

Compensation de la charge d'espace dans les lignes de basse énergie

Frédéric Gérardin
frédéric.gerardin@cea.fr

CEA/ DRF/ Irfu/DACM

INTRODUCTION

SIMULATIONS

RÉSULTATS

CONCLUSION & PERSPECTIVES

INTRODUCTION

SIMULATIONS

RÉSULTATS

CONCLUSION & PERSPECTIVES

Les faisceaux de haute puissance (\sim MW) sont caractérisés par :

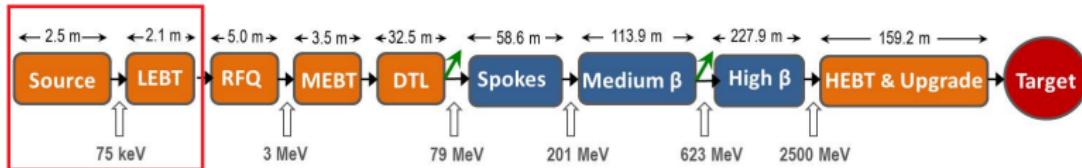
1. une intensité de quelques mA à plusieurs centaines de mA.
2. une énergie cinétique de la dizaine de MeV à plusieurs GeV.

Leur intérêt s'explique par leur utilisation dans différents secteurs comme :

- ▶ l'injection pour les grands collisionneurs (Linac4 : H^- @ 160 MeV & 40 mA)
- ▶ la production de noyaux radioactifs (SPIRAL2 : D^+ @ 40 MeV & 5 mA)
- ▶ la production de neutrons
 1. par réaction de spallation (European Spallation Source : H^+ @ 2. GeV & 62.5 mA)
 2. par un faisceau de protons (\sim 10 MeV) : source compacte de neutrons
 3. pour l'énergie (MYRRHA : H^+ @ 600 MeV & 4mA), IFMIF (D^+ @ 40MeV & 125 mA)

INTRODUCTION

La ligne de basse énergie (LBE)



Un exemple : l'accélérateur ESS

Les fonctions de la ligne de basse énergie sont de trois types :

- ▶ assurer le transport du faisceau de la source d'ions jusqu'à l'entrée du RFQ.
- ▶ optimiser la transmission du faisceau (minimisation des pertes).
- ▶ adapter le faisceau pour son injection dans le RFQ.

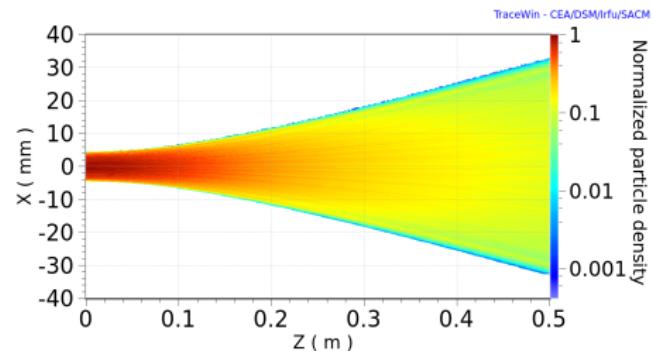
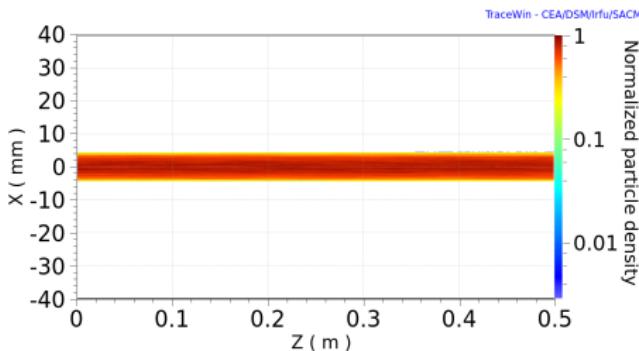
En prenant en compte deux contraintes :

