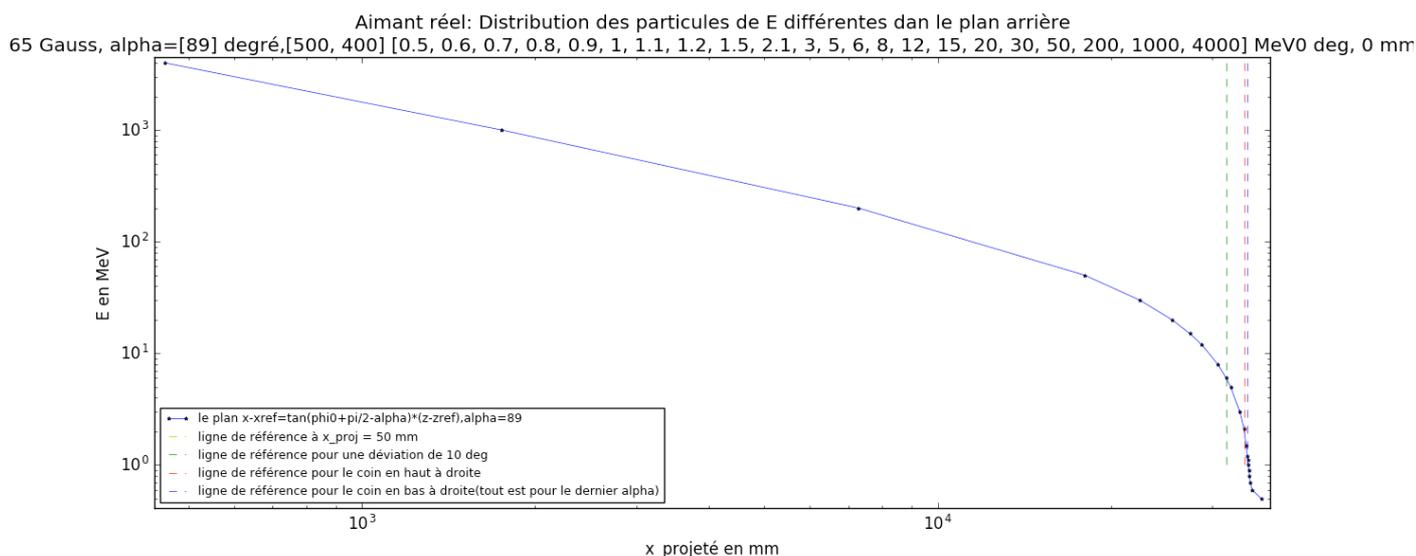


Figure 18 La courbe de distribution en échelle logarithmique pour 6 MeV et pour $\alpha = 45$ degré

On vérifie bien l'existence de l'asymptote qui est l'énergie au repos. On peut aussi trouver qu'en jouant sur l'angle d'inclinaison de l'écran, on peut contrôler la forme de la première zone. C'est à environ 45 degré que cette courbe garde sa linéarité de la partie de haute énergie jusqu'au coin en bas à droite.

3.2.2 Les courbes de résolution de l'énergie et des améliorations

On cherche à équilibrer la résolution au niveau de la caméra placé après l'écran :

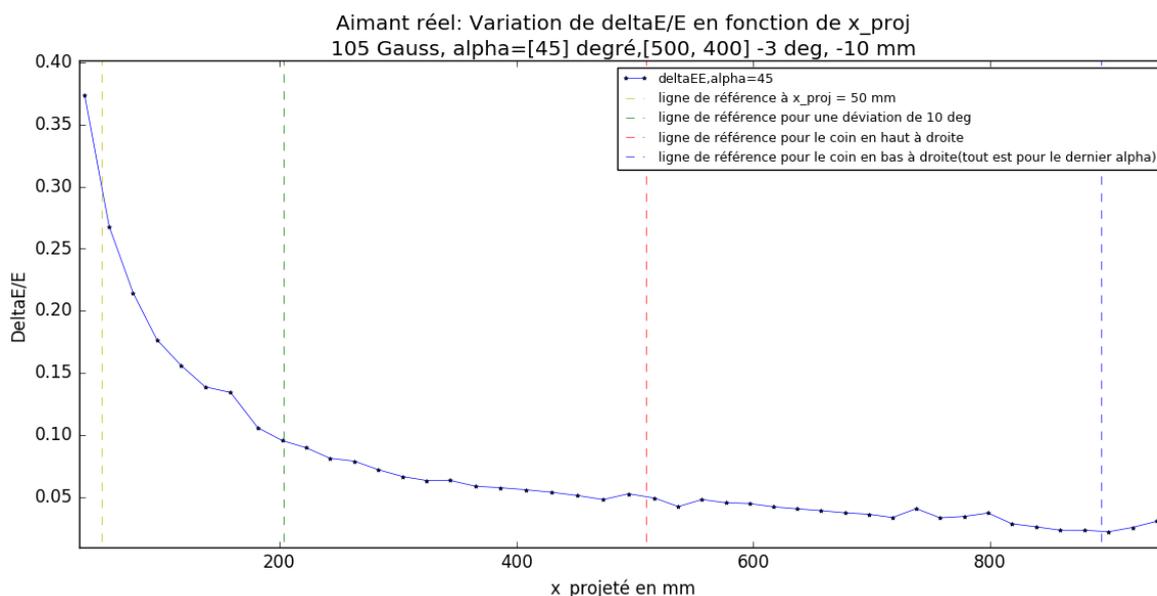


Figure 19 La courbe de résolution en pour 11 MeV et pour $\alpha = 45$ degré

Pour la configuration optimisée (de façon 1) obtenu pour $E_{max}=11\text{MeV}$, et pour $\alpha=45$ degré, on peut trouver en échelle linéaire:

Les tailles des zones 1, 2, 3 à l'écran sont de l'ordre : 153.058, 305.476, 383.692 (mm).

Les résolutions caractéristiques initiales des zones 1, 2, 3 sont environ: 0.177, 0.062, 0.034

Les facteurs mieux choisis sont: $k_1=1$, $k_2=0.350$, $k_3=0.192$; Les angles β sont: 0, 69.5, 88.1 degré.

