



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

Journées accélérateurs 2015 | Frédéric Gérardin

[frederic.gerardin@cea.fr](mailto:frederic.gerardin@cea.fr)

# Plan

**Introduction**

**Codes de calcul pour les simulations**

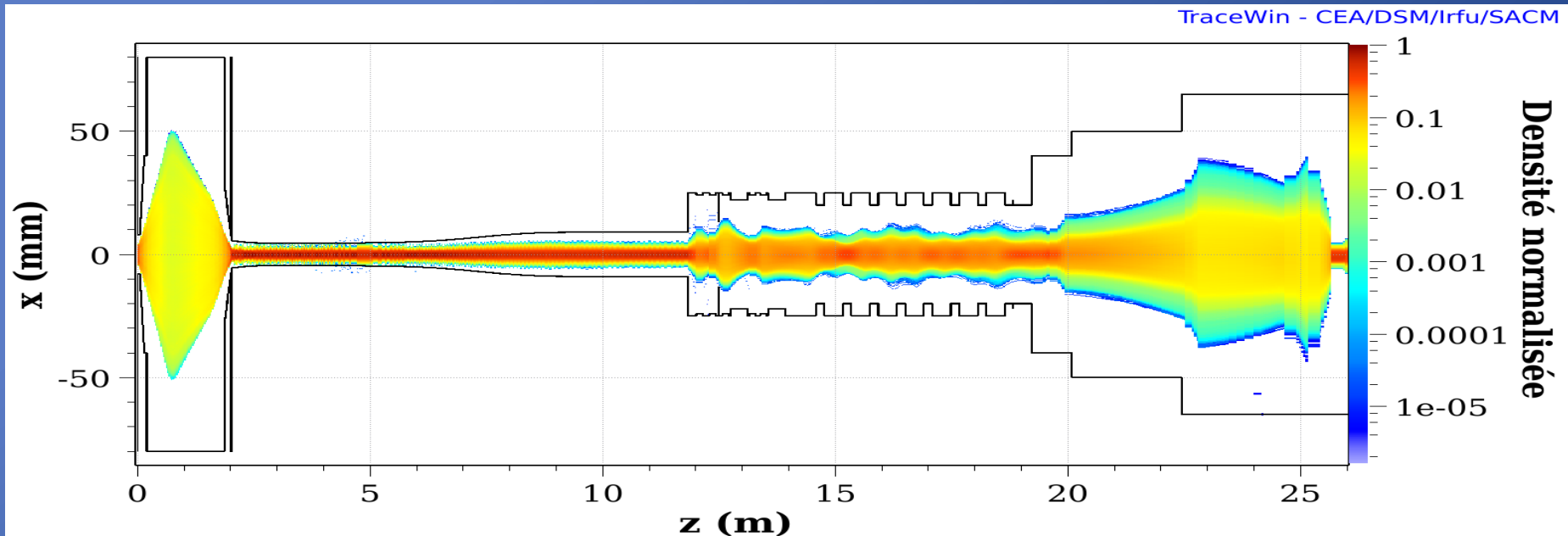
**Résultats des simulations**

**Activités expérimentales**

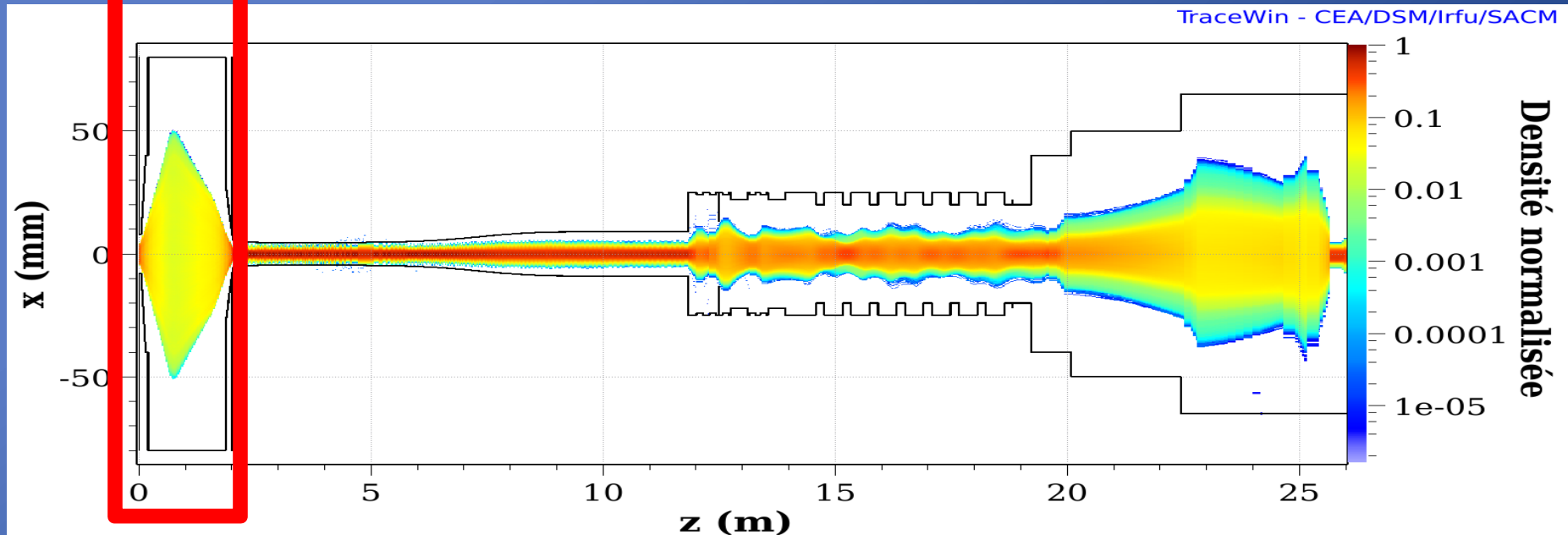
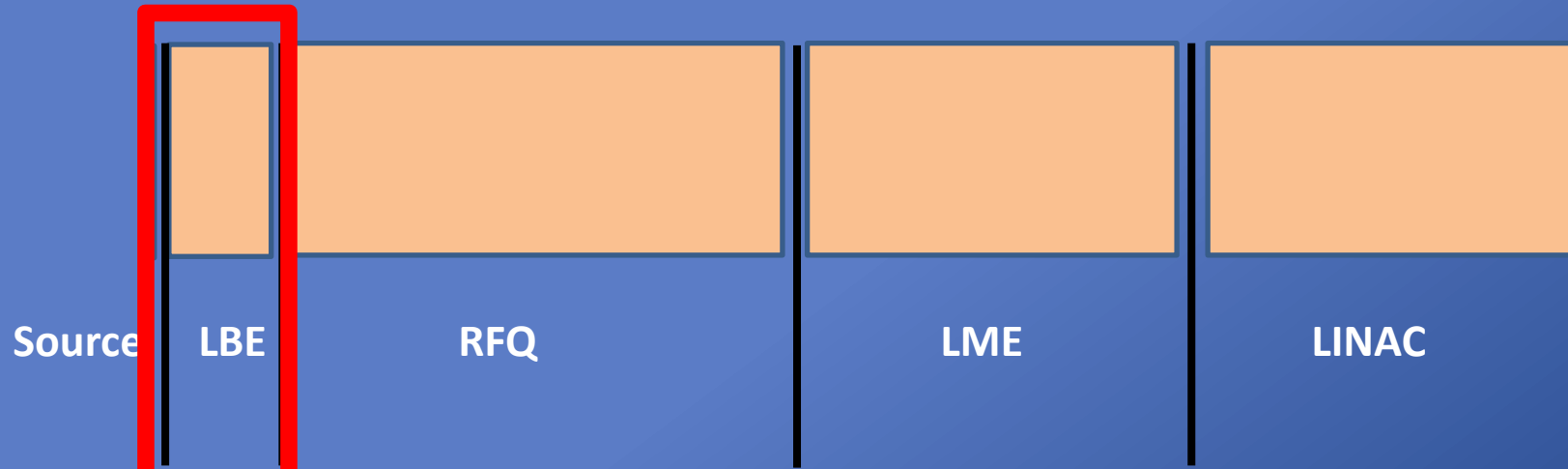
**Conclusion et perspectives**

# Introduction

# La ligne basse énergie



# La ligne basse énergie



# La charge d'espace

# La charge d'espace

- Etude de la dynamique d'un faisceau intense à basse énergie

# La charge d'espace

- Etude de la dynamique d'un faisceau intense à basse énergie
- Dominée par le champ de charge d'espace



# La charge d'espace

- Etude de la dynamique d'un faisceau intense à basse énergie
- Dominée par le champ de charge d'espace
- Ce champ peut induire une augmentation d'émittance et la formation de halo

# La charge d'espace

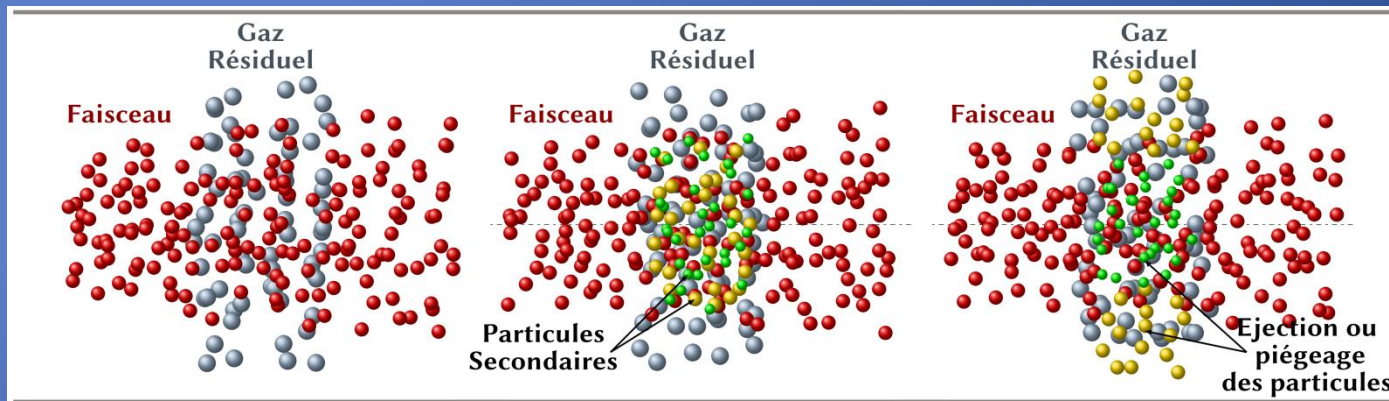
- Etude de la dynamique d'un faisceau intense à basse énergie
- Dominée par le champ de charge d'espace
- Ce champ peut induire une augmentation d'émittance et la formation de halo
- Le champ électrique induit par la charge d'espace défocalise le faisceau
- Le champ magnétique induit par la charge d'espace le focalise

# La charge d'espace

- Etude de la dynamique d'un faisceau intense à basse énergie
- Dominée par le champ de charge d'espace
- Ce champ peut induire une augmentation d'émittance et la formation de halo
- Le champ électrique induit par la charge d'espace défocalise le faisceau
- Le champ magnétique induit par la charge d'espace le focalise
- A basse énergie et fort courant, l'effet défocalisant prédomine

# La compensation de charge d'espace (1)

- A basse énergie, le faisceau induit l'ionisation du gaz résiduel dans la ligne basse énergie.
- Les particules secondaires (ions et électrons) issues de l'ionisation sont confinées ou repoussées par le champ de charge d'espace.



## Processus de compensation de charge d'espace

- L'accumulation progressive des particules de charges opposées à celles du faisceau contribue à la compensation de charge d'espace.

# La compensation de charge d'espace (2)

# La compensation de charge d'espace (2)

- Dépend de la distribution du faisceau

# La compensation de charge d'espace (2)

- Dépend de la distribution du faisceau
- Non linéaire et dépend du temps

# La compensation de charge d'espace (2)

- Dépend de la distribution du faisceau
- Non linéaire et dépend du temps
- Temps caractéristique de compensation :

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

Temps pour produire autant d'électrons que de protons dans le faisceau 100 keV à  $10^{-4}$  mbar : 4,9  $\mu$ s



# La compensation de charge d'espace (2)

- Dépend de la distribution du faisceau
- Non linéaire et dépend du temps
- Temps caractéristique de compensation :

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

Temps pour produire autant d'électrons que de protons dans le faisceau 100 keV à  $10^{-4}$  mbar : 4,9  $\mu$ s

- Taux de compensation de charge d'espace :

$$\eta = 1 - \frac{\Phi_C}{\Phi_0}$$

$\Phi_C$  : potentiel du faisceau compensé

$\Phi_0$  : potentiel du faisceau équivalent en l'absence de compensation

# Codes de calcul pour les simulations

# Warp

# Warp

- Code utilisé : Warp, code PIC développé aux USA

# Warp

- Code utilisé : Warp, code PIC développé aux USA
- Spécialement conçu pour la dynamique des faisceaux avec une charge d'espace élevée

# Warp

- Code utilisé : Warp, code PIC développé aux USA
- Spécialement conçu pour la dynamique des faisceaux avec une charge d'espace élevée
- Présente une interface Python

# Warp

- Code utilisé : Warp, code PIC développé aux USA
- Spécialement conçu pour la dynamique des faisceaux avec une charge d'espace élevée
- Présente une interface Python
- S'exécute en parallèle avec un protocole MPI

# Warp

- Code utilisé : Warp, code PIC développé aux USA
- Spécialement conçu pour la dynamique des faisceaux avec une charge d'espace élevée
- Présente une interface Python
- S'exécute en parallèle avec un protocole MPI
- Cartes de champ, diagnostics multiples, solveurs RZ & 3D...



# Warp

- Code utilisé : Warp, code PIC développé aux USA
- Spécialement conçu pour la dynamique des faisceaux avec une charge d'espace élevée
- Présente une interface Python
- S'exécute en parallèle avec un protocole MPI
- Cartes de champ, diagnostics multiples, solveurs RZ & 3D...
- En lien avec les développeurs

# Cadre de la simulation

# Cadre de la simulation

## ENTREES

- **Distribution des faisceaux à simuler**
- **Collision :**
  - avec le gaz résiduel (espèce, pression, température...)
  - avec les parois (émission d'électrons secondaires...)
- **Géométrie de la ligne et maillage de l'espace**
- **Cartes de champs extérieurs**

# Cadre de la simulation

## ENTREES

- Distribution des faisceaux à simuler
- Collision :
  - avec le gaz résiduel (espèce, pression, température...)
  - avec les parois (émission d'électrons secondaires...)
- Géométrie de la ligne et maillage de l'espace
- Cartes de champs extérieurs

## SORTIES

- Distribution des particules dans la ligne (électrons & ions)
- Carte de potentiel de charge d'espace
- Carte de champ

# Résultats des simulations

# Simulation dans un espace de glissement

# Simulation dans un espace de glissement

## Paramètres :

Ligne de faisceau cylindrique de 500 mm de long

Injection d'un faisceau de protons uniforme de 100 keV à 100 mA

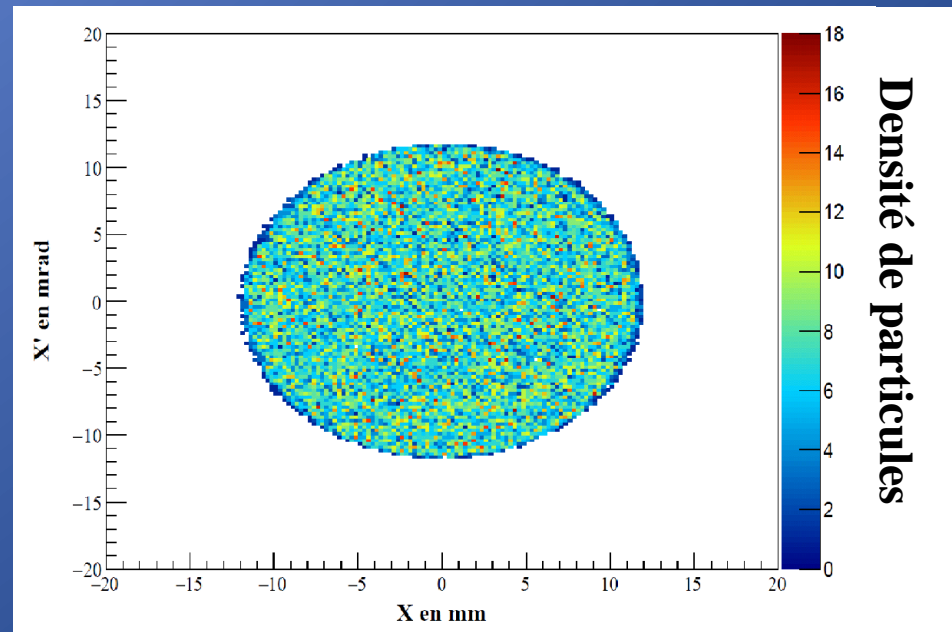
Réaction prise en compte :  $H^+ + H_2 \rightarrow H^+ + e^- + H_2^+$