1. le grossissement de l'émittance du faisceau
2. les pertes du faisceau

INTRODUCTION

La charge d'espace

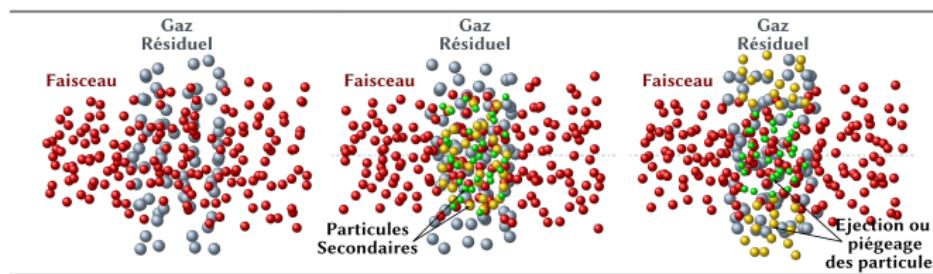
- ▶ On considère un faisceau intense d'ions de basse énergie.
- ▶ Sa dynamique est dominée par les champs de charge d'espace auto-induits par le faisceau lui-même.
- ▶ La force de charge d'espace résultante présente deux composantes :
 1. une composante électrostatique défocalisante
 2. une composante magnétique focalisante (négligeable à basse énergie)



INTRODUCTION

La compensation de charge d'espace (CCE)

A basse énergie, le faisceau ionise le gaz présent dans la ligne. Les particules issues de l'ionisation (ions & électrons) sont éjectées ou confinées par le champ de charge d'espace relativement à leur signe de charge.



Processus de compensation de charge d'espace

L'accumulation progressive des particules de charge opposée à celle des particules du faisceau contribue à la compensation de charge d'espace.

Afin de quantifier l'effet de réduction du potentiel de charge d'espace du fait de la compensation, il convient d'établir un critère : le taux de compensation défini par :

$$\eta = 1 - \frac{\Phi_C}{\Phi_0} \quad (1)$$

Φ_C le potentiel du faisceau compensé

Φ_0 le potentiel du faisceau équivalent en l'absence de compensation

Pour améliorer la compréhension de la CCE dans une LBE : introduction d'une carte spatiale avec $\eta(x,y,z)$

On le définit par le temps au bout duquel on obtient une compensation stationnaire.

On peut l'approcher par :

$$T_{CCE} = \frac{1}{\sigma_i(E) n_g v_f} \quad (2)$$

$\sigma_i(E)$ la section efficace totale d'ionisation du gaz à une énergie cinétique E de faisceau donnée

v_f la vitesse du faisceau

n_g la densité du gaz.

H^+ @ 100 keV sur H_2 à 10^{-5} mbar : $T_{CCE} = 49 \mu s$

Le transport d'un faisceau dans une LBE entraîne des collisions qui sont susceptibles d'influer sur la compensation. On retiendra celles dont les sections efficaces sont les plus importantes aux énergies de faisceaux dans les lignes de basse énergie.

On considère donc les réactions suivantes :

- ▶ ionisation du gaz résiduel par le faisceau
- ▶ émission d'électrons secondaires (impact du faisceau sur paroi métallique)
- ▶ ionisation du gaz résiduel par les électrons
- ▶ échange de charge entre les ions du faisceau et le gaz résiduel

INTRODUCTION

SIMULATIONS

RÉSULTATS

CONCLUSION & PERSPECTIVES

Warp est un code PIC développé aux États-Unis, adapté pour des simulations de dynamique faisceau en régime de compensation de charge d'espace.

Algorithme de calcul en 5 étapes :

1. Dépôt des charges et de courant aux noeuds de la grille
2. Résolution de l'équation de Poisson
3. Interpolation des champs (E,B) sur les positions des particules
4. Déplacement des particules via l'intégration des équations du mouvement
5. Génération des collisions

Temps de calcul d'une LBE typique sur cluster avec 64 coeurs : 7 jours.

Entrée

- ▶ Distribution du faisceau.
- ▶ Type de gaz et sa pression.
- ▶ Réactions : ionisation, échange de charge...
- ▶ Géométrie de la ligne et maillage de l'espace.
- ▶ Cartes des champs extérieurs.
- ▶ Les conditions aux bords.

Sortie

- ▶ Les coordonnées 6D (x, y, z, v_x, v_y, v_z) de toutes les espèces présentes.
- ▶ La carte de potentiel de charge d'espace.

