

FROM RESEARCH TO INDUSTRY



SUJET DE STAGE

Réalisation de design d'un canon à électrons pour un Klystron 12 GHz de haute puissance

Lyes Boudjaoui

24 Septembre 2014

1. Contexte et objectifs de stage

- 1.1. *Le Klystron*
- 1.2. *Le canon de Pierce*

2. Design d'un canon à électrons

- 2.1. *Principales étapes de l'étude d'un canon à électrons*
- 2.2. *Logiciel de simulation CST Particle Studio*
- 2.3. *Etude de différents concepts pour la réalisation du design électrostatique*

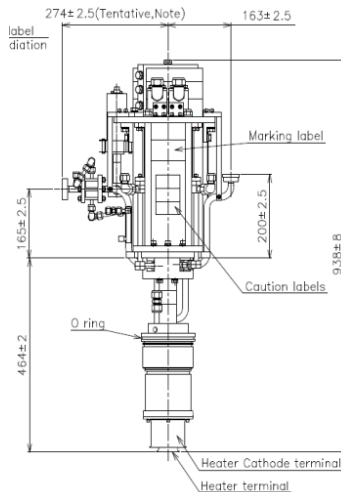
3. Etude de la focalisation de faisceau

- 3.1. *Calcul de champ de Brillouin*
- 3.2. *Résultats de focalisation du faisceau avec un champ constant (CST)*
- 3.3. *Résultats de focalisation du faisceau avec une bobine*

4. Conclusion et perspectives

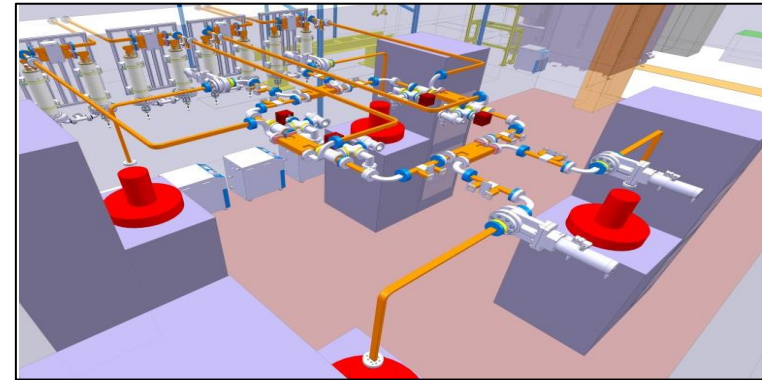
- XBOX3 utilise quatre klystrons TOSHIBA de moyenne puissance (6 MW) en bande X recombinaés et comprimés pour produire un niveau de puissance de 50 MW.

❖ Klystron 12 GHz (Toshiba)



Caractéristiques de Klystron

Puissance crête	6 MW
Puissance moyenne	12.4 kW
Tension de faisceau	170 kV
Courant de faisceau	90 A



banc de test (XBOX3) au CERN

- Notre Klystron sera conçu pour être compatible avec le **modulateur** et le **compresseur d'impulsions** au CERN, afin de permettre des possibilités de test.

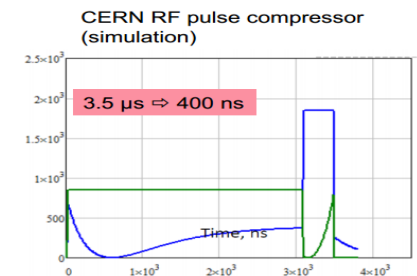
Modulateur Scandinova



Caractéristiques de modulateur

Puissance crête	20 MW
Puissance moyenne	50 kW
Tension d'impulsion	170 kV
Courant d'impulsion	115 A
Durée d'impulsion	4.5 μs

Compresseur d'impulsions



➤ **structure d'accueil** : CEA / IRFU / SACM / LISAH

- ✓ **LISAH**: Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Accélérateurs et Hyperfréquences
- ✓ **SACM**: Service des Accélérateurs, de la Cryogénie et du Magnétisme.
- ✓ **Responsables de stage**: Juliette Plouin / Franck Peauger

➤ **Objectif de stage**: L'étude de design d'un canon à électrons pour un klystron monofaisceau fonctionnant à 12 GHz capable de fournir:



Spécification Klystron 12 GHz (CEA)

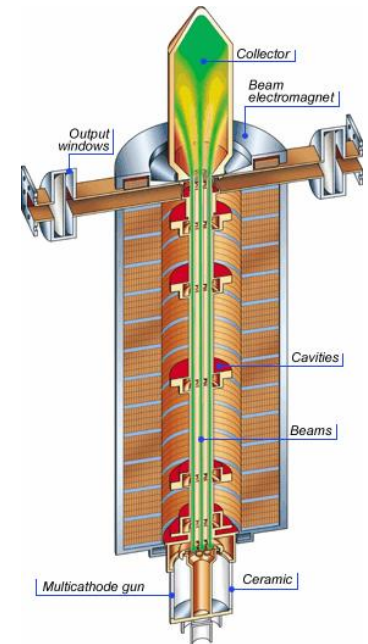
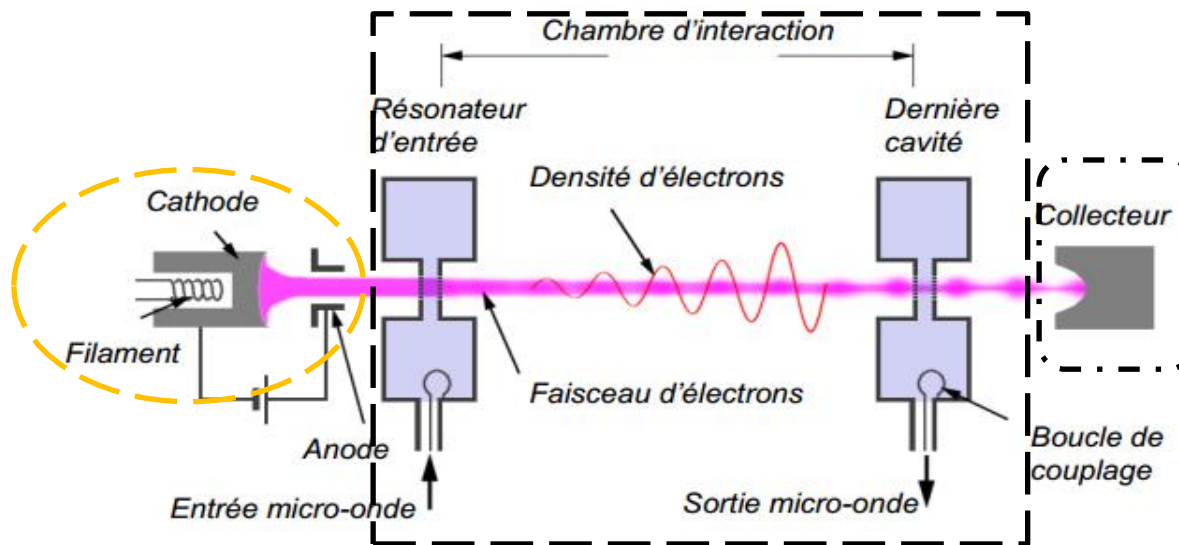
Puissance crête	10MW
Puissance moyenne	10 kW
Tension de faisceau	170 kV
Courant de faisceau	100 A
Durée d'impulsion	4.5 μs

Ce klystron sera destiné à tester des structures accélératrices CLIC.

- Les performances de la machine CLIC sont obtenues grâce à des cavités accélératrices très avancées qui résonnent à la fréquence de 12 GHz.
- Si ces performances sont atteintes, le **klystron 6 MW de Toshiba** pourrait être remplacé par ce klystron et devrait doubler la capacité de tests de la **XBOX3 au CERN**.

1.1. Le Klystron

✓ Source hyperfréquence dans laquelle l'énergie d'un faisceau d'électrons est transmise à une onde hyperfréquence.

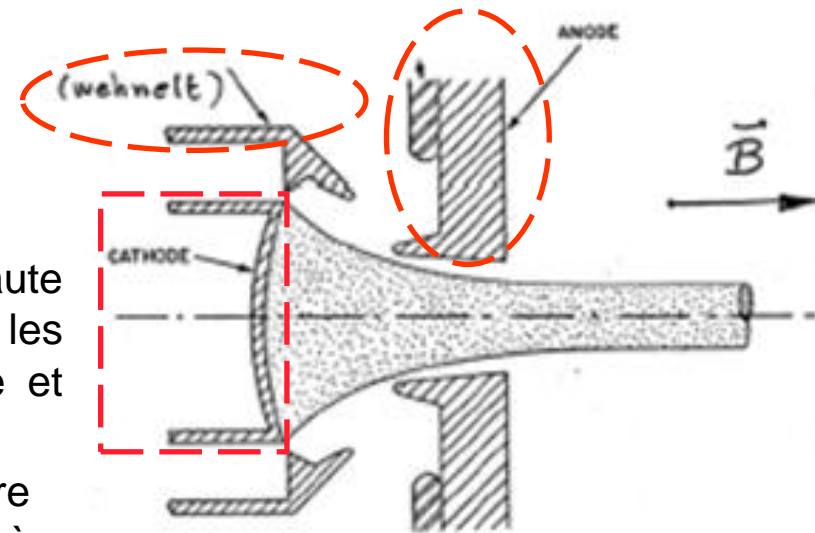


- **Canon à électrons** → produit et assure la mise en forme du faisceau d'électrons.
- **Ligne d'interaction** → constituée de cavités résonantes dans laquelle a lieu l'interaction onde hyperfréquence/faisceau d'électrons.
- **Collecteur** → chargé de récupérer les électrons après l'interaction.