$10^{-4}$  mbar uniforme

Gaz considéré comme un réservoir infini d'électrons

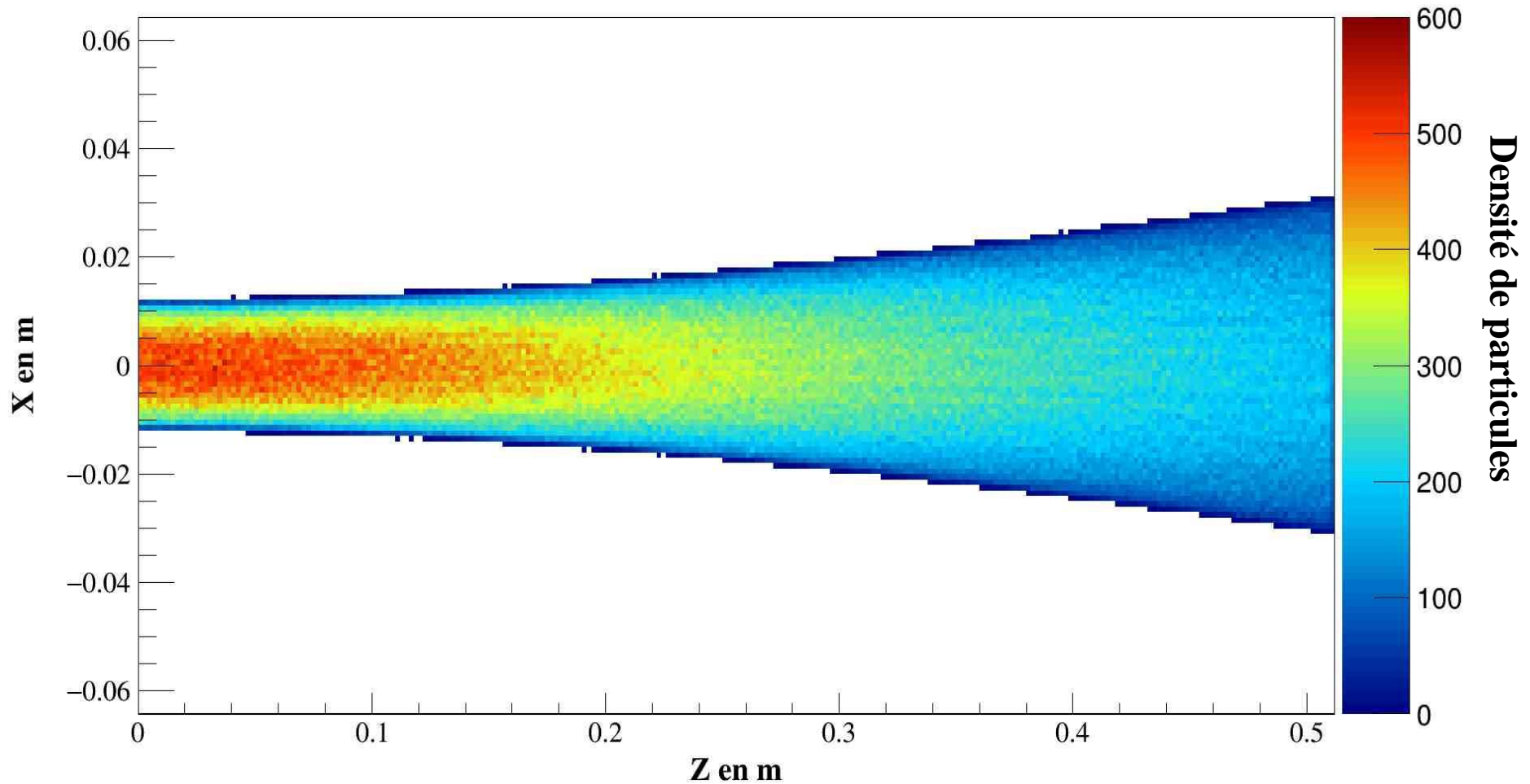
Maillage :  $1 \times 1 \times 2 \text{ mm}^3$

Temps de simulation : 10,0  $\mu\text{s}$



Distribution du faisceau injecté

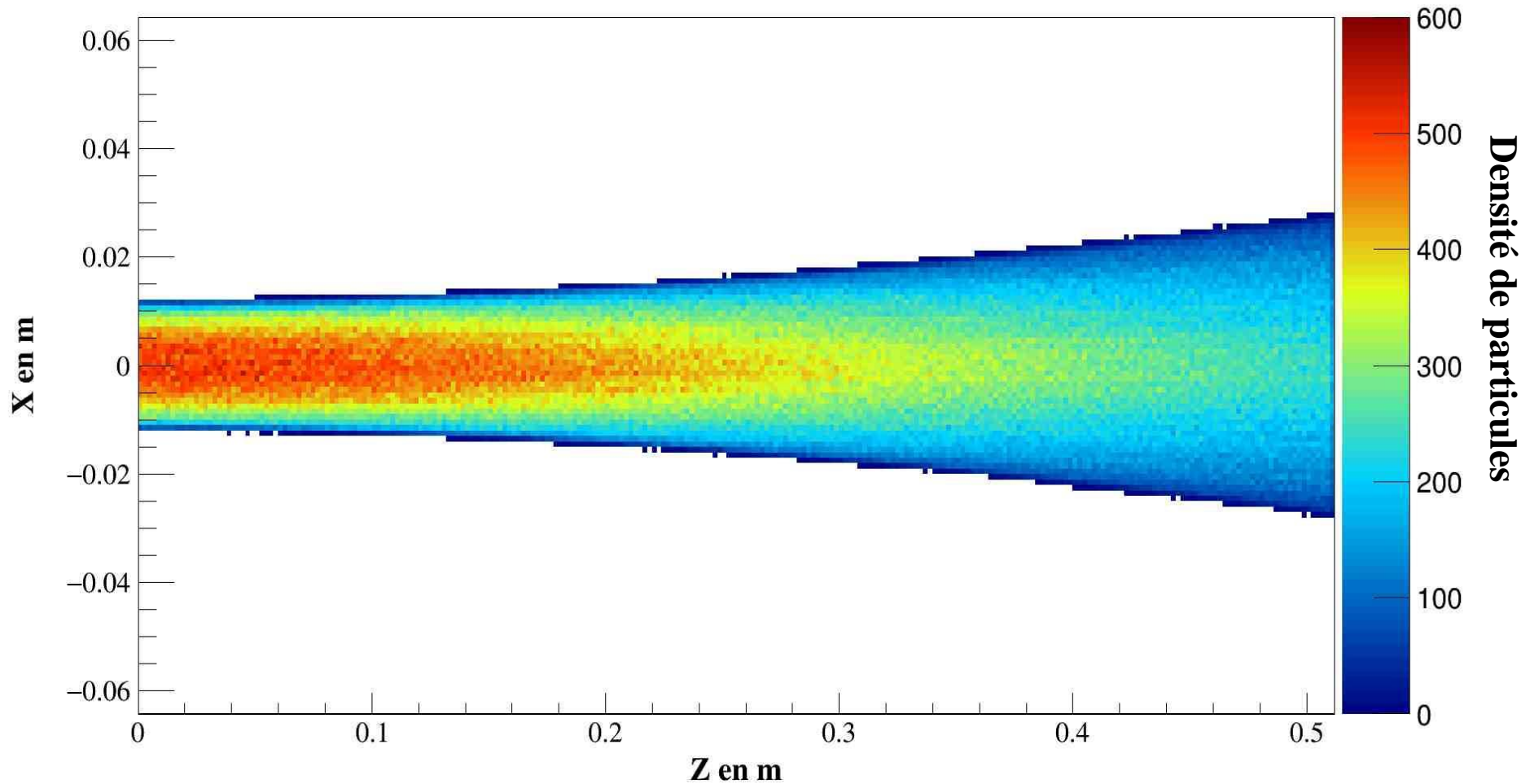
# Faisceau de protons



Faisceau de protons non compensé

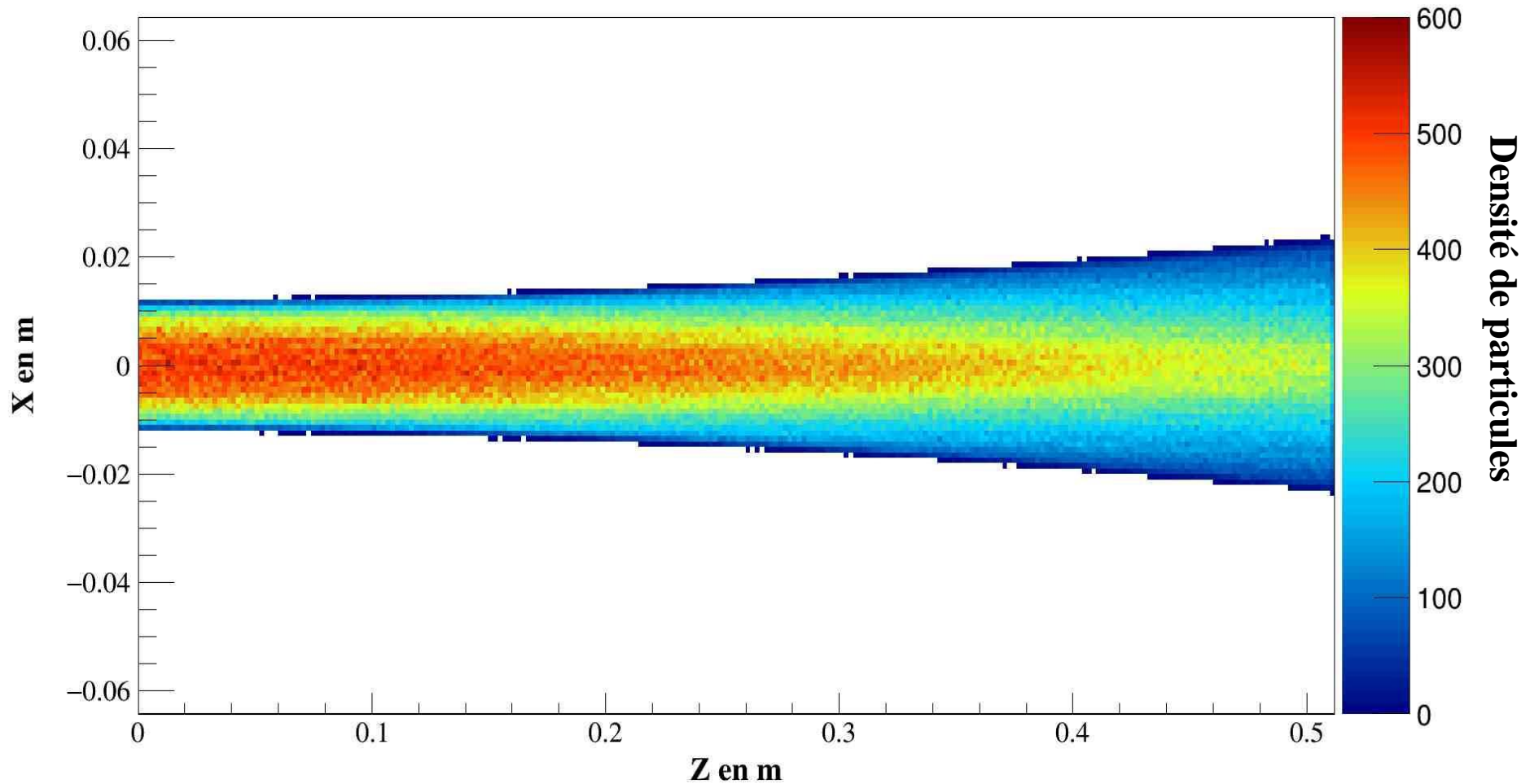


# Faisceau de protons



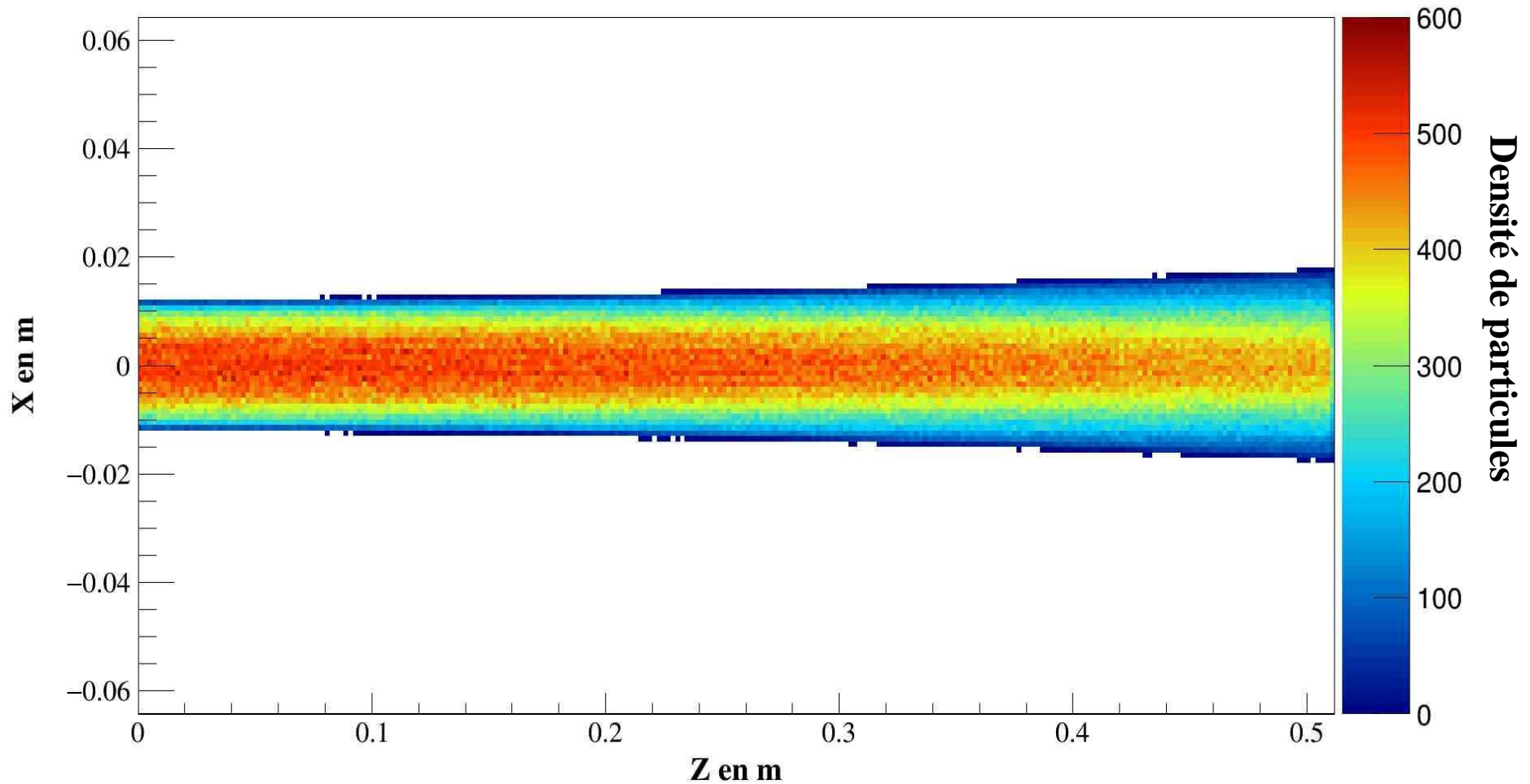
Faisceau de protons au temps  $t = 1,0 \mu\text{s}$