INTRODUCTION

SIMULATIONS

RÉSULTATS

CONCLUSION & PERSPECTIVES

On simule la ligne de basse énergie du projet IFMIF.

Les paramètres d'entrée de la simulation sont :

- ▶ Un faisceau de deutons de 135 mA ($E = 100$ keV)
- ▶ Utilisation du code AXCEL pour déterminer la distribution en sortie de source d'ions

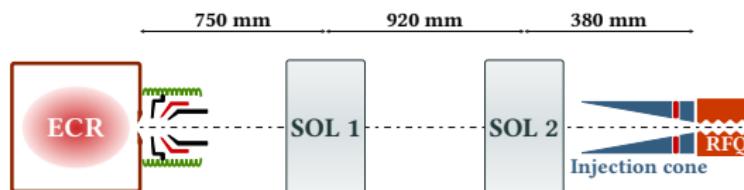


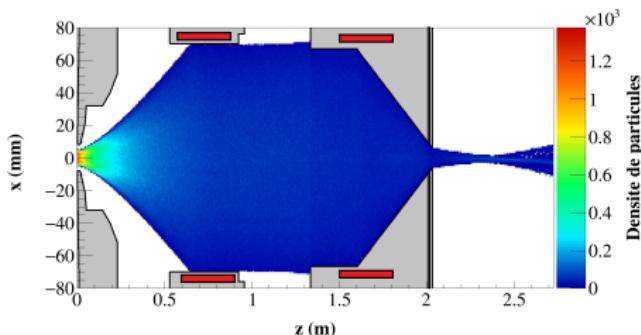
Schéma de la LBE de IFMIF

On va étudier le transport du faisceau dans la LBE :

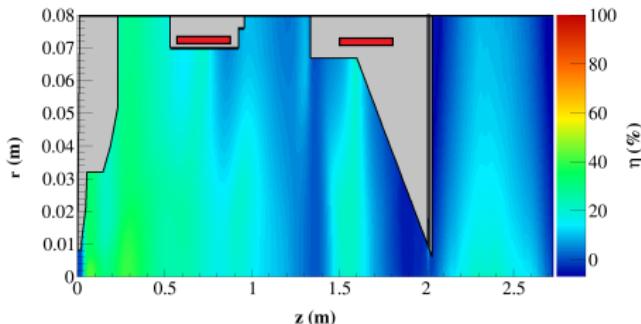
- ▶ **Cas A** : en considérant uniquement l'ionisation du gaz par le faisceau
- ▶ **Cas B** : en considérant les 4 réactions décrites