Si on réussit à construire un système optique qui permet d'équilibrer les résolutions comme notre planification, la courbe de résolution doit être comme la suite :

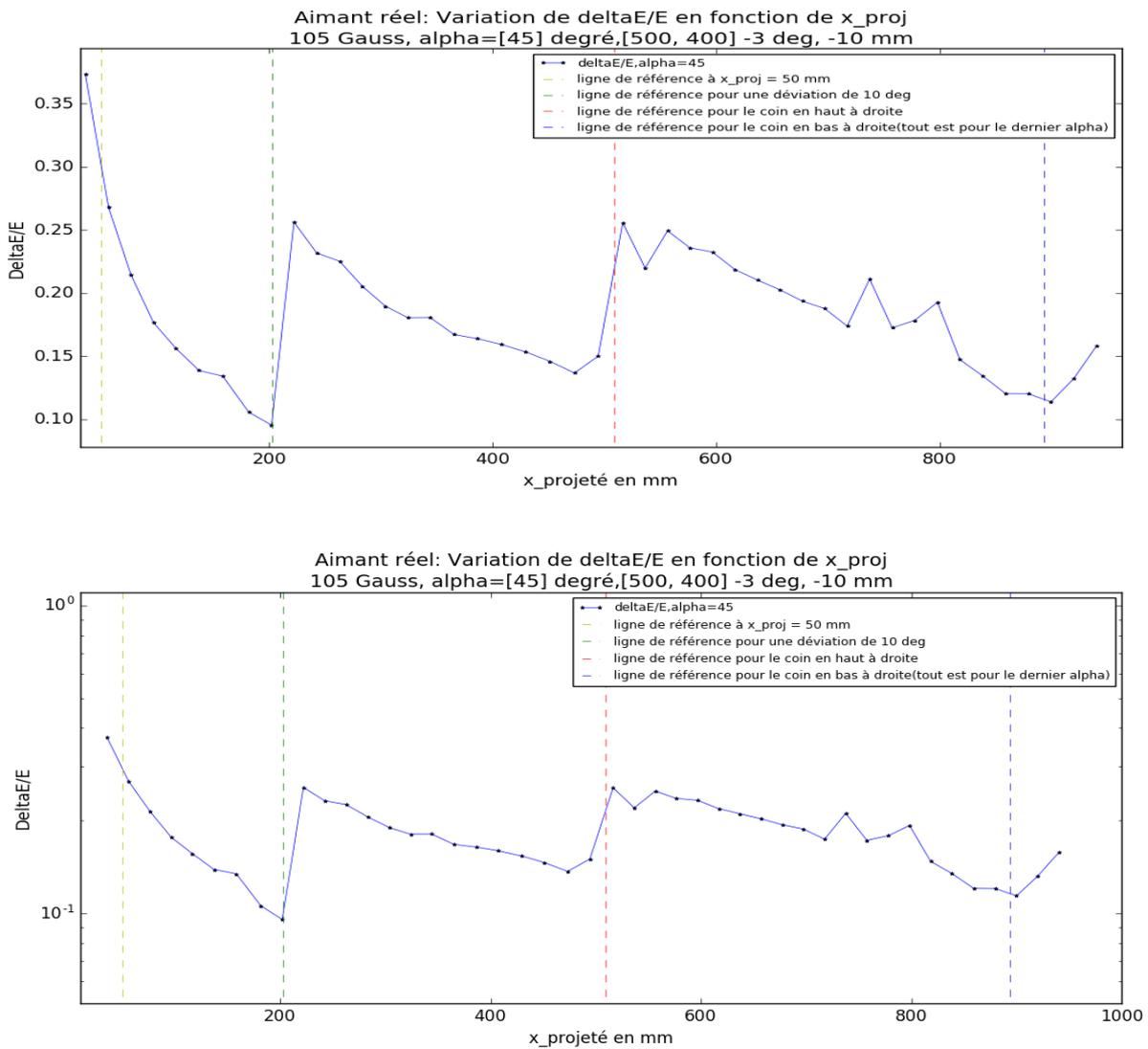


Figure 20 La courbe de résolution en ajoutant le système optique planifié, pour 11 MeV et pour $\alpha = 45$ degré

On trouve que notre équilibrage des résolutions permettra d'augmenter la valeur minimale de $\Delta E/E$ de 0.05 à 0.1.

La chicane de compression

4.1 la chicane de compression symétrique

4.1.1 Principe du fonctionnement d'une chicane de compression

Après avoir étudié le spectromètre qui permet de contrôler notre faisceau d'électron transversalement. On va maintenant concevoir une chicane de compression qui permet de réduire longitudinalement la longueur de notre paquet d'électron qui est demandé d'être concentré.

En fait, d'un point à un autre point, la longueur de la trajectoire des électrons plus énergétiques est toujours plus grande par rapport à celle des électrons moins énergétiques. On doit nécessairement considérer que les électrons plus énergétiques sont initialement en retard par rapport à ceux moins énergétiques. Il faut alors trouver la variation de ce retardement en fonction de l'énergie en utilisant notre simulation.

Pour les électrons relativistes, leurs vitesses sont tous proche de la vitesse de lumière. On peut vérifier par la suite que la compression à travers une certaine distance est très faible si on n'utilise pas la chicane (voir 4.2.2).

Un système composé de quatre dipôles de nous permet de réaliser la chicane :

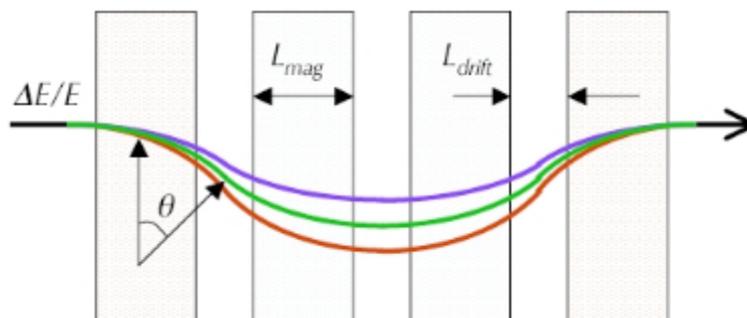


Figure 21 La chicane de compression à quatre dipôles dans le cas idéal

Les portées des dipôles sont tous identiques et rectangulaires pour simplifier la désignation. Les paramètres qui apparaissent dans la figure ci-dessus sont L_{mag} , L_{drift} , θ , $\Delta E/E$. On peut obtenir la distance de compression pour un paquet d'électrons traversant cette chicane à partir de ces paramètres.

On va d'abord calculer la distance parcourue pour une certaine énergie :

$$L(E) = L_{drift} + 2 \frac{L_{drift}}{\cos(\theta)} + 4R\theta, \text{ avec } R = \frac{\sqrt{E^2 - m^2 c^4}}{qBc} \text{ et } \theta = \arcsin\left(\frac{L_{mag}}{R}\right).$$

On peut ensuite connaître la distance de compression en proposant un écart de l'énergie ΔE entre les électrons les plus énergétiques et ceux moins énergétiques. Il faut aussi considérer la petite influence de la différence de vitesse entre les électrons même s'ils sont relativistes pour avoir la précision. Ces calculs sont faits dans la partie pour la chicane asymétrique.

A partir des équations précédentes on peut trouver l'écart de la distance parcourue ΔL . En faisant un développement limité on peut obtenir les équations suivantes qui caractérisent la qualité d'une chicane.

$$\Delta L = R_{56} \frac{\Delta E}{E} + T_{566} \left(\frac{\Delta E}{E}\right)^2 \quad R_{56} = 2\theta^2(L_{dft} + \frac{2}{3}L_{mag})$$

R_{56} et T_{566} s'appellent les facteurs de compression d'ordre 1 ou 2. En utilisant ces deux équations on peut commencer à désigner les tailles de notre chicane. On veut initialement compenser une longueur de $300\mu\text{m}$ pour une dispersion de 1% autour de 10 MeV. Cela demande un R_{56} de 30 mm. Si on veut que l'angle de déviation à travers chaque dipôle soit à 10° , il nous faut un L_{mag} de 100 mm et un L_{drift} de 400 mm.