1.2. Le canon de Pierce

✓ Le design de canon est basé sur la conception d'un canon de Pierce. Il comporte:

- **Cathode** : a une forme sphérique portée à très haute température pour extraire les électrons, puis les accélérer par le champ électrique entre la cathode et l'anode.
- **Wehnelt** : électrode de mise en forme permet de faire converger le faisceau vers l'espace d'interaction à travers une anode annulaire.
- **Anode**: imprime une forme particulière aux lignes de champ.

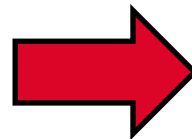


✓ Les électrons arrachés à la cathode forment un faisceau caractérisé par:

- un courant électrique I_k ,
- une tension d'accélération V_k ,

(*loi de Child- Langmuir*)

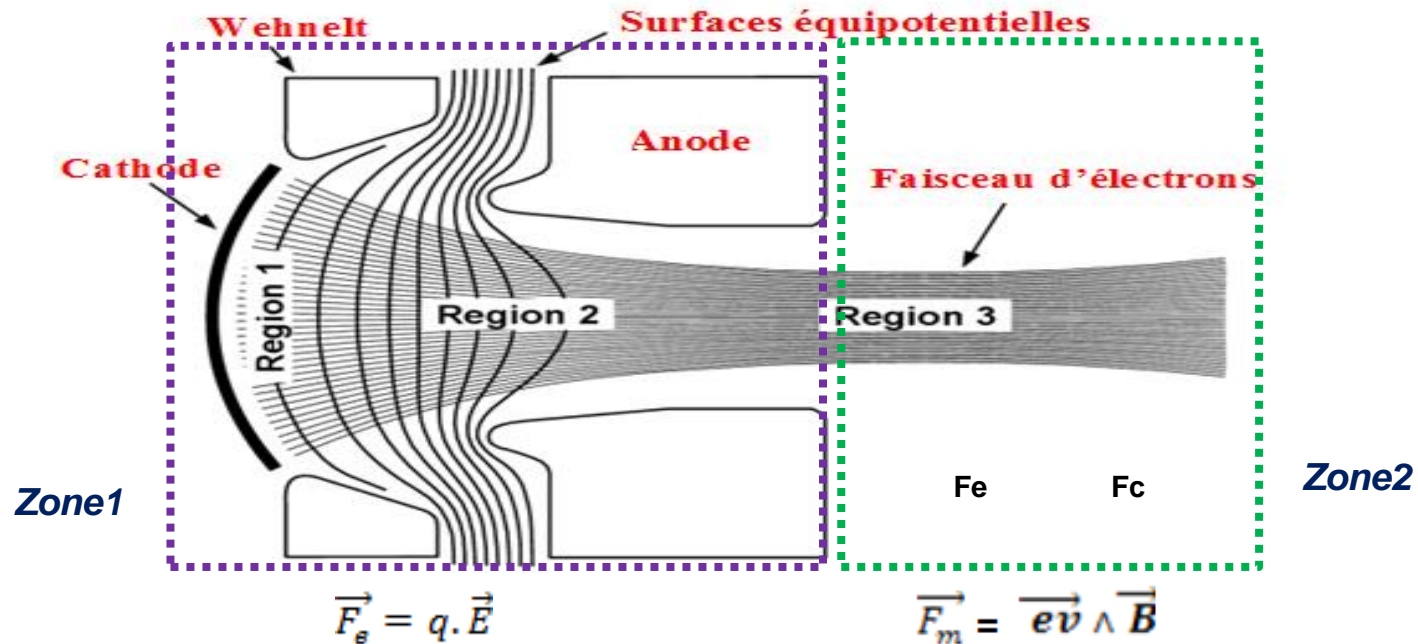
$[I_k = k. (V_k)^{3/2}]$: k : pervéance du faisceau.



k : rapport entre densité électronique et énergie cinétique de chaque électron et dépend de la géométrie de canon.

1.2. Le canon de Pierce

✓ La zone d'extraction et de mise en forme du faisceau s'appelle l'optique électronique.



❑ **Zone 1 (design électrostatique):** (cathode, wehnelt, anode) ont pour fonction d'établir un réseau d'équipotentielle du champ électrique tel que le faisceau ait une forme optimale.

❑ **Zone 2 (Focalisation du faisceau):** sous l'action d'un champ magnétique B , la force magnétique compense l'expansion due à la charge d'espace: (B est créé par un solénoïde ou des aimants permanents).

2.1. Principales étapes de l'étude d'un canon à électrons

a- Choix des paramètres d'entrée

✓ La conception de canon est définie par quatre paramètres qui définissent un canon de Pierce unique.

DONNEES	<i>Tension de la cathode</i>	<i>(V_c) (Volts)</i>	<i>170000</i>
	<i>Densité de courant maximum de la cathode</i>	<i>J_c (A/cm²)</i>	<i>10,00</i>
	<i>Courant du faisceau</i>	<i>I_f (Ampères)</i>	<i>100</i>
	<i>Rayon du faisceau</i>	<i>($r_w = r_{95}$ (mm))</i>	<i>1,80</i>

✓ A partir des données d'entrée, fournies par le projet du canon à électrons, il s'agit de déterminer les formes et dimensions convenables des électrodes.

2.2. Logiciel de simulation CST PS

- ✓ ***CST PARTICLE STUDIO***: outil spécialisé pour l'analyse rapide et précise de la dynamique des particules chargées dans les champs électromagnétiques 3D, utilisé pour la conception des canons à électrons.

- ✓ ***Contient six solveurs différents*** : électrostatique , magnétostatique, eigenmode , particle tracking, particle in cell solver (PIC) et le wakefield.

- ✓ Particle tracking peut être utilisé pour calculer les trajectoires de particules chargées dans les champs magnétostatique et électrostatiques.

- ✓ ***La tâche principale de solveur "particle tracking"***: calculer les trajectoires des particules, le champ électrostatique, la répartition de la charge d'espace et le courant de particules.

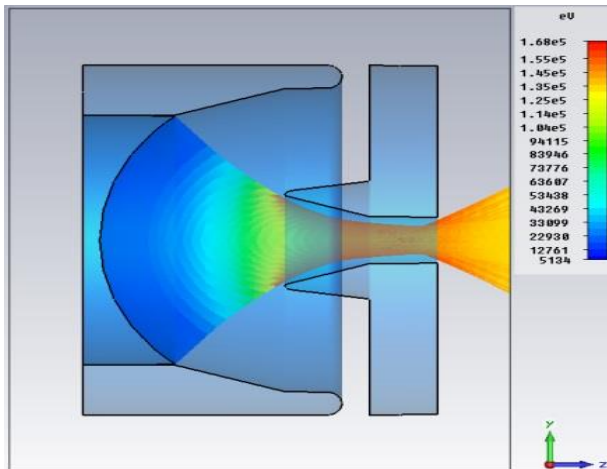
2.3. Etude de différents concepts pour la réalisation de design électrostatique

a) Design initial à partir d'un canon de Pierce

➤ Forme d'électrodes

Potentiel de la cathode et de wehnelt = -170 kV
L'anode est a la masse = 0 kV

➤ Forme et courant du faisceau



Théorie

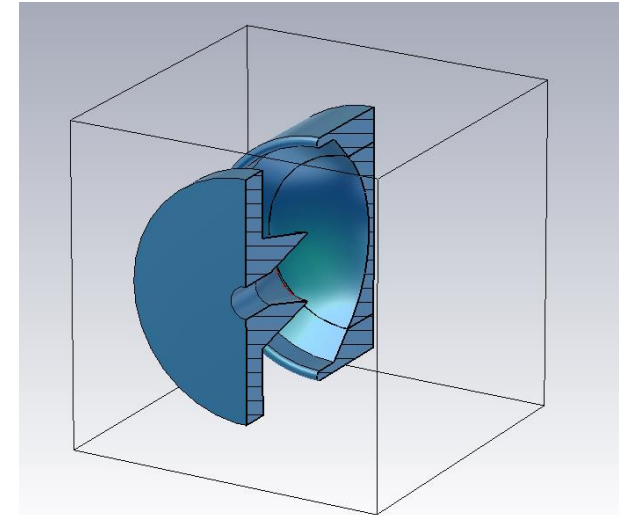
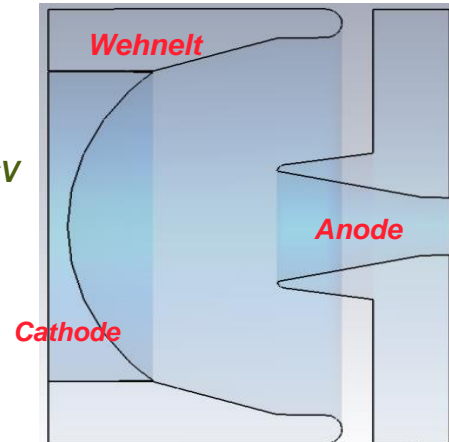
I = 100 A