TRANSPORT D'UN FAISCEAU

Cas A

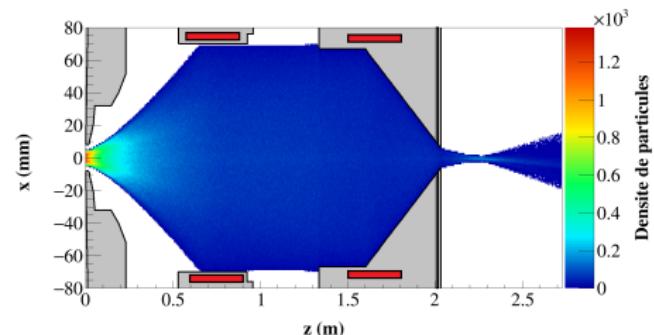


Densité du faisceau à $t = 2 \mu\text{s}$

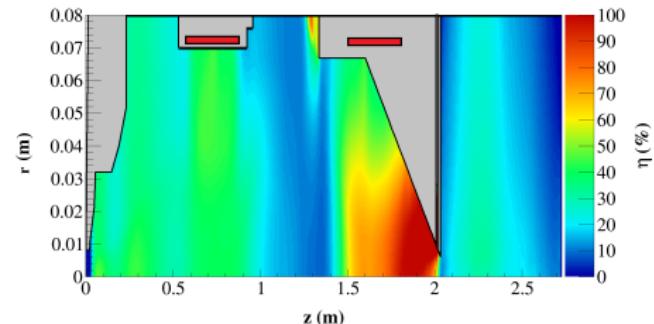


Carte de compensation à $t = 2 \mu\text{s}$

Cas B



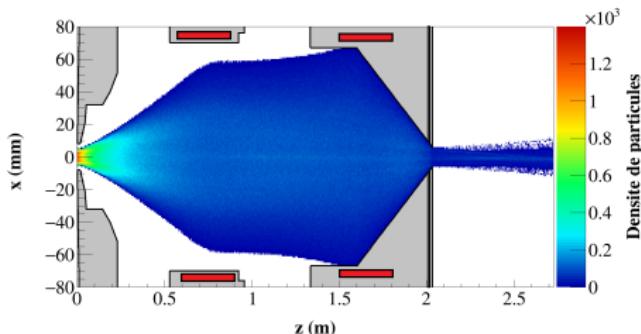
Densité du faisceau à $t = 2 \mu\text{s}$



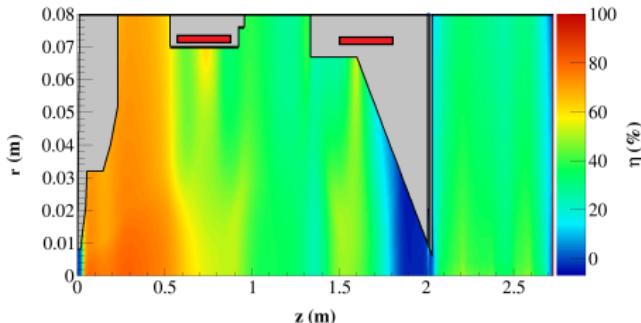
Carte de compensation à $t = 2 \mu\text{s}$