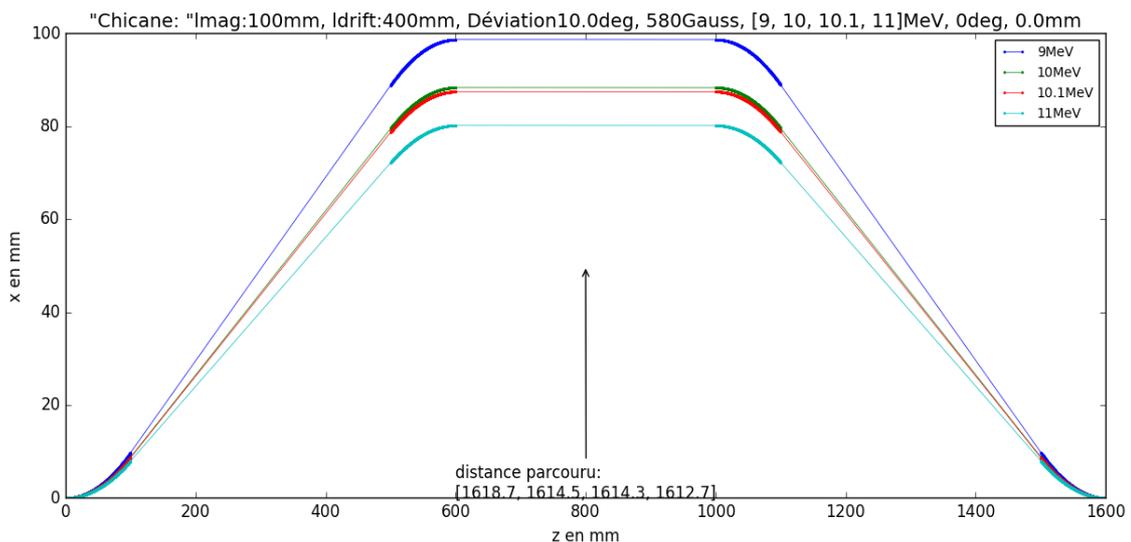


Figure 22 La chaîne de compression symétrique avec les notations sur la distance parcourue de chaque énergie

On vérifie que la différence de la distance parcourue entre 10 MeV et 10.1MeV vaut environ 0.2 mm, notre simulation est correcte

4.1.2 Simulation réalisée et les caractérisations

On peut étudier l'influence de l'instabilité du champ magnétique sur la chicane de compression.

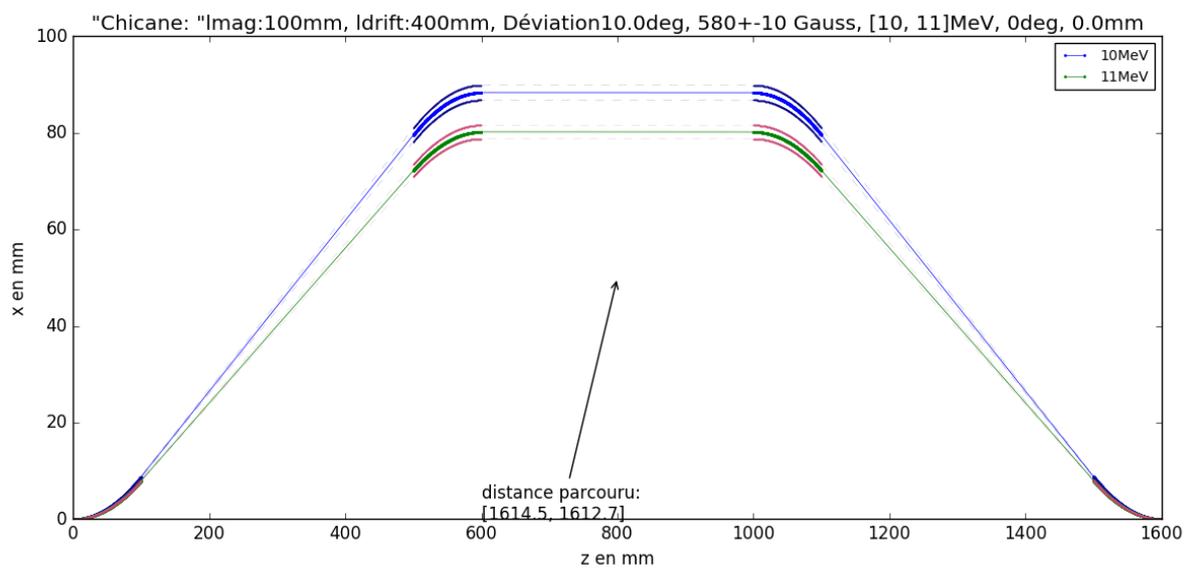


Figure 23 La simulation pour la chicane avec un champ magnétique instable.

On vérifie bien qu'une variation de 10% du champ magnétique permet de compenser une variation de 10% de l'énergie (à environ ± 60 G les lignes se rencontrent). On va ensuite faire un zoom pour la même image mais pour une variation de 1% de l'énergie.

"Chicane: "Imag:100mm, ldrift:400mm, Déviation10.1deg, 580+-1 Gauss, [9.9, 10, 10.1]MeV, 0deg, 0.0mm
Pour les deux derniers aimants, dImag=0, dldrift=0, dB=0Gauss

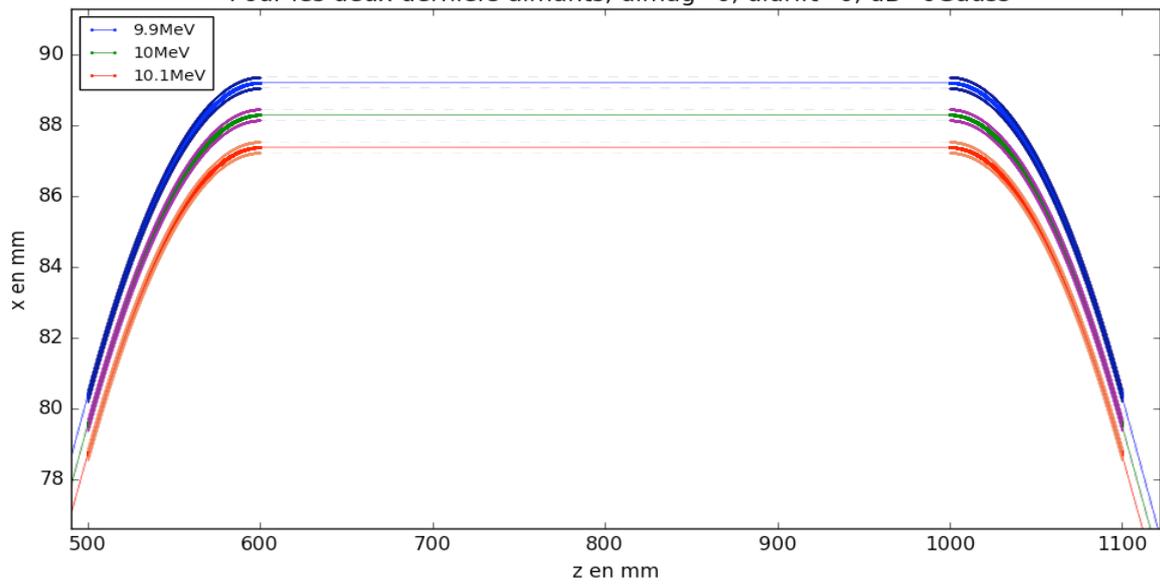


Figure 24 Zoom pour une variation de 1% de l'énergie autour de 10 MeV

Ainsi, pour bien construire la chicane, il nous faut assurer que la variation du champ magnétique soit inférieure à 6 Gauss et encore moins pour vraiment compresser le paquet d'électrons sans le trop perturber.

