

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea

# JOURNÉES DES DOCTORANTS - 7-8 JUILLET 2016

[www.cea.fr](http://www.cea.fr)

**Nom :** Frédéric GÉRARDIN

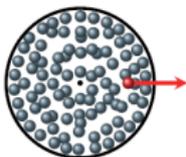
**Parcours :** MASTER 2 Recherche NPAC, spécialité physique nucléaire

**Contact pour la thèse :** Thèse proposée par Nicolas Chauvin qui recherchait un doctorant

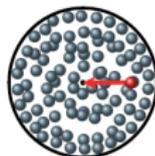
**Motivations :** M'initier au monde de la recherche, exploiter et approfondir mes connaissances dans le domaine des accélérateurs, acquérir des compétences dans les domaines de simulations et expérimental.

Titre de la thèse : **Etude de la compensation de la charge d'espace dans les lignes de basse énergie des accélérateurs d'ions légers de haute intensité**

Mots-clefs : **Accélérateurs de particules, charge d'espace, dynamique faisceau, simulations numériques**



Force électrique repoussant les particules



Direction  
du faisceau

$$I = \sum_i q_i v$$

Force magnétique de direction opposée

**INTRODUCTION**

**SIMULATIONS**

**ACTIVITÉS EXPÉRIMENTALES**

**RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES**

**CONCLUSION & PERSPECTIVES**

**INTRODUCTION**

SIMULATIONS

ACTIVITÉS EXPÉRIMENTALES

RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES

CONCLUSION & PERSPECTIVES

Les faisceaux de haute puissance sont caractérisés par :

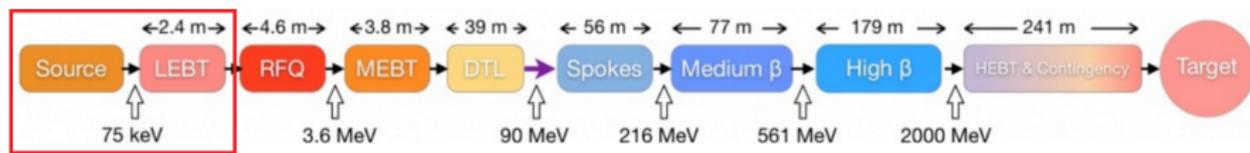
1. Une intensité de quelques mA à plusieurs centaines de mA.
2. Une énergie cinétique de la dizaine de MeV au GeV.

Leur intérêt s'explique par leur utilisation dans les domaines suivants :

- ▶ injection pour grands collisionneurs (Linac4 :  $H^-$  @ 160 MeV & 40 mA)
- ▶ production de noyaux radioactifs (SPIRAL2 :  $D^+$  @ 40 MeV & 5 mA)
- ▶ production de neutrons
  1. par spallation (European Spallation Source :  $H^+$  @ 2.0 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 basse énergie



### Schéma de l'accélérateur ESS

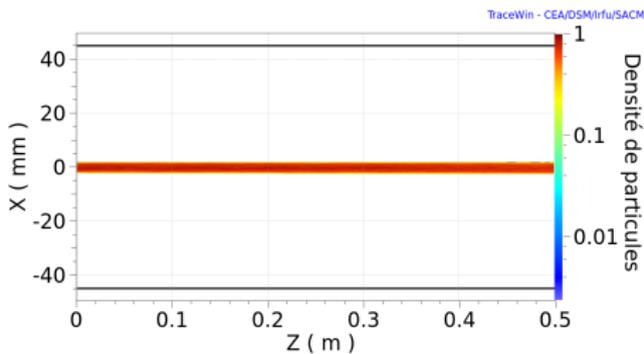
Les fonctions de la ligne basse énergie sont de :

- ▶ Transporter le faisceau depuis la source jusqu'au RFQ
- ▶ Adapter le faisceau pour son injection dans le RFQ
- ▶ Optimiser la transmission du faisceau dans le RFQ

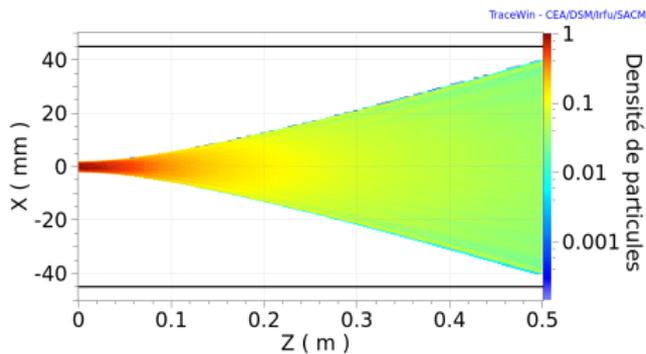
Problématiques :

1. Limiter les grossissements d'émittance
2. Limiter les pertes de faisceau

- ▶ On étudie un faisceau à basse énergie et fort courant.
- ▶ La dynamique est dominée par le champ de charge d'espace : champ induit par le faisceau lui-même.
- ▶ La force de charge d'espace en symétrie cylindrique est donnée par :  $F_r = q(1 - \beta^2)E_r$ .

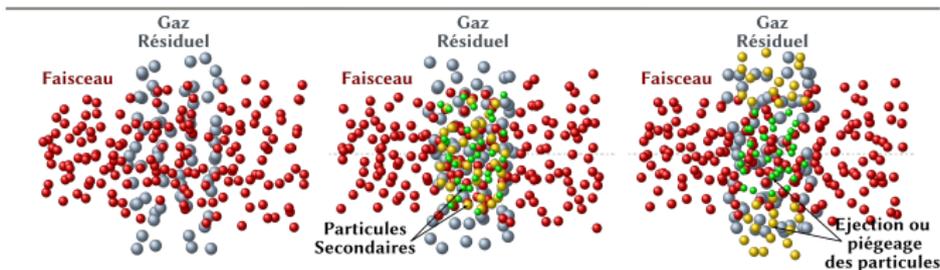


Distribution d'un faisceau de protons sans charge d'espace  
( $I = 0$ )



Distribution d'un faisceau de protons avec charge d'espace  
( $I = 100$  mA)

A basse énergie, le faisceau ionise le gaz présent.  
Les particules secondaires (ions & électrons) issues de l'ionisation sont repoussées ou confinées par le champ de charge d'espace.