TRANSPORT D'UN FAISCEAU

Cas A

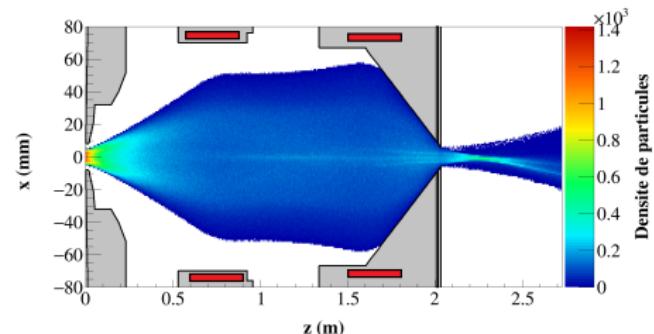


Densité du faisceau à $t = 5 \mu s$

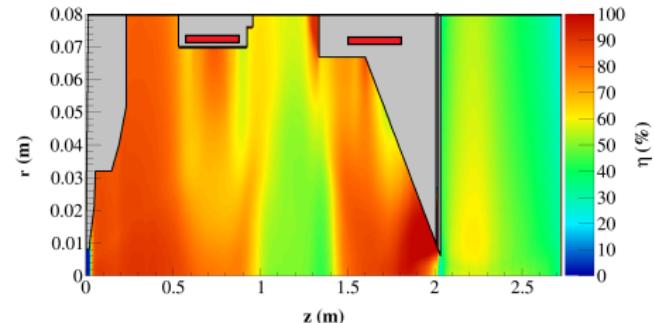


Carte de compensation à $t = 5 \mu s$

Cas B



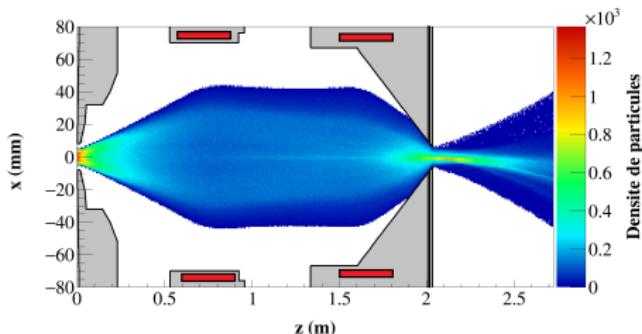
Densité du faisceau à $t = 5 \mu s$



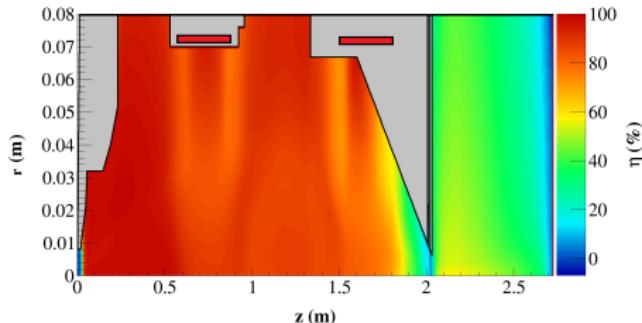
Carte de compensation à $t = 5 \mu s$

TRANSPORT D'UN FAISCEAU

Cas A

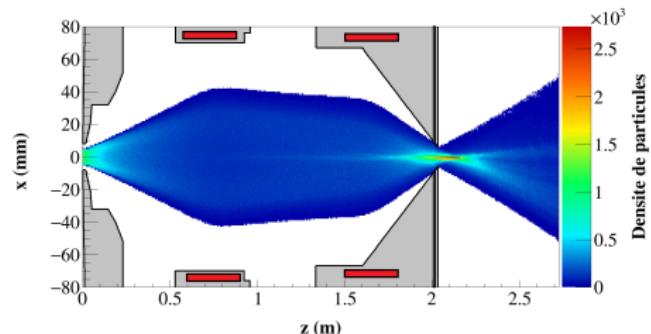


Densité du faisceau à $t = 10 \mu\text{s}$

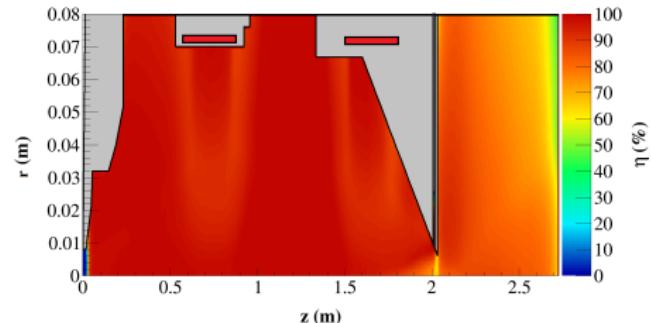


Carte de compensation à $t = 10 \mu\text{s}$

Cas B



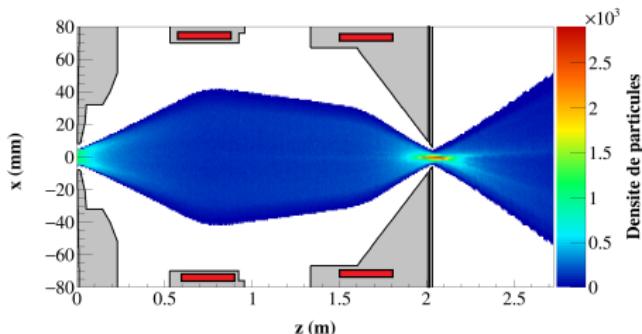
Densité du faisceau à $t = 10 \mu\text{s}$



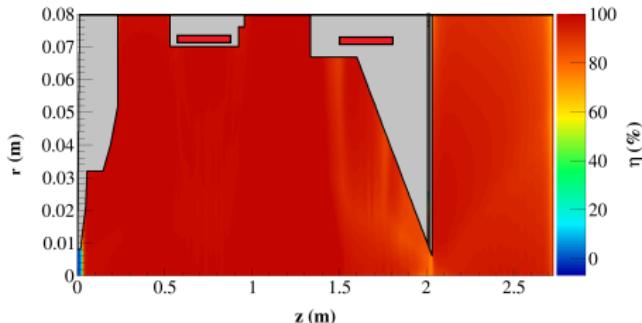
Carte de compensation à $t = 10 \mu\text{s}$