# Faisceau de protons



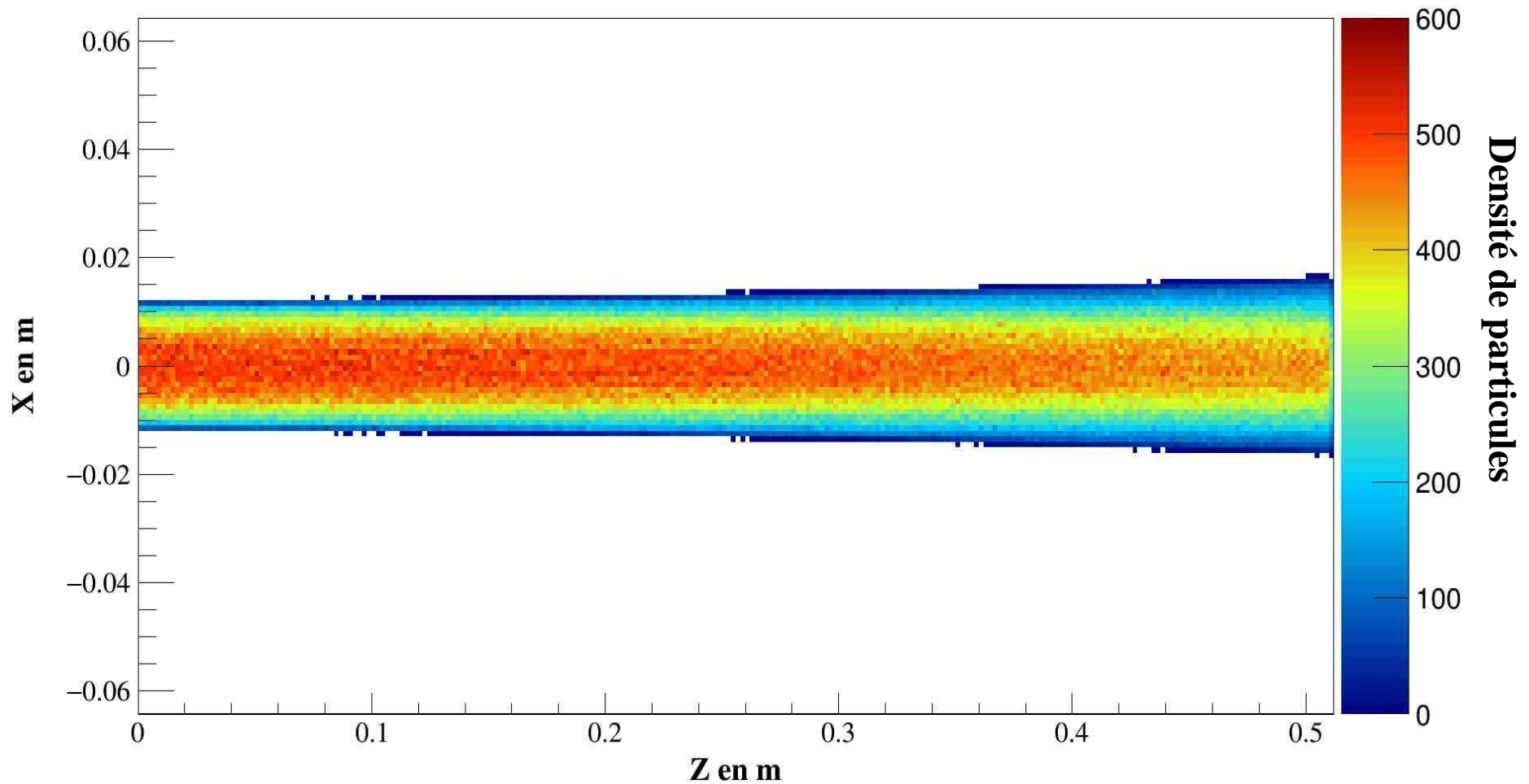
Faisceau de protons au temps  $t = 2,5 \mu\text{s}$

# Faisceau de protons



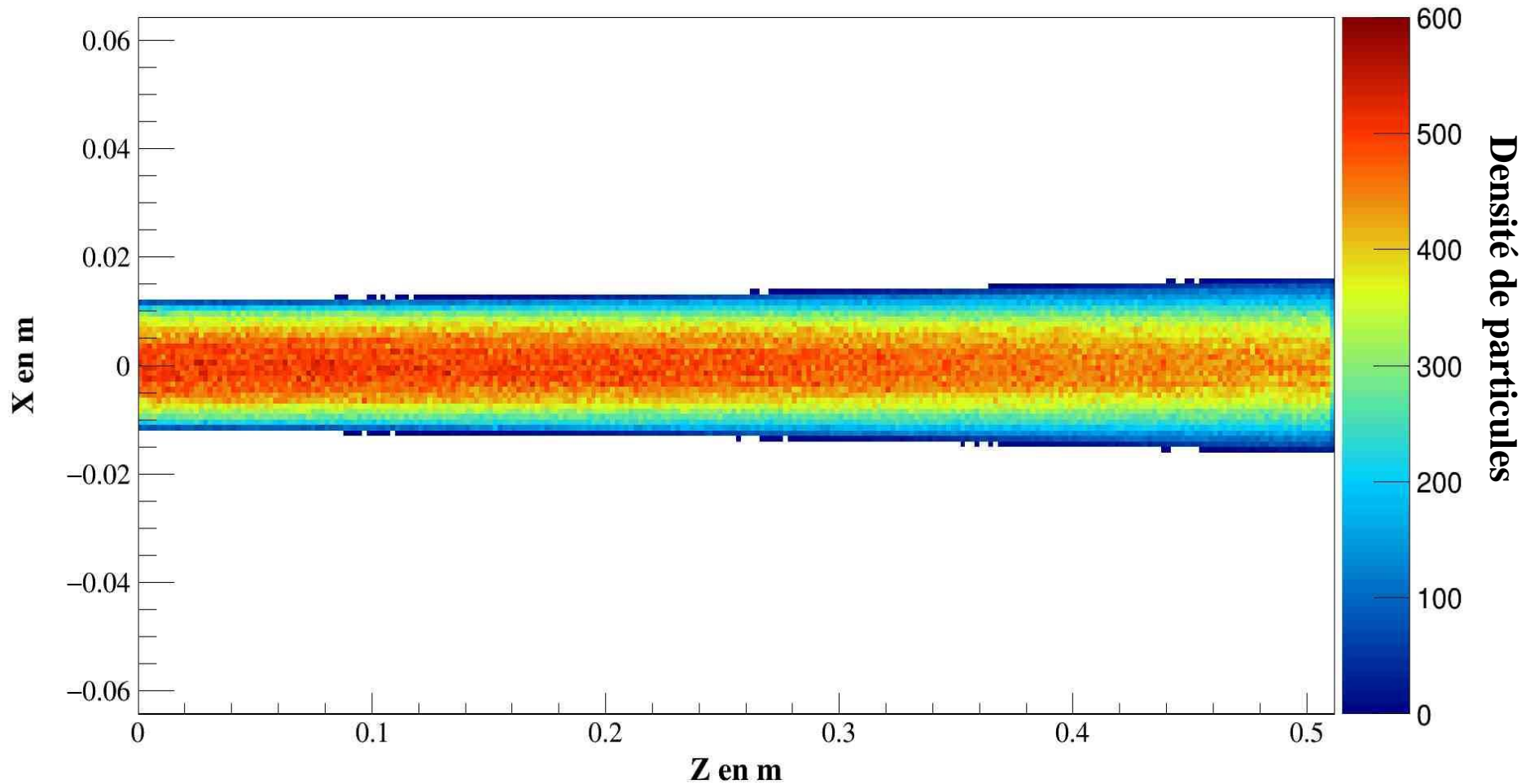
Faisceau de protons au temps  $t = 5,0 \mu\text{s}$

# Faisceau de protons



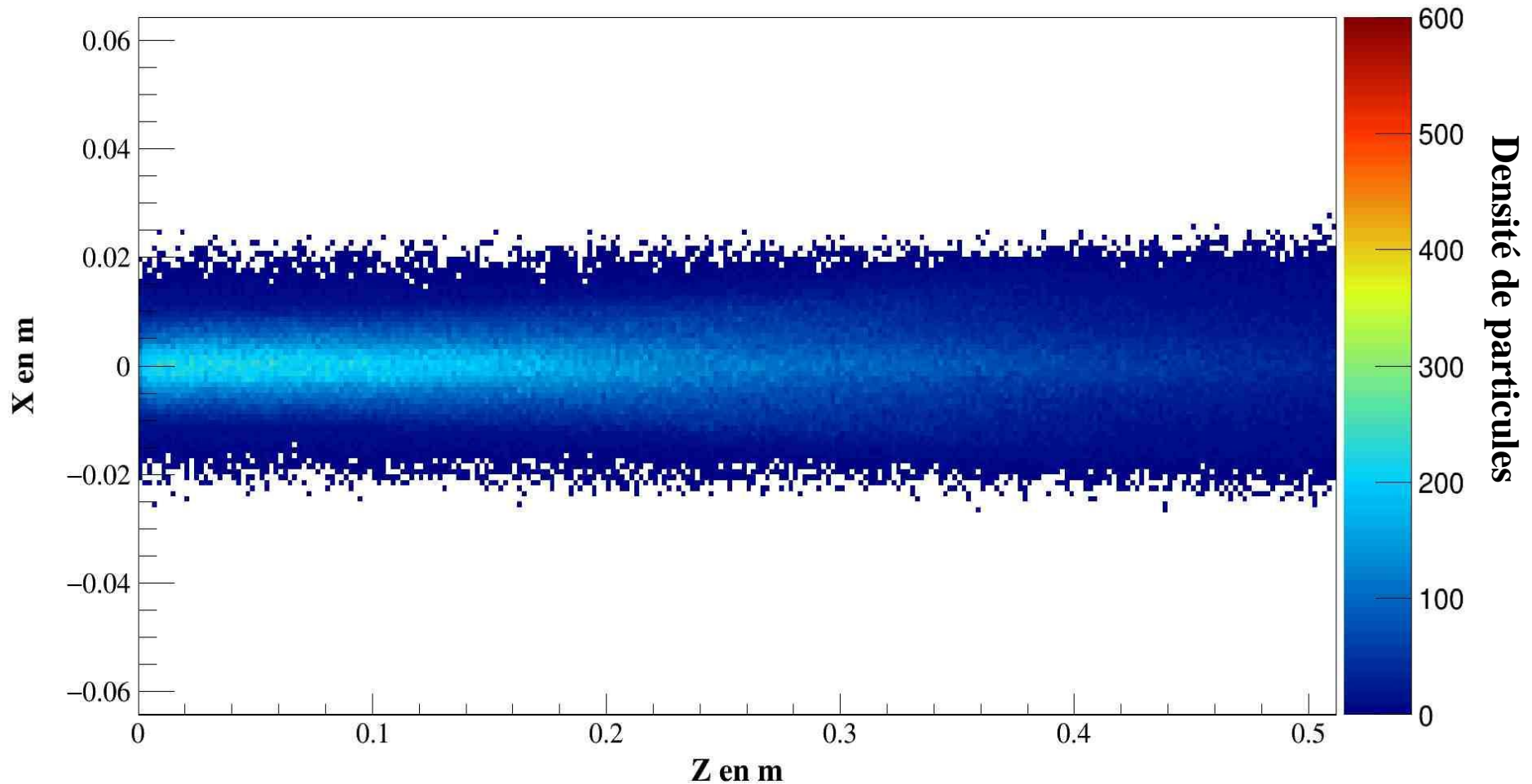
Faisceau de protons au temps  $t = 7,5 \mu\text{s}$