$\mu\text{Pervers}=1,43$

Mesure CST

I = 77,11 A

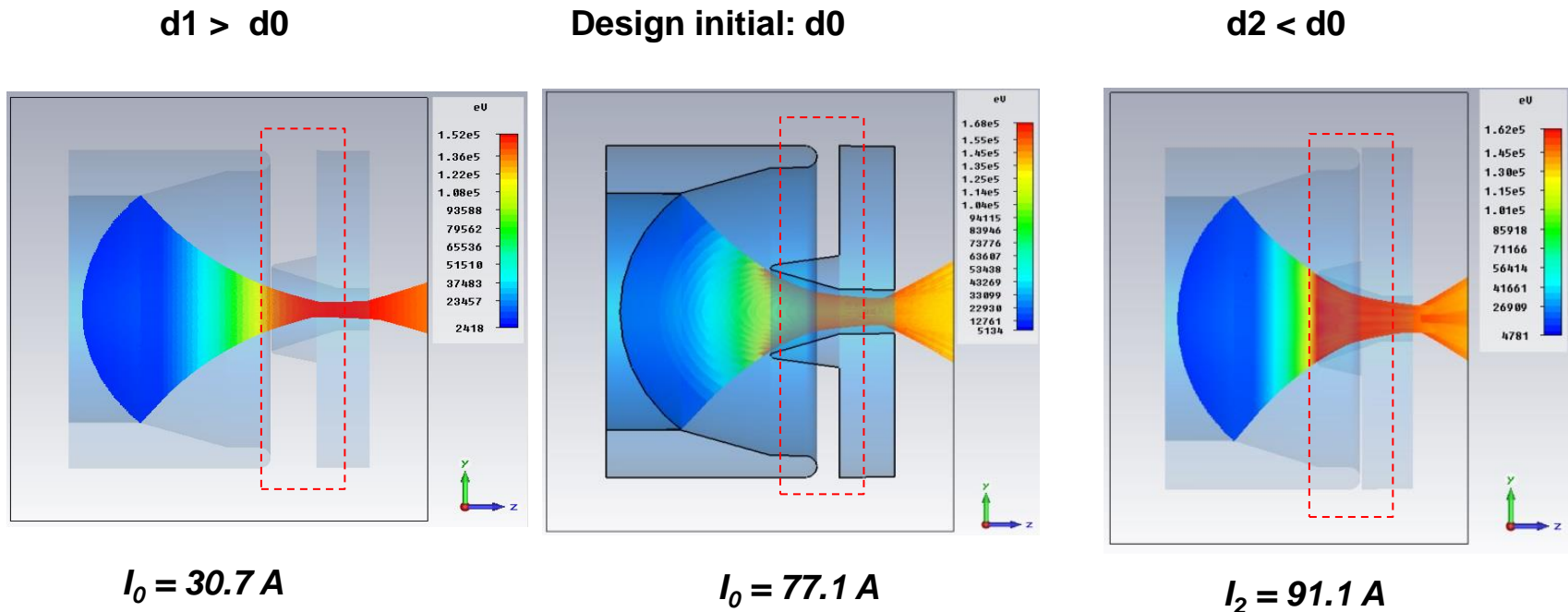
$\mu\text{Pervers}=1,26$



- ✓ Les dimensions millimétriques de canon ($f=12$ GHz) ainsi que le fort courant de faisceau (100 A) n'ont pas permis d'avoir les caractéristiques de sortie données par le canon de Pierce.
- ✓ Nous allons apporter des ajustements sur la configuration jusqu'à ce qu'un faisceau acceptable soit produit.

2.3. Etude de différents concepts pour la réalisation de design électrostatique

b) Modification du design initial



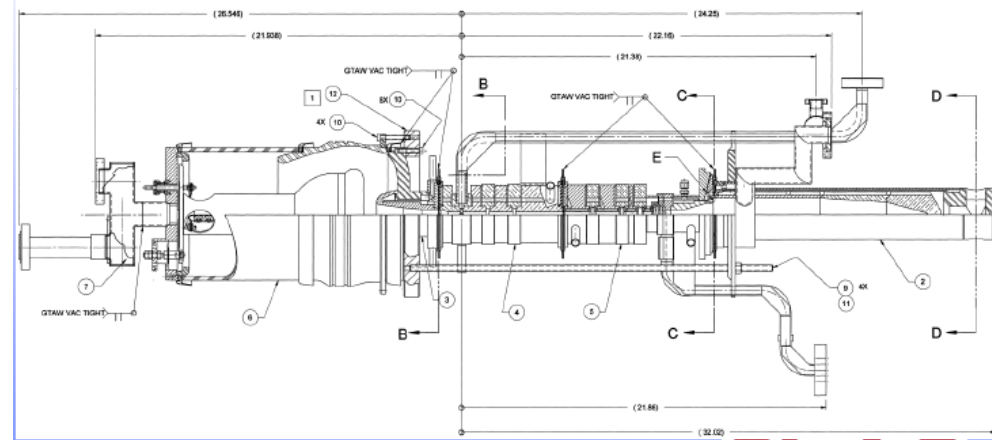
✓ Plus d diminue, plus la densité électronique est forte \rightarrow les forces de répulsion électrostatiques sont importantes et s'opposent à la focalisation du faisceau.

2.2. Etude de différents concepts pour la réalisation de design électrostatique

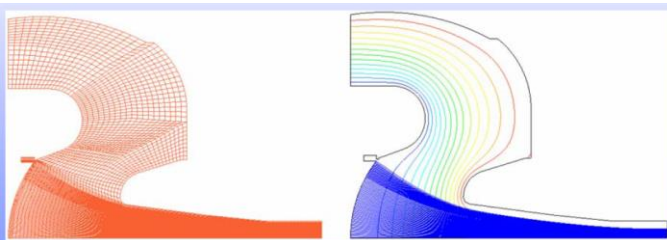
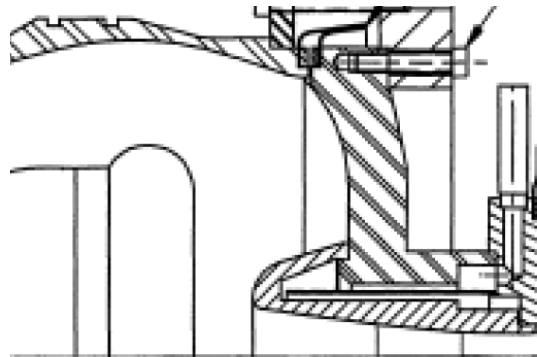
c) Design de canon pour le Klystron XL5 (SLAC)

Caractéristiques de XL5

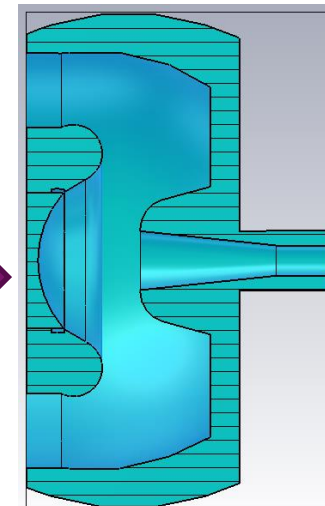
Fréquence (GHz)	12
Puissance moyenne (MW)	50
Tension de la cathode (kVolts)	410
Courant du faisceau (Ampères)	305
Rayon du faisceau (mm)	3.35
Densité de courant de la cathode (A/cm ²)	10,00



Ref: Andy Haase, Daryl Sprehn, SLAC 2009

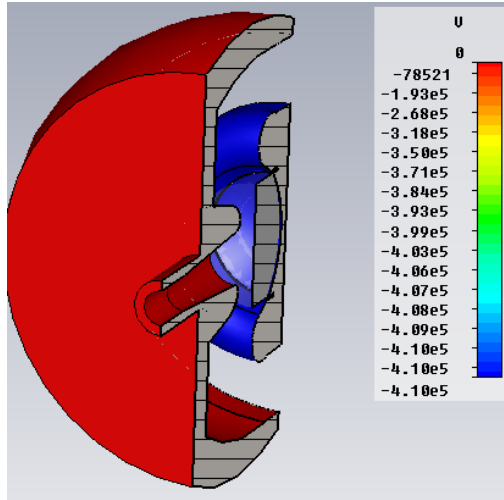


Design CST

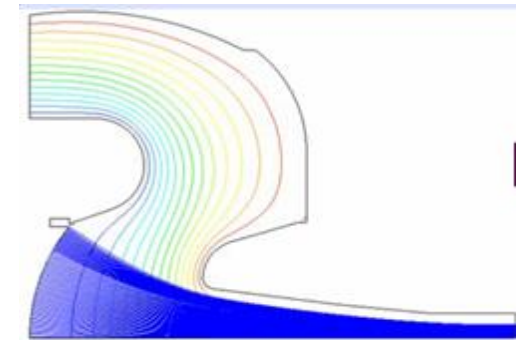
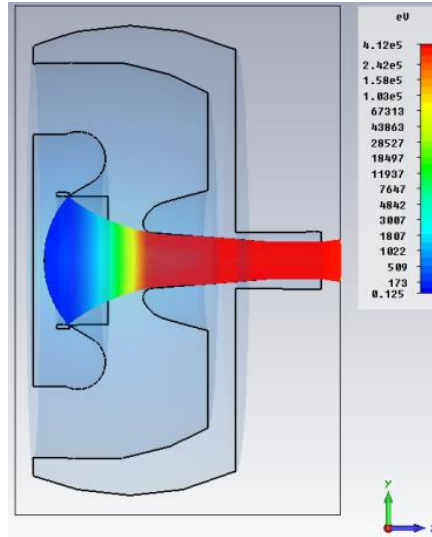