TRANSPORT D'UN FAISCEAU

Cas A

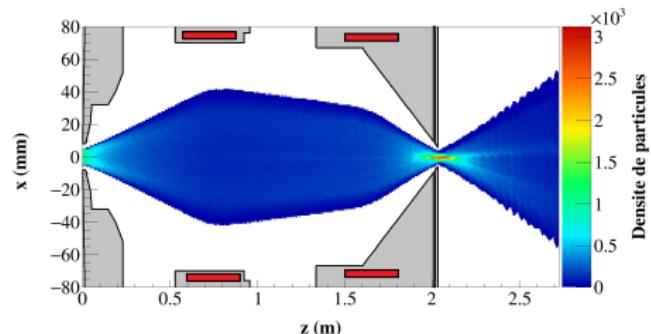


Densité du faisceau à $t = 30 \mu\text{s}$

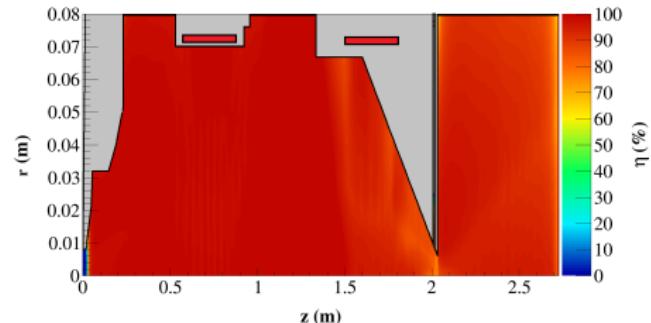


Carte de compensation à $t = 30 \mu\text{s}$

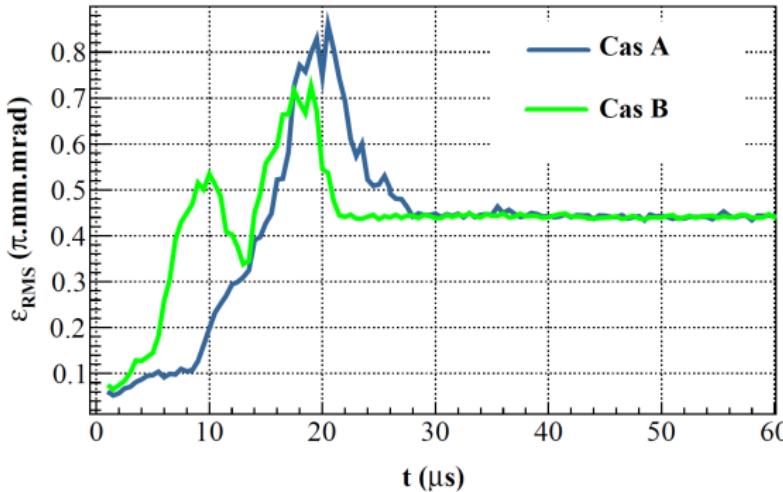
Cas B



Densité du faisceau à $t = 30 \mu\text{s}$



Carte de compensation à $t = 30 \mu\text{s}$



Evolution temporelle de l'émittance mesurée à $z = 2,4$ m pour les cas A et B

- ▶ Pas d'impact sur la carte de compensation à l'équilibre.
- ▶ Réduction du temps de compensation.

On simule un émittancemètre à $z_E = 2,4$ m par une plaque de tungstène.

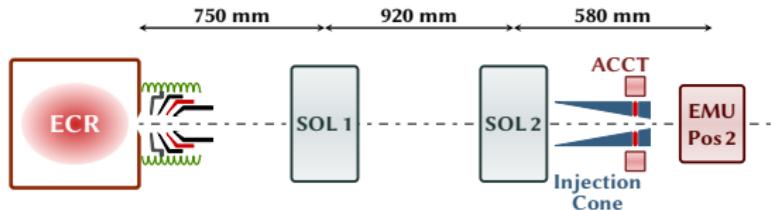


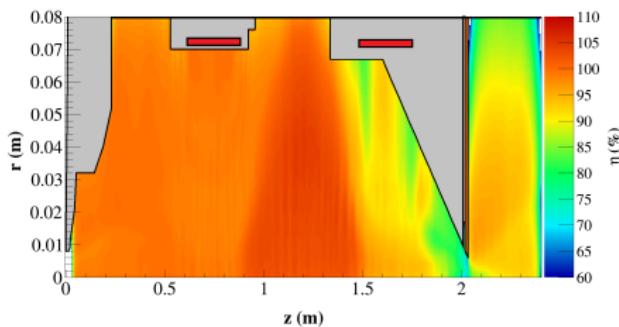
Schéma de la LBE de IFMIF avec émittancemètre

On mesure la distribution du faisceau dans l'espace des phases à la position de l'émittancemètre dans deux cas :

- ▶ **Cas 1** : la plaque n'émet pas d'électrons secondaires.
- ▶ **Cas 2** : la plaque est émettrice d'électrons secondaires.