Processus de compensation de charge d'espace

L'accumulation progressive des charges de signe opposé à celui du faisceau contribue à la compensation de charge d'espace.

La compensation de charge d'espace :

- ▶ dépend de la distribution du faisceau de particules
- ▶ dépend du temps
- ▶ n'est que partielle

Le temps caractéristique de compensation est défini par :

$$T_{SCC} = \frac{1}{\sigma n v_f}$$

$\sigma$  : section efficace totale d'ionisation du gaz à une énergie cinétique de faisceau donnée

$n$  : densité du gaz

$v_f$  : vitesse du faisceau

$T_{SCC} = 49 \mu\text{s}$  pour un faisceau de  $\text{H}^+$  à 100 keV ionisant du  $\text{H}_2$  @  $10^{-5}$  hPa

INTRODUCTION

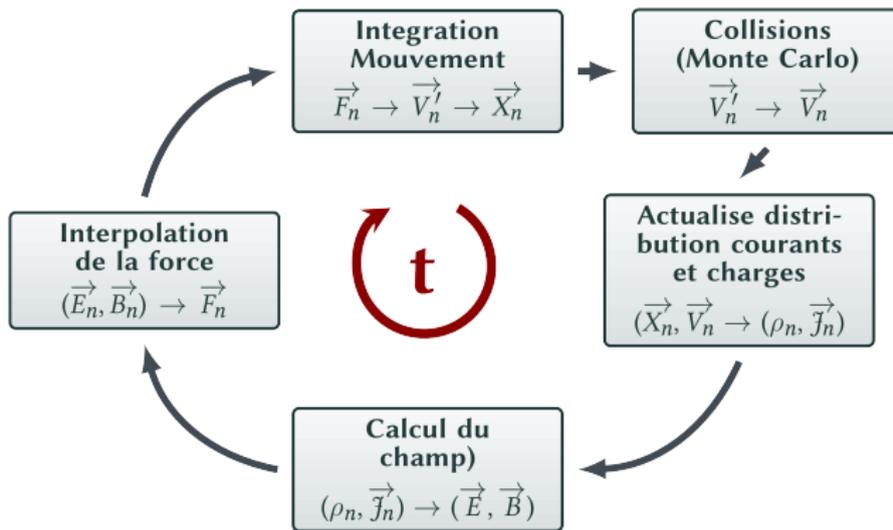
**SIMULATIONS**

ACTIVITÉS EXPÉRIMENTALES

RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES

CONCLUSION & PERSPECTIVES

- ▶ Code PIC développé aux Etats-Unis
- ▶ Il est conçu pour simuler la dynamique des faisceaux en régime de compensation de charge d'espace.



Algorithme du code PIC

### ENTRÉE

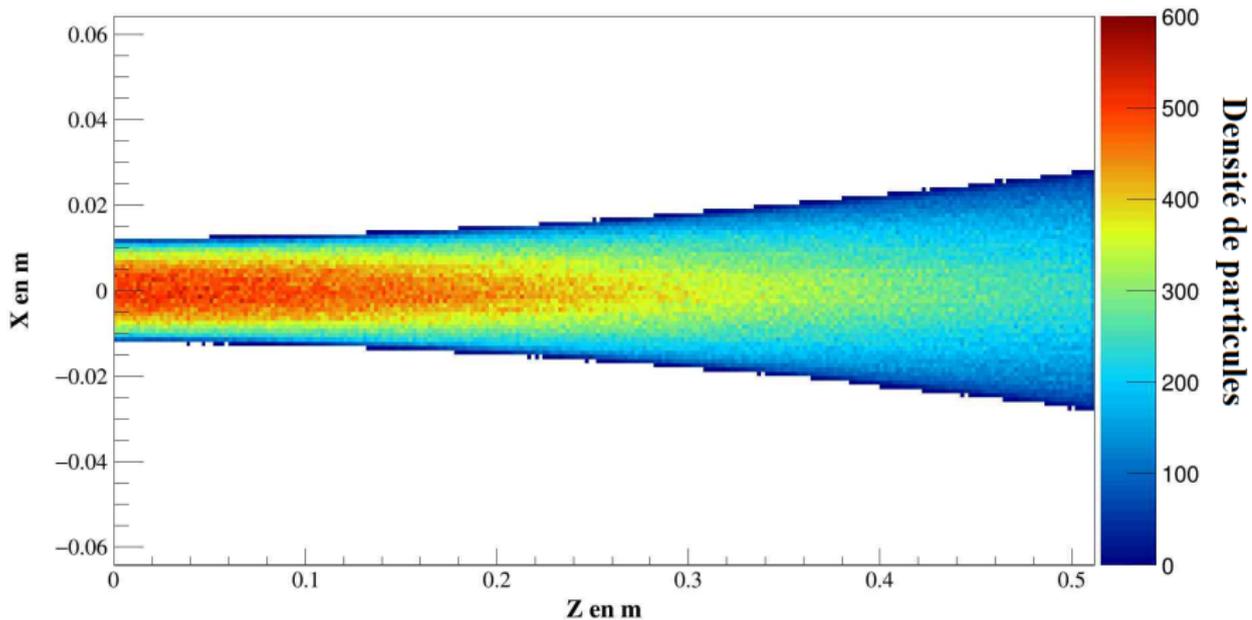
- ▶ Distribution du faisceau
- ▶ Nature et pression du gaz
- ▶ Réactions : collisions, ionisation, émission d'électrons secondaires...
- ▶ Géométrie de la chambre et maillage de l'espace
- ▶ Cartes des champs extérieurs
- ▶ Conditions aux bords