On va maintenant tracer la variation de la distance parcouru en fonction de l'énergie pour cette chicane.

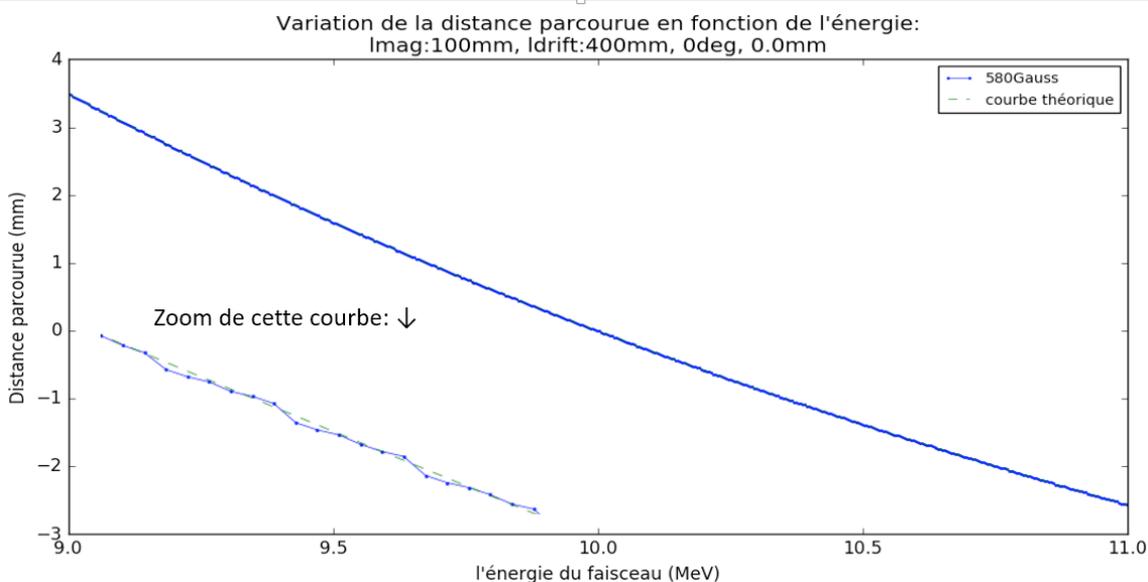
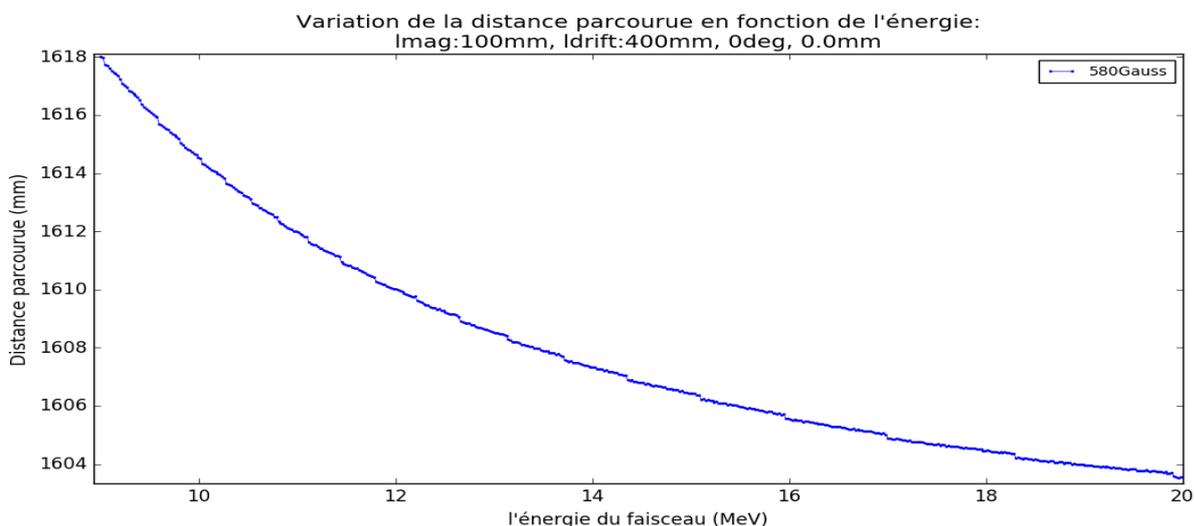
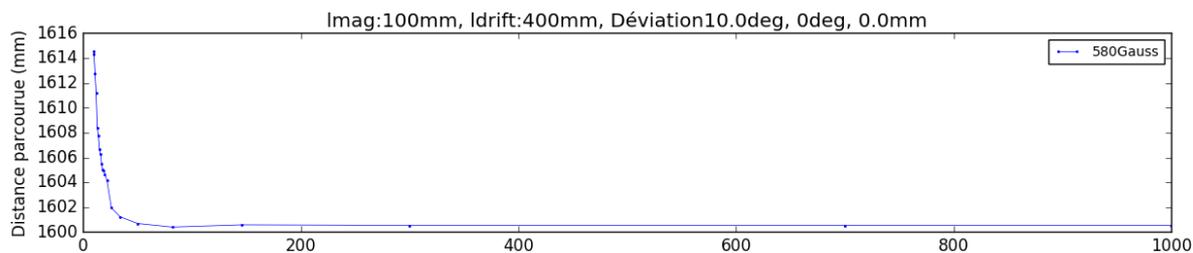


Figure 25 Les variation de la distance parcourue en fonction de l'énergie.

On diminue l'intervalle du temps entre chaque itération pour la simulation et augmente le nombre d'échantillon de l'énergie pour les courbes l'une après l'autre. On trouve que quand cet intervalle n'est pas assez petite et que le nombre d'échantillons n'est pas suffisant, la courbe présente les dents. Pour la fin des titres des courbes, 0deg, 0.0mm signifie qu'on reste toujours à la configuration par défaut, c'est-à-dire les électrons arrivent perpendiculairement par rapport au premier dipôle et à $x=0$.