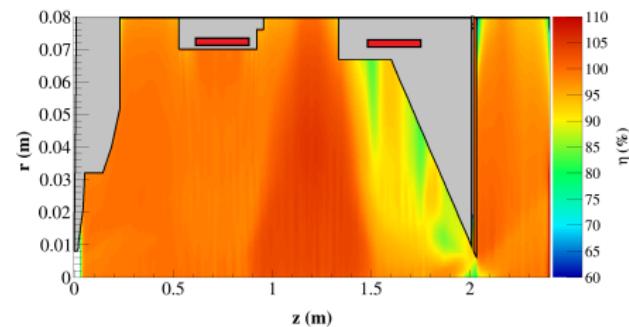
RESULTATS

Cas 1



Carte de compensation sans émittancemètre

Cas 2



Carte de compensation avec émittancemètre

L'émittance modifie le taux de compensation :

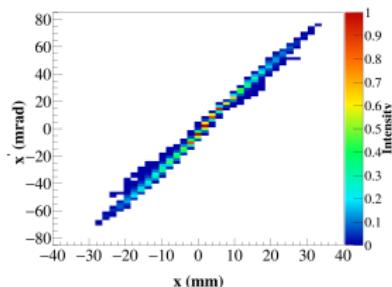
- ▶ Cas 1 : $\eta \sim 90\%$ au voisinage de z_E
- ▶ Cas 2 : $\eta > 1\%$ au voisinage de z_E

RESULTATS

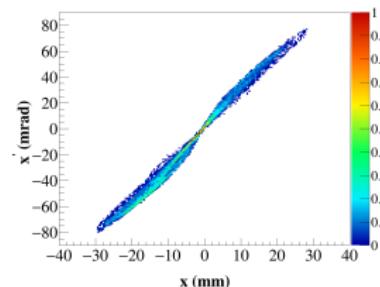
Expérience

Cas 1

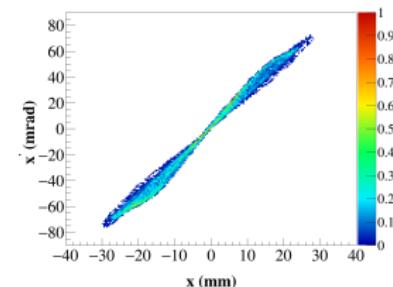
Cas 2



Emittance normalisée



Emittance normalisée



Emittance normalisée

$$\varepsilon_{RMS} = 0,26 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$$
$$\alpha = -11,9$$
$$\beta = 4,7 \text{mm}/(\pi \cdot \text{mrad})$$

$$\varepsilon_{RMS} = 0,44 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$$
$$\alpha = -9,9$$
$$\beta = 3,2 \text{mm}/(\pi \cdot \text{mrad})$$

$$\varepsilon_{RMS} = 0,35 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$$
$$\alpha = -10,1$$
$$\beta = 4,1 \text{mm}/(\pi \cdot \text{mrad})$$

INTRODUCTION

SIMULATIONS

RÉSULTATS

CONCLUSION & PERSPECTIVES

- ▶ Simulation d'un transport de faisceau dans une ligne
- ▶ Ajout de phénomènes physiques pour une meilleure compréhension
- ▶ Meilleure compatibilité avec les diagnostics interceptifs
- ▶ Les mêmes simulations ont été faites avec la LBE de l'accélérateur MYRRHA

- ▶ Simulation du régime transitoire en présence d'un hacheur
- ▶ Amélioration du système d'extraction de la source
- ▶ Avoir des résultats expérimentaux à différentes positions dans la LBE
- ▶ Prise en compte des collisions coulombiennes

Merci de votre attention !