2.2. Etude de différents concepts pour la réalisation de design électrostatique

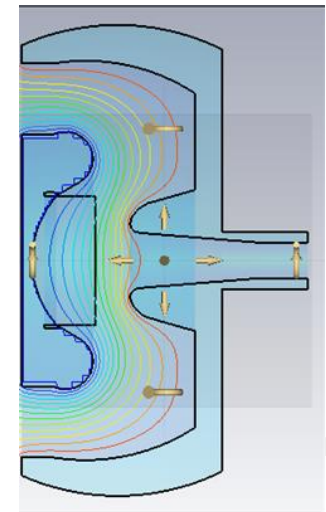
c) Design de canon pour le Klystron XL5 (SLAC)



Potentiel cathode/ wehnelt = -410 kV
Potentiel anode = 0 kV



Lignes équipotentielles de XL5 (code Michelle 2D)



Simulation CST	XL5
I= 315 A	I= 305 A
rw= 7.69 mm	w= 3.34 mm

- ✓ La trajectoire du faisceau n'est pas retrouvée.
- ✓ Le logiciel CST PS a permis de vérifier les performances de XL5 en terme de courant de faisceau et la distribution des lignes équipotentielles.

2.3. Etude de différents concepts pour la réalisation de design électrostatique

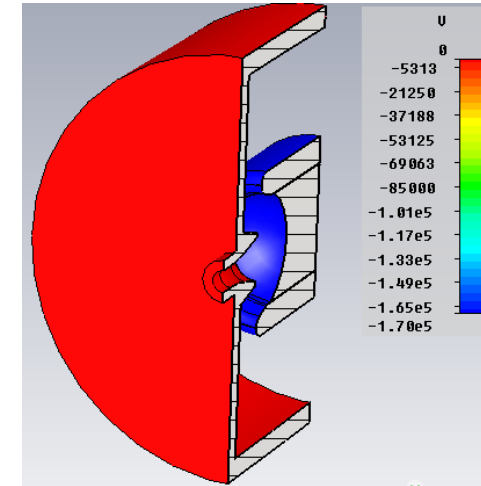
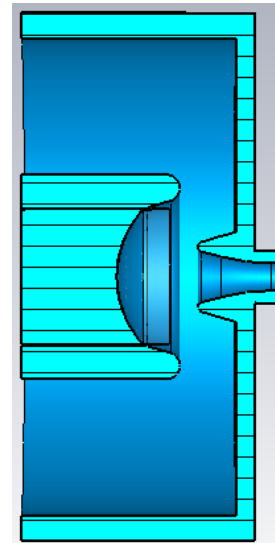
d) Design final de canon CEA

- ✓ Combinaison de design d'un canon de Pierce et le canon de XL5.

❖ Performances attendues de ce design

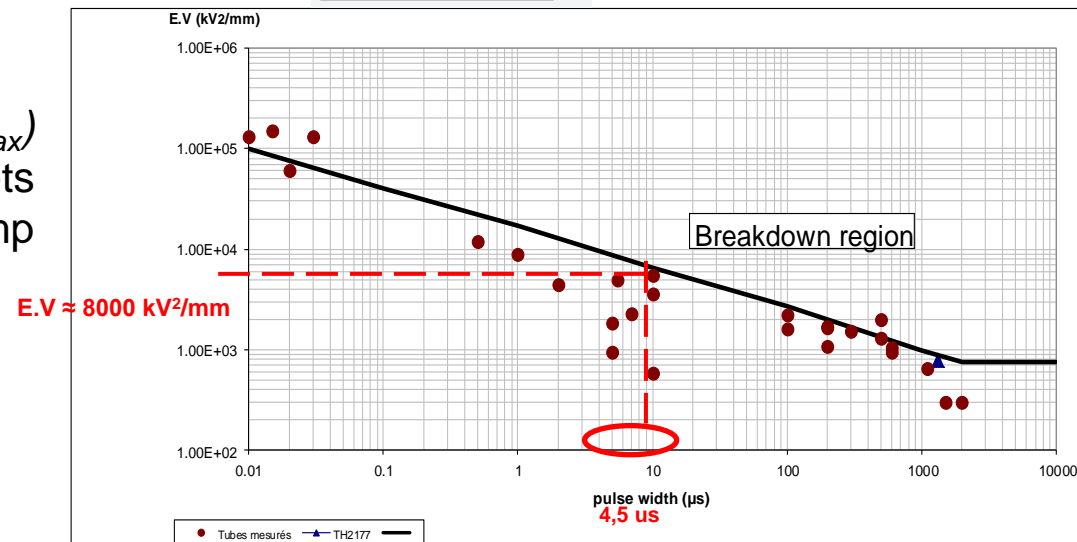
❖ Performances optimales

❖ Courant du faisceau	I_f (Ampères)	100
❖ Rayon du faisceau	$r_w = r_{95}$ (mm)	1,80



❖ Tension de claquage de canon

Prendre une marge de sécurité: (E_{max}) pour prendre en considération les effets de pointes renforçant le champ électrique.



Limite de claquage canon

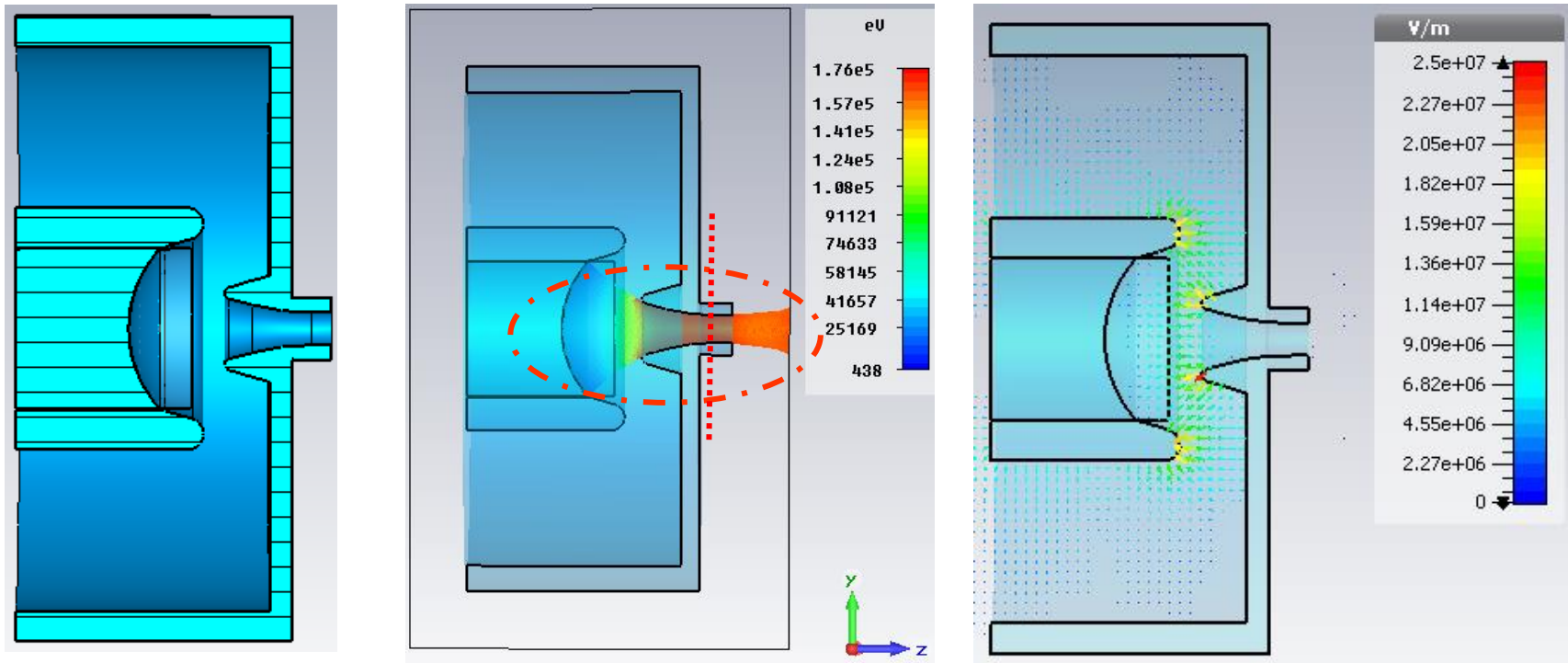
Pour des impulsions de durée 4.5 us :

$E.V \approx 8000 \text{ kV}^2/\text{mm}$
 $V \text{ cathode} = 170 \text{ kV}$
 $E_{max} < 47 \text{ kV/mm}$

2.3. Etude de différents concepts pour la réalisation de design électrostatique

d) Design final de canon CEA

- Résultats des simulations



$I_0 = 115 \text{ A}$

Rayon du faisceau très grand !!!!!

→ des ajustements sont nécessaires sur la configuration jusqu'à ce qu'un faisceau acceptable soit produit.