### SORTIE

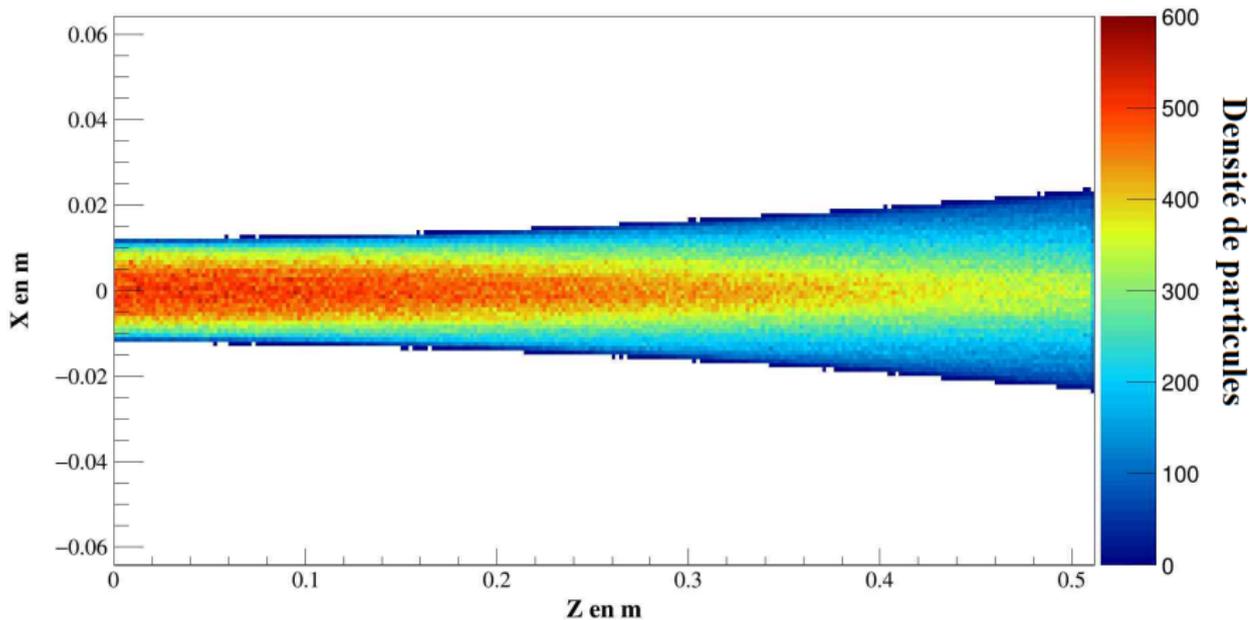
- ▶ Distribution des espèces dans la ligne
- ▶ Carte de potentiel induit par les particules
- ▶ Cartes de champ

On considère la simulation suivante :

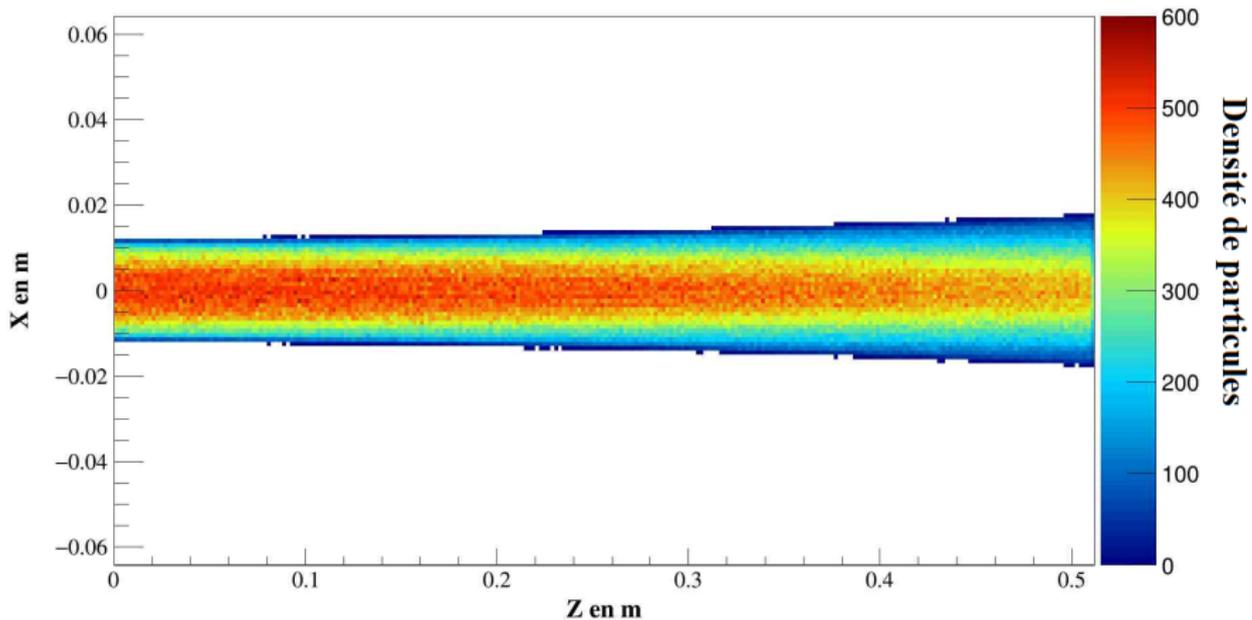
<b>Géométrie</b>	Espace de glissement cylindrique de 0.5 m de long
<b>Distribution</b>	Distribution Kapchinsky-Vladimirski
<b>Particules</b>	Protons
<b>Energie cinétique</b>	100 keV
<b>Intensité</b>	100 mA
<b>Gaz</b>	$H_2$ @ $10^{-4}$ hPa
<b>Collision</b>	Ionisation du gaz résiduel : $H^+ + H_2 \rightarrow H^+ + H_2^+ + e^-$
<b>Maillage de l'espace</b>	1 mm en transverse et 2 mm en longitudinal
<b>Temps simulé</b>	10.0 $\mu$ s ( $T_{SCC} = 4.9 \mu$ s @ $10^{-4}$ hPa)