# Faisceau de protons



Faisceau de protons au temps  $t = 10,0 \mu\text{s}$

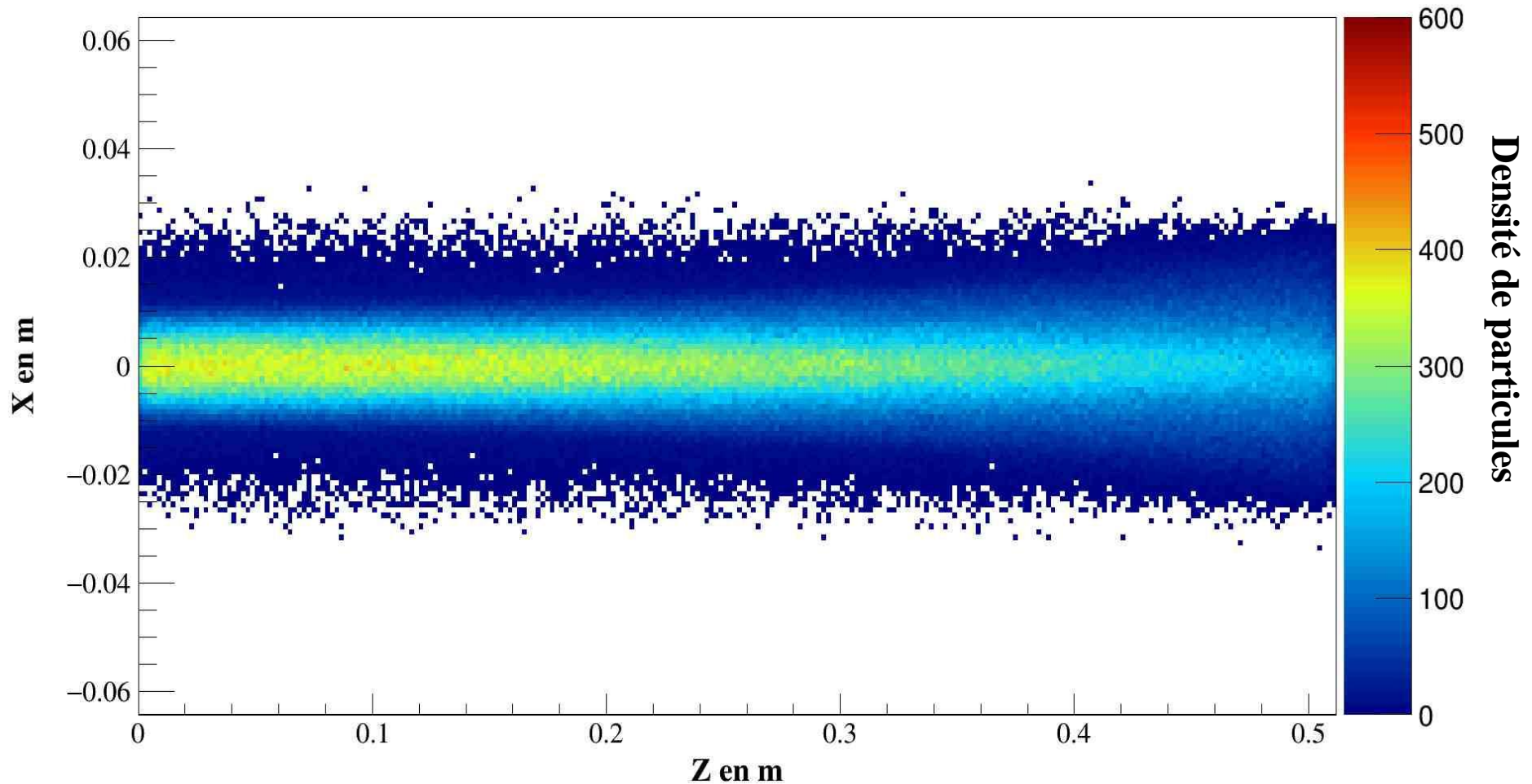
# Distribution des électrons



Distribution des électrons au temps  $t = 1,0 \mu\text{s}$

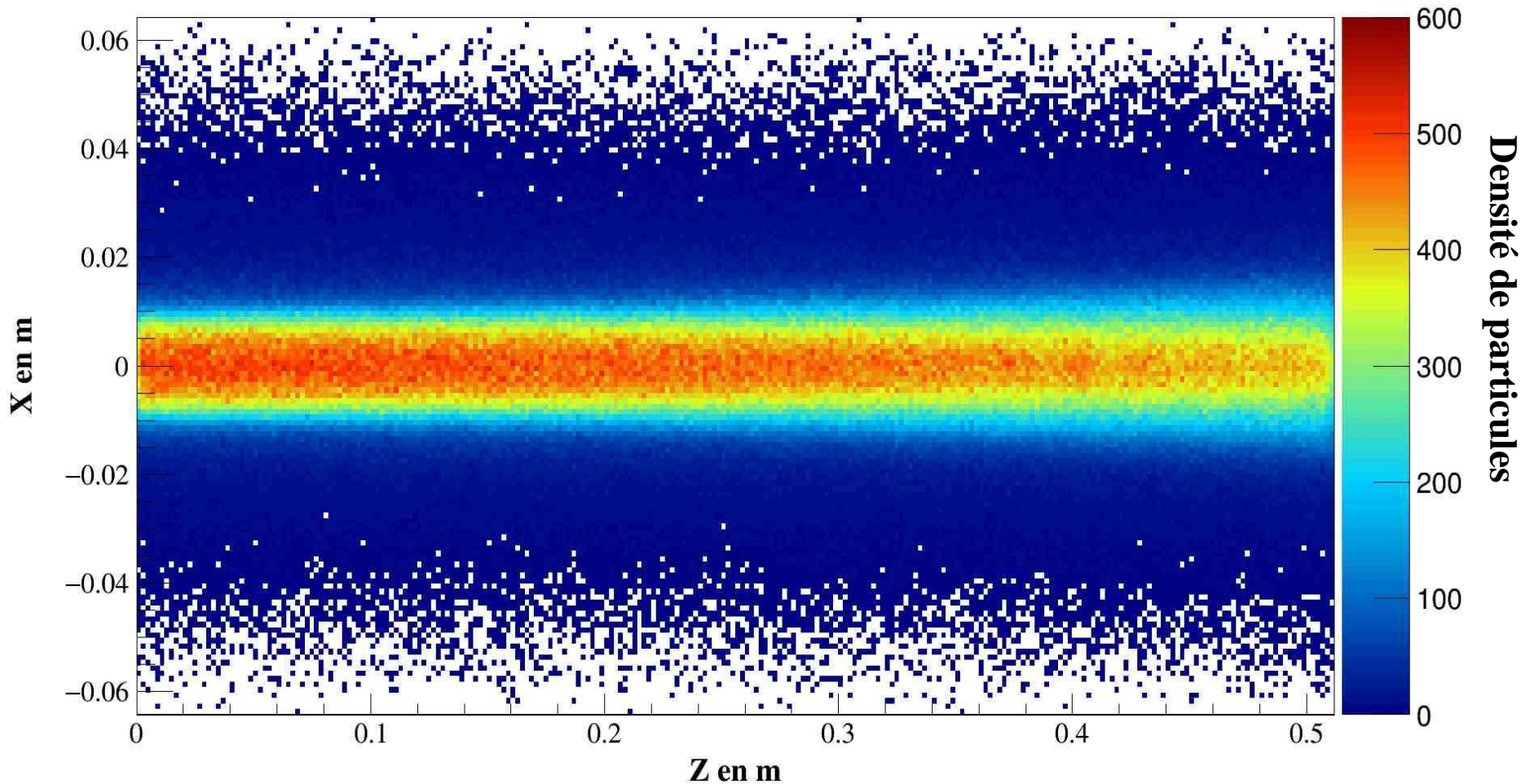


# Distribution des électrons



Distribution des électrons au temps  $t = 2,5 \mu\text{s}$

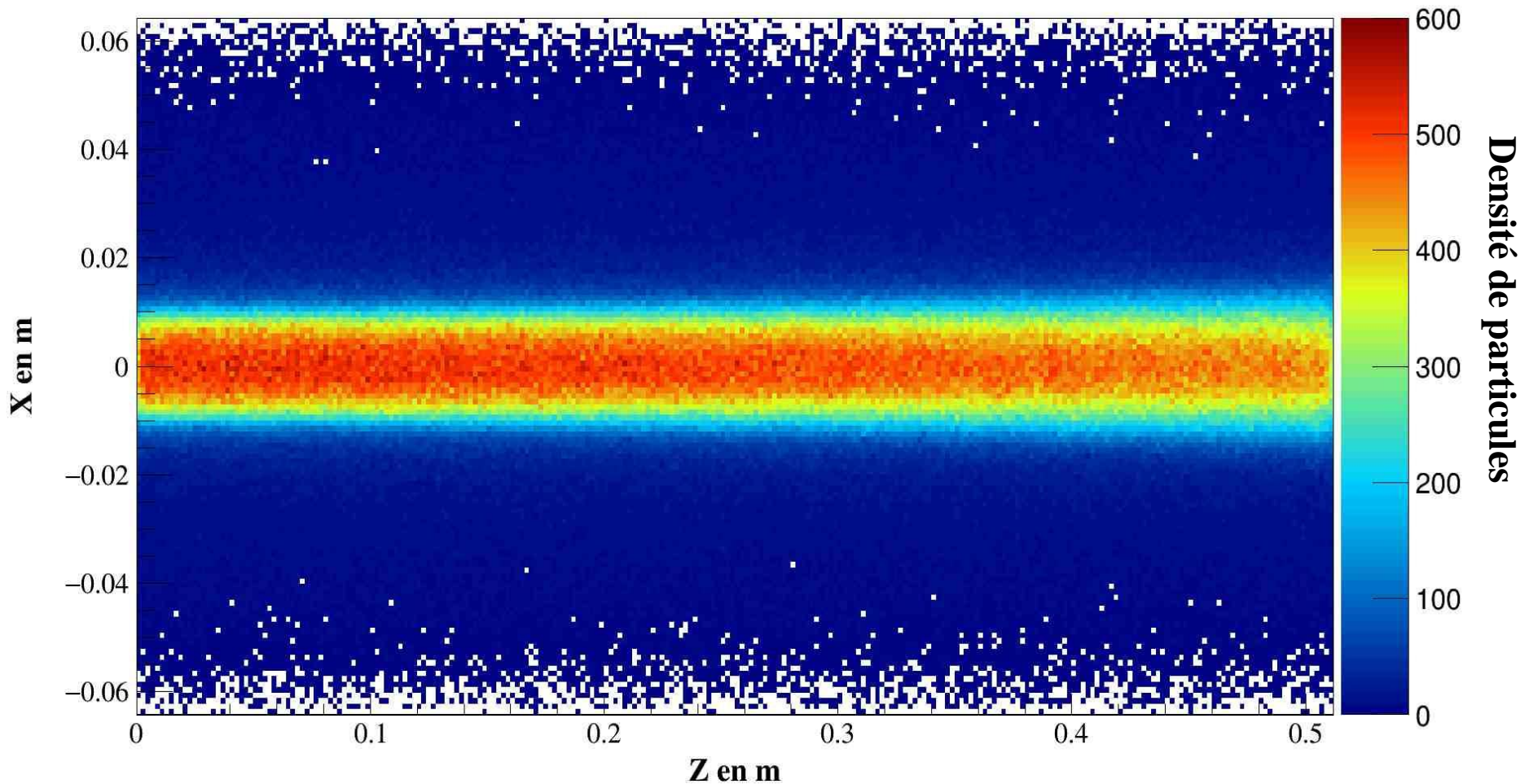
# Distribution des électrons



Distribution des électrons au temps  $t = 5,0 \mu\text{s}$

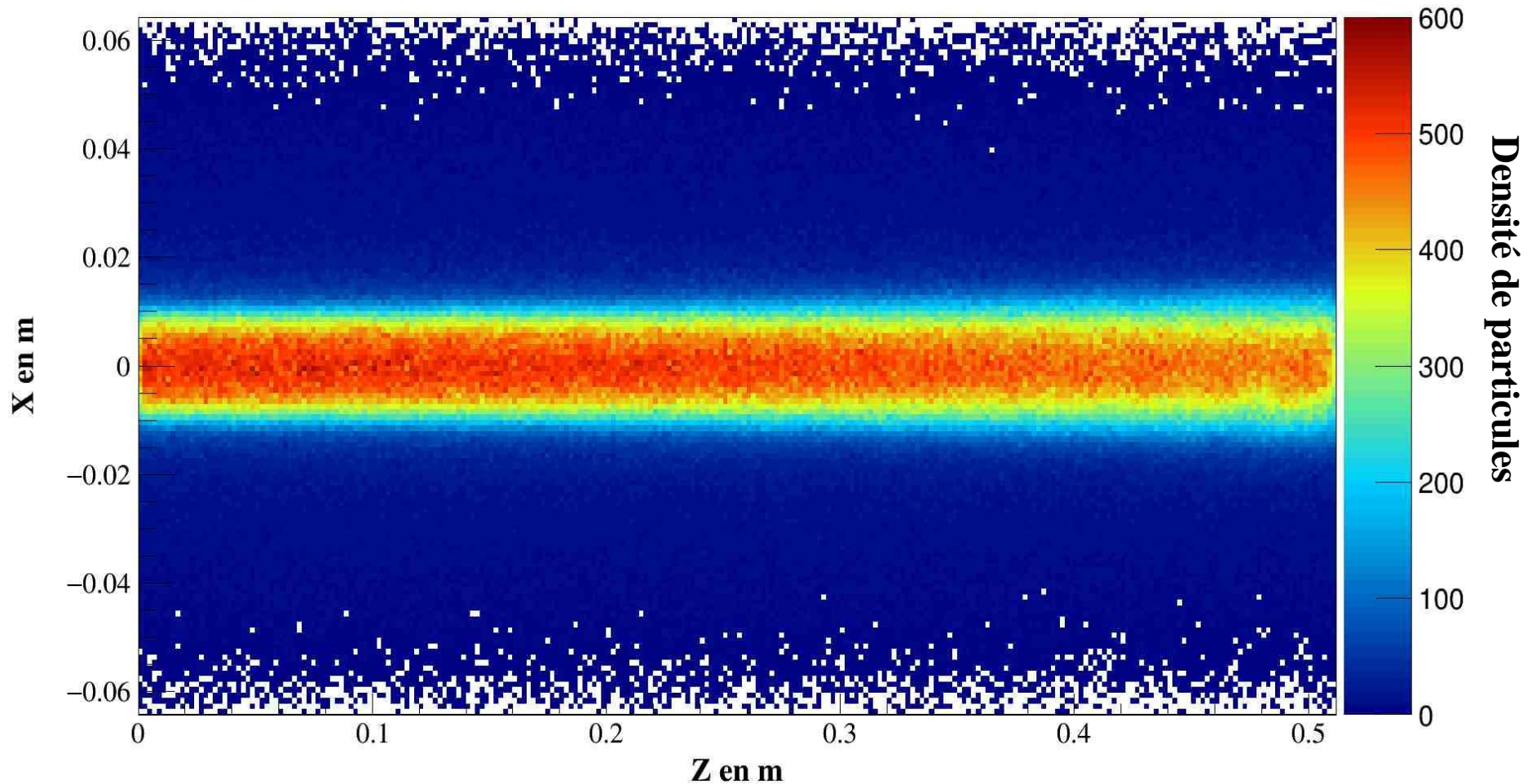


# Distribution des électrons



Distribution des électrons au temps  $t = 7,5 \mu\text{s}$

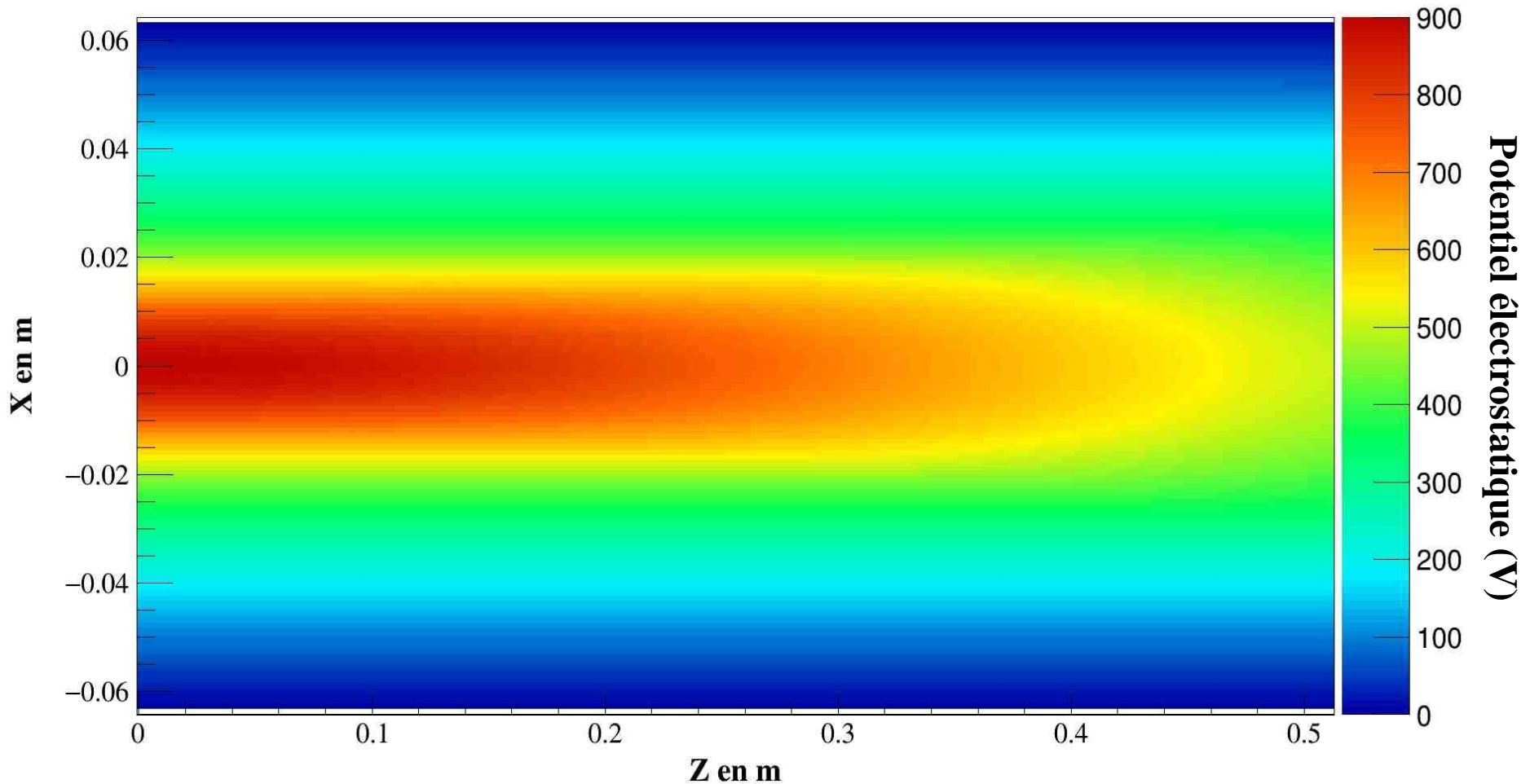
# Distribution des électrons



Distribution des électrons au temps  $t = 10,0 \mu\text{s}$

# Etude du potentiel

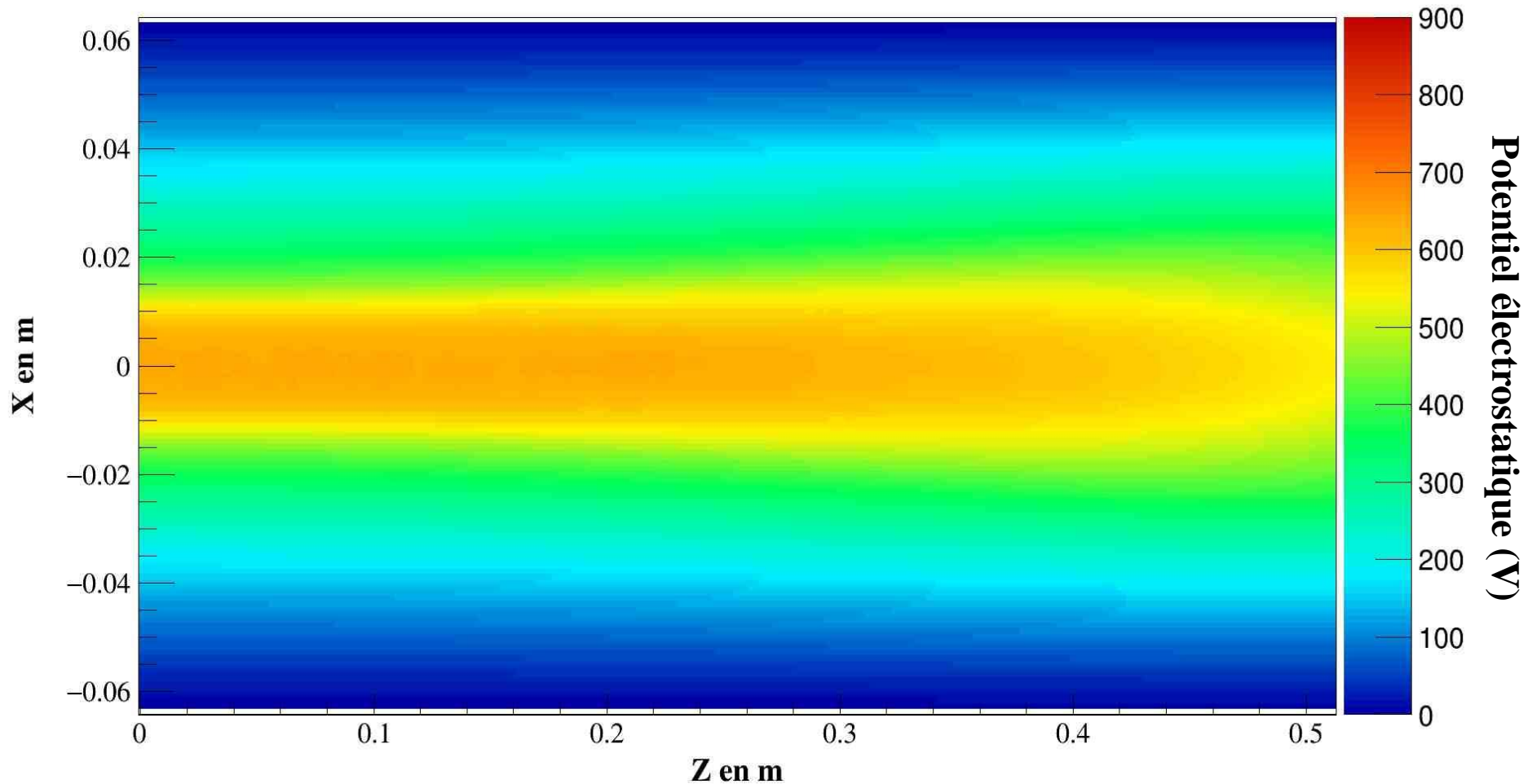
yz projection



Potentiel du faisceau en l'absence de compensation de charge d'espace

# Etude du potentiel

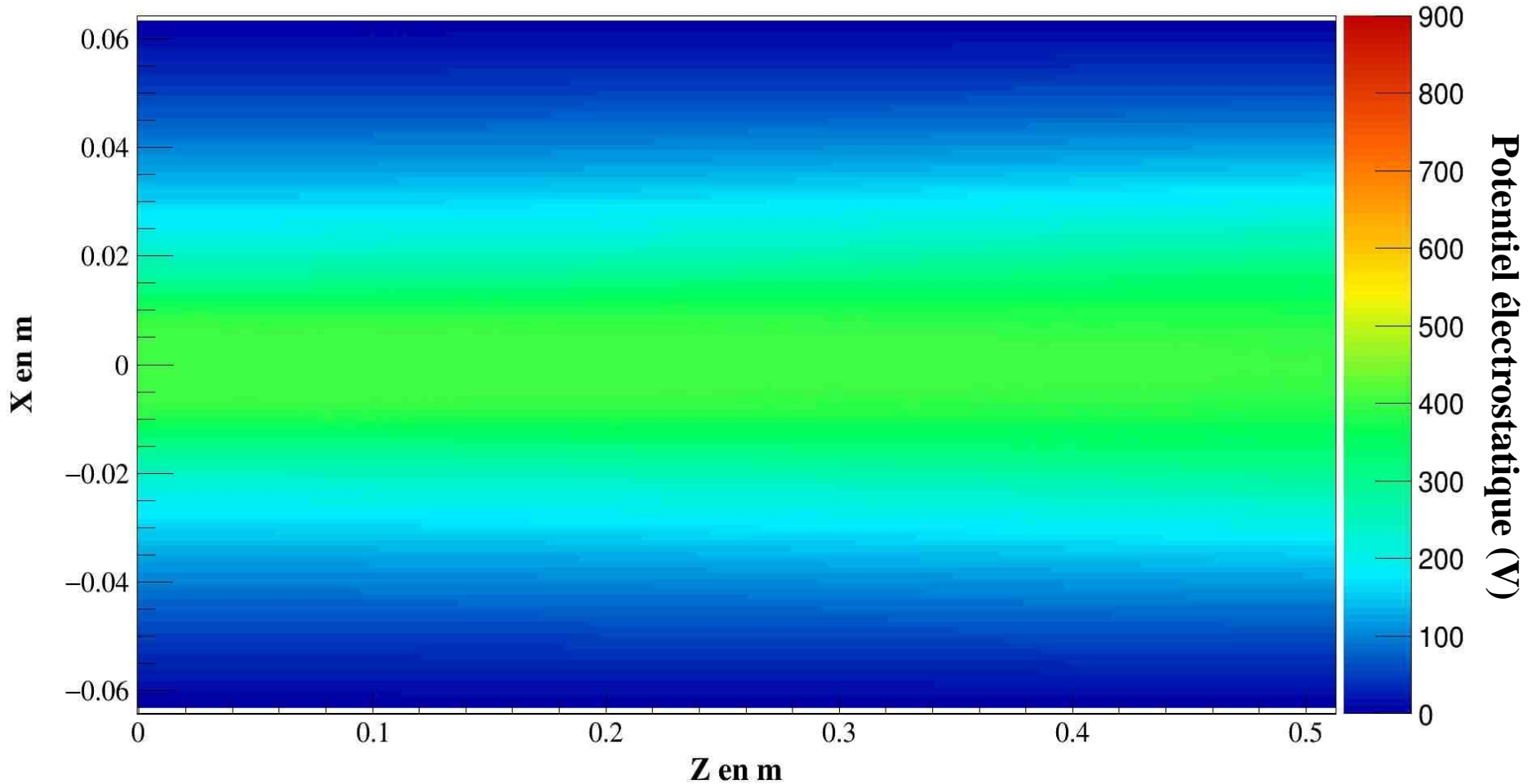