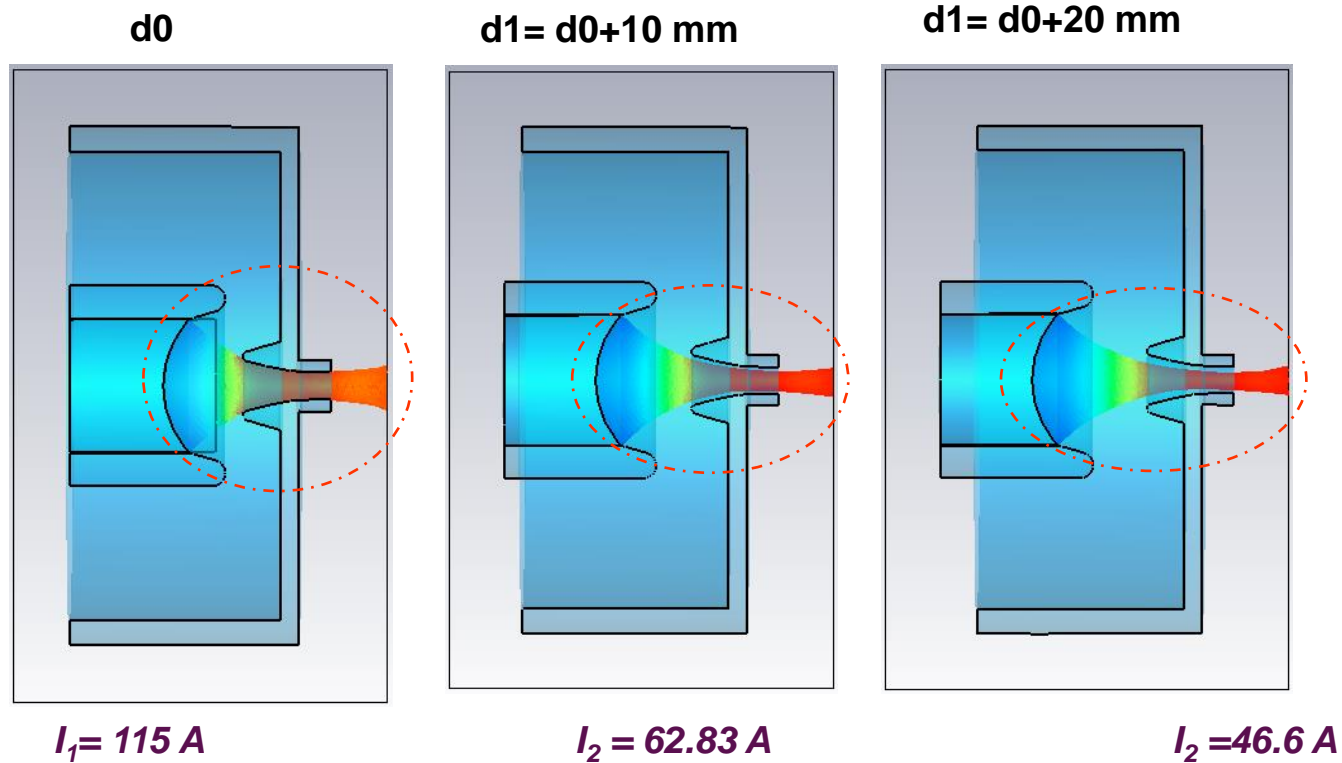
$E_{max} = 25 \text{ kV/mm} < 47 \text{ kV/mm}$

Bonne marge de sécurité pour le champ électrique

2.3. Etude de différents concepts pour la réalisation de design électrostatique

d) Design final de canon CEA

- Modification de la distance anode cathode



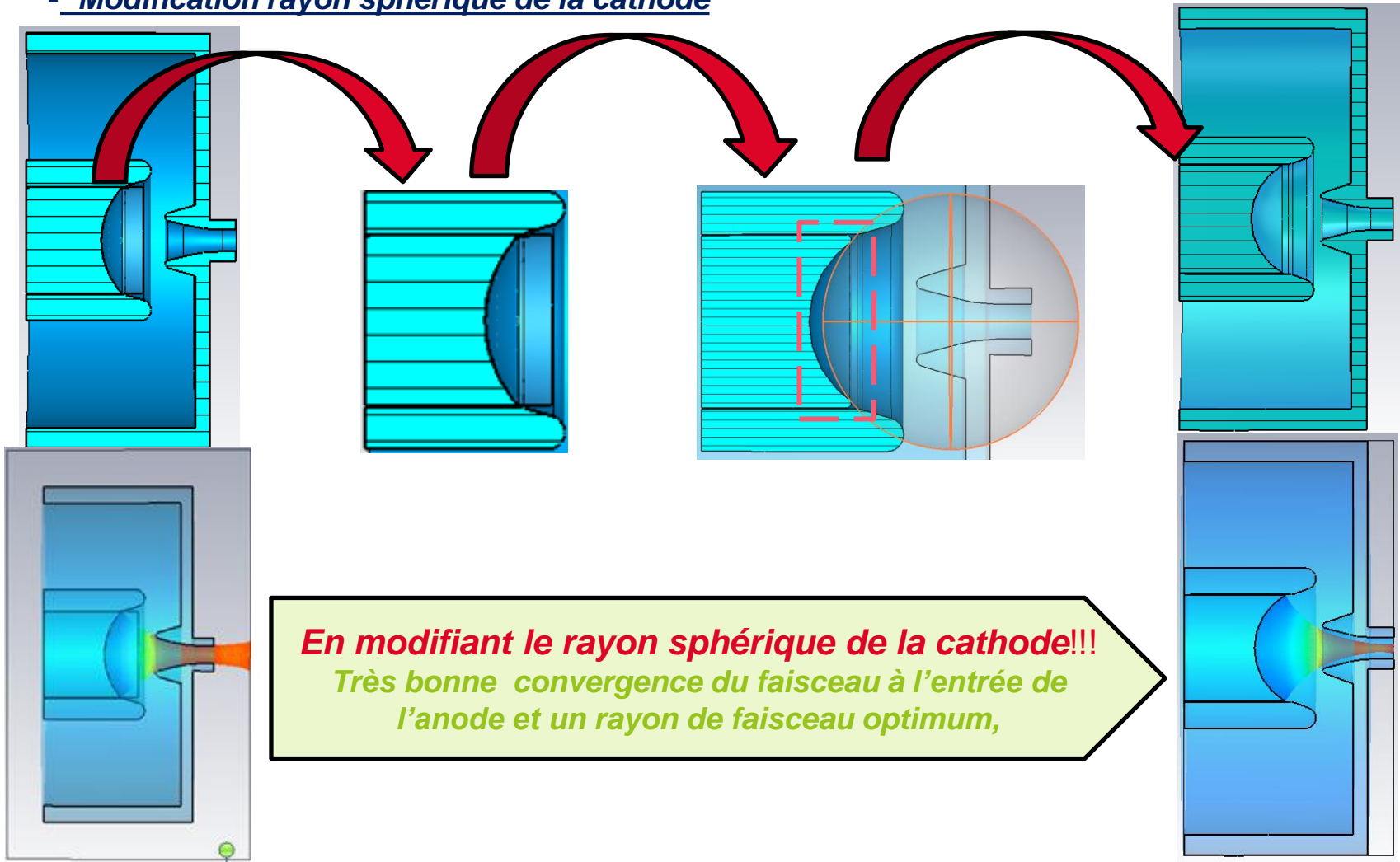
✓ . Bonne convergence du faisceau meilleur focalisation.

X . Diminution de courant du faisceau

2.3. Etude de différents concepts pour la réalisation de design électrostatique

d) *Design final de canon CEA*

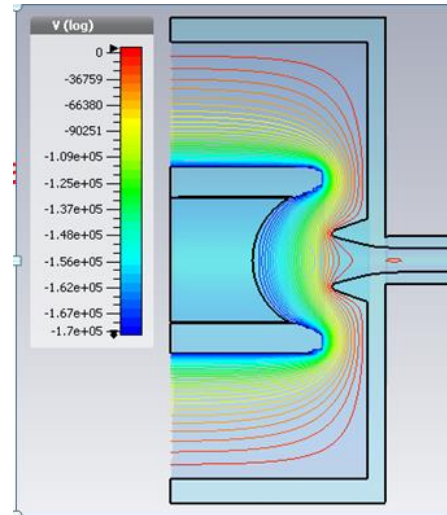
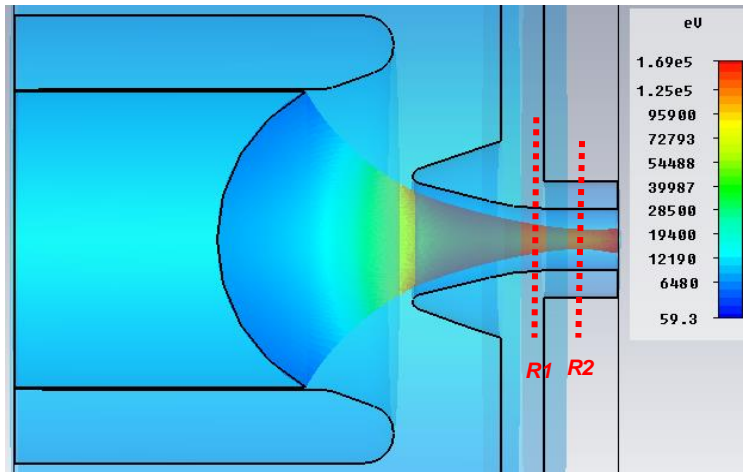
▪ Modification rayon sphérique de la cathode