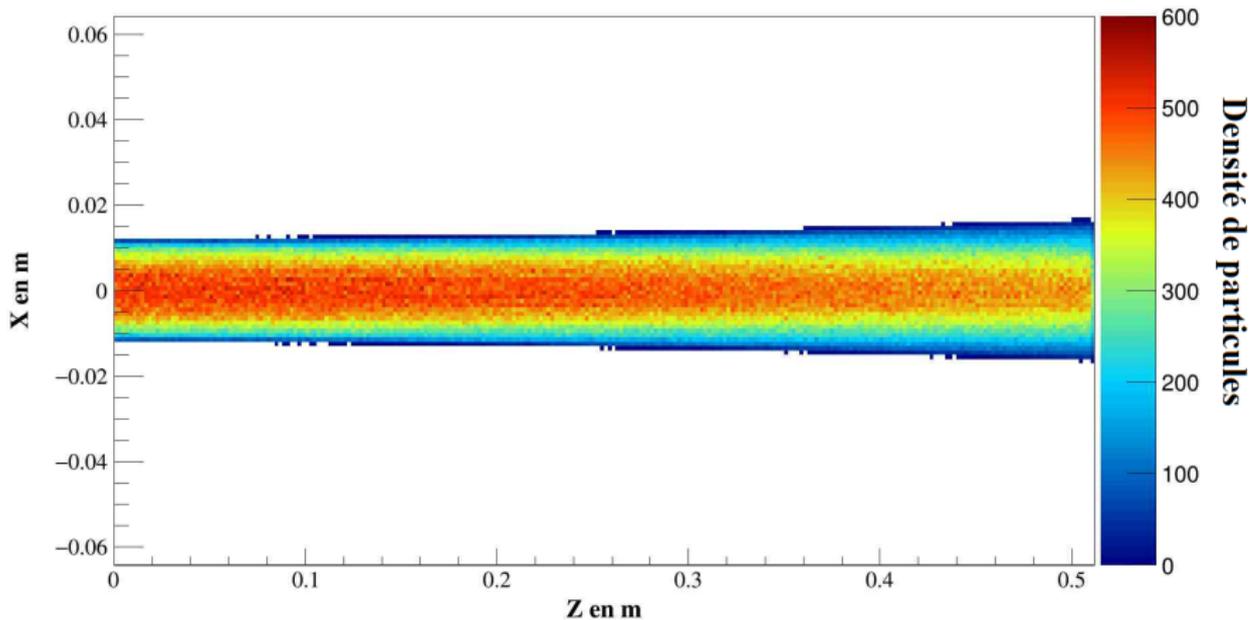
Faisceau de protons au temps  $1.0 \mu\text{s}$



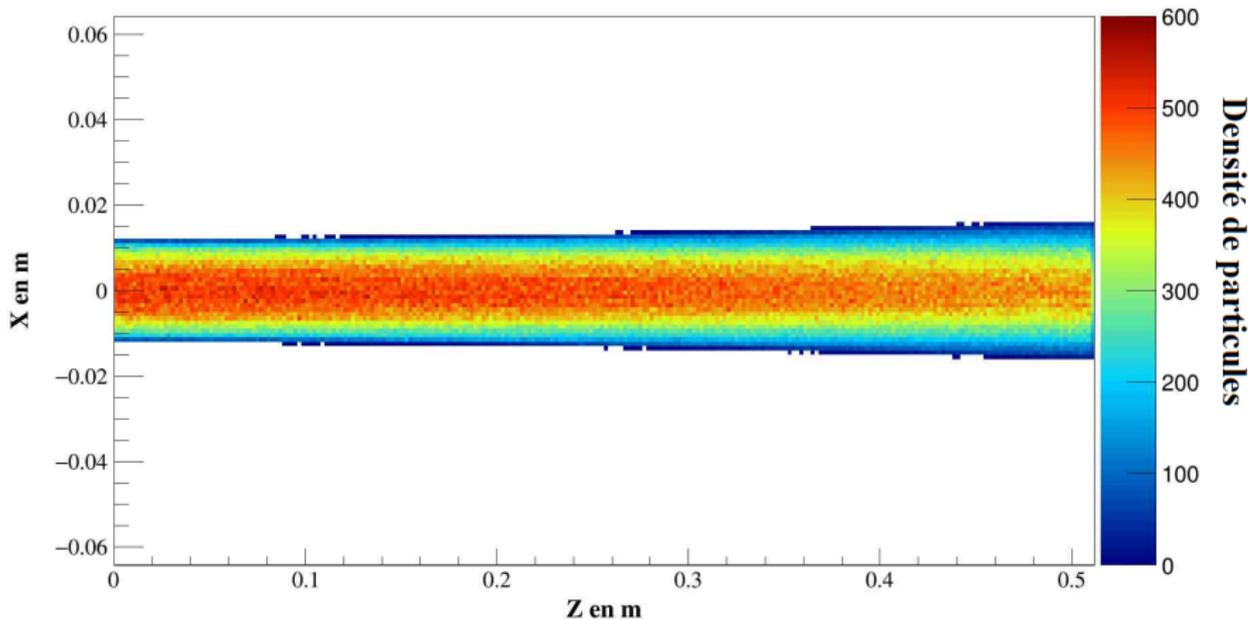
Faisceau de protons au temps  $2.5 \mu\text{s}$



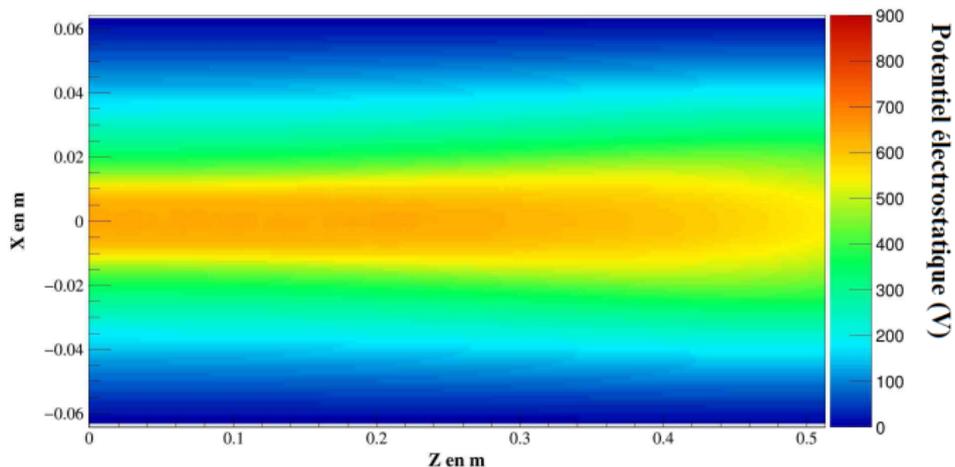
Faisceau de protons au temps  $5.0 \mu\text{s}$