Pour la troisième courbe, le zéro est choisi pour 10 MeV, la vraie valeur de la distance parcouru pour $E=10\text{MeV}$ est 1614.47mm.

Pour la troisième courbe, on a aussi ajouté une courbe théorique en pointillé. On peut trouver que la courbe simulée couvre parfaitement la courbe théorique obtenue par

$$L = L_{drift} + 2 \frac{L_{drift}}{\cos(\theta)} + 4R\theta, \quad \text{avec } R = \frac{\sqrt{(E^2 - m^2c^4)}}{qBc} \text{ et } \theta = \arcsin\left(\frac{L_{mag}}{R}\right).$$

En utilisant les codes on peut réussir à obtenir n'importe quelle valeur qu'on veut pour les électrons traversant cette chicane symétrique. Il nous reste à découvrir la possibilité d'une chicane asymétrique.

4.2 la chicane de compression asymétrique

4.2.1 Les étapes pour concevoir une chicane de compression asymétrique

L'objectif d'une chicane asymétrique est de converger les électrons en un autre point de sortie en gardant le même angle de sortie. Ici on choisit de converger les électrons à $x = 50 \text{ mm}$ au lieu de 0 mm , et d'avoir la même direction de propagation que les électrons incidents.

Pour réaliser cette chicane, on doit nécessairement changer la forme de l'aimant ou l'homogénéité du champ magnétique. Mais si on change l'homogénéité du champ magnétique, car les faisceaux pour les différentes énergies vont finalement converger à un seul point, il est très difficile pour prévoir la variation du champ magnétique et pour la réaliser autour de ce point. On utilise donc aussi un champ homogène

Si on reste sur la chicane de compression à quatre aimant, et on ne modifie que les deux derniers aimants. Réfléchissons sur les rôles de chaque aimant (numéroté 1, 2, 3, 4) pour l'aimant symétrique :

Déviations: 1,2: $+\Delta\varphi - \Delta\varphi = 0$; 3,4: $-\Delta\varphi + \Delta\varphi = 0$

Dislocation: 1,2: $+\Delta h$; 3,4: $-\Delta h$

$\Delta\varphi$ et Δh dépend de E par une formule non linéaire.

Pour l'aimant asymétrique, il nous faut :

$$\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 + \Delta\varphi_3 + \Delta\varphi_4 = 0 ; \Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3 + \Delta h_4 + \Delta h_{12} + \Delta h_{23} + \Delta h_{34} = 50 \text{ mm};$$

On simplifie le problème en se basant sur l'aimant symétrique:

$$\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 = 0 ; \Delta\varphi_3 + \Delta\varphi_4 = 0 \text{ ainsi } \Delta h_{23} = 0$$

Finalement, on trouve que L'effet des aimants 3 et 4 ne doit pas introduire l'écart de ϕ pour les différentes énergies et doit compenser l'écart de h (ou x) créé par l'aimant 1,2. En fait Δh_{12} et Δh_{23} sont aussi mis en jeu pour avoir 50 mm d'écart dans la direction x.

On va maintenant fixer les dipôles 1, 2. On suppose que les portées des dipôles 3, 4 sont infiniment fines, ainsi on peut tracer la chicane idéale. On utilise une fonction qui calcule l'angle de déviation nécessaire pour que les électrons arrivent en un seul point en fonction de la position x à la sortie du deuxième aimant. Cette fonction n'est forcément pas linéaire. Mais en la linéarisant, on peut peut-être trouver les formes correctes pour 3 et 4.

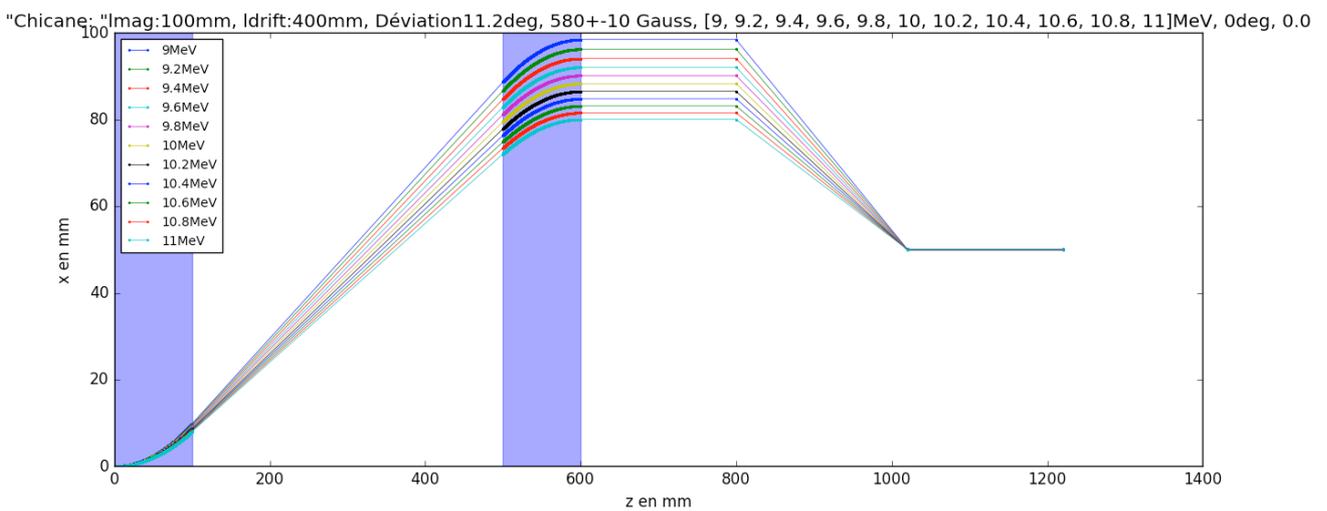


Figure 26 La chaîne de compression asymétrique idéale

Il est important d'avoir une image qui montre l'état idéal, A partir de cette image on doit réfléchir sur les méthodes pour chercher la forme réelle. J'ai d'abord supposé que 2 dipôles sectoriels contrôlables permettent de résoudre ce problème.

Un code qui permet de modifier: les centres des deux secteurs, l'angle d'inclinaison du bord d'entrée et celui du bord de sortie, le champ magnétique des deux aimants sectoriels est réalisé.