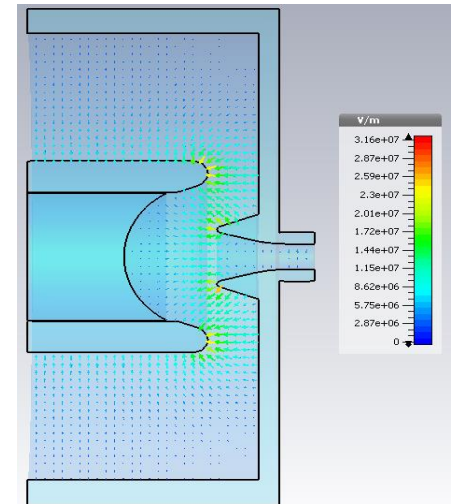
2.3. Etude de différents concepts pour la réalisation de design électrostatique

d) Design final de canon CEA

▪ Design électrostatique final



Distribution des lignes de potentiel

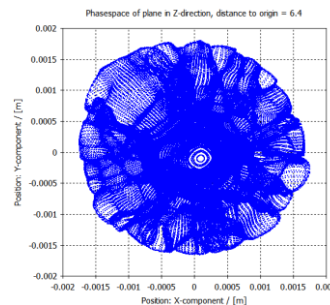


Bonne marge de sécurité pour le champ électrique

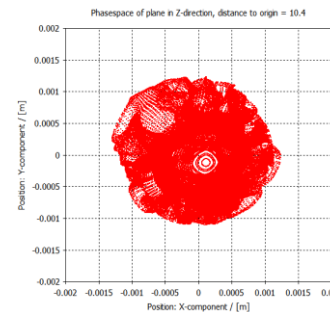
$$E_{max} = 31 \text{ kV/mm} < 47 \text{ kV/mm}$$

(CST PS): $\rightarrow I_{\text{faisceau}} = 100.6 \text{ A}$ $\mu P_1 = 1.435$
 Théorie: $\rightarrow I_{\text{faisceau}} = 100 \text{ A}$ $\mu P_1 = 1.43$

Rayon du faisceau à l'entrée du tunnel de l'anode



R1 = 1,7 mm

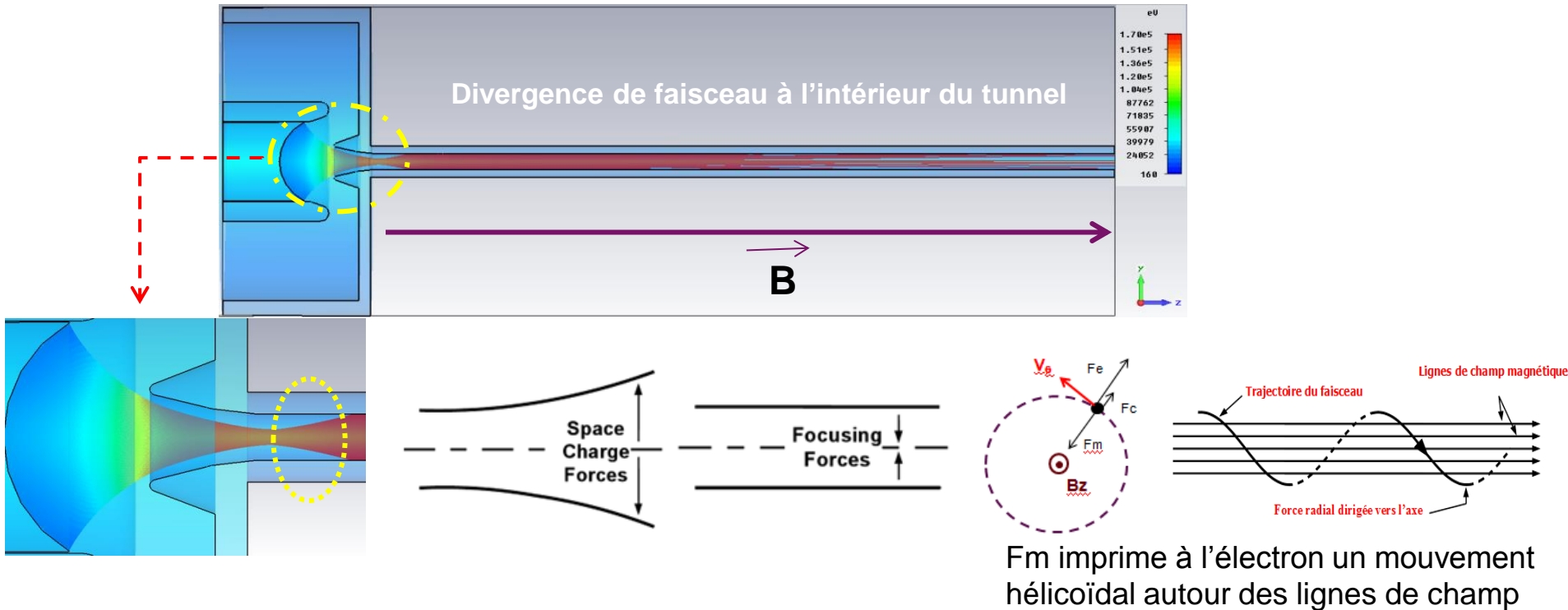


R2 = 1,3 mm

Continuer l'étude avec $r_w = 1,3 \text{ mm}$

3.1. Calcul de champ de Brillouin

❖ *Comment conserver la forme cylindrique du faisceau*



B est déterminé par la formule de Brillouin: Condition pour laquelle un faisceau reste parfaitement cylindrique

$$B_b = 8.3 \cdot 10^{-4} \frac{\sqrt{I_0}}{b V_0^{1/4}}$$

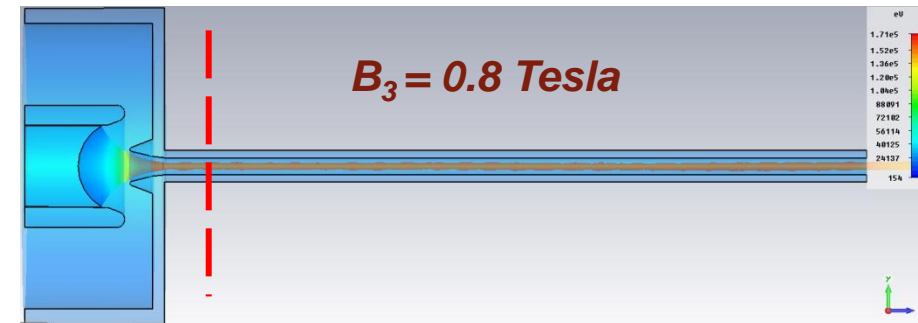
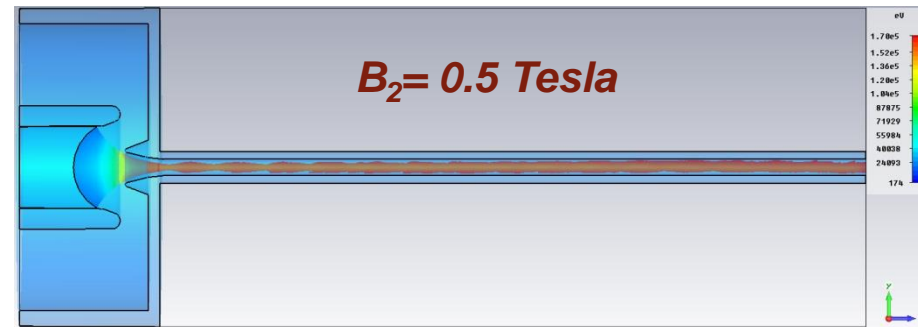
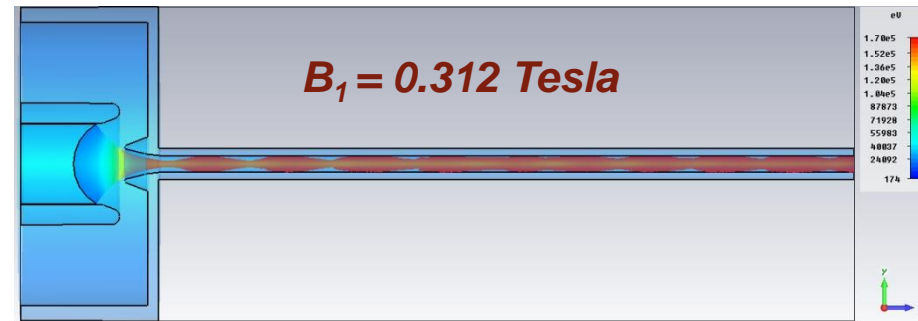
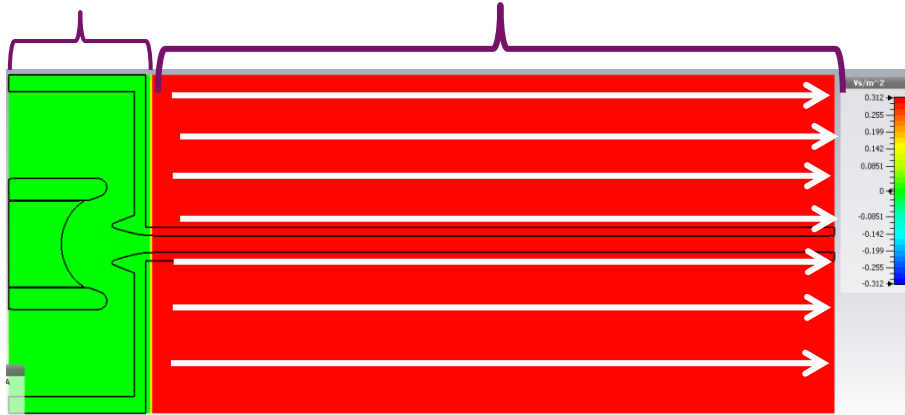
En Tesla, avec: I_0 en A, V_0 en kV et b en m