yz projection



Potentiel électrostatique dans le plan  $xOz$  au temps  $t = 1,0 \mu\text{s}$

# Etude du potentiel

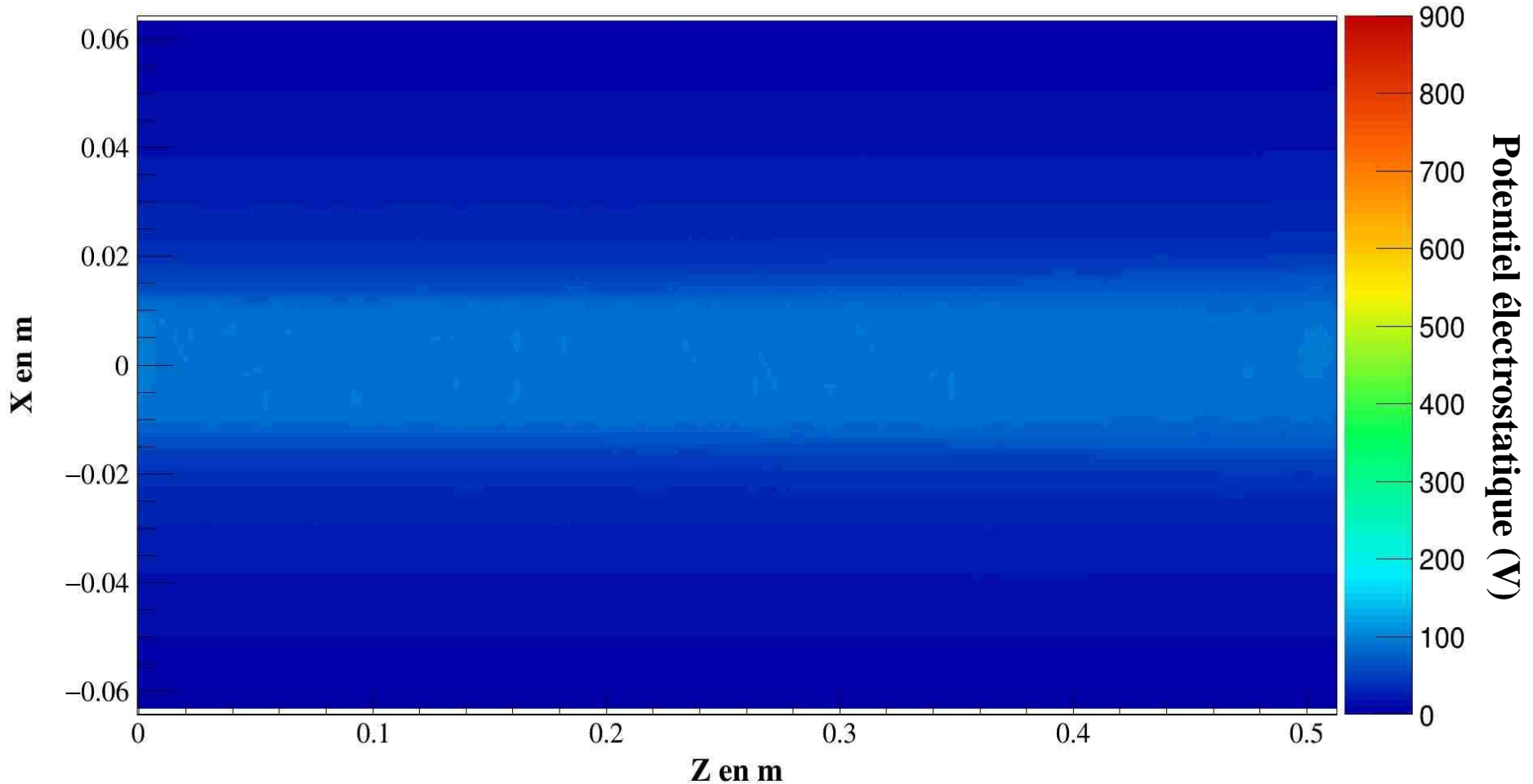
yz projection



Potentiel électrostatique dans le plan  $xOz$  au temps  $t = 2,5 \mu\text{s}$

# Etude du potentiel

yz projection

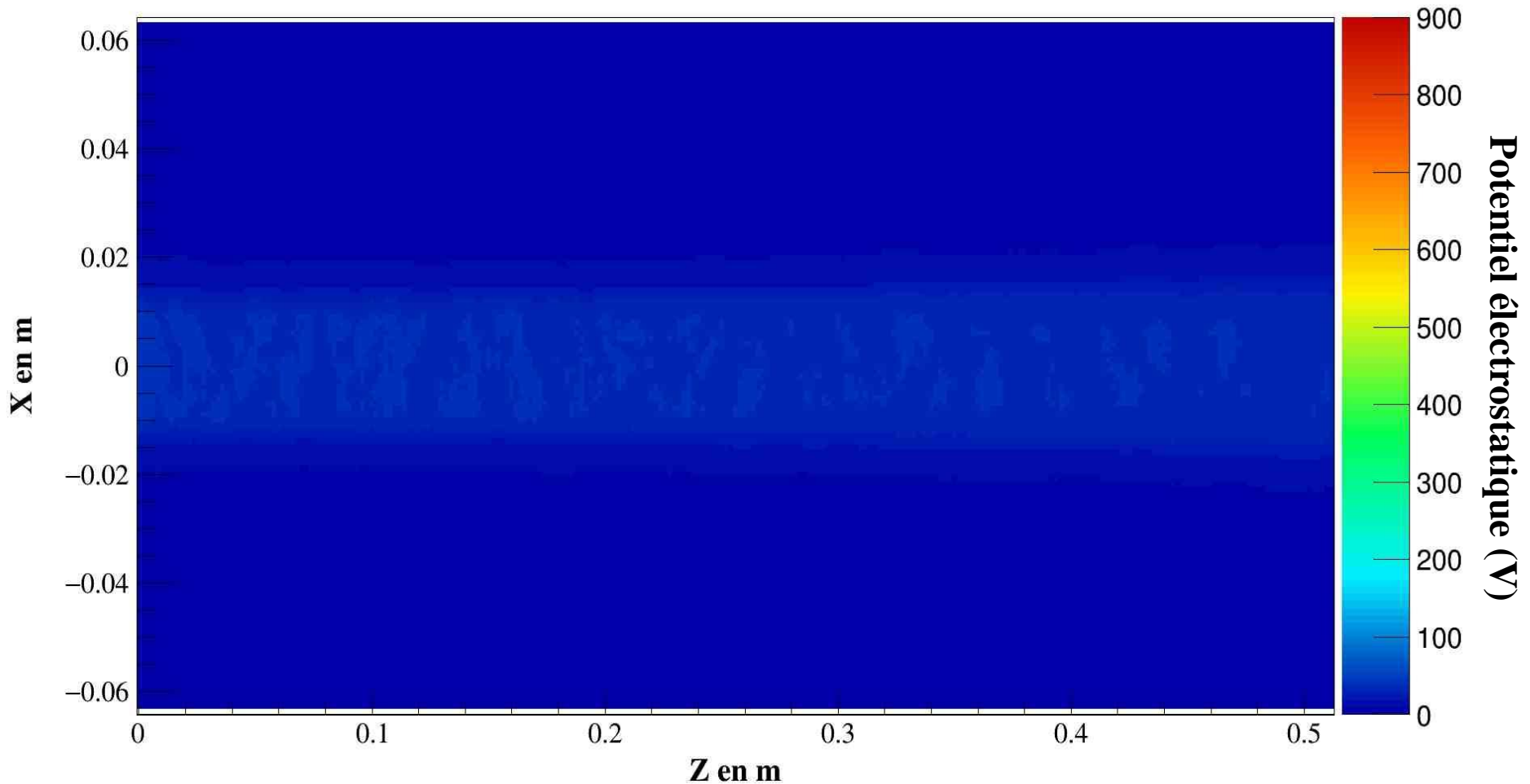


Potentiel électrostatique dans le plan  $xOz$  au temps  $t = 5,0 \mu\text{s}$



# Etude du potentiel

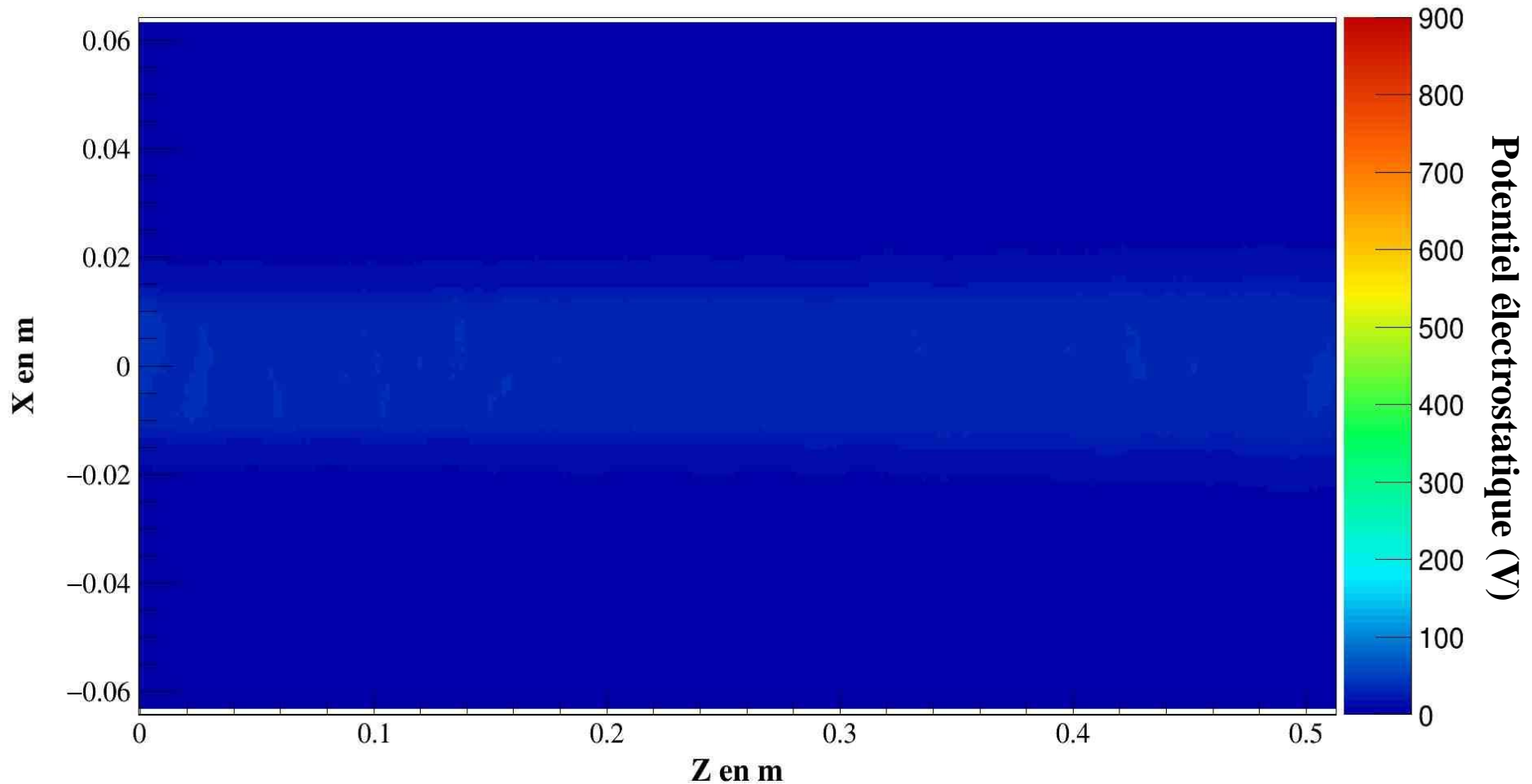
yz projection



Potentiel électrostatique dans le plan  $xOz$  au temps  $t = 7,5 \mu\text{s}$

# Etude du potentiel

yz projection



Potentiel électrostatique dans le plan  $xOz$  au temps  $t = 10,0 \mu\text{s}$



# Calcul du taux de compensation

# Calcul du taux de compensation

## Méthode

# Calcul du taux de compensation

## Méthode

On sauvegarde la distribution du faisceau à différents temps et on calcule le potentiel du faisceau en l'absence de compensation de charge d'espace.