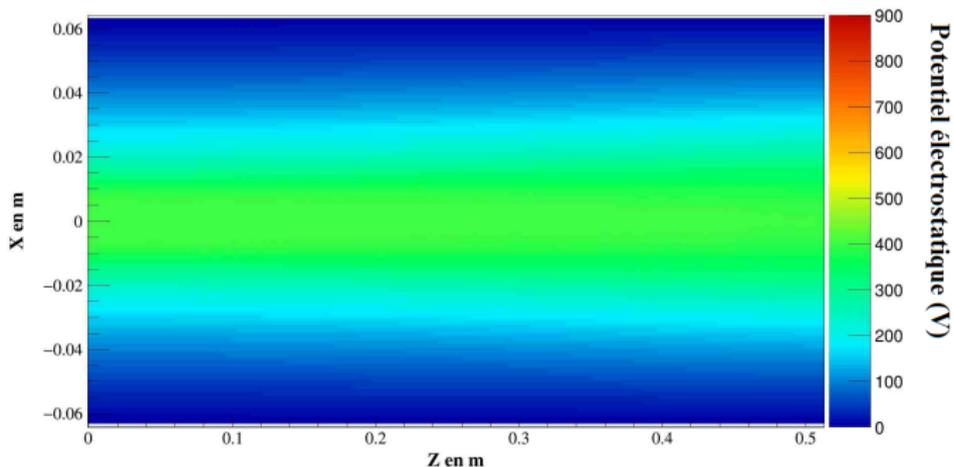
Faisceau de protons au temps  $7.5 \mu\text{s}$



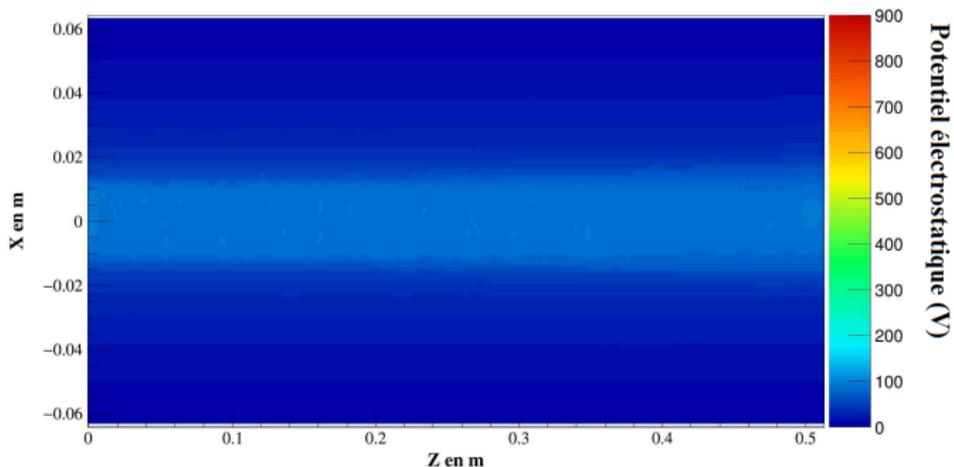
Faisceau de protons au temps  $10.0 \mu\text{s}$



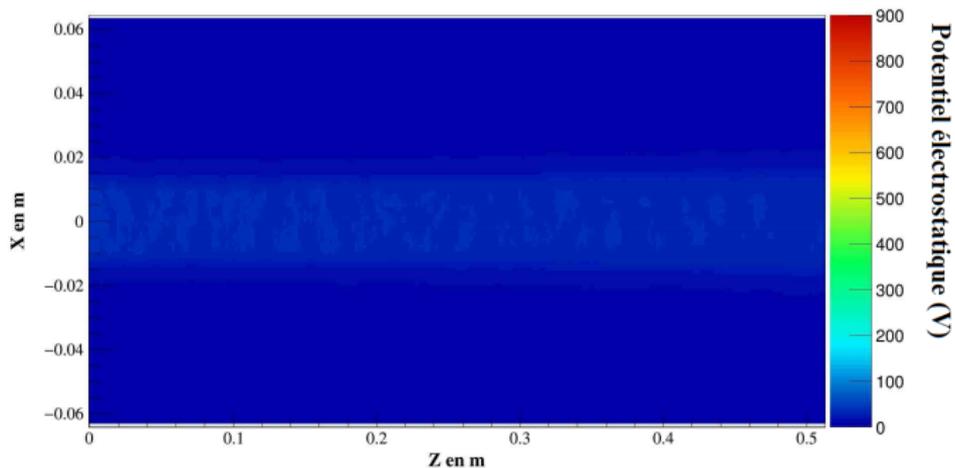
Coupe de potentiel électrostatique dans le plan  $xOz$  au temps  $1.0 \mu\text{s}$



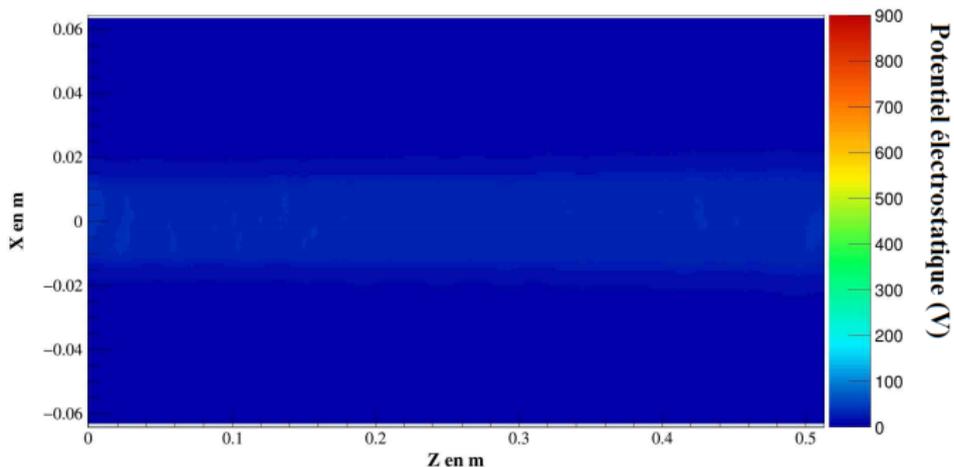
Coupe de potentiel électrostatique dans le plan  $xOz$  au temps  $2.5 \mu\text{s}$