Potentiel de la cathode V_0	170 kV
Courant du faisceau I_0	100 A
Rayon à l'équilibre b	1,3 mm
Champ de Brillouin B_b	0,312 Tesla

3.2. Résultats de focalisation du faisceau avec un champ constant (CST)

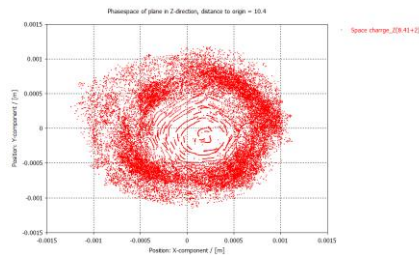
Champ cathode = 0

Champ de Brillouin



pour un champ magnétique $B_3 = 0,8 \text{ Tesla}$,
Le faisceau d'électrons est focalisé à l'intérieur du tunnel de l'anode

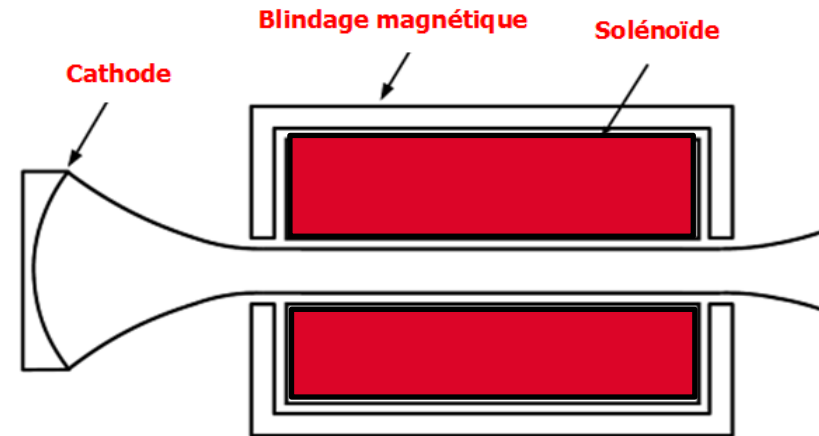
rayon du faisceau à l'intérieur du tunnel



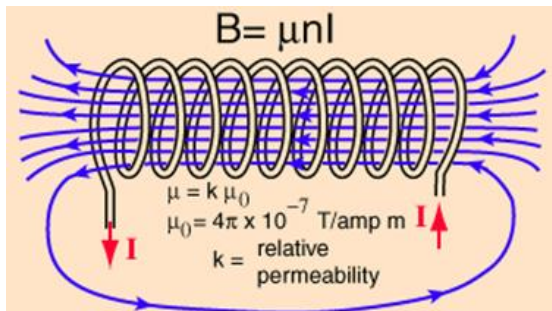
$R = 1,3 \text{ mm}$

3.3. Résultats de focalisation du faisceau avec un solénoïde

- ✓ Nous allons insérer un solénoïde afin de compenser le faisceau avec un champ longitudinal = **0,8 Tesla**
- ✓ On ajoute un blindage magnétique autour du solénoïde pour limiter et contrôler le champ de fuite au niveau de la cathode.



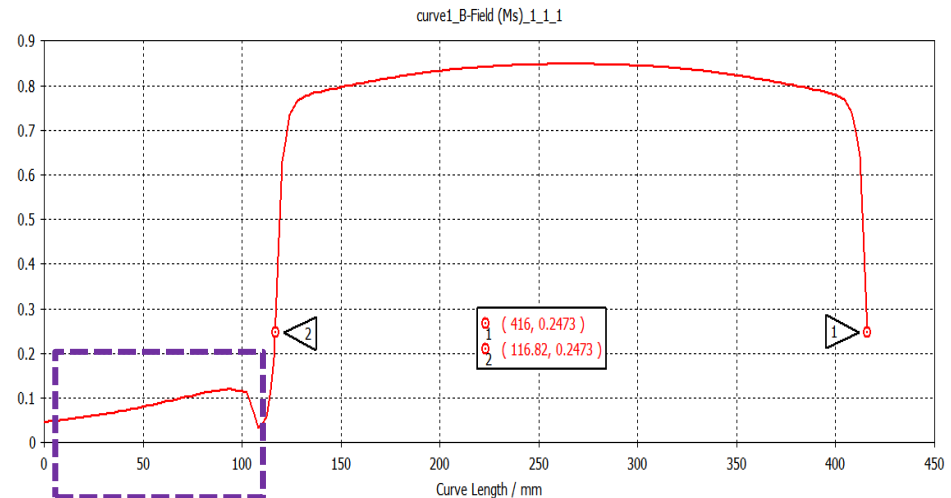
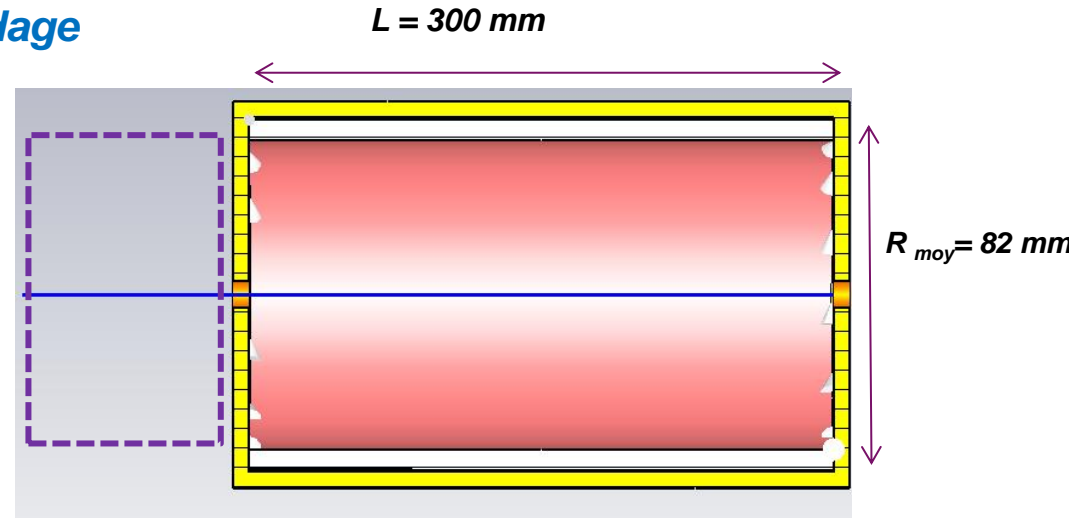
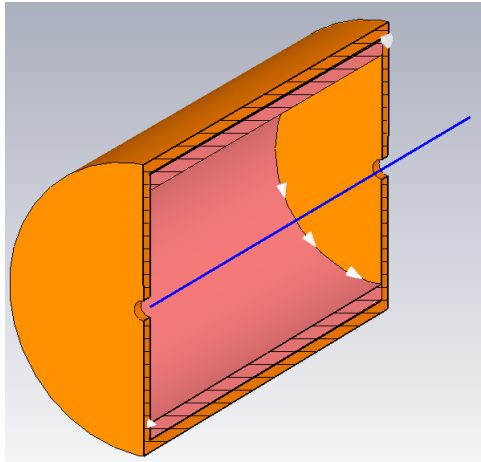
❖ Champ magnétique créé par un solénoïde



$B (T) = u_0 * n * I = 1,26 e^{-6} * (N / L) * I$	
u_0	Perméabilité
$I (A)$	Courant circulant dans la bobine
$N (spire)$	Nombre de spire
$L (m)$	Longueur de la bobine
$B (T)$	Champ magnétique longitudinal

3.3. Résultats de focalisation du faisceau avec bobine

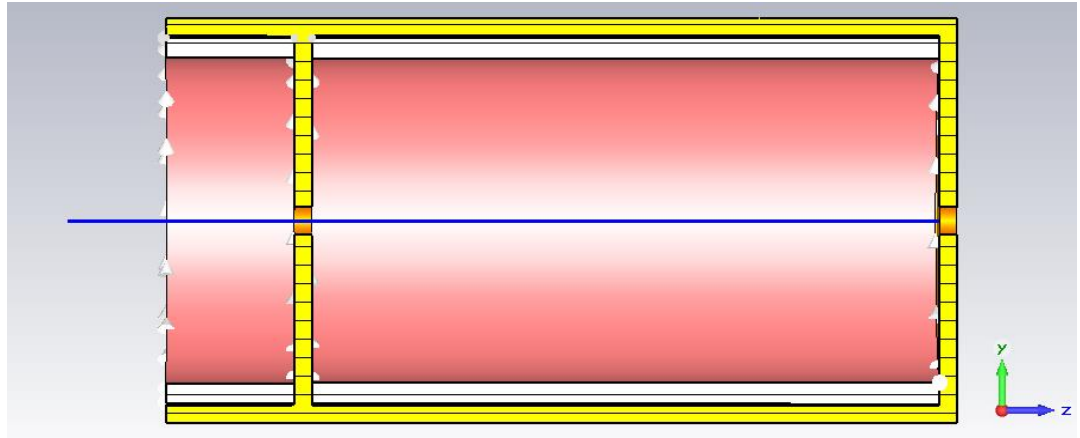
➤ Simulation de la bobine+ blindage



➤ Compenser ce champ magnétique apparu au niveau de la cathode par l'insertion d'une contre bobine.