→  $\Phi_0$

# Calcul du taux de compensation

## Méthode

On sauvegarde la distribution du faisceau à différents temps et on calcule le potentiel du faisceau en l'absence de compensation de charge d'espace.

→  $\Phi_0$

On sauvegarde le potentiel du faisceau compensé (plots précédents).

→  $\Phi_c$

# Calcul du taux de compensation

## Méthode

On sauvegarde la distribution du faisceau à différents temps et on calcule le potentiel du faisceau en l'absence de compensation de charge d'espace.

→  $\Phi_0$

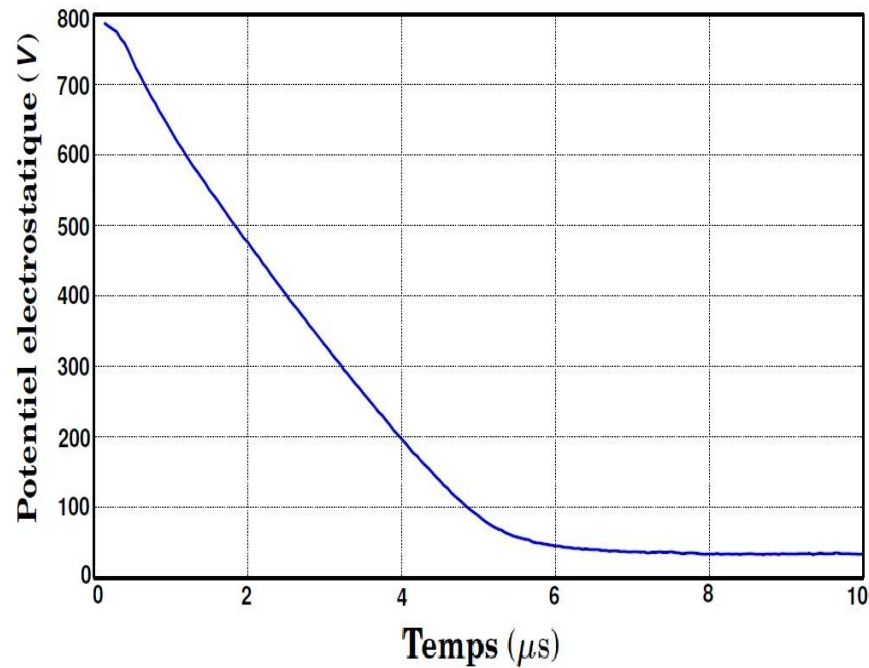
On sauvegarde le potentiel du faisceau compensé (plots précédents).

→  $\Phi_c$

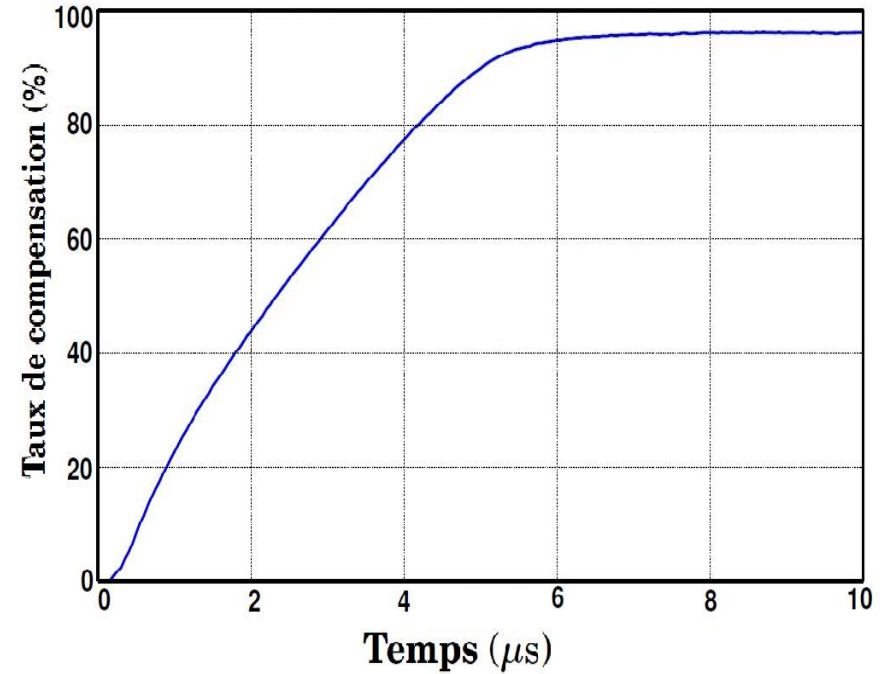
Le taux de compensation est donné par :

$$\eta = 1 - \frac{\Phi_c}{\Phi_0}$$

# Calcul du taux de compensation



Evolution temporelle du potentiel électrostatique sur l'axe du faisceau



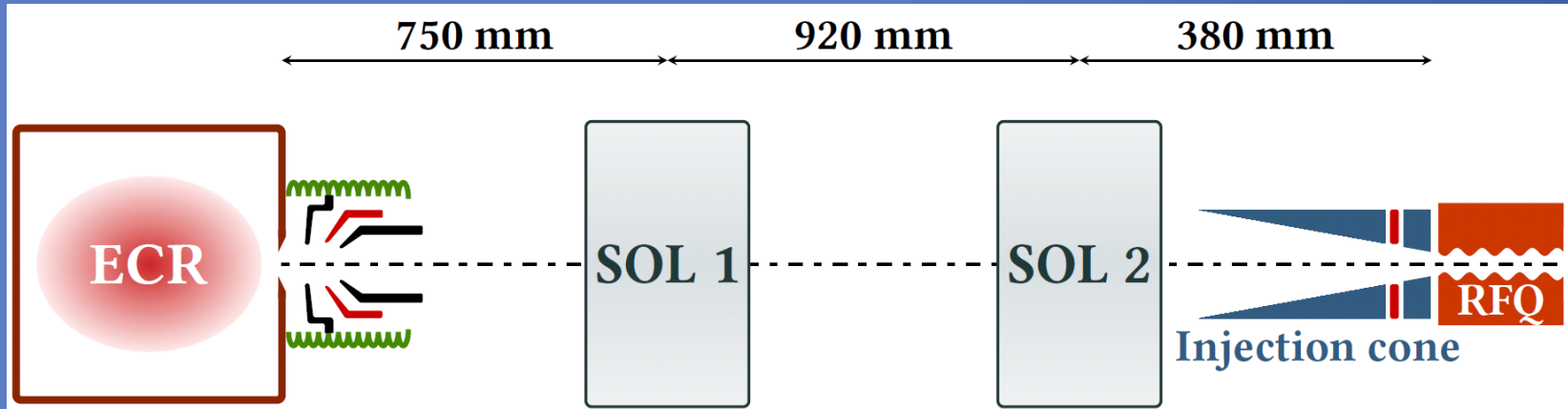
Evolution du degré de compensation de charge d'espace

# Simulation de la LBE d'IFMIF

# Simulation de la LBE d'IFMIF

Paramètres :

Géométrie de la LBE d'IFMIF :