Coupe de potentiel électrostatique dans le plan  $xOz$  au temps  $5.0 \mu\text{s}$



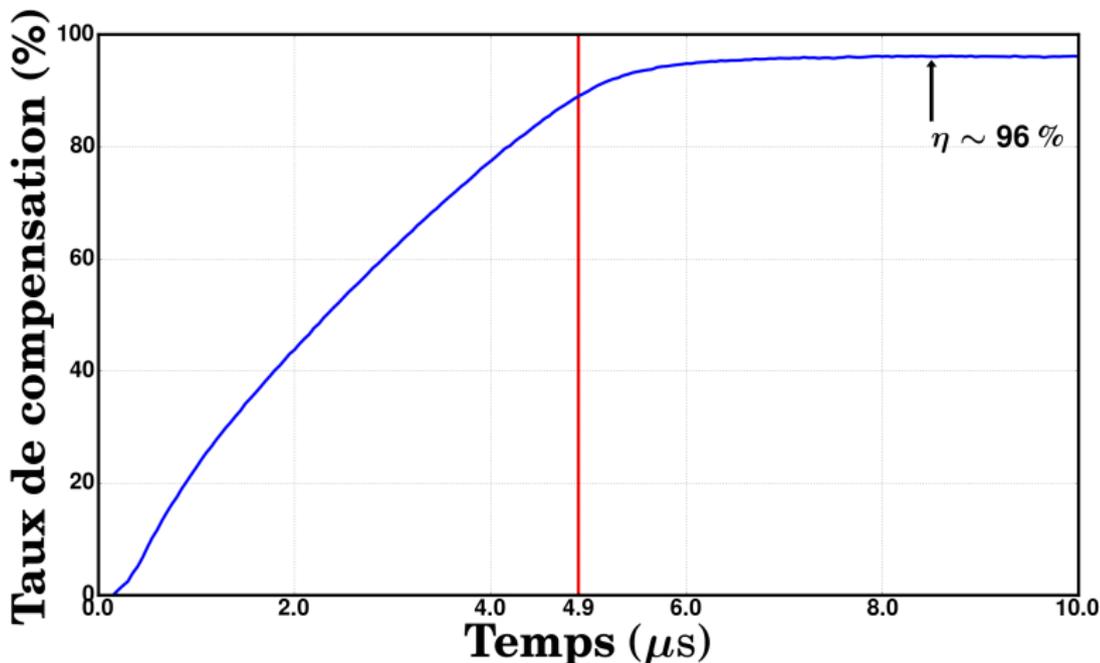
Coupe de potentiel électrostatique dans le plan  $xOz$  au temps  $7.5 \mu\text{s}$



Coupe de potentiel électrostatique dans le plan  $xOz$  au temps  $10.0 \mu\text{s}$

A différents pas de temps  $t$  de la simulation :

- ▶ Calcul du potentiel induit par les protons seuls en l'absence de compensation de charge d'espace (faisceau non compensé) :  $\Phi_0(x, y, z, t)$
- ▶ Le potentiel induit par toutes les particules présentes dans la ligne :  $\Phi_C(x, y, z, t)$  est donné en sortie du code.
- ▶ Calcul de  $\eta(x, y, z, t) = 1 - \frac{\Phi_C(x, y, z, t)}{\Phi_0(x, y, z, t)}$



Evolution temporelle du taux de compensation sur l'axe du faisceau en  $z = 0.25$  m

INTRODUCTION

SIMULATIONS

**ACTIVITÉS EXPÉRIMENTALES**

RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES

CONCLUSION & PERSPECTIVES

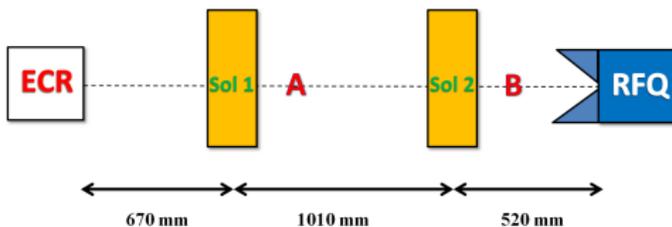
Nous participons à une campagne expérimentale auprès de la LBE de MYRRHA, actuellement en opération au LPSC Grenoble.

On peut faire varier les paramètres expérimentaux suivants :

- ▶ Le champ magnétique dans les solénoïdes
- ▶ La nature du gaz injecté (ex : argon, hélium)
- ▶ La pression du gaz injecté

On peut mesurer les grandeurs suivantes :

- ▶ L'intensité du faisceau
- ▶ L'émittance transverse du faisceau à 2 positions de la ligne
- ▶ La compensation de charge d'espace (analyseur 4-grilles)



Ligne basse énergie de MYRRHA avec les positions des émittancemètres en A et B

Présentation d'un résultat expérimental illustrant l'effet de la pression de gaz sur la compensation de charge d'espace.

On mesure la distribution du faisceau dans l'espace des phases après le 1<sup>er</sup> solénoïde.

Présentation d'un résultat expérimental illustrant l'effet de la pression de gaz sur la compensation de charge d'espace.

On mesure la distribution du faisceau dans l'espace des phases après le 1<sup>er</sup> solénoïde.

Paramètres  
expérimentaux :

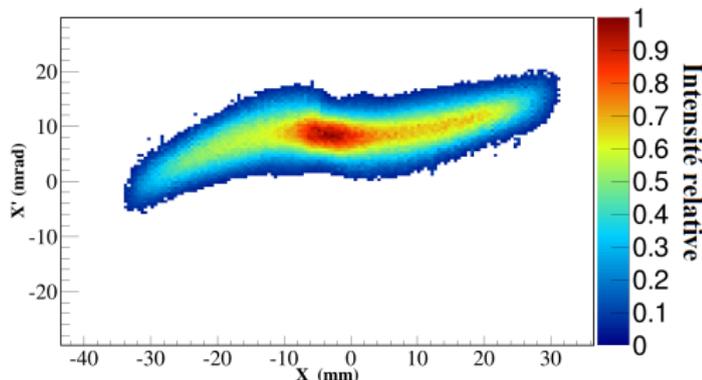
Energie : 30 keV

Intensité : 10 mA

Solénoïde 1 : 0.21 T

Gaz : hélium @

$2.3 \times 10^{-4}$  hPa



Distribution du faisceau de protons dans  
l'espace des phases

Présentation d'un résultat expérimental illustrant l'effet de la pression de gaz sur la compensation de charge d'espace.