3.3. Résultats de focalisation du faisceau avec bobine

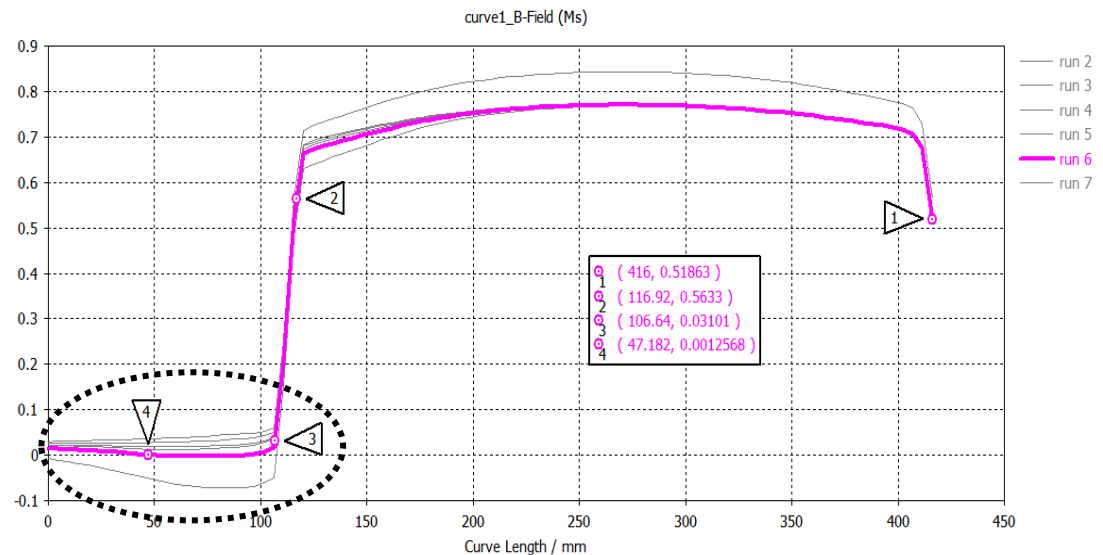
➤ Simulation de bobines1+bobine2+ blindage



Ajustement des courants dans les deux bobines pour avoir un profil de champ proche au champ constant donné par CST.

B à l'intérieur du solénoïde $\approx 0.7 \pm 0.1$ Tesla

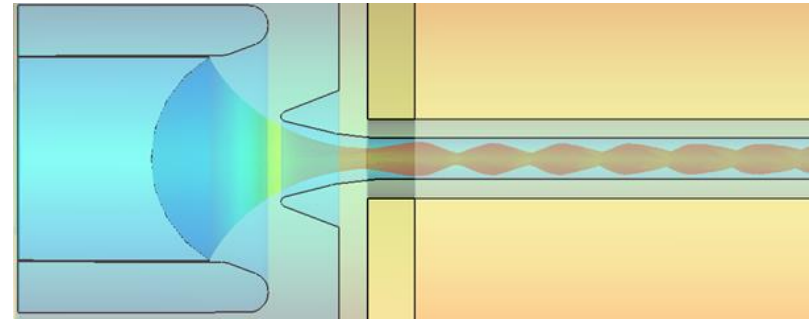
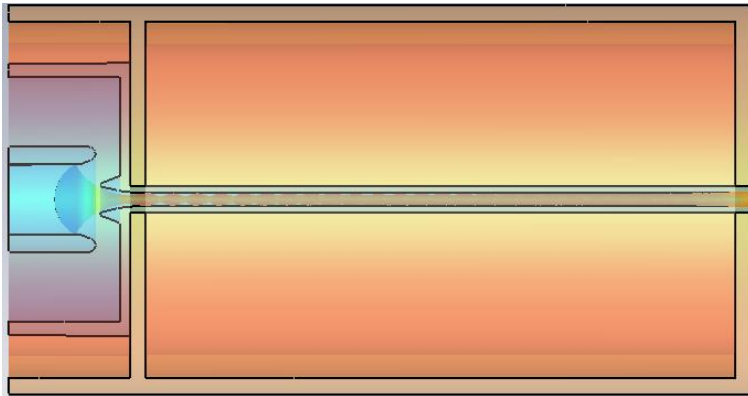
B au niveau de la cathode ≈ 0.0012 Tesla



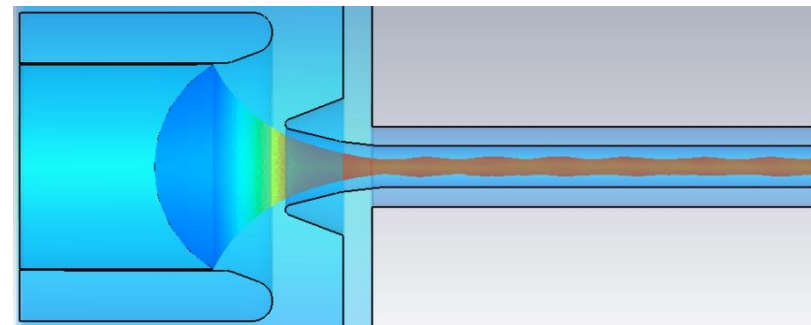
3.3. Résultats de focalisation du faisceau avec bobine

➤ *Simulation de design + bobines + blindage*

❑ *Trajectoire du faisceau obtenu avec le solénoïde*



❑ *Trajectoire du faisceau obtenu avec un champ constant (CST)*

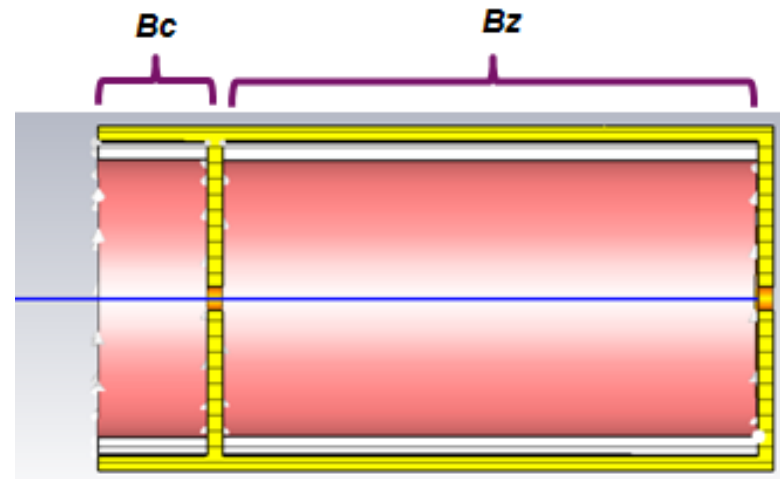


- ✓ Réalisation de design électrostatique de canon à partir des données d'entrée, fournies par le projet de canon à électrons.
- ✓ Poursuivre les simulations pour focaliser le faisceau : la valeur du champ magnétique de compensation au niveau de la cathode est donnée par les équations de Busch.

❖ Equations de Busch.

$$B_z^2 = B_B^2 + B_C^2 * (A_C^2 / A_e^2)$$

$$B_z = m * B_B$$



<i>m</i>	<i>B</i> _{Brillouin} (Tesla)	<i>B</i> _z = <i>m</i> * <i>B</i> _B	<i>B</i> _c (Tesla)
m1= 2,05	3,12E-01	0,6396	0,0025271
m2= 2,2	3,12E-01	0,6864	0,0027672
m3= 2,4	3,12E-01	0,7488	0,003081
m4= 2,6	3,12E-01	0,8112	0,0033892
m5= 2,8	3,12E-01	0,8736	0,0036933
m6= 2,95	3,12E-01	0,9204	0,0039192

FROM RESEARCH TO INDUSTRY



www.cea.fr

***MERCI POUR VOTRE
ATTENTION***

Lyes Boudjaoui

24 Septembre 2014

Formules utilisées pour le calcul des paramètres de sortie

$$R_c = \frac{r_c}{\sin \theta}$$

$$(-\alpha) = \sqrt{14.67 \frac{(1 - \cos \theta)}{P_\mu}}$$

$$\gamma = (-\alpha) - 0.275(-\alpha)^2 + 0.06(-\alpha)^3 - 0.006(-\alpha)^4$$

$$R_a = R_c e^{-\gamma}$$

$$r_b(z_a) = r_c e^{-\gamma}$$

$$r_a = 1.2 r_b(z_a)$$

$$z_a = R_c - \sqrt{R_a^2 - r_a^2}$$

$$R = \frac{r_b(z_a)}{r_{95}}$$

$$Z = 11(R - 1)^{0.5} - 0.275(-\alpha)^2 + 0.06(-\alpha)^3 - 0.006(-\alpha)^4$$

$$z_m = R_c - R_a + \frac{r_{95} Z}{\sqrt{P_\mu}}$$