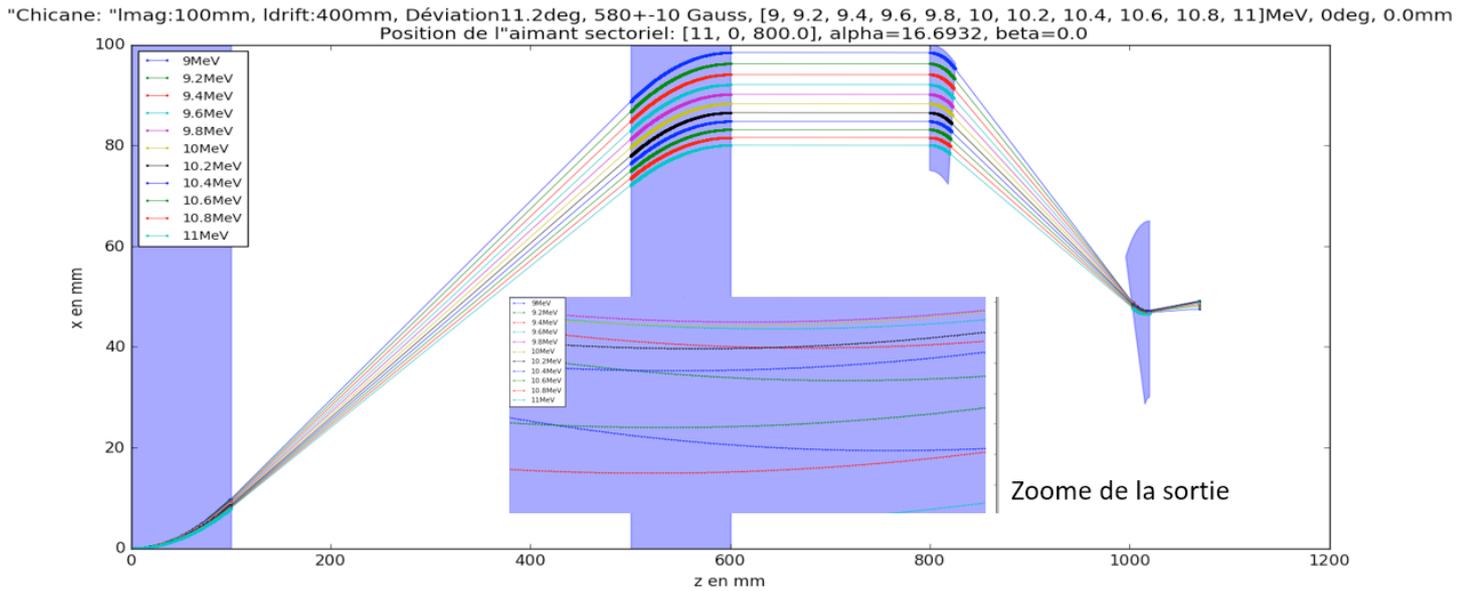


Figure 27 La chaîne de compression asymétrique idéale

Pour le troisième et le quatrième aimant, le champ magnétique est plus fort, ici c'est 3000 Gauss.

On arrive alors à visualiser les effets des aimants mais on trouve bien que ce système des deux aimants sectoriels ne satisfait jamais notre besoin: même point et même angle de sortie.

L'avantage de cette configuration est que c'est plus facile à fabriquer un dipôle de portée sectorielle, mais il faut nécessairement un système de re-focalisation pour avoir les paquets d'électrons de bonne qualité. Mais cela ne satisfait pas notre but. On doit alors chercher une nouvelle méthode pour concevoir la chicane asymétrique : On utilise l'itération automatique du programme.

4.2.2 La chicane asymétrique obtenue par une méthode numérique

Dans la partie précédente, on a montré que c'est difficile à configurer notre chicane avec les formes bien connue comme le secteur.

Les électrons sortent de cette chicane à une différence de 50 mm dans la direction x. On sait que les trajectoires des électrons dans la chicane symétrique se compensent, c'est-à-dire que la déviation totale et la dislocation totale sont tous nulles. Maintenant on suppose que pour la chicane asymétrique, la différence de 50 mm provient seulement de la trajectoire entre le dipôle 3 et le dipôle 4. On doit aussi fixer le quatrième aimant comme rectangulaire identique à celui de la chicane. Ainsi, les trajectoires des électrons dans le quatrième aimant sont fixées, et cela permet d'avoir une même direction de propagation. Il nous faut ensuite déterminer la forme du troisième aimant,

Pour que la sortie soit à $x = 50$ mm, on planifie de retarder la déviation des faisceaux de haute énergie par rapport à celle de basse énergie. Une valeur de Δz pour une énergie, qui décide le point de départ de la déviation au troisième aimant, est utilisée pour faire des itérations. La condition de sortie concerne la position de sortie après le quatrième aimant.

On détermine ensuite les deux bords du troisième par un fit au deuxième ordre, pourtant, ses formules théoriques restent compliquées.

On peut aussi transférer une partie du troisième aimant au deuxième aimant, mais la forme du deuxième aimant ne doit pas être ressemblante. Donc on reste à cette configuration.