On mesure la distribution du faisceau dans l'espace des phases après le 1<sup>er</sup> solénoïde.

Paramètres  
expérimentaux :

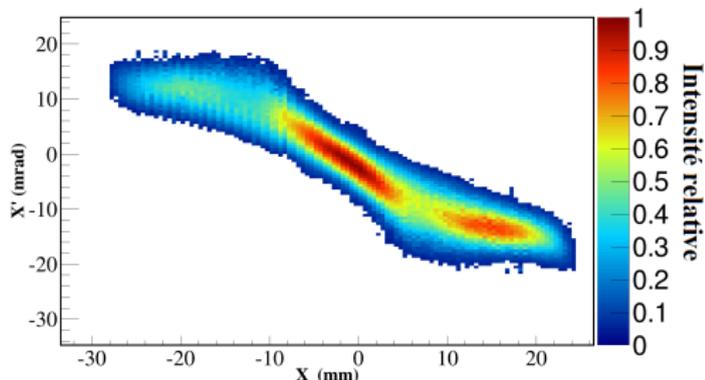
Energie : 30 keV

Intensité : 10 mA

Solénoïde 1 : 0.21 T

Gaz : hélium @

$1.2 \times 10^{-3}$  hPa



Distribution du faisceau de protons dans  
l'espace des phases

INTRODUCTION

SIMULATIONS

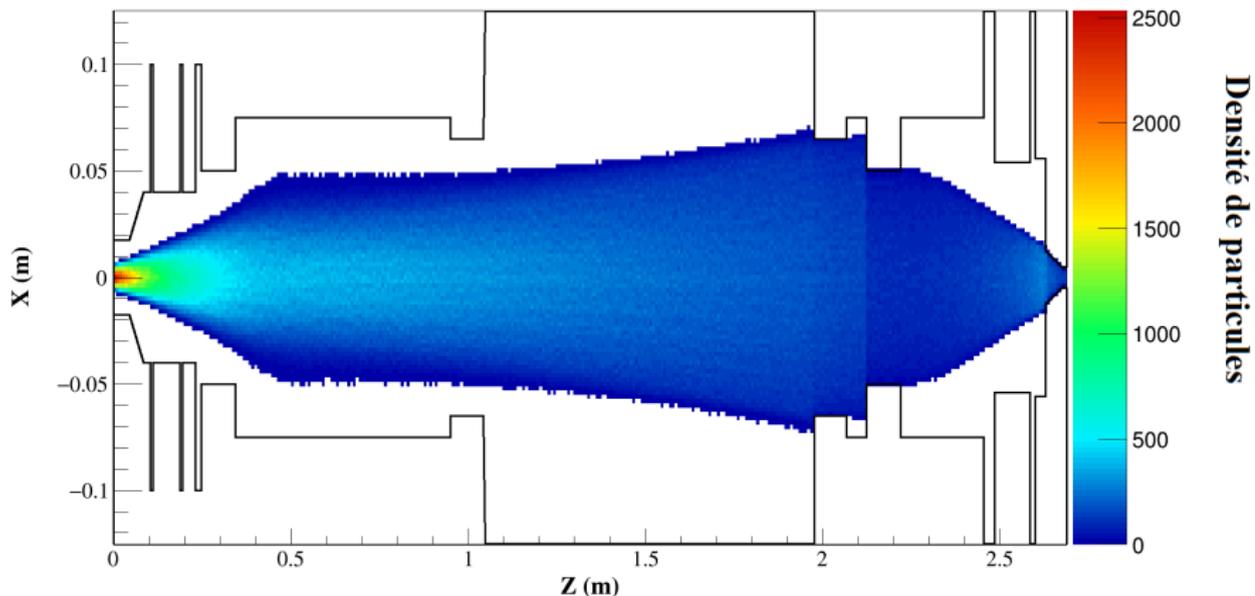
ACTIVITÉS EXPÉRIMENTALES

**RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES**

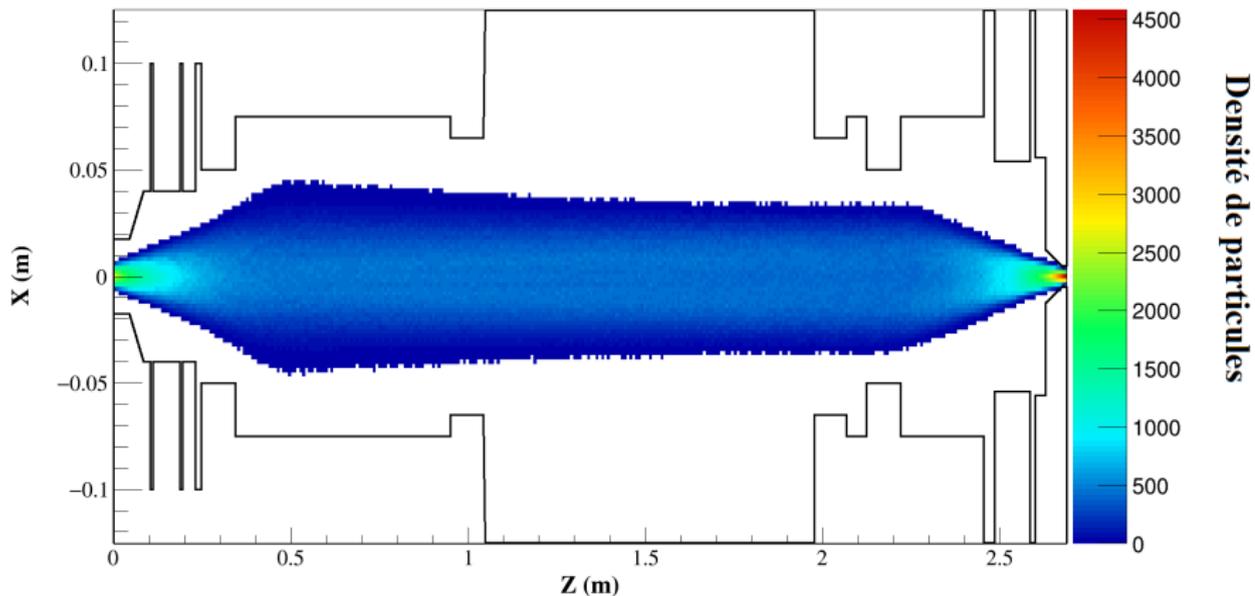
CONCLUSION & PERSPECTIVES

On établit une simulation reproduisant les conditions de l'expérience :