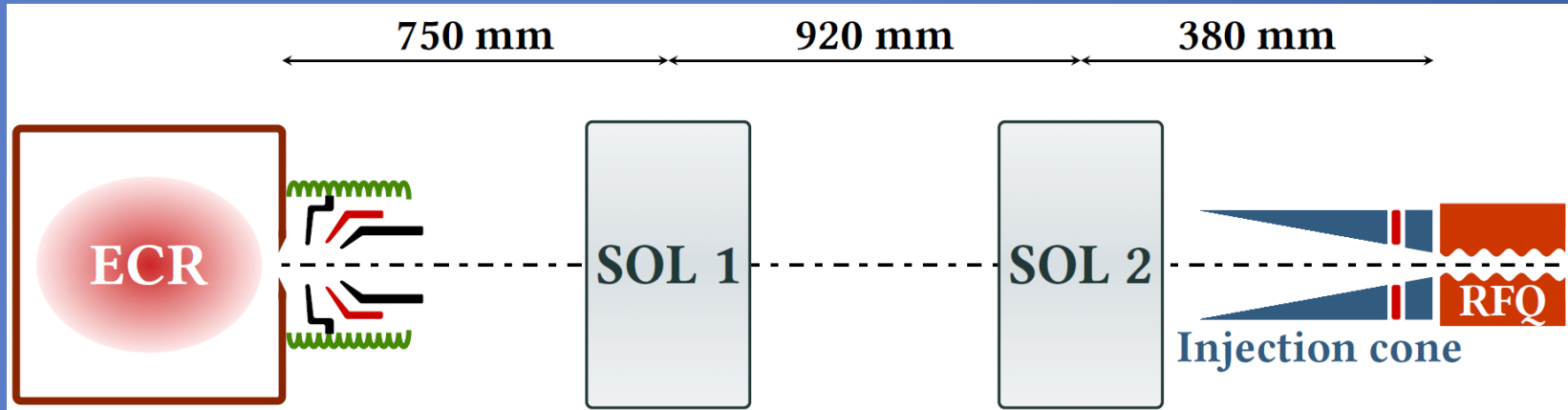




# Simulation de la LBE d'IFMIF

## Paramètres :

## Géométrie de la LBE d'IFMIF :



Carte de champ d'extraction

Carte de champ de solénoïdes

Faisceau typique produit au début du commissioning de l'injecteur à Rokkasho

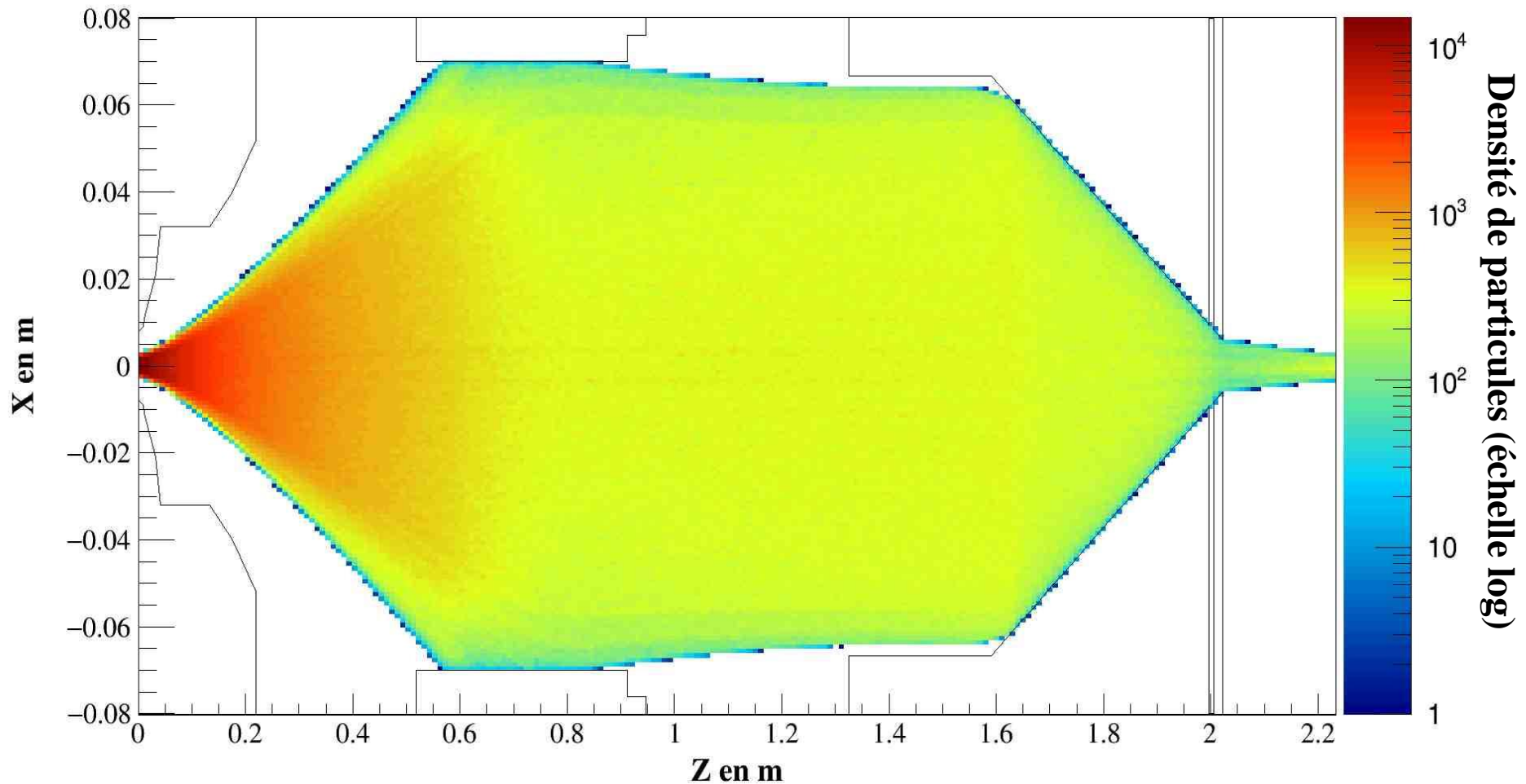
Faisceau de protons de 50 keV à 55 mA

$10^{-4}$  mbar uniforme

Réaction prise en compte :  $H^+ + H_2 \rightarrow H^+ + e^- + H_2^+$

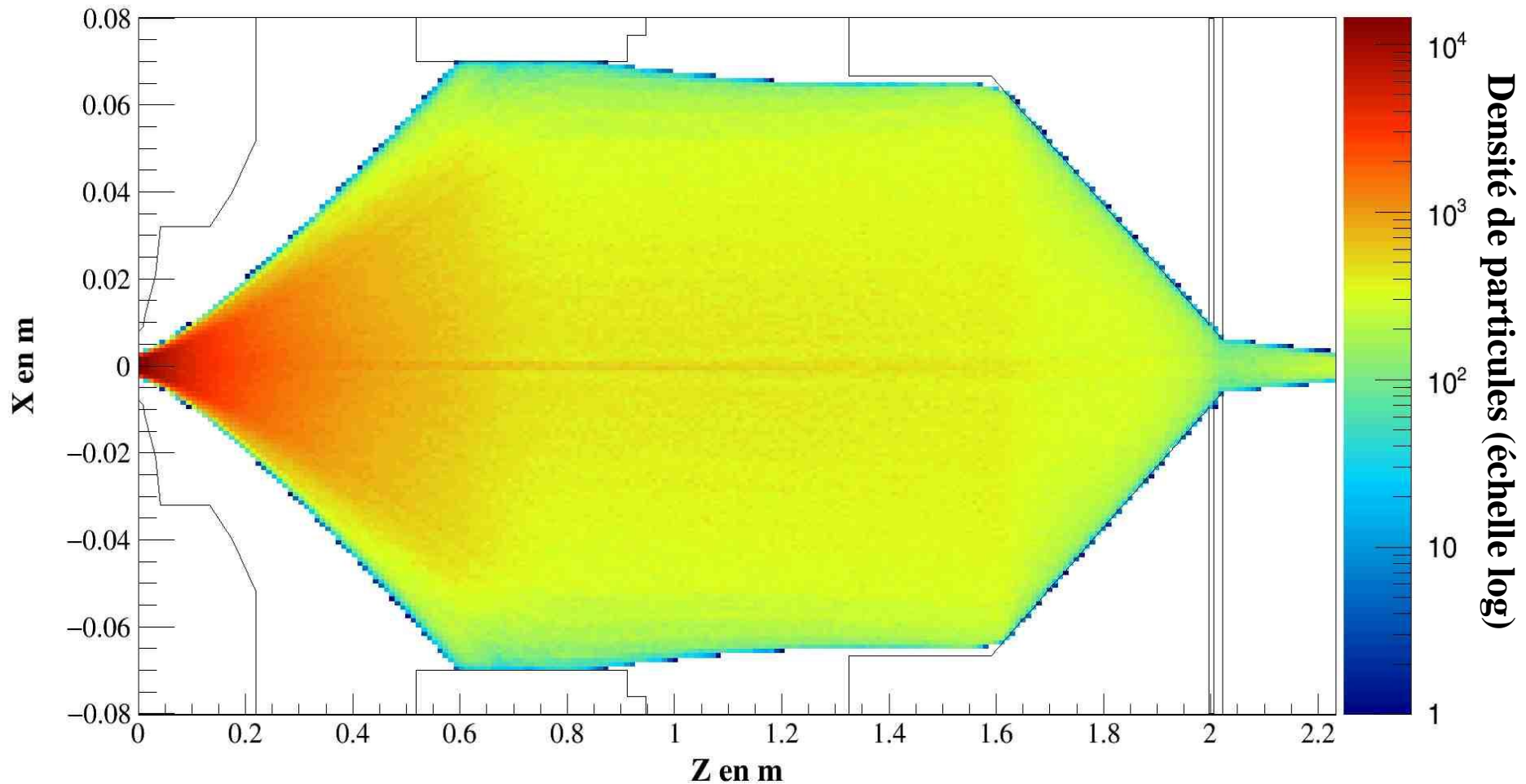
Temps de simulation : 10,0  $\mu$ s

# Simulation de la LBE d'IFMIF



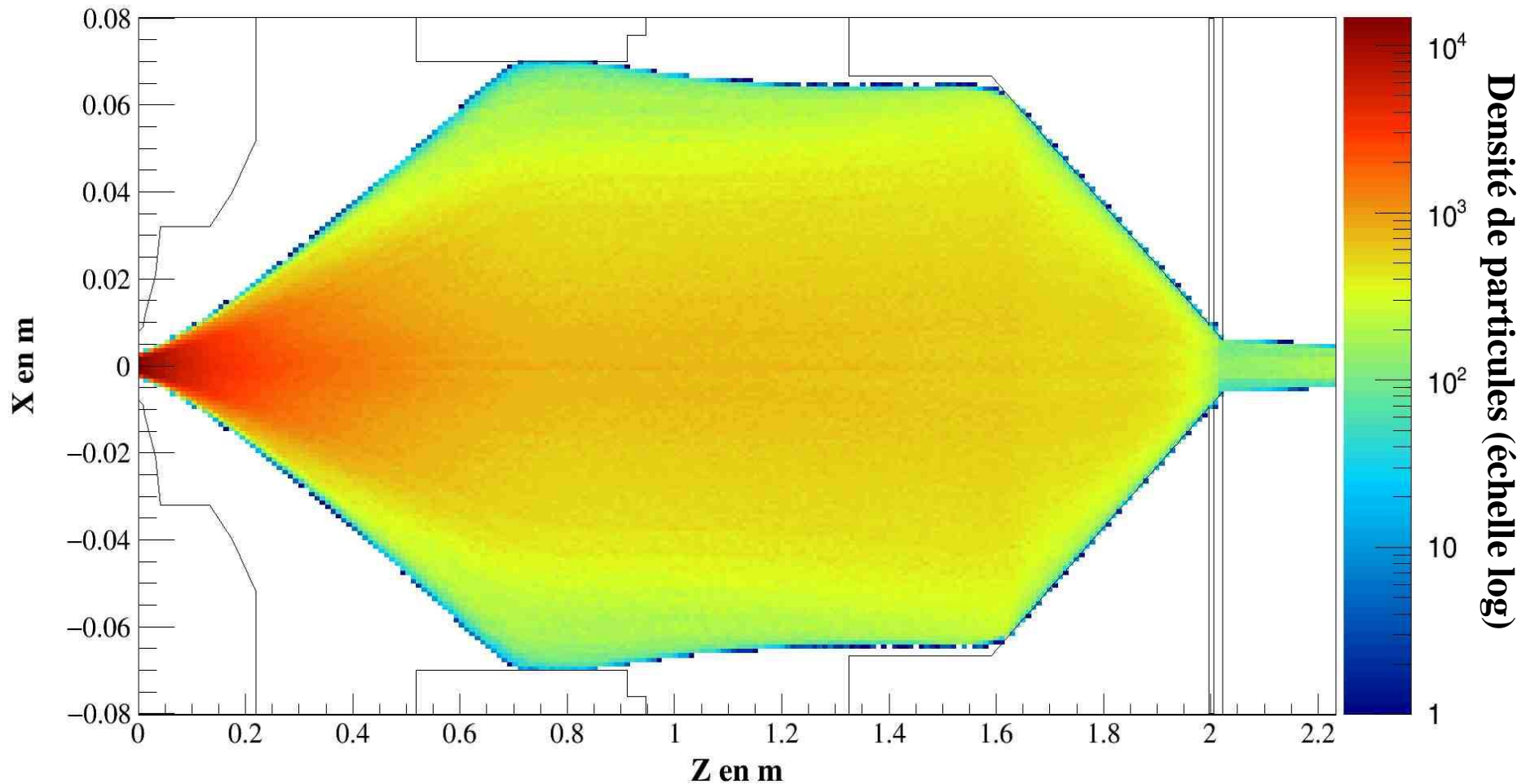
Faisceau de protons non compensé

# Simulation de la LBE d'IFMIF



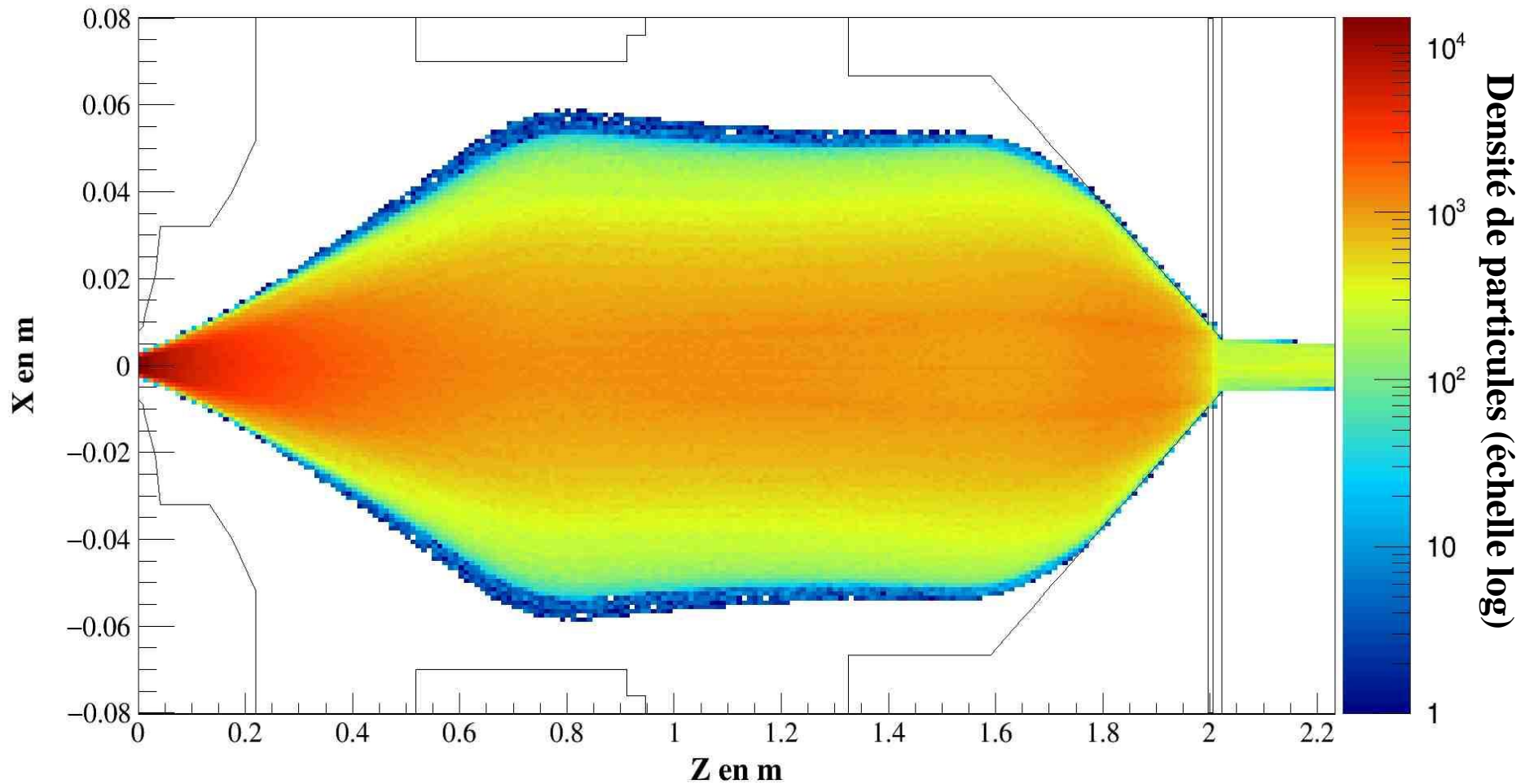
Faisceau de protons au temps  $t = 1,0 \mu\text{s}$

# Simulation de la LBE d'IFMIF



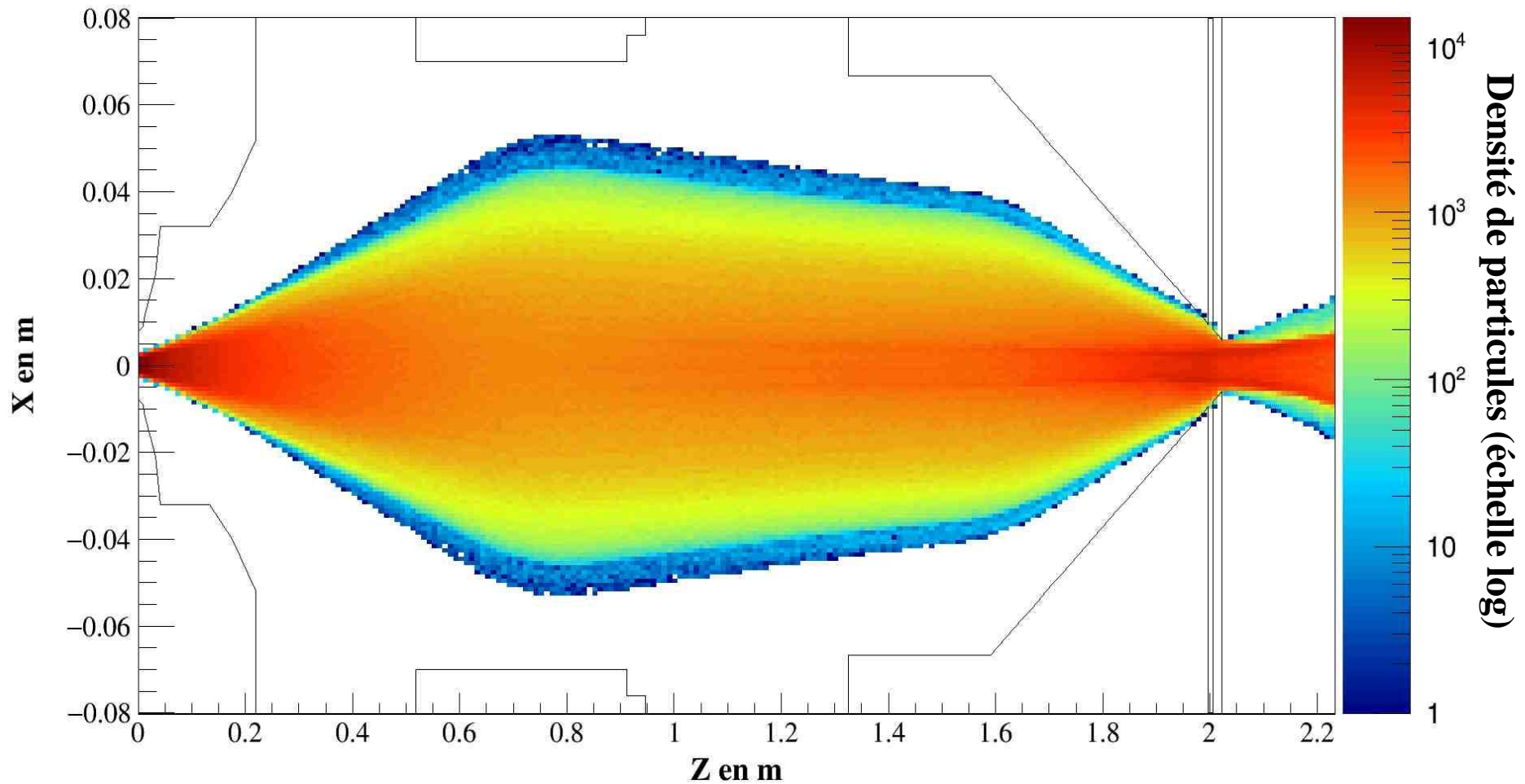
Faisceau de protons au temps  $t = 3,0 \mu\text{s}$