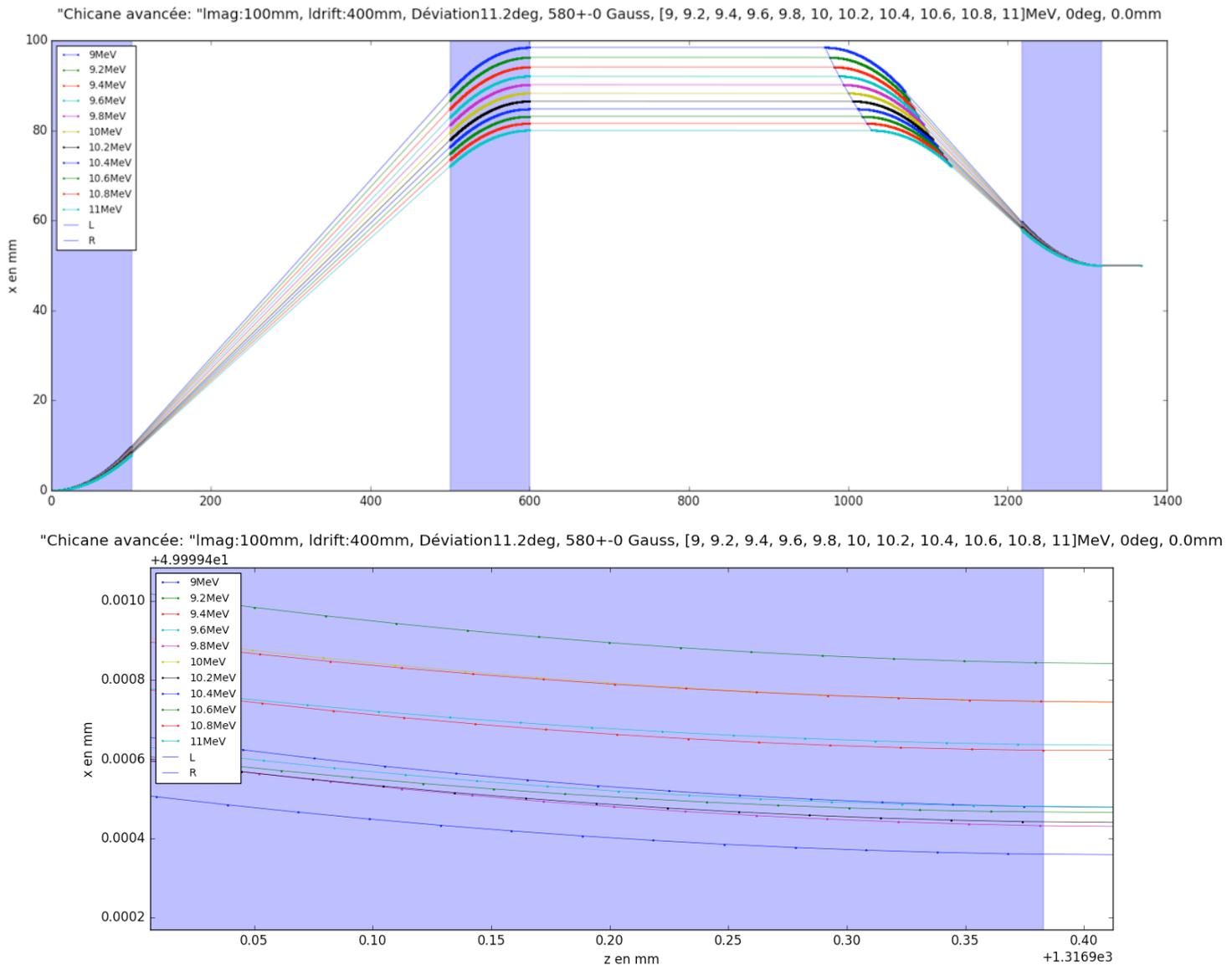


Figure 28 La chicane asymétrique obtenue par la méthode numérique et le zoom sur la sortie

On vérifie bien que cette fois les faisceaux sortis satisfassent notre besoin. Mais le défaut de cette configuration est que la forme de l'aimant est peut-être difficile à obtenir.

On peut faire un fit sur les deux bords du troisième aimant :

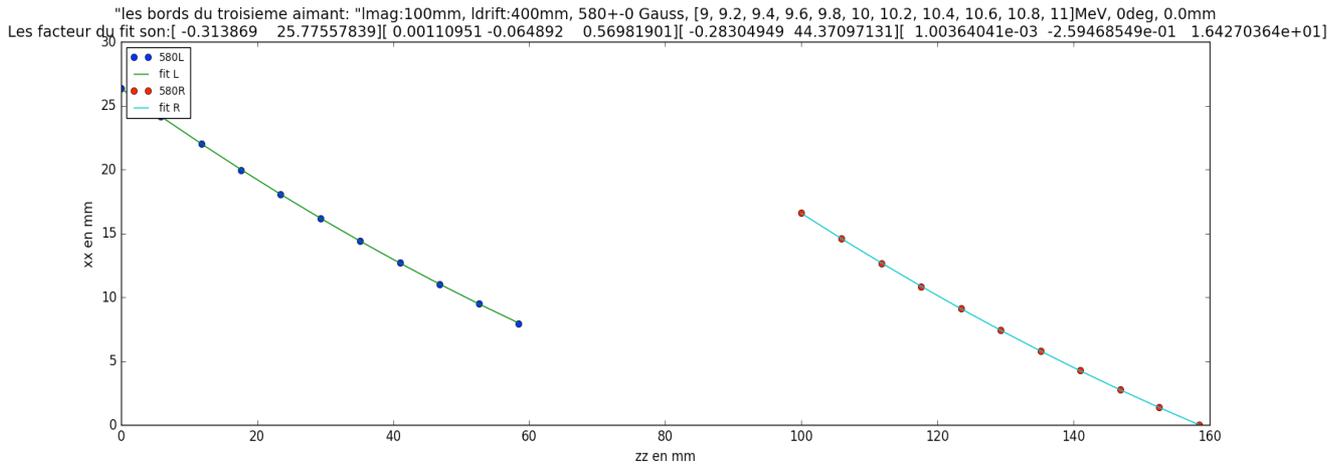


Figure 29 Les deux bords du troisième aimant.

Les coordonnées de la position de l'aimant sont enlevées car on doit toujours repositionner précisément au cours de l'installation. Les facteurs de fit sont listé de façon suivante : [b1, a1] [c2, b2, a2]. L'équation du fit est $f(x) = c * x^2 + (b1+b2)*x + (a1+a2)$

On va maintenant caractériser la capacité de compression de cette chicane asymétrique :

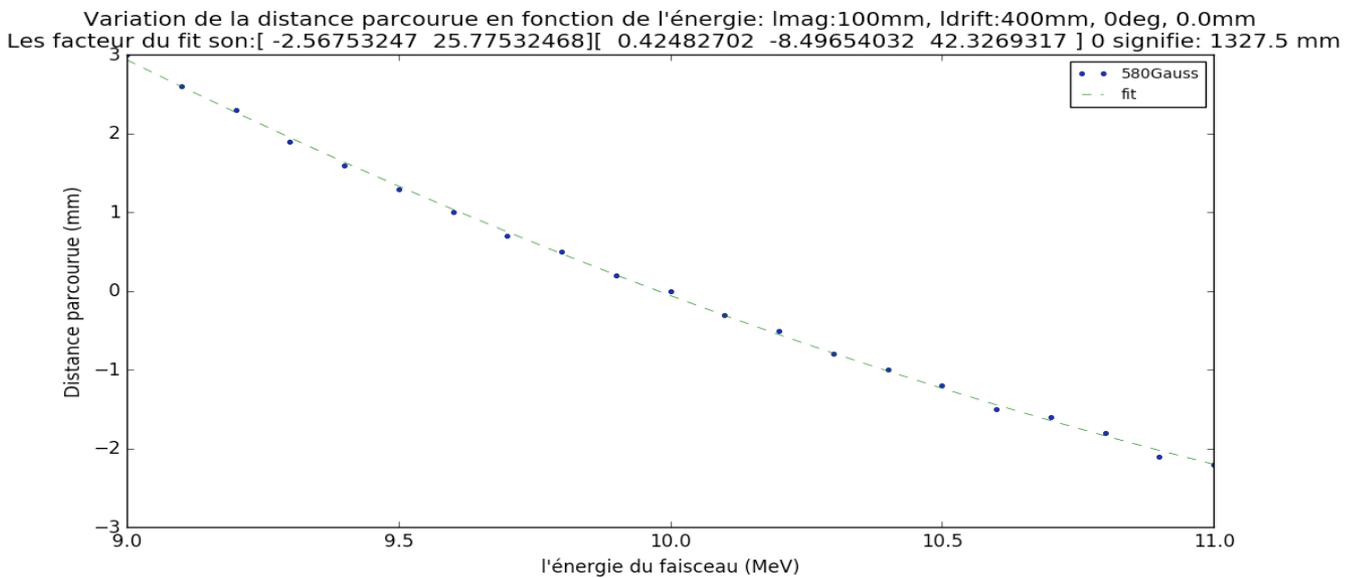


Figure 30 La variation de la distance parcourue dans cette chicane en fonction de l'énergie

Le résultat du fit est $L = 0.42E^2 - 11.06E + 68.10$ (mm, MeV)

Si on considère les électrons d'énergies différentes partent d'un même point juste avant la chicane, quand les électrons de l'énergie de référence (ici 10 MeV) sorte de la chicane, les électrons plus énergétique est en avant, et ceux moins énergétique est en retard. On cherche donc la variation de cet avancement en fonction de l'énergie pour caractériser cette chicane.