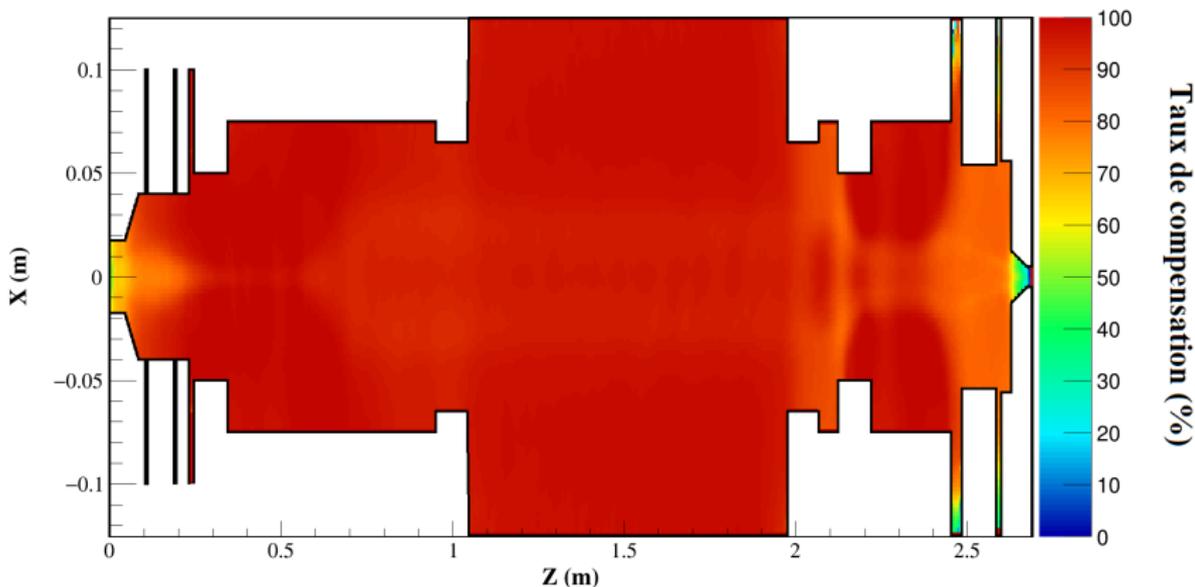
- ▶ Géométrie de la ligne
- ▶ Faisceau de protons de 30 keV d'intensité 7.8 mA
- ▶ On approche la distribution du faisceau par une distribution analytique
- ▶ Gaz injecté : Argon @  $1.2 \times 10^{-5}$  hPa
- ▶ Courant dans le premier solénoïde : 70 A
- ▶ Courant dans le second solénoïde : 76 A
- ▶ Temps simulé : 100  $\mu$ s



Faisceau de protons au temps  $t = 2.0 \mu\text{s}$

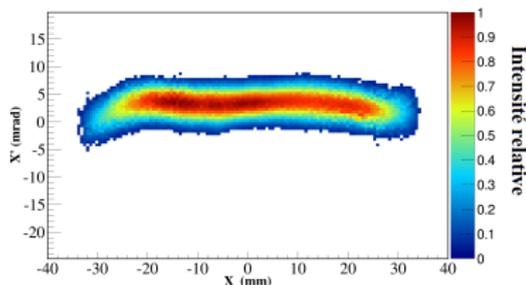


Faisceau de protons au temps  $t = 100.0 \mu\text{s}$

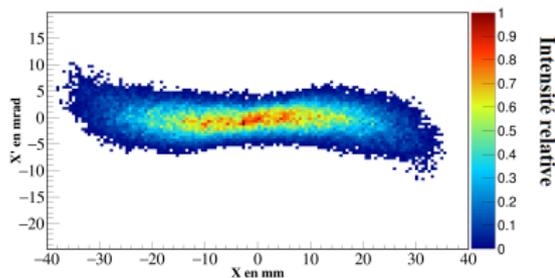


Carte de compensation de charge d'espace dans le plan  $z_0x$  au temps  $t = 100.0 \mu\text{s}$

## RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES



Distribution du faisceau de protons mesurée par l'émittancemètre



Distribution du faisceau de protons issue de la simulation

	Expérience	Simulation	Ecart relatif (%)
$\varepsilon_{rms}$ ( $\pi$ .mm.mrad)	0.2429	0.2568	5.4
Taille rms du faisceau (mm)	14.24	14.79	3.7

INTRODUCTION

SIMULATIONS

ACTIVITÉS EXPÉRIMENTALES

RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES

**CONCLUSION & PERSPECTIVES**

- ▶ Modélisation auto-consistante de la dynamique d'un faisceau de basse énergie en régime de compensation de charge d'espace
- ▶ Détermination du taux de compensation et du temps de compensation
- ▶ Activités expérimentales sur la ligne basse énergie de MYRRHA
- ▶ Simulation d'une ligne basse énergie existante dans des conditions réelles

- ▶ Ajout de phénomènes physiques dans les simulations :
  - ▶ Émission d'électrons secondaires
  - ▶ Ionisation du gaz par les électrons
  - ▶ Gradient de pression dans la ligne
- ▶ Fin de la campagne expérimentale sur la LBE de MYRRHA :
  - ▶ Mesures d'émittances à la fin de la ligne basse énergie
  - ▶ Mesures de la compensation de charge d'espace
- ▶ Simulation de la ligne MYRRHA dans les mêmes conditions que l'expérience
- ▶ Simulations d'autres lignes basse énergie (IFMIF)

Merci de votre attention !