# Simulation de la LBE d'IFMIF



Faisceau de protons au temps  $t = 6,0 \mu\text{s}$

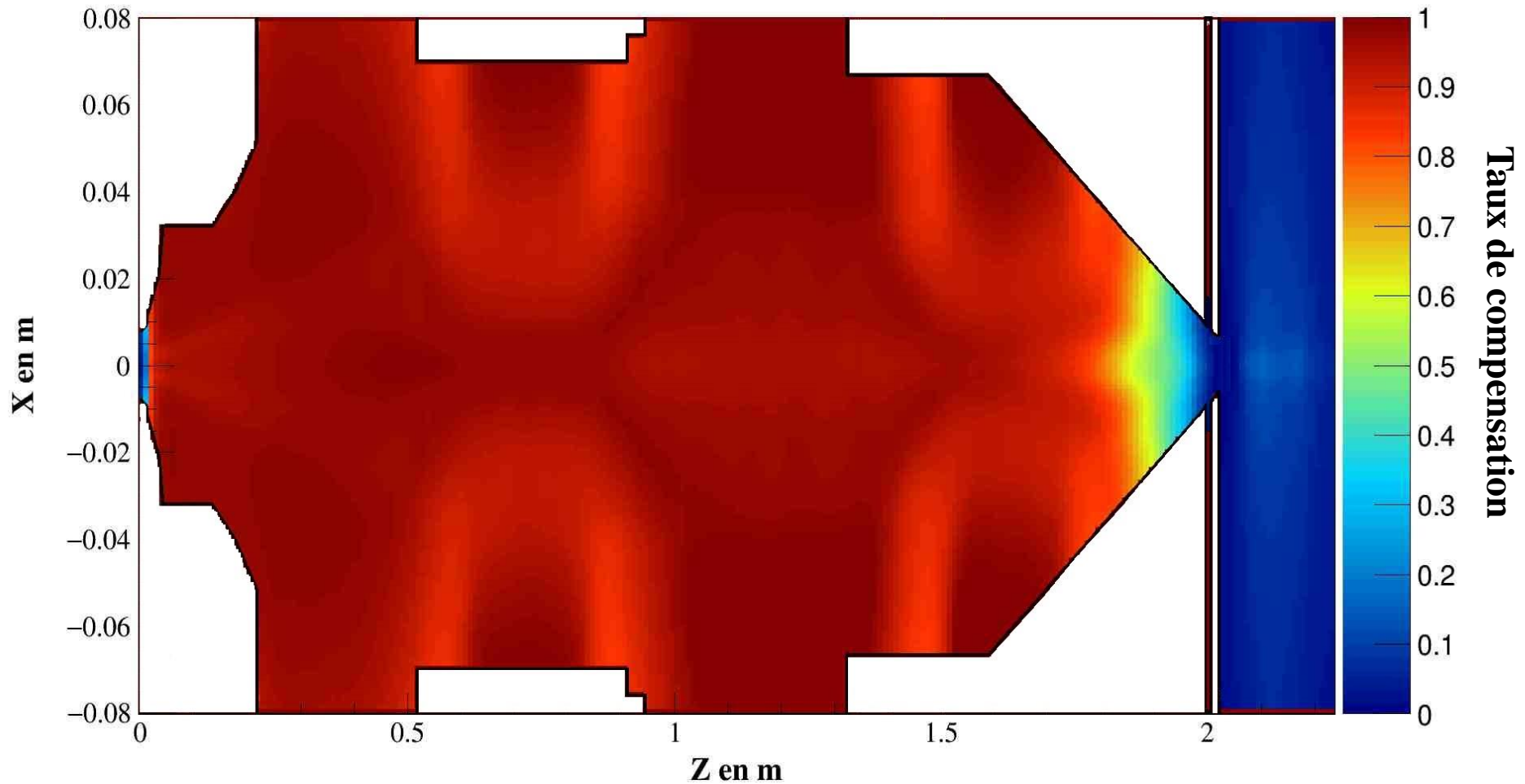
# Simulation de la LBE d'IFMIF



Faisceau de protons au temps  $t = 10,0 \mu\text{s}$



# Simulation de la LBE d'IFMIF



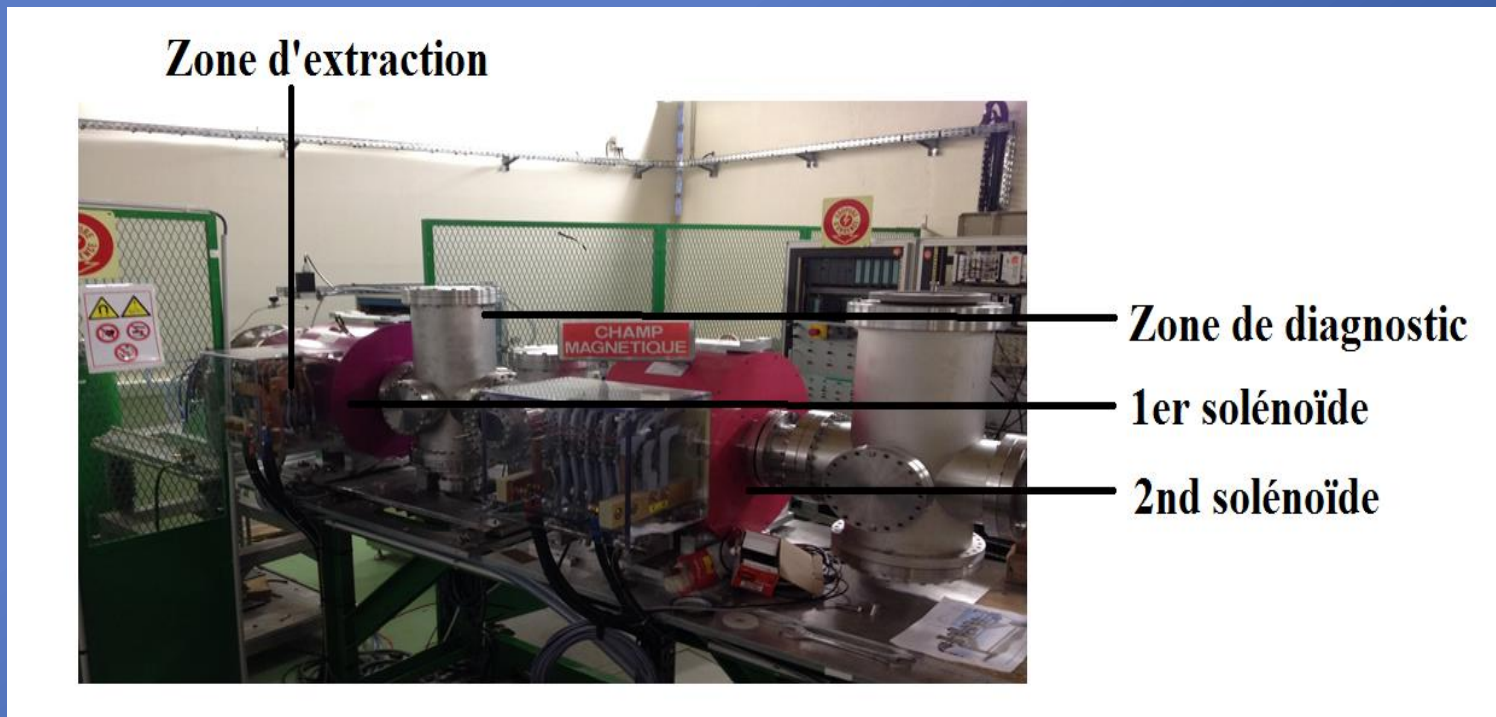
Carte de compensation en régime stationnaire

# Activités expérimentales



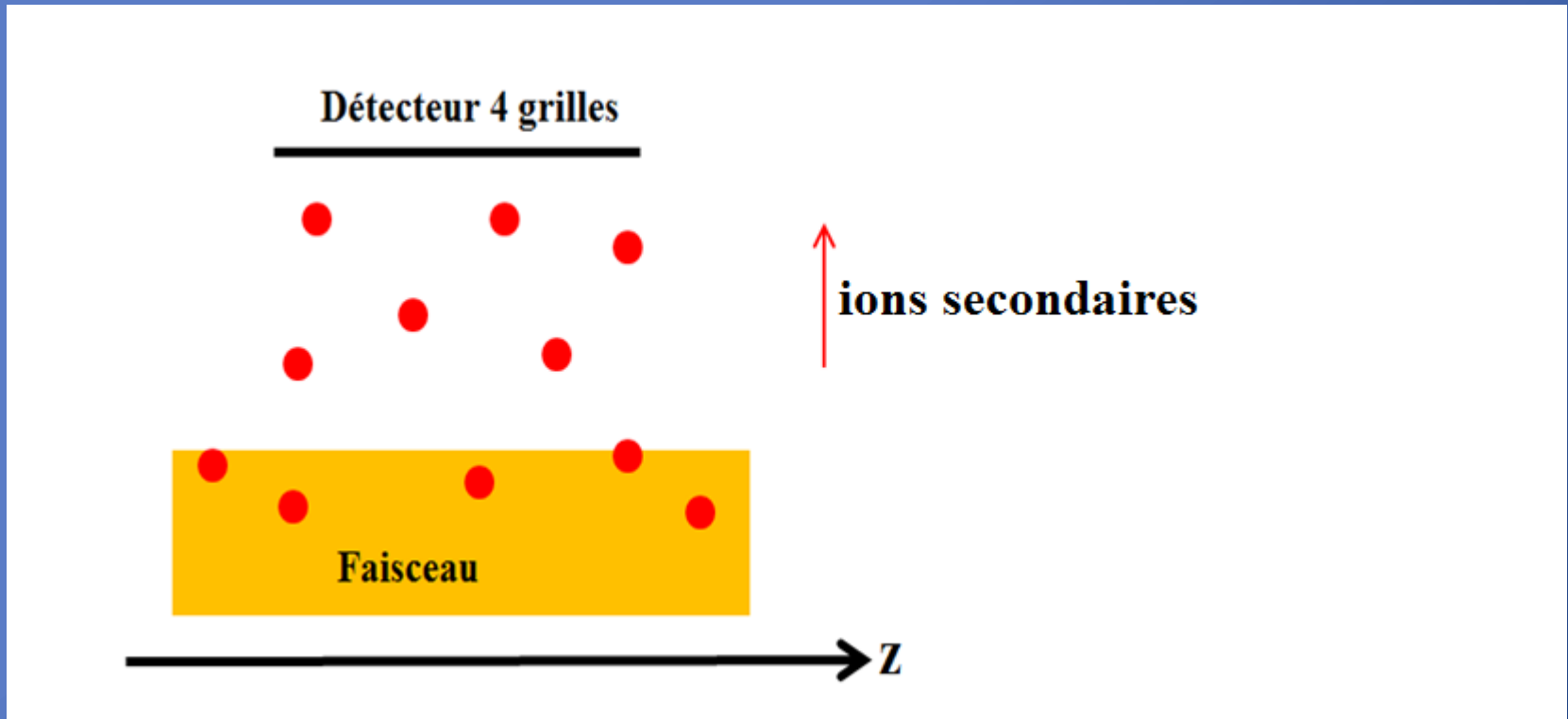
# Détecteur 4 grilles

- Utilisation d'un détecteur 4 grilles
- Expériences réalisées sur BETSI



**Banc de test BETSI**

# Détecteur 4 grilles



- Mesure l'énergie des ions secondaires afin d'évaluer le potentiel du faisceau

# Détecteur 4 grilles

# Détecteur 4 grilles

Aspect expérimental :

# Détecteur 4 grilles

## Aspect expérimental :

- Faisceau de protons de 40 keV à 30 mA

# Détecteur 4 grilles

## Aspect expérimental :

- Faisceau de protons de 40 keV à 30 mA
- Mesures 4 grilles effectuées pour différentes valeurs de solénoïdes

# Détecteur 4 grilles

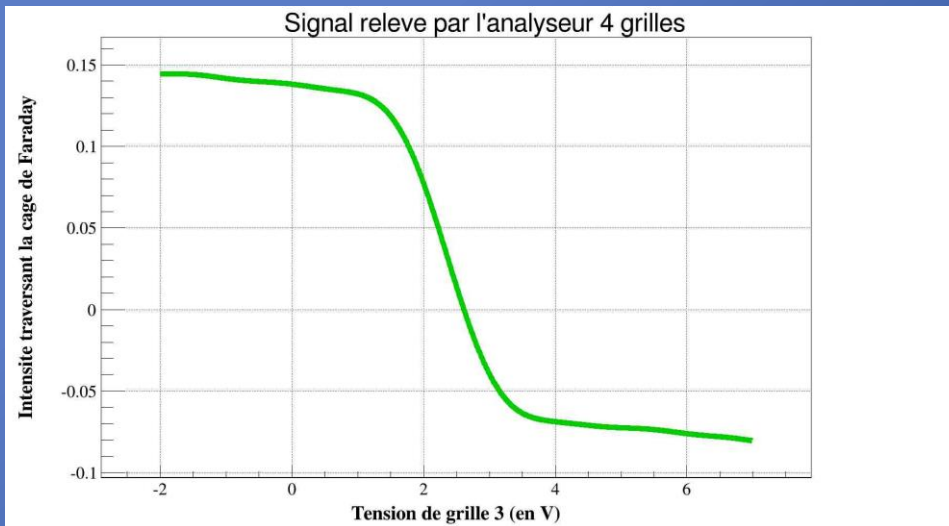
## Aspect expérimental :

- Faisceau de protons de 40 keV à 30 mA
- Mesures 4 grilles effectuées pour différentes valeurs de solénoïdes
- Enregistrement du profil du faisceau

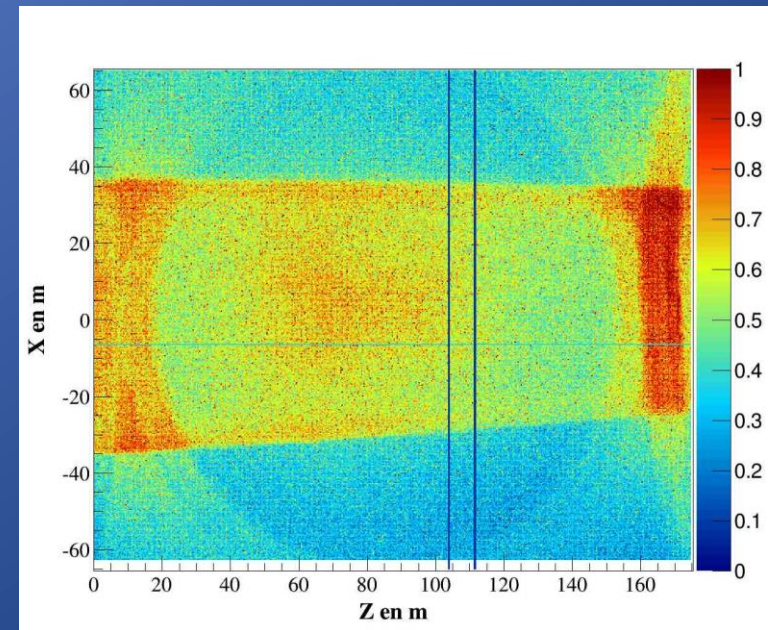
# Détecteur 4 grilles

## Aspect expérimental :

- Faisceau de protons de 40 keV à 30 mA
- Mesures 4 grilles effectuées pour différentes valeurs de solénoïdes
- Enregistrement du profil du faisceau



Signal relevé par la 4 grilles



Profil du faisceau



# Détecteur 4 grilles

# Détecteur 4 grilles

Simulation :

# Détecteur 4 grilles

## Simulation :

- Simulation d'un transport de faisceau dans des conditions similaires à celles de l'expérience.

# Détecteur 4 grilles

## Simulation :

- Simulation d'un transport de faisceau dans des conditions similaires à celles de l'expérience.
- Collection des ions éjectés du faisceau et de leur énergie

# Détecteur 4 grilles

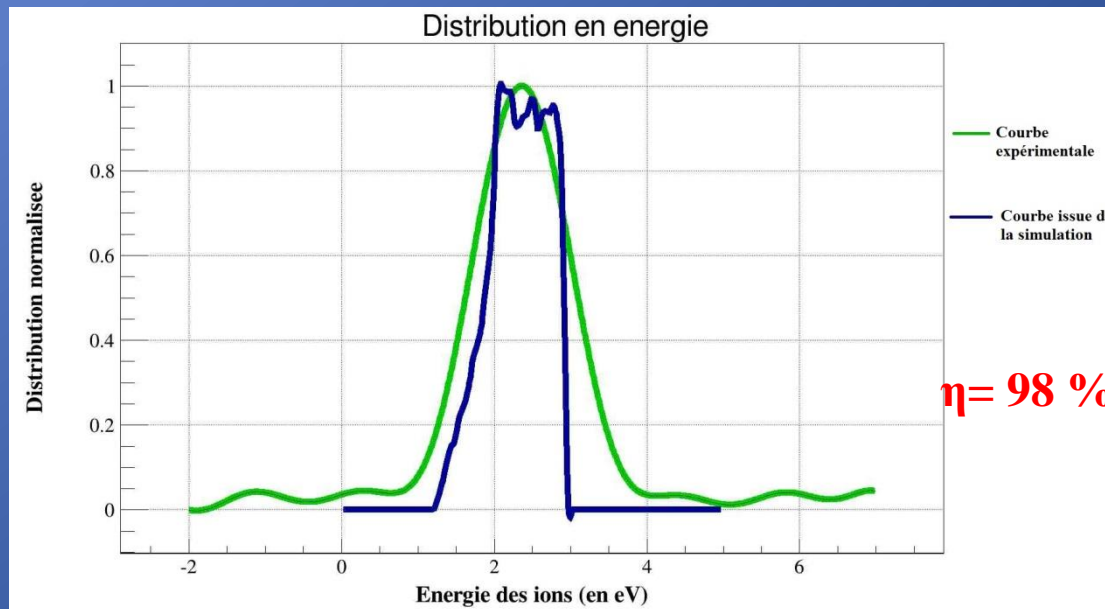
## Simulation :

- Simulation d'un transport de faisceau dans des conditions similaires à celles de l'expérience.
- Collection des ions éjectés du faisceau et de leur énergie
- Ajustement du taux de compensation pour obtenir une énergie des ions semblable à celle de l'expérience

# Détecteur 4 grilles

## Simulation :

- Simulation d'un transport de faisceau dans des conditions similaires à celles de l'expérience.
- Collection des ions éjectés du faisceau et de leur énergie
- Ajustement du taux de compensation pour obtenir une énergie des ions semblable à celle de l'expérience



# Conclusion et perspectives

# Conclusion & perspectives

Simulations préliminaires réalisées

Proposition d'une meilleure analyse de mesures 4 grilles

Réaliser une simulation avec le faisceau de deutons nominal de la LBE d'IFMIF

Simulation de la ligne Myrte (projet ADS)

Développement d'un nouveau type de détecteurs pour analyser l'énergie des particules secondaires

Prise en compte de plus de phénomènes physiques dans la simulation



**MERCI DE VOTRE ATTENTION**