Les électrons à environ 10 MeV sont relativistes, si on n'utilise pas la chicane, le paquet d'électron d'énergie de 9 à 11 MeV traversant une distance de 1328mm ne peut être comprimée que 0.8mm. Avec la chicane, on verra que c'est environ 6mm. Toutes les courbes suivantes comprennent déjà l'influence de la différence de vitesse.

On commence par calculer le temps de référence pour passer la chicane qui correspond à notre énergie de référence. On peut en même temps tracer la variation du temps de passage en fonction de l'énergie :

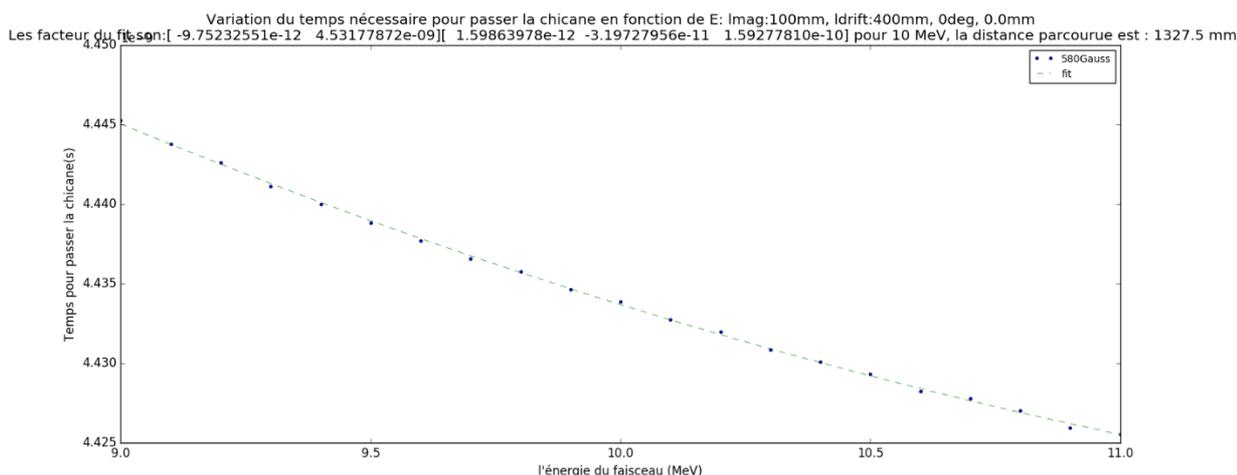


Figure 31 La variation du temps nécessaire pour passer la chicane en fonction de l'énergie

A partir de ce temps de référence, on peut calculer l'avancement :

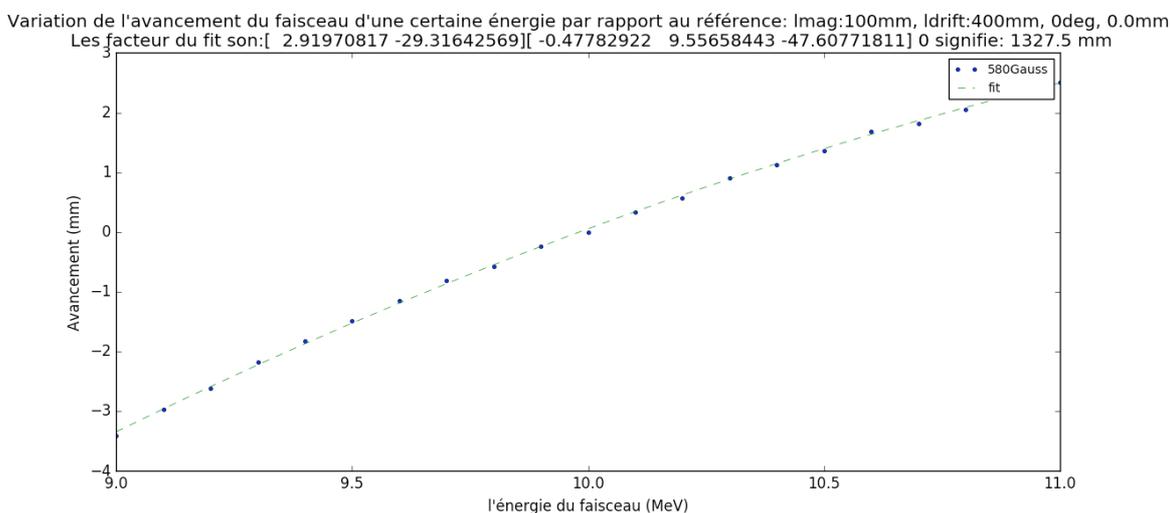


Figure 32 La variation de l'avancement en fonction de l'énergie

Conclusion

Yu ZHANG

Pour le spectromètre, il nous reste à préciser la portée du champ magnétique et peut-être à refaire une nouvelle carte du champ, pour réaliser la simulation plus performante concernant le champ inhomogène.

Pour le système d'optique après le spectromètre et l'écran, la méthode que j'ai proposée porte beaucoup de liberté car tous les positionnements des composants dépendent du positionnement des images virtuelles secondaires qui est assez libre. On doit alors chercher le meilleur positionnement de cette image.

Pour la chicane de compression asymétrique, il sera idéal si on peut fabriquer un dipôle spécial qui satisfait le principe du "retard de la déviation". Sinon, on doit considérer une autre façon à faire des itérations et en cette fois modifiant les formes des autres aimants.

Après ce stage d'environ, j'ai appris beaucoup de connaissances sur la programmation et sur la technique pour rechercher des informations, j'ai compris que le travail scientifique est un effet pas à pas, terre à terre. On commence souvent à des choses vraiment petites. Et à partir de ces bricolages, on construit le bâtiment de l'aujourd'hui.

Annexes : liste des scripts utilisés

Yu ZHANG

Les informations concernant les phénomènes physiques considérés pendant ce stage peuvent être trouvées facilement sur Wikipédia, ici je vais lister les scripts principaux que j'ai programmés et utilisés pendant le stage. Toutes les informations complémentaires seront trouvées dans les scripts.

Rectangulaire.py :

Il permet de simuler la déviation d'une particule dans un champ magnétique de forme rectangulaire, il permet aussi de trouver automatiquement la bande passante pour caractériser l'influence des conditions initiales.

Sectoriel.py :

Par rapport au script précédent, une condition pour assurer que la particule ne soit déviée que dans la zone sectorielle est ajoutée. Il est désigné pour simuler les dipôles parfaits.

Réel.py :

Il permet cette fois de modéliser la forme du dipôle utilisé dans le spectromètre de PHIL avec quand même des simplifications.

Chicane.py :

Il conserve des codes principaux pour la simulation et la caractérisation d'une chicane de compression symétrique.

Chicane_In.py :

Par rapport au script précédent, il est désigné pour pouvoir configurer les formes des dipôles et les champs magnétiques comme on veut.

Chicane_Out.py :

Ce code est utilisé pour chercher, par des méthodes numériques, la forme approximative des dipôles en satisfaisant les conditions de sortie qu'